Tampereen yliopisto

Kasperi Pirttikoski

RAKENNUSMATERIAALIEN VAIKUTUKSET SILLAN ILMASTOPÄÄSTÖJEN LASKENNASSA

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastajat: prof. Anssi Laaksonen
dos. Jukka Lahdensivu
Helmikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Kasperi Pirttikoski: Rakennusmateriaalien vaikutukset sillan ilmastopäästöjen laskennassa
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Helmikuu 2022

Ihmisen aiheuttama ilmastonmuutos tulee muuttamaan elinolosuhteita ympäri maapalloa. Nykyään puhutaankin ilmastonmuutoksen hillitsemisestä ja toisaalta siihen varautumisesta. Euroopan Unioni on asettanut tavoitteeksi hiilineutraaliuden vuoteen 2050 mennessä. Suomi on valtiona pyrkimässä hiilineutraaliuteen vuoteen 2035 mennessä. Myös muilla Pohjoismailla on vastaavia, EU:ta kunnianhimoisempia tavoitteita. Asetetut tavoitteet aiheuttavat tarpeen vähentää päästöjä kaikilla sektoreilla.

Tämä diplomityö pyrkii kokoamaan tilannekuvaa Pohjoismaisista käytännöistä siltojen päästölaskennassa sekä rakennusmateriaalien tyypillisistä päästöistä ja niiden vähennyspotentiaalista. Aluksi luvussa 2 esitetään siltojen päästölaskentaan liittyviä standardeja, käsitteistöä ja menetelmiä. Tarkoituksena on tarjota olennainen tieto selkeässä ja tiiviissä muodossa.

Siltojen osuudesta väyläinfrastruktuurin päästöistä ei ole Suomessa tehty selvityksiä. Diplomityössä tarkasteltujen neljän hankkeen pohjalta voidaan todeta, että tälläinen tarkastelu olisi mahdollista tuottaa joko takautuvasti määräluetteloiden pohjalta tai teettämällä elinkaariarvioinnit useammassa hankkeessa. Päästöjen ennakointia varten esitetään käytettäväksi parametreja siltatiheys ja siltojen pituuden osuus hankeosan kokonaispituudesta.

Pohjoismaissa rakennushankkeiden päästöarviointi perustuu CEN/TC 350:n eurooppalaisiin standardeihin. Standardit päivittyvät lähivuosina, joten muutoksiin laskenta- ja allokointiperiaatteissa on varauduttava. Päästöarvioinnissa yleensä käytettävä panospohjainen laskenta on pääpiirteissään helppoa: panoksia kerrotaan niiden päästötiheyksillä. Epävarmuuksia liittyy kuitenkin esimerkiksi tarkasteltaviin moduuleihin ja käytettäviin päästötiheyksiin.

Pohjoismaiset väyläviranomaiset tekevät paljon yhteistyötä päästölaskennan ja elinkaariarvioinnin tutkimuksessa. Maissa käytettävät tai käyttöönotettavat arviointimenetelmät ovat myös keskenään samankaltaisia. Menetelmät ovat panospohjaisia, mutta tarkasteluun sisällytettävät elinkaarimoduulit vaihtelevat maittain. Esimerkiksi Ruotsissa yli 50 miljoonan kruunun infrastruktuurihankkeille asetetaan päästöraja, jota ei saa ylittää. Rajan alittamisesta maksetaan portaittainen bonus.

Diplomityön pääsisältönä voidaan pitää lukua 4, jossa analysoidaan sillanrakennuksessa käytettävien materiaalien ilmastovaikutuksia käsittelevää hajanaista ja osin teollisuuden tuottamaa tutkimustietoa. Lisäksi tarkastellaan yleisellä tasolla rakentamisesta ja kuljetuksista aiheutuvia päästöjä, joista olisi syytä tehdä oma selvityksensä. Erikseen käsitellään tarkemmin päämateriaaleina betoni-, teräs- ja puurakenteiden kantavat materiaalit. Minkään materiaalin ei voida sanoa olevan muita vähäpäästöisempi, vaan vertailu tulee tehdä vastaavien rakenteiden välillä.

Työn tulosten pohjalta esitetään luvussa 5 suosituksia, miten sillanrakentamisen päästöjä voidaan vähentää. Myös diplomityössä tarpeellisiksi todettuja jatkotutkimusaiheita esitetään.

Avainsanat: sillanrakennus, LCA, elinkaari, hiilidioksidi, päästölaskenta, betoni, teräs, puu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Kasperi Pirttikoski: Effects of the construction materials on life-cycle assessment of a bridge
Master of Science Thesis
Tampere University
Civil Engineering
February 2022

Anthropogenic climate change will change living conditions worldwide. Nowadays it's usual to approach the problem on how to mitigate it and on how to adapt to it. The European Union has set a target to be carbon neutral by 2050. Finland is aiming to be carbon neutral as a state by 2035. Other Nordic countries have similar targets, that are more ambitious than EU targets. To achieve the targets, emissions cuts are needed in every industry.

This Thesis endeavours to report the state-of-the-art of Nordic practises on life-cycle assessment of bridges and materials utilised in their construction. Attention is paid also to the ways to cut the emissions of common materials. In chapter 2, the relevant standards, terms and methodologies are presented. These are intended to be presented in a clear and concice form.

No studies exist on the share of bridges in the emissions of transport infrastructure in Finland. In the thesis emissions calculations of four FTIA's construction projects were studied. Based on the study it is shown that it is possible to make this kind of examination either regrressively based on existing bills of quantities, or by including a life cycle assessment (LCA) on more future construction projects. To make a predictive model to estimate emissions in different projects, parameters bridge density and the share of the bridge lenghts in relation to the total length of the project are presented to be used.

The LCA of infrastrucure constructions in the Nordics is based on European standards developed by CEN/TC 350. The standards are to be updated in the coming years, so changes in the assessment and allocation principles are excepted. Common LCA methods are principally easy: quantities of inputs are multiplied by their specific emission factor. There are uncertainties, however, in the emissions modules and factors used in the assessments.

The Nordic transportation authorities cooperate on studying the emissions calculation and life cycle assessment. Assessment methods used or developed in the Nordic countries are rather similar compared to each other. The methodology is same, but the life cycle modules included vary. For example, in Sweden for projects over 50 million SEK a mandatory carbon budget is set. There's also a bonus model if the contractor lowers the emissions more than required.

Chapter 4, where climate effects of the common construction materials are analysed, can be seen as the main part of Thesis. The analysis is based mainly on peer evaluated articles, but also studies produced by the industries is used where appropriate. The climate effects of construction and transportation activities are also studied in general, and should be studied more in the future. Materials used in concrete, steel and timber superstructures are comprehensively studied from the perspective of their climate effects. In general, no material can be said to be eco-friendly, as the comparison should be made between equivalent structures.

In the chapter 5 ways to lower the emissions of bridge construction, as well as subjects for further research, are presented.

Keywords: bridge engineering, LCA, lifecycle, carbondioxide, emissions, concrete, steel, timber

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ramboll Finland Oy:ssa Väyläviraston Taitorakenneyksikön toimeksiannosta. Aiheeseen liittyen on Rambollilla työn alla myös Katariina Martikkalan YAMK-opinnäytetyö, joka osaltaan jatkaa tämän diplomityön pohjalta päästölaskennan hyödyntämistä eri siltatyyppien vertailuun. Näistä kahdesta työstä tullaan julkaisemaan Väyläviraston julkaisu vuoden 2022 aikana.

Työtä ovat ohjanneet professori, TkT Anssi Laaksonen Tampereen yliopistosta ja yksikönpäällikkö, DI Harri Koskinen Rambollista. Ohjausryhmään ovat kuuluneet lisäksi TkT Timo Tirkkonen, DI Mika Lemmetyinen, MSc Karoliina Saarniaho ja DI Markku Äijälä Väylävirastosta. Lisäksi mm. Mikko Peltomaa Väylävirastosta sekä sisäisen ohjausryhmän Taavi Dettenborn, Riina Känkänen, Jukka Lahdensivu ja Esko Rechardt Rambollista ovat kommentoineet ja muuten edistäneet diplomityötä vuoden mittaan. Työn ovat tarkastaneet Anssi Laaksonen ja Jukka Lahdensivu. Suuri kiitos kaikille mainituille ja muille työtä edistäneille panoksestanne.

Kiitos kaikille kavereille, ketkä olette olleet opintojen varrella mukana elämässäni. Joidenkin teidän nimi alkaa kirjaimella J, A, M, E, S tai L, joidenkin jollakin muulla. Hauska sattuma, että ensimmäisten käyttööni saamien James-farkkujen pesulappu sisälsi kaikki edellä mainitut kirjaimet. Kiitos myös vanhemmilleni Aulille ja Jyrkille (nousevassa aakkos- ja laskevassa ikäjärjestyksessä) ja muulle sisaruksilleni Matleenalle, TkT Saaralle ja Henrille.

Oli ilahduttavaa saada diplomityölleni aihe, joka sopii arvoihini kuin appelsiinimehu kiljuun; on ollut hienoa huomata, miten näinkin ”pehmeään” ilmiöön liittyen on saatu kehitettyä insinöörijärkeä totteleva lähestymistapa. Otetaan vakavasti, muttei vakavissaan.

Kaiken maailman sekopäille sitä diplomeita jaellaankin. Tutkinto 2/3.

Tampereella, 7. helmikuuta 2022

Kasperi Pirttikoski

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto 1
1.1 Taustaa 1
1.2 Työn tavoitteet ja sisältö 4
1.3 Tutkimusmenetelmä ja käytetty aineisto 5
1.4 Työn rajaus 5
2. Päästölaskennan käsitteistö ja menetelmät 7
2.1 Standardit 7
2.1.1 Kestävä rakentaminen 7
2.1.2 Taitorakenteiden informaatiomoduulit 8
2.1.3 Rakennustuotteiden informaatiomoduulit 9
2.1.4 Elinkaariarvioinnin käsitteistö 11
2.1.5 Ympäristöselosteet 14
2.1.6 Elinkaariarvioinnissa käytettävä tieto 15
2.2 Laskentamenetelmät 16
2.3 Hiilen kulku rakentamisessa 19
2.4 Päästöt hankinnoissa 21
3. Väyläinfrastruktuurin ilmastopäästöt ja -tavoitteet 22
3.1 Ilmastotavoitteet Pohjoismaissa 22
3.1.1 Euroopan unioni 22
3.1.2 Suomi 23
3.1.3 Ruotsi 26
3.1.4 Tanska 28
3.1.5 Norja 29
3.2 Pohjoismainen yhteistyö 30
3.3 Siltojen osuus väylien päästöistä 31
3.4 Yhteenveto 37
4. Sillanrakennuksessa käytettävien materiaalien ilmastovaikutukset 40
4.1 Kestävä sillanrakennus 40
4.1.1 Suomen sillasto 40
4.1.2 Kuljetus- ja asennuskalusto 42
4.2 Betoni 44
4.2.1 Betonin valmistus 44
4.2.2 Raudoitteiden valmistus 70
4.2.3 Betonirakentaminen 72

4.2.4 Käyttöiän aikaiset vaikutukset 75
4.2.5 Loppukäyttö 75
4.2.6 Tulevaisuus 76
4.3 Teräs 84
4.3.1 Teräksen valmistus 84
4.3.2 Konepajavalmistus 86
4.3.3 Teräsrakenteen asentaminen 87
4.3.4 Käyttöiän aikaiset vaikutukset 88
4.3.5 Loppukäyttö 88
4.3.6 Tulevaisuus 89
4.4 Puu 92
4.4.1 Puutuotteiden valmistus 92
4.4.2 Puurakentaminen 94
4.4.3 Käyttöiän aikaiset vaikutukset 95
4.4.4 Loppukäyttö 96
4.4.5 Tulevaisuus 96
4.5 Yhteenveto 98
4.5.1 Betonin päästöt 98
4.5.2 Teräksen päästöt 101
4.5.3 Puun päästöt. 102
4.6 Materiaalien päästöistä ja niiden vertailusta 104
5. Johtopäätökset 110
5.1 Siltojen osuus väylähankkeiden päästöistä. 110
5.2 Elinkaariarvioinnin nykytila Pohjoismaissa 110
5.3 Sillanrakennusmateriaalien päästöjen huomiointi hankkeissa 112
5.4 Jatkotoimenpide-ehdotukset 114
Lähteet 115
Liite A: Tarkasteltujen hankkeiden siltojen tietoja 134
Liite B: Taitorakennerekisteristä haetut siltojen määrät 136
Liite C: Infrabetonien mukaisten seosaineosuuksien vaikutus sideaineen valmistus-
päästöihin 140

MÄÄRITELMÄT

A1...A3	tuotteen valmistamiseen "tehtaan portille" asti kuuluvat informaatiomoduulit
A4...A5	rakenteen rakentamiseen ja siihen liittyviin kuljetuksiin liittyvät informaatiomoduulit
B-moduulit	rakenteen käyttövaiheen käsittävät informaatiomoduulit, esimerkiksi ylläpito-, huolto- ja korjaustoimenpiteet
BF	puhalluskuilu-uuni, masuuni (Blast Furnace)
BOF	emäshappimellotus (Basic Oxygen Furnace)
C-moduulit	rakenteen käyttöiän loppupään käsittävät informaatiomoduulit, esimerkiksi rakenteen purkaminen ja puretun materiaalin kuljetukset ja prosessointi
CCSU	hiilidioksidin talteenotto, käyttö ja varastointi (Carbon Capture, Storage and Utilisation)
CEN/TC 250	eurooppalainen kantavien rakenteiden standardoinnista vastaava tekninen komitea
CEN/TC 350	eurooppalainen kestävän rakentamisen standardoinnista vastaava tekninen komitea
D-moduulit	rakenteen järjestelmärajojen ulkopuolisiin hyötyvaikutuksiin liittyvää lisätietoa
EaF	valokaariuuni (Electric Arc Furnace)
EoL	tuotteen elinkaaren loppuvaihe (End of Life)
EPD	(rakennus)tuotteen tai palvelun ympäristöseloste (Environmental Product Declaration)
GWP	tuotteen ilmastopäästöjen määrä hiilidioksidiekvivalentteina (Global Warming Potential)
ilmastoneutraali	hiilijalanjälki on pienempi tai yhtä suuri kuin hiilikädenjälki. Käsite ei ole täysin objektiivinen, eroja on esimerkiksi siinä, otetaanko huomioon muussa toiminnossa tehtävät päästökompensaatiot kädenjälkenä.
IMF	induktiosulatusuuni (Induction Melting Furnace)

investointipäästöt	päästöt, jotka syntyvät rakenteen rakentamisen aikana. Käytännössä siis materiaalien valmistuspäästöt moduuleissa A1...A3 ja työmaan aikaisen kuljettamisen ja työmaatoiminnan päästöt A4...A5. Katso myös ylläpitopäästöt.
IPCC	hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
klinkkeri	portlandklinkkeri, kalkkikivestä kalsinoitumisen johdosta polttouunissa syntyvää kalsiumkarbonaattipitoista, hydraulisesti aktivoituvaa hienoa jauhetta, jota käytetään nykyaikaisen betonin sideaineena
LIPASTO	VTT:n kehittämä työkalu eri liikennevälineiden päästöjen arviointiin
NA	luonnonkiviaines (Natural Aggregate)
NAC	luonnonkiviaineksesta valmistettu betoni (Natural Aggregate Concrete)
Pohjoismaat	tässä työssä Suomi, Norja, Ruotsi ja Tanska. Maantieteellisenä alueena Pohjoismaihin luetaan myös Islanti sekä Tanskan ja Norjan itsehallintoalueet.
RA	uusiokiviaines (Recycled Aggregate)
RAC	uusiokiviaineksesta valmistettu betoni (Recycled Aggregate Concrete)
RSL	referenssikäyttöikä (Reference Service Life), jonka avulla voidaan määritellä tuotteiden vertailtavuus
seosaine	betonin osa-aine, joka osallistuu sen sementtikiven muodostumiseen
SILKO	siltojen korjausohjeet. Väyläviraston Taitorakenneyksikkö hallinnoi ja organisoi ohjetöiden laatimista SILKO-toimikunnan kanssa.
skenaario	tiedot ja oletukset, joilla kuvataan odotettavissa olevaa tulevaisuuden tapahtumaketjua (SFS-EN 15804 2019). Esimerkiksi lainsäädännön, energiantuotannon ja päästöjen kehittyminen.
toimintaympäristö	esimerkiksi rakenteessa olevaan materiaaliin kohdistuvat, olosuhteista ja liikenteestä aiheutuvat rasitukset
ylläpitopäästöt	päästöt, jotka syntyvät rakenteen ylläpidosta ja korjauksista. Käytännössä siis moduulin B päästöt lukuun ottamatta rakenteen käytöstä aiheutuvia päästöjä.

1. JOHDANTO

1.1 Taustaa

Ihmisen aiheuttama osuus ilmastonmuutoksesta on jo pitkään ollut tiedeyhteisön tunnustama tosiasia. Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneeli IPCC:n lokakuussa 2018 julkaisemassa Global Warming of 1.5 °C -erikoisraportissa tuotiin julki, minkälaiset vaikutukset 1,5 °C ja 2 °C ilmaston keskilämpötilan nousulla verrattuna esiteolliseen aikaan olisi eri puolilla maapalloa. Tällaisia vaikutuksia ovat esimerkiksi eliölajien häviäminen sekä sään ääri-ilmiöiden yleistyminen. Mitä suuremmaksi keskilämpötila nousee, sitä suurempia vaikutukset ovat. (Hoegh-Guldberg et al. 2018)

Erikoisraportti on osa IPCC:n kuudetta arviointiraporttia. Arviointiraportti koostuu neljästä erikois- ja menetelmäraportista, kolmesta osaraportista ja yhteenvetoraportista, jotka on julkaistu tai tarkoitus julkaista vuosina 2018-2022. Ensimmäinen osaraportti julkaistiin vuonna 2021, ja se käsittelee ilmastonmuutoksen luonnontieteellistä taustaa. Vuonna 2022 julkaistava toinen osaraportti käsittelee ilmastonmuutoksen vaikutuksia ja niihin sopeutumista. Kolmas osaraportti käsittelee ilmastonmuutoksen hillitsemistä. (IPCC 2021)

Vuoden 2015 Pariisin ilmastosopimuksessa monet valtiot olivat sitoutuneet pitämään lämpötilan nousun reilusti alle 2 °C verrattuna esiteolliseen aikaan. Vuosina 2018-2021 useat valtiot ja kansainväliset toimijat ovat ilmoittaneet merkittävistä kasvihuonepäästöjen vähennyksistä muutaman vuosikymmenen sisään. Esimerkiksi Hollannissa ja Saksassa kansalaiset ja järjestöt ovat haastaneet valtioita ja suuryrityksiä oikeuteen ilmastolakien ja -tavoitteiden vastaisista toimista (Juhola 2021; Turtiainen 2021; Vainio 2021). Osa oikeustoimista on jo muuttanut maiden käytännön tavoitteita.

Yleisesti puhutaan erityisesti hiilidioksidin vaikutuksista, vaikka myös monet muut yhdisteet vauhdittavat kasvihuoneilmiötä merkittävästi. Usein eri kasvihuonekaasut muunnetaankin vastaavaksi hiilidioksidimääräksi, jolloin puhutaan hiilidioksidiekvivalenteista päästöistä (CO_2e-kg, CO_2e-tn) tai kasvihuonekaasupäästöistä (khk, ghg). (Arias et al. 2021) Nykyisin EN-standardeissa käytetään termiä ilmastonlämmityspotentiaali GWP (SFS-EN 15978 2012).

Euroopan Unioni on asettanut tavoitteeksi hiilineutraaliuden vuoteen 2050 mennessä (Euroopan parlamentti 2021). Suomi on valtiona pyrkimässä hiilineutraaliuteen vuoteen 2035

mennessä (Ympäristöministeriö 2021b). Myös muilla Pohjoismailla on vastaavia, EU:ta kunnianhimoisempia tavoitteita (Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet 2020; Trafikverket 2021b). Suomen tavoite asettaa haasteita kaikille sektoreille riippumatta siitä, mikä sektori aiheuttaa eniten päästöjä.

Suomessa rakennusalan kasvihuonekaasupäästöt ovat noin 35 % koko maan päästöistä ja vastaavaasti 40 % energiankulutuksesta. (Tuominen et al. 2020) Liikenneviraston selvityksen (2012) mukaan liikenneverkon vuosittaisista 11 773 CO_2e-kt päästöistä infrastruktuurin osuus on 803 CO_2e-kt eli 6,8 prosenttia. Siltojen osuutta liikenneverkkojen päästöistä ei ole erikseen arvioitu. Kivikon eritasoliittymän (Aulakoski et al. 2014) ja Pisararadan (Herva et al. 2015) päästöselvityksissä rakentamisvaiheen päästöjä arvioitiin suhteessa investointihintaan. Kivikon eritasoliittymään rakennettiin seitsemän siltaa, joista aiheutui rakentamisvaiheessa päästöjä noin 2,9 CO_2e-kt, mikä vastasi noin neljännestä hankkeen investointipäästöistä.

Rakennusteollisuus ry:n teettämän selvityksen (2020) mukaan rakennetun ympäristön vuosittainen hiilijalanjälki on 17 092 CO_2e-kt, josta materiaalien ja työmaatoimintojen osuus on 4 085 CO_2e-kt. Liikenneverkkojen rakentamisen materiaalipäästöjen osuudeksi on arvioitu 434 CO_2e-kt eli 2,5 prosenttia. Päästöistä valtaosa, 356 CO_2e-kt, aiheutuu betonista. Kun huomioon otetaan kuljetus- ja työmaatoimintojen selvityksessä arvioidut päästöt, on liikenneverkkojen osuus rakennetun ympäristön päästöistä 1035 CO_2e-kt eli 6,1 prosenttia. Selvityksen materiaalimäärät ovat teollisuuden arvioita. (Laine et al. 2020)

Monet yksityiset toimijat ovat sitoutuneet World Green Building Councilin tavoitteeseen saada asumisen päästöt hiilineutraaleiksi 2030-luvulla. Järjestön sitoumuksessa ei tällä hetkellä oteta huomioon rakentamisen päästöjä, mitä perustellaan muun muassa laskennan epäselvyydellä ja liiallisella nojautumisella päästökompensaatioihin. (WorldGBC 2021) Suomen kaupungeista esimerkiksi Helsinki pyrkii olemaan hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä.

Kestävässä rakentamisessa otetaan huomioon perinteisten teknisten, toiminnallisten ja taloudellisten vaatimusten lisäksi ympäristö- ja sosiaaliset vaikutukset. Huomioon otettaviin ympäristövaikutuksiin luetaan kasvihuonekaasujen lisäksi esimerkiksi materaalivarantojen hupeneminen ja ympäristön saastuminen. (SFS-EN 15643 2021) Tästä seuraa, että esimerkiksi ilmaston kannalta vähäpäästöinen materiaali ei välttämättä pärjää vertailussa muilla indikaattoreilla, esimerkiksi uusiutumattomien luonnonvarojen ehtymisen osalta.

Ruuskan (2018) mukaan tavanomaisessa asuinrakentamisessa materiaalien osuus elinkaaren aikaisista kasvihuonekaasupäästöistä on 24...37 % loppujen aiheutuessa käytönaikaisesta toiminnasta, pääasiassa energiankulutuksesta. ETSI III -hankkeessa (Salokangas 2013) materiaalien osuus siltojen kasvihuonekaasupäästöistä oli 55...84 %, kun sillalla kulkevan liikenteen päästöjä ei oteta huomioon. Yleisesti tapana on ottaa huo-

mioon talonrakentamisen päästöissä energiankäyttö, sillä siihen voidaan vaikuttaa rakenneratkaisuilla. Liikenteen osalta taas ajoneuvojen päästöt on tapana erottaa infrastruktuurin rakentamisen ja ylläpidon päästöistä, vaikka esimerkiksi ETSI-hankkeessa kehitettiin menetelmä, jolla ylläpidosta aiheutuvan kiertoliikenteen päästöt voidaan ottaa huomioon osana rakenteiden elinkaariarviointia.

Jotta kasvihuonekaasupäästöjä voidaan pienentää, täytyy niiden suuruuteen päästä käsiksi jo suunnitteluvaiheessa. Erilaisia elinkaaren aikaisia vaikutuksia huomioon ottavia LCA-menetelmiä on kehitetty ja niiden tekemiseen on julkaistu myös eurooppalainen standardisarja. Kestävän rakentamisen yhteiseurooppalaiset standardit laatii eurooppalaisen standardointijärjestö CEN:n tekninen komitea *TC 350 Sustainability of construction works* (SFS-EN 15643 2021). Yhteneväisesti saman standardin mukaisesti tehdyillä LCA-laskelmilla voidaan keskenään vaihtoehtoisia ratkaisuja vertailla teknisten ja taloudellisten mittarien lisäksi myös ilmastonmuutoksen kannalta. Vertailu voidaan standardeja noudattavien menetelmien ja kansallisten valintojen mukaisesti tehtyjen LCA-raporttien pohjalta tehdä tasapuolisesti myös julkisissa hankinnoissa.

Rakennusalalla, jossa määrätietoa luodaan jokaisessa projektissa, ja niiden laatu etenkin rakennussuunnitteluvaiheessa on hyvä, merkittäviksi kysymyksiksi LCA:n kannalta jäävät toisaalta käyttöiän aikaiset vaikutukset ja skenaariot ja toisaalta luotettavan ja vertailukelpoisen, investointivaiheen määrätietoon yhdistettävän päästötietokannan luominen. Myös laskennan linkittäminen tietomalleihin ja laajemmin suunnitteluun on tärkeää.

Suomessa ollaan luomassa kansallista päästötietokantaa rakennusalalle Ympäristöministeriön johdolla. Vuosien 2019-2022 aikana luotavan tietokannan pohjalta on tarkoitus tehdä rakennusalalle yhteiset pelisäännöt päästöjen huomioon ottamiseksi projekteissa. Alkuvuodesta 2021 julkaistun tietokannan sisältö painottuu toistaiseksi talonrakennuksessa käytettäviin materiaaleihin. Infrarakenteiden osalta vastaavan tietokannan kehittäminen on alkanut Väyläviraston johdolla keväällä 2021 ja sen on tarkoitus valmistua vuonna 2022. (Saarniaho et al. 2021)

Kansallisen päästötietokannan luomiseksi on olennaista tietää, miten eri rakennusmateriaalit vaikuttavat kasvihuonepäästöihin elinkaarensa aikana. Mitä näistä vaikutuksista otetaan huomioon vaihtoehtoja vertailtaessa, on jossakin määrin valintakysymys. Teollisuuden tasapuolisen kohtelun varmistamiseksi valinnat tulee tehdä tutkittuun tietoon perustuen kritiikin kestäviksi.

Suomessa on rakennusalalla ja etenkin sillanrakennuksessa totuttu toimintatapaan, jossa lainsäädäntö ja viranomaisohjeistus eivät kategorisesti estä turvallisiksi todettujen materiaalien käyttöä. Esimerkiksi rakennusten energiatehokkuusvaatimuksissa lämmöneristetyypin ja -paksuuden sijasta vaatimuksena on vaipan riittävän pieni U-arvo, sillä tarkoituksena on vähentää rakennusten energiankulutusta eikä määrätä käytettäviä rakennetyyppejä.

Sillanrakennuksessa ja muissa infrakohteissa toimintaympäristö on huomattavan erilainen verrattuna talonrakentamiseen. Karkeasti voitaneen sanoa, että talonrakentamisessa rakenteilta vaaditaan joko lujuutta hyvissä olosuhteissa tai hyvää säänkestävyyttä julkisivuissa. Infrakohteissa, kuten myös esimerkiksi pysäköintirakennuksissa, rakenteilta vaaditaan sekä hyviä lujuus- että kestävyysominaisuuksia. Sillat suunnitellaan tyypillisesti vähintään sadan vuoden käyttöiälle. Jos siis valitaan materiaalit, jotka eivät sovi siltapaikalle tai muuten hankkeeseen, joudutaan siltaa korjaamaan useammin tai jopa uusimaan aiotun käyttöiän aikana.

Päästölaskentaa on Suomessa tutkittu etenkin talonrakennuksen kannalta. Sillanrakennuksessa ja laajemmin infrarakentamisessa käytetään osin erilaisia materiaaleja varsin erilaisissa olosuhteissa. Väyläviraston onkin hyödyllistä tietää, miten edetä kohti valtion hiilineutraaliustavoitetta ilman, että luodaan suurta korjausvelkapiikkiä tulevaisuuteen. Tämä diplomityö pyrkii kokoamaan tilannekuvaa Pohjoismaisista käytännöistä siltojen päästölaskennassa sekä rakennusmateriaalien tyypillisistä päästöistä ja niiden vähennyspotentiaalista.

1.2 Työn tavoitteet ja sisältö

Tämän työn tarkoitus on koota tietoa sillanrakennuksen ilmastopäästöjen huomioinnin nykytilasta sekä käsitellä sillanrakennusmateriaalien elinkaaren aikaisia ilmastovaikutuksia. Pääasiallisia tutkimuskysymyksiä on kolme:

1. Kuinka suuri osuus väylähankkeen päästöistä aiheutuu sillanrakentamisesta?
2. Miten Pohjoismaissa arvioidaan sillanrakentamisen ilmastovaikutuksia tällä hetkellä?
3. Millä periaatteilla materiaalien ilmastovaikutuksia tulisi arvioida, kuinka suuria niiden ilmastovaikutukset ovat ja miten ne kehittyvät tulevaisuudessa?

Aluksi luvussa 2 esitetään siltojen päästölaskentaan liittyviä standardeja, käsitteistöä ja menetelmiä. Tarkoituksena on tarjota olennainen tieto selkeässä ja tiiviissä muodossa.

Sillanrakentamisen osuutta päästöistä ja pohjoismaisia arviointikäytäntöjä (tutkimuskysymykset 1 ja 2) tarkastellaan luvussa 3. Tutkimuskysymystä 1 käsitellään Suomen olosuhteissa ja tutkimuskysymystä 2 käsitellään eurooppalaisessa standardikehyksessä ja pohjoismaisissa olosuhteissa.

Luvussa 3 käsitellään ensiksi pohjoismaisten väyläviranomaisten ilmastotavoitteita ja keinoja niihin pääsemiseksi sekä päästölaskennan nykytilannetta Pohjoismaissa. Lisäksi tarkastellaan päättyneitä ja käynnissä olevia pohjoismaisia yhteistyöhankkeita. Huomiota kiinnitetään myös, miten päästölaskelmia voidaan hyödyntää julkisissa kilpailutuksissa. Lopuksi tutkitaan siltojen osuutta väylärakentamisen ilmastopäästöistä.

Diplomityön pääsisältönä voidaan pitää lukua 4, jossa kerätään ja analysoidaan sillanrakennuksessa käytettävien materiaalien ilmastovaikutuksia (tutkimuskysymys 3) käsittelevää hajanaista ja osin teollisuuden tuottamaa tutkimustietoa. Erikseen käsitellään tarkemmin betoni-, teräs- ja puusiltojen päämateriaalit. Jokaisesta materiaalista kuvataan päästöjen muodostuminen nykytilanteessa ja lisäksi pyritään esittämään keinot ja tutkimustarpeet eri elinkaarenvaiheiden päästöjen huomioimiseksi. Lopuksi jokaisen materiaalin osalta tarkastellaan lähitulevaisuuden oletettuja kehityskulkuja. Lisäksi tarkastellaan yleisellä tasolla rakentamisesta ja kuljetuksista aiheutuvia päästöjä.

Työn tulosten pohjalta esitetään luvussa 5 suosituksia, miten sillanrakentamisen päästöjä voidaan vähentää. Lisäksi esitetään suosituksia kansallisen päästötietokannan luomisessa sillanrakennuksen kannalta huomioon otettaviksi asioiksi eri materiaaleilla.

1.3 Tutkimusmenetelmä ja käytetty aineisto

Tämä diplomityö on kirjallisuusselvitys. Lähdeaineistona on pyritty käyttämään ensisijaisesti vertaisarvioituja julkaisuja. Käsiteltävien aiheiden vuoksi myös muita lähteitä on käytetty, kuten seuraavissa lukukohtaisissa katsauksissa on eritelty.

Luvun 2 aineistona käytetään eurooppalaisia standardeja ja tarvittavin osin niitä tarkentavia kansallisia ohjeita. Lisäksi lähteinä on käytetty alaan liittyvää tutkimustietoa sekä peruskirjallisuutta.

Luvussa 3 vastataan ensiksi tutkimuskysymykseen 2 käyttäen aineistona pohjoismaisten väyläviranomaisten avoimesti tarjolla olevia ohjeita, määräyksiä ja tutkimus- sekä muuta soveltuvaa materiaalia. Tutkimuskysymykseen 1 vastataan käyttäen aineistona Väyläviraston rata- ja tiehankkeissa tehtyjä selvityksiä ja muuta soveltuvaa kirjallisuutta

Tutkimuskysymykseen 3 eri materiaalien päästövaikutuksista löytyy sekä yleistä tutkimustietoa että eri teollisuudenalojen luomia julkaisuja. Lisäksi materiaalikohtaista päästötietoa on saatavilla erilaisista päästötietokannoista ja yritysten tuotteilleen teettämistä EPD-selvityksistä. Kysymykseen vastataan luvussa 4, johon on koottu niin tieteellisiä kuin teollisuudenkin julkaisemia tutkimuksia ja muita selvityksiä eri materiaalien päästövaikutuksista. Erityisesti tulevaisuudessa mahdollisesti käyttöön otettavien keinojen, kuten sähkömasuunien, osalta tiedonlähteinä on käytetty esitysmateriaalia yritysten, järjestöjen ja korkeakoulujen tilaisuuksista.

1.4 Työn rajaus

Työssä tarkastellaan uudissillanrakennusta Suomen olosuhteissa. Luvussa 3 tutustutaan lisäksi pohjoismaisten väyläviranomaisten ja osin myös valtioiden tavoitteisiin infra- ja erityisesti sillanrakentamiseen liittyen. Lisäksi esitellään Pohjoismaissa käytössä ja kehitteil-

lä olevia laatuvaatimuksia, arviointimenetelmiä ja työkaluja.

Rakennusmateriaaleista käsitellään teräsbetonin, jännitetyn betonin, rakenneteräksen ja rakennuspuutuotteiden ilmastovaikutuksia. Nämä materiaalit on valittu, sillä ne ovat Suomessa pääasialliset sillanrakennuksessa käytettävät materiaalit. Niiden osuudet yksittäisen sillan massoista ja päästöistä ovat myös huomattavasti suuremmat kuin muiden rakentamisessa käytettävien materiaalien. Tarkastelu keskittyy niiden käyttöön sillan päällysrakenteissa. Betonimateriaalien käsittely on yleistettävissä myös alusrakenteissa käytettäviin betonimateriaaleihin. Eri materiaaleja tarkastellaan erityisesti materiaalien ominaisuuksien kautta. Tässä tutkimuksessa ei siis vertailla materiaaleista rakennettavissa olevien siltojen päästöjä. Maarakentamisen päästöt on lähtökohtaisesti rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Ilmastovaikutuksiksi käsitetään tässä työssä kestävän rakentamisen eurooppalaisen standardikehyksen ympäristövaikutusten arvioinnissa huomioon otettava ilmastonlämpenemispotentiaali GWP. Valinta tehdään tiedostaen, että yksiuloitteinen tarkastelu ei ole kestävän kehityksen periaatteiden mukaista. Valintaan on päädytty työn tilaajan kanssa. Päätökseen vaikuttavat diplomityön laajuus sekä valtion pyrkimykset erityisesti hiilineutraaliuteen.

Materiaalien ilmastopäästöjä tutkitaan jättäen huomioimatta niille tietyllä tapaa yhteiset taakat, kuten työmaan yleisestä toiminnasta aiheutuvat päästöt. Myös sillan ylittävän liikenteen päästöjen vaikutus jätetään huomioimatta. Nämä valinnat tehdään, jotta diplomityön laajuudessa päästään mahdollisimman syvälle nimenomaan rakennusmateriaaleihin liittyviin päästöihin.

Materiaalien hankintaa, rakennusmateriaalin valmistusprosessia ja itse rakentamista tarkastellaan kullakin päämateriaalilla sen erikoispiirteet huomioon ottaen niin, että paino on merkittävästi ilmastovaikutuksia aiheuttavissa vaiheissa.

Samoilla painotuksilla tarkastellaan materiaalien käyttäytymistä sillan investointivaiheen jälkeisen käyttöiän aikana. Erityisesti syvennytään materiaaleille ominaisiin käytön aikaisiin ilmastovaikutuksiin, sekä käsitellään materiaalien loppukäyttöä sillan elinkaaren jälkeen. Lisäksi esitellään ja käsitellään materiaalien valmistus- ja asennusprosessien ja korvaavien materiaalien oletettua kehitystä tulevaisuudessa.

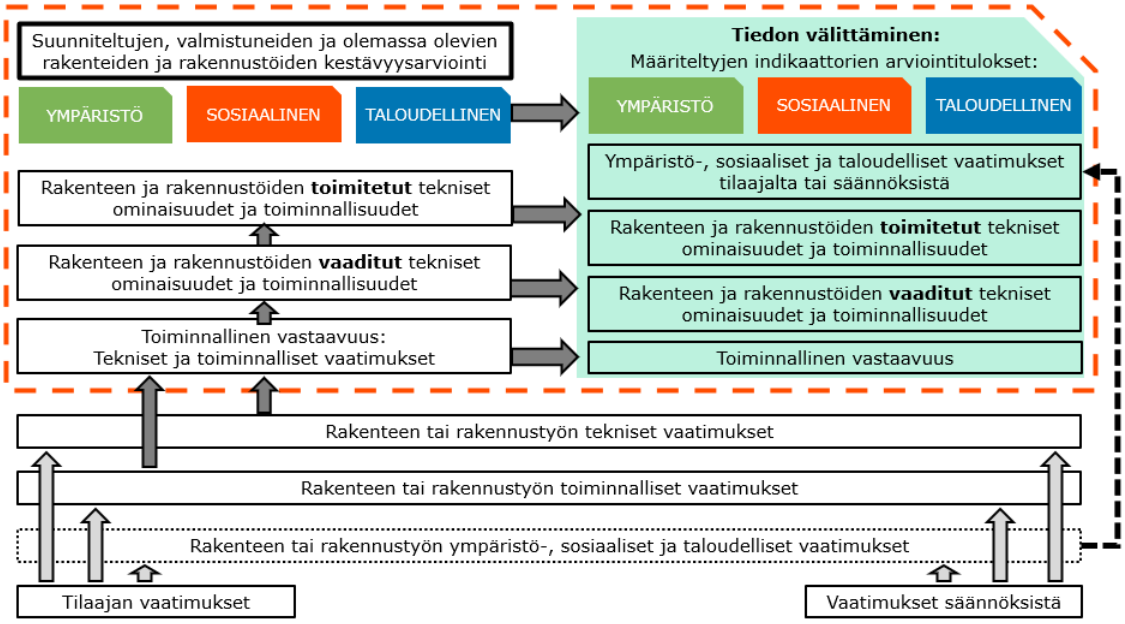
Tässä diplomityössä ei ole tarkoitus syventyä eri hankintamuotoihin, vaan niitä ja muita sopimusteknisiä asioita käsitellään riittävällä laajuudella, jotta elinkaariarvioinnin merkitys ja potentiaali tulevat ilmi.

2. PÄÄSTÖLASKENNAN KÄSITTEISTÖ JA MENETELMÄT

2.1 Standardit

2.1.1 Kestävä rakentaminen

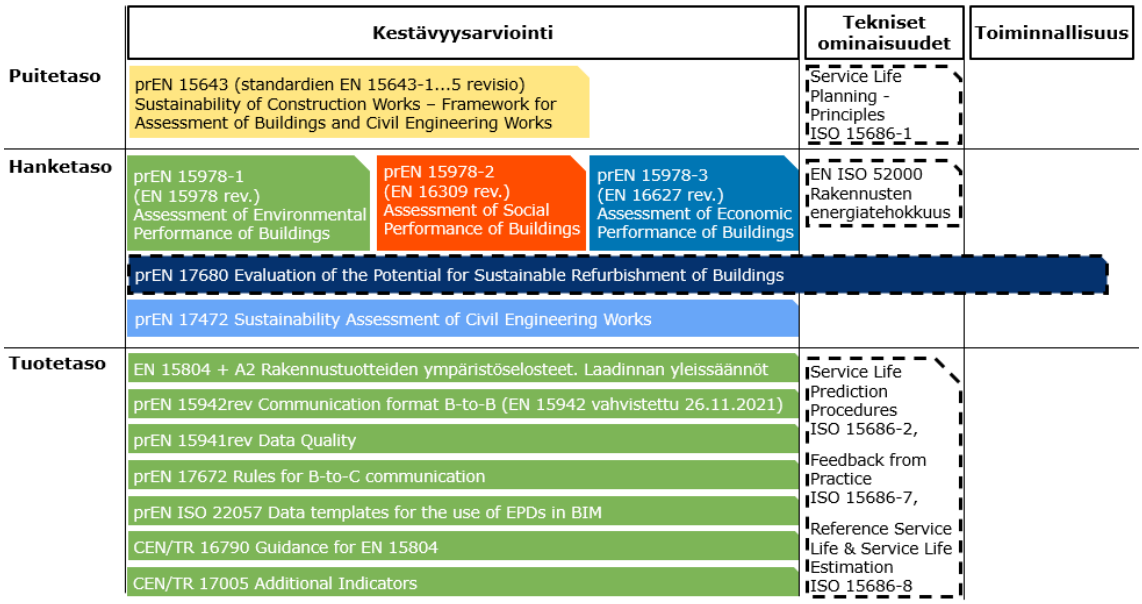
Kestävän rakentamisen yhteiseurooppalaiset standardit laatii eurooppalaisen standardointijärjestö CEN:n tekninen komitea *TC 350 Sustainability of construction works*. Kestävän kehityksen ulottuvuudet on ryhmitelty kolmeen ryhmään: ympäristö-, sosiaaliset ja taloudelliset vaikutukset. (SFS-EN 15643 2021) Komitean toiminnan alaan kuuluvat osat kestävän rakentamisen standardoinnista on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. *CEN/TC 350:n toiminnan alaan kuuluvat osat kestävän rakentamisen standardoinnista merkittynä punaisella katkoviivalla. (suomennettu ja luotu englanninkielisestä kuvasta standardissa SFS-EN 15643 2021)*

Rakennusalan päästölaskennassa käytettävä standardiperhe on esitetty kuvassa 2.2. Standardiperheessä on kolme tasoa: puite-, hanke- ja tuotetasot.

Puite- ja hanketasolla on standardit komitean vastuulle kuuluvien kolmen kestävän kehi-



Kuva 2.2. *CEN/TC 350:n työohjelma. (suomennettu ja luotu englanninkielisestä kuvasta standardissa SFS-EN 15643 2021)*

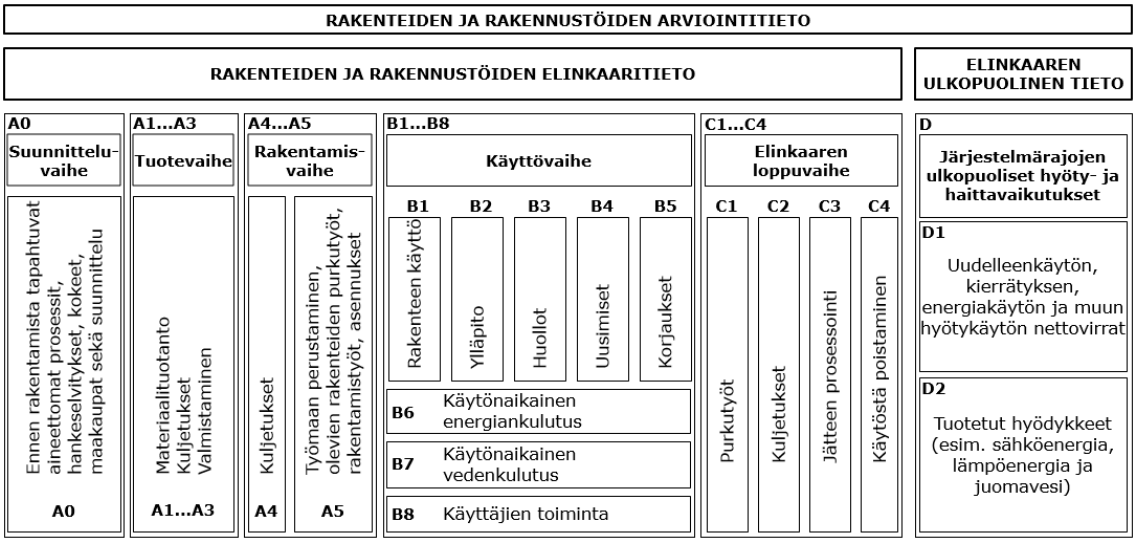
tyksen ulottuvuuden huomioon ottamiseen. Tällä hetkellä vain ympäristönäkökulmille on saatavilla tuotetason standardi. Lisäksi infrarakentamiselle on luotu oma puitestandardi ja vastaava hanketasoinen standardi on tarkoitus julkaista syksyllä 2021.

Kuvan 2.2 sarakkeissa on mainittu CEN/TC 350:n työalaan kuuluvien kolmen kestävän kehityksen ulottuvuuden lisäksi kestävässä rakentamisessa huomioon otettavat tekniset ja toiminnalliset vaatimukset. Kaikki viisi ulottuvuutta tulee ottaa huomioon rakennettaessa kestävästi. (SFS-EN 15643 2021)

2.1.2 Taitorakenteiden informaatiomoduulit

Kestävän rakentamisen standardeissa elinkaari on jaettu eri vaiheisiin, jotka jakautuvat edelleen informaatiomoduuleihin. Kaikelle rakentamiselle yhteinen puitestandardi on SFS-EN 15643 (2021), jota sovelletaan myös taitorakenteisiin. Taitorakenteiden elinkaariarvioinnin yhteydessä käytetyt informaatiomoduulit on eritelty kuvassa 2.3. Taitorakenteet käsitetään tässä työssä suppeassa merkityksessään, jossa niihin luetaan kuuluviksi Väyläviraston Taitorakenneyksikön työala, kuten sillat.

A-moduulit käsittelevät suunnittelu-, tuotanto- ja rakennusvaihetta. Moduuliin A0 sisällytetään esimerkiksi esi- ja hankeselvitykset, alustavat tutkimukset sekä suunnittelu. Moduulit A1...A3 käsittelevät rakennustuotteiden tuotantovaihetta, sisältäen materiaalien hankinnan ja valmistuksen sekä niihin liittyvät kuljetukset. Moduulit A4...A5 käsittävät rakennusvaiheen alkaen materiaalien kuljetuksesta tehtaan portilta työmaalle ja päättyen valmiin rakenteen luovutukseen. (SFS-EN 15643 2021)



Kuva 2.3. *Taitorakenteiden ja muiden infrarakenteiden elinkaaren informaatiomoduulit. (suomennettu ja luotu englanninkielisestä kuvasta standardissa SFS-EN 15643 2021)*

B-moduulit käsittelevät rakenteen käyttövaihetta. Moduulit B1...B5 kattavat rakenteen käytöstä, ylläpidosta, huollosta ja korjauksista seuraavat vaikutukset. Moduuleihin B6 ja B7 sisältyy rakenteen energian- ja vedenkulutuksen vaikutukset. Mahdolliset rakenteen hyötykäytöstä seuraavat vaikutukset sisällytetään moduuliin B8. (SFS-EN 15643 2021)

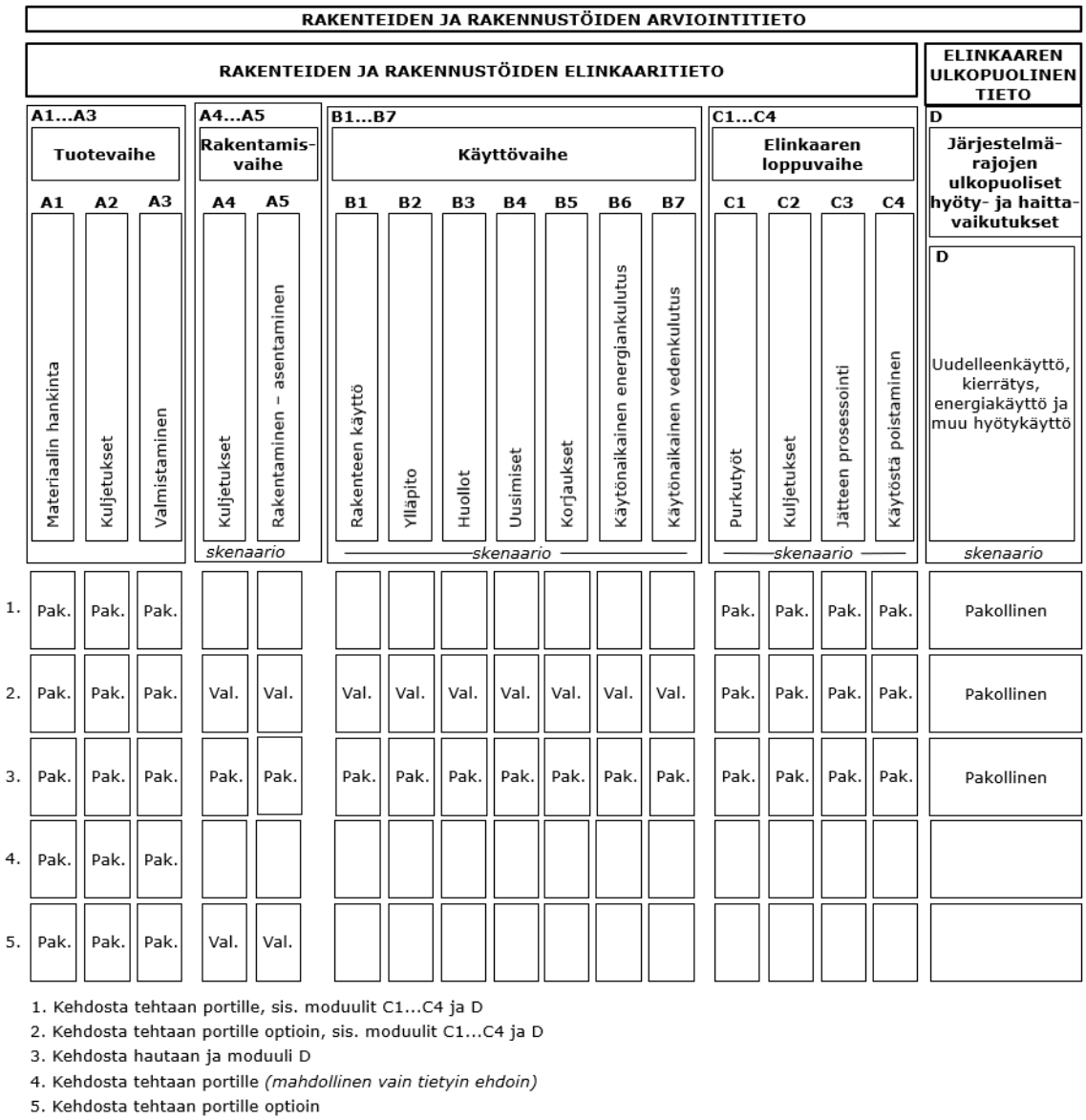
C-moduulit käsittelevät rakenteen käyttöiän loppupäätä. Moduuliin C1 sisällytetään rakenteen purkamisesta tai käytöstä poistamisesta aiheutuvat vaikutukset. Moduuleihin C2...C4 sisältyy puretun materiaalin prosessointi ja kuljetukset purkutyömaalta loppusijoitukseen asti. (SFS-EN 15643 2021)

Moduuliin D voidaan liittää lisätietoja järjestelmärajojen ulkopuolisista hyötyvaikutuksista ja potentiaalista. (SFS-EN 15643 2021) Moduuliin D liittyy läheisesti hiilikädenjäljen käsite, jota käsitellään tarkemmin kohdassa 2.3.

2.1.3 Rakennustuotteiden informaatiomoduulit

Rakennustuotteiden ja -palveluiden elinkaariarvioinnin yhteydessä käytetyt informaatiomoduulit sekä erityyppisissä ympäristöselosteissa vaaditut moduulit on eritelty kuvassa 2.4. Rakennustuotteiden informaatiomoduulit käsittävät taitorakenteiden moduuleja vastaavat sisällöt tuotetasolla. Tästä eteenpäin rakennustuotteella viitataan rakennustuotteeseen tai -palveluun.

Moduulit A1...A3 vaaditaan kaikilta rakennustuotteilta ja ne perustuvat tosiasialliseen valmistusprosessiin. Muut moduulit ovat tuotteesta ja ympäristöselosteen laajuudesta riippuen vapaaehtoisia tai pakollisia ja perustuvat aina selosteessa määritettyyn skenaarioon. (SFS-EN 15804 2019)



Kuva 2.4. *Rakennustuotteiden ja -palveluiden elinkaaren informaatiomoduulit. (suomennettu ja luotu englanninkielisestä kuvasta standardissa SFS-EN 15804 2019)*

A-moduulit käsittelevät tuotanto- ja rakennusvaihetta. Moduulit A1...A3 käsittelevät rakennustuotteen tai -palvelun valmistusvaihetta, sisältäen materiaalien hankinnan ja valmistuksen sekä niihin liittyvät kuljetukset kehdosta tehtaan portille. Moduulit A4...A5 käsittävät tuotteen ympäristöselosteessa mainittuun käyttötarkoitukseen liittyvät rakennus- ja asennusprosessit alkaen tuotteen kuljetuksesta tehtaan portilta työmaalle ja päättyen siihen hetkeen, kun tuotteesta tulee osa rakennetta. (SFS-EN 15804 2019)

B-moduulit käsittelevät tuotteen vaikutuksia skenaarion mukaisen valmiin rakenteen ollessa skenaarion mukaisessa käytössä. Moduulissa B1 skenaariona on aiottu käyttö. Moduuleihin B2, B3 ja B5 liittyvää skenaariotietoa ovat kunnosapitoon, korjauksiin ja laajamittaisiin korjauksiin, vastaavasti, liittyvät prosessit, sykli (lukumäärä per vertailukäyttöikä tai a), käytettävät materiaalit eriteltynä, veden käyttö, energian käyttö ja paikalliset ener-

giamuodot sekä syntyvät jätteet. Moduuliin B4 Osien vaihto liittyvää skenaariotietoa ovat osien vaihtosykli, tuotteen elinkaaren aikana vaihdettavat kuluneet osat sekä tieto käytettävän energian laadusta ja määrästä. Moduulit B6 ja B7 kuvaavat rakennukseen integroidun teknisen laitteen energian tai vedenkulutusta käytön aikana. (SFS-EN 15804 2019)

C-moduulit käsittelevät rakenteen käyttöiän loppupäätä. Moduulit C1...C4 käsittelevät tuotteen yhden elinkaaren käyttöiän loppupäässä tapahtuvaa purkamista, siihen liittyviä kuljetuksia, jätteenkäsittelyä ja hävittämistä, vastaavasti. Niihin liittyvää skenaariotietoa ovat kerättävän rakennusjätteen massa jaoteltuna lajiteltuun ja lajittelemattomiin määriin, hyödyntämisprosessien mukaan jaoteltu (komponentin uudelleenkäyttö, materiaalikierrätys ja energiasisällön hyödyntäminen) rakennusjätteen massa sekä loppusijoitettavan jätteen massa. Myös muut skenaarioon liittyvät oletukset, kuten kuljetusetäisyydet, on esitettävä. (SFS-EN 15804 2019)

Moduuliin D voidaan liittää lisätietoja järjestelmärajojen ulkopuolisista hyötyvaikutuksista ja potentiaalista. Näitä voivat olla esimerkiksi rakennustuotteen uudelleen käyttäminen sellaisenaan tai luonnonvaroja korvaavana osa-aineena uuden tuotteen valmistuksessa. Eri materiaaleille tyypillisiä moduulin D käyttökohteita käsitellään tarkemmin luvussa 4.

2.1.4 Elinkaariarvioinnin käsitteistö

Elinkaariarviointi (LCA) voidaan tehdä mille tahansa tuotejärjestelmälle. Rakennusalalla arvioinnin kohteet voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan: kokonaisiin rakennuksiin tai rakenteisiin ja toisaalta rakennustuotteisiin tai -palveluihin. Käytännössä suurempien rakenteiden elinkaariarviointi perustuu sen osien elinkaariarviointeihin.

Elinkaariarvioinnin lähtökohtana on, että *tekniset ja toiminnalliset vaatimukset* lukitaan joko tilaajan toimesta tai projektia määriteltäessä. Näiden vaatimusten pohjalta määritellään valmiin rakenteen tai sen osan *toiminnallinen vastaavuus*, joka keskenään vertailukelpoisten vaihtoehtojen tulee täyttää. (SFS-EN 15643 2021) Toiminnallinen vastaavuus voi olla esimerkiksi yksi kappale kaksiajorataista siltaa tietylle liikennekuormalle ja ajanjaksolle.

Ympäristöselosteessa, jossa ilmoitetaan vähintään yksi käyttövaiheen C-moduuli, on ilmoitettava vertailukäyttöikätieto. *Vertailukäyttöiällä* (*RSL*) tarkoitetaan rakennustuotteen tai rakenteen käyttöikää, jonka sen oletetaan saavuttavan vertailukäyttöolosuhteissa täyttäen ilmoitetun teknisen ja toiminnallisen suoritustason. Vertailukäyttöiän on oltava perusteltavissa ja varmennettavissa. (SFS-EN 15804 2019)

Vertailukäyttöikä on riippuvainen tuotteen tai rakenteen ominaisuuksista ja vertailukäyttöolosuhteista. Tyypillinen vertailukäyttöiän varmentava tieto sisältää kuvauksen tuotteesta, johon vertailukäyttöikää sovelletaan; kuvauksen vertailukäyttöolosuhteista, joihin vertailukäyttöikätieto pätee; sekä kuvauksen tiedon laadusta. Rakennustuotteen käyttöikään

liittyvät vaatimukset ja ohjeistus on esitetty standardin SFS-EN 15804 velvoittavassa liitteessä A. (SFS-EN 15804 2019)

”End-of-waste”-tilalla viitataan tilanteeseen, jossa rakenteesta poistettu materiaali lakkaa olemasta jätettä, eli se voidaan ilmoittaa D-moduulissa. Saavuttaakseen ”end-of-waste”-tilan jätteen on täytettävä kaikki seuraavista kriteereistä (SFS-EN 15804 2019)

- talteen otettua materiaalia, tuotetta tai rakennusosaa käytetään yleisesti johonkin määrättyyn tarkoitukseen
- talteen otetulla materiaalilla, tuotteella tai rakennusosalla on olemassa markkinat, esim. kaupallista käyttöä tai kysyntää (positiivista rahallista arvoa)
- talteen otettu materiaali, tuote tai rakennusosa täyttää määrätyssä tarkoituksessa vaadittavat tekniset vaatimukset ja olemassa olevan lainsäädännön ja sovellettavan tuotestandardin vaatimukset
- talteen otetun materiaalin, tuotteen tai rakennusosan käyttö ei johda määriteltyihin haitallisiin ympäristö- tai terveysvaikutuksiin.

Määrätyllä tarkoituksella tarkoitetaan tässä yhteydessä käyttöä tuotteena, kierrätysmateriaalina tai -polttoaineena. Määritellyillä haitallisilla ympäristö- ja terveysvaikutuksilla viitataan laissa ja muissa viranomaissäädöksissä määriteltyihin haitallisten aineiden rajaarvoihin. (SFS-EN 15804 2019)

Elinkaariarvioinnissa tuotejärjestelmät määritetään mallintamalla fyysiset yksikköprosessit. *Yksikköprosessi* on pienin inventaarioanalyysissa huomioon otettava osa, jonka suhteen syöte- ja tuotostiedot määritellään. Yksikköprosessissa syötevirrat muuttuvat päästöiksi ilmaan, veteen tai maaperään sekä välivalmisteiksi. (SFS-EN 15804 2019) Esimerkki yksikköprosessista voisi olla kalkkikiven kalsinointi, jossa polttoaineista ja kalkkikivestä syntyy päästöjä ja sementtiklinkkeriä.

Järjestelmäraja määrittää ne yksikköprosessit, jotka sisällytetään tarkasteltavaan tuotejärjestelmään. Järjestelmärajojen asettamisessa noudatetaan kahta periaatetta. *Modulaarisuusperiaatteen* mukaan tuotteen ympäristösuoritustasoon vaikuttavat prosessit kohdistetaan siihen informaatiomoduuliin, jossa ne tapahtuvat. *Saastuttaja maksaa -periaatteen* mukaan jätteenkäsittelyprosessit kohdistetaan siihen tuotejärjestelmään, joka tuottaa jätteen kunnes ”end-of-waste” -tila saavutetaan. (SFS-EN 15804 2019)

Modulaarisuusperiaatteen mukaisesti esimerkiksi tuotteen asennusprosessin aikana syntyvä hävikki kohdistetaan moduuliin A5. Saastuttaja maksaa -periaatteen mukaisesti kyseisen hävikin saattaminen ”end-of-waste”-tilaan sisältyy myös moduuliin A5.

Taitorakenteissa arvioinnin kohteena on taitorakenteen lisäksi sen vaikutusalue, siihen liittyvät rakenteet ja tilapäiset rakenteet. Vaikutusalueen määrittely voi vaihdella sen mukaan, mitä kestävän kehityksen ulottuvuutta arvioidaan. Taitorakenteiden järjestelmärajat

tulee asettaa niin, että järjestelmä kattaa koko rakenteen elinkaaren ja vaikutusalueen. (SFS-EN 15643 2021)

Toiminnallinen yksikkö on tuotejärjestelmän määrällinen suoritustaso, jota käytetään viiteyksikkönä (SFS-EN ISO 14040). Rakennustuotteen toiminnallisen yksikön on määriteltävä (SFS-EN 15804 2019)

- toiminnalliseen yksikköön kuuluvan tuotteen tai tuoteryhmien sovellus tai käyttö
- rakennuskohteeseen asennetun toiminnallisen yksikön viitemäärä
- rakenteeseen asennetun rakennustuotteen toiminnallinen käyttötarkoitus, suoritustaso tai vähimmäissuoritustaso, ottaen huomioon tarkasteltavan rakenteen toiminnallinen vastaavuus[1]
- määritellyissä olosuhteissa vähimmäissuoritustaso, joka on täytyttävä toiminnallisen yksikön määritellyn ajanjakson ajan
- referenssikäyttöiän mukaisesti määritelty ajanjakso referenssikäyttöolosuhteissa. Jos toiminnallisessa yksikössä käytetään erilaista ajanjaksoa kuin referenssikäyttöiässä, referenssikäyttöikä on esitettävä ympäristöselosteen teknisissä tiedoissa.

Taitorakenteen toiminnallinen yksikkö voi olla esimerkiksi yksi kansineliömetri tai kappale kaksiajorataista siltaa tietylle liikennekuormalle ja ajanjaksolle. Rakennustuotteen toiminnallinen yksikkö voisi olla vastaavasti kansineliömetri vedeneristystä tietylle ajanjaksolle tietyissä olosuhteissa, jolloin toiminnallisen yksikön viitemäärä on kansineliömetri. (SFS-EN 15804 2019)

Ilmoitettu yksikkö on yhden tai useamman informaatiomoduulin sisältävän rakennustuotteen ympäristöselosteen viiteyksikkö. Ilmoitettua yksikköä käytetään viiteyksikkönä, jos toiminnallista yksikköä ei voi määritellä. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että tuotetta voidaan käyttää usealla eri tavalla rakennuskohteessa. Ilmoitettuun yksikköön perustuva ympäristöseloste voi kattaa elinkaaren kaikki moduulit ja D-moduulin. Tällöin ilmoitetun yksikön on liityttävä tuotteen tyypillisiin sovelluksiin tai tavanomaiseen käyttöön ja niiden referenssikäyttöikään. (SFS-EN 15804 2019)

Ilmoitetuksi yksiköksi on valittava tuoteyksikkö, massa, pituus, pinta-ala tai tilavuus. Tuoteyksikön, pituuden ja pinta-alan tapauksessa yksikön mitat on määritettävä. Esimerkiksi jos palkin tapauksessa ilmoitettu yksikkö on pituus [m], on ilmoitettava myös palkin poikkileikkaustiedot. Vaihtoehtoisesti voidaan perustellen käyttää poikkeavaa yksikköä, kunhan ilmoitetaan tieto siitä, kuinka tämä yksikkö muunnetaan vähintään yhtä listattua yksikkötyyppiä vastaavaksi. (SFS-EN 15804 2019) Ilmoitettu yksikkö voisi olla esimerkiksi kuutio tietyn olosuhdeluokan valmisbetonia.

[1] Suomennoksen lause ei ollut oikein, joten tähän käännetty suoraan englanninkielisestä standardista.

2.1.5 Ympäristöselosteet

Ympäristöseloste (EPD) on rakennustuotteen tai -palvelun elinkaariarvioinnin tiivistelmä (Väylävirasto 2020b). Standardilla SFS-EN ISO 14025 vahvistetaan periaatteet ja menettelyt tuotteiden ja palveluiden ympäristöselosteen luomiseen. Standardissa SFS-EN 15804 taas esitetään keskeiset rakennustuotteita ja -palveluita koskevat säännöt. Ympäristöselosteen pohjana oleva elinkaariarviointi tulee tehdä standardien SFS-EN ISO 14040 ja SFS-EN ISO 14044 sekä luvussa 2.1. esitetyn CEN/TC 350 alaisen standardiperheen mukaisesti.

Standardin SFS-EN ISO 14025 mukainen tyypin III ympäristöseloste tarjoaa tuotteen tai palvelun ympäristönäkökohtiin liittyvää määrällistä tietoa käyttäen ennalta määritettyjä ympäristöparametreja ja tarvittaessa ympäristöön liittyvää lisätietoa. Samassa standardissa esitetään samaan toiminnalliseen käyttöön sopivien tuotteiden keskinäisen vertailuun liittyvä tuoteryhmäsääntöjen käsite. Tuoteryhmäsääntö määritetään joukoksi määriteltyjä sääntöjä, vaatimuksia ja suuntaviivoja tyypin III ympäristöselosteiden kehittämiselle yhtä tai useampaa tuoteryhmää varten. (SFS-EN ISO 14025 2010)

Standardia SFS-EN 15804 (2019) täydentäviä rakentamiseen liittyviä tuoteryhmäsääntöjä on määritetty osalle tuoteryhmistä standardeina. Standardissa SFS-EN 16485 (2014) on esitetty tuoteryhmäsäännöt puu- ja puupohjaisille rakennustuotteille. Standardissa SFS-EN 16757 (2017) vastaavat säännöt on esitetty betonille ja betonielementeille ja standardissa SFS-EN 16908 (2017) mm. sementille. Standardissa EN 17662 tullaan esittämään tuoteryhmäsäännöt rakentamisessa käytetyille teräs-, rauta- ja alumiinituotteille (prEN 17662 2021). Tuoteryhmäsääntöjä voidaan laatia myös kansallisesti tai toimialakohtaisesti.

Standardissa SFS-EN 15942 (2021) määritellään ympäristöselosteille formaatti käytettäväksi yritysten välisessä viestinnässä. Standardin tarkoituksena on yhtenäistää rakennustuotteiden ympäristöselosteita, jotta niitä on helpompi käyttää useasta tuotteesta koostuvaa rakennusta tai rakennetta arvioitaessa. Työn alla on myös yritysten kuluttajaviestintää määrittelevä standardi prEN 17672 (2021), joka oli lausuntokierroksella kesällä 2021.

Rakennustuotteiden ympäristöselosteessa on ilmoitettava kaikki SFS-EN 15804 mainitut 13 yleisindikaattoria, joita ovat esimerkiksi vaikutuspotentiaalit yläilmakehän otsonikatoon, uusiutumattomien luonnonvarojen ehtymiseen ja ilmaston lämpenemiseen. Ilmaston lämpenemisen indikaattorit on jaettu kolmeen osaan: fossiilisten polttoaineiden (GWP-fossil), eloperäisten (GWP-biogenic) sekä maankäytön ja maankäytön muutoksen (GWP-luluc) aiheuttamiin. Lisäksi on erikseen ilmoitettava näiden summa GWP-total. Kaikkien ilmastonmuutokseen liittyvien indikaattorien yksikkö on CO_2e-kg ilmoitettua tai toiminnallista yksikköä kohden. Lisäksi standardissa määritetään kuusi lisäindikaattoria, joita ei ole pakko ilmoittaa selosteessa, mutta ne on mainittava. (SFS-EN 15804 2019)

Tässä työssä rakennustuotteiden ympäristöselosteita tarkastellaan pääasiassa ilmastonlämpenemisen näkökulmasta.

2.1.6 Elinkaariarvioinnissa käytettävä tieto

Tuotteiden elinkaariarvioinnin tuloksena syntyvät ympäristöselosteet ovat käyttötarkoituksessaan tarkkaa tietoa. Jos tarkkaa tietoa ei ole saatavilla, käytetään yleisiä tietoja. Yleisen tiedon käyttöön saatetaan päätyä esimerkiksi siksi, että tuotteella ei ole voimassa olevaa ympäristöselostetta, tai että kyseisessä suunnitteluvaiheessa ei ole vielä tietoa lopullisesta toimittajasta tai valmistajasta. (Väylävirasto 2020b)

Ympäristöselosteissa käytettävän tiedon valintaa käsitellään standardissa SFS-EN 15804 (2019). Tuotekohtaisessa ympäristöselosteessa vähimmäisvaatimuksena on yleisen, julkisesti saatavilla olevan tiedon käyttö. Määrättyä tuotetta koskevassa selosteessa tulee käyttää spesifiä tietoa vähintään prosesseista, joihin valmistaja pystyy vaikuttamaan. Keskiarvotuotetta kuvaavassa selosteessa taas käytetään tuotteita edustavia keskiarvotietoja. (SFS-EN 15804 2019) Käytännössä tuotevalmistajan tulee siis käyttää yleistä tietoa tarkempaa tietoa vähintään informaatiomoduuleissa A2 ja A3. Jos valmistaja myös hankkii raakamateriaalin esimerkiksi omalta kaivokseltaan, tulee tarkempaa tietoa käyttää myös moduulissa A1.

Rakentamishankkeiden elinkaariarvioinnissa käytettävän tiedon laatu vaihtelee sen mukaan, missä vaihessa elinkaarta arviointi tehdään. Rakentamishankkeiden elinkaariarviointia käsittelevässä standardissa SFS-EN 15978 esitetään, minkälaista tietoa tulisi käyttää rakennuksen eri elinkaarivaiheissa. Standardin suositukset on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1. *Eri elinkaarivaiheissa suositellut käytettävät tietotyypit. X tai x merkitsevät käytettäväksi suositeltavia ja O vaihtoehtoisia tietotyyppejä, jos lähteitä on saatavilla. (SFS-EN 15978 2012, taulukko suomennettu vapaamuotoisesti, sillä suomenkielistä standardia ei ole julkaistu)*

Suositeltava tietotyyppi	**Arvioinnin ajankohta**				
	Vaihtoehto-suunnittelu	***Rakenne-suunnittelu***	***Rakentaminen***	***Käyttövaihe***	***Elinkaaren loppuvaihe***
Yleinen tieto	X	X	X	X	X
Yhdistetty tieto	X	X			
Keskiarvotieto	X	X	X	X	X
Tuoteryhmätieto	O	x	x	X	x
Tuotteiden keskiarvotieto	O	X	X	X	X
Tuotekohtainen tieto	O	X	X	X	X
Käyttövaiheen malliskenaariot	X	X	X	X	
Mittaustieto			X	X	X
Muu tieto	O	O	O	O	O

Yleisen tiedon valintaa ja käyttöä käsitellään tarkemmin CEN:n teknisessä raportissa

CEN/TR 15941 (2010). Standardia ollaan päivittämässä ja uusi versio oli lausuntokierroksella kesällä 2021 (prEN 15941 2021).

Alaluvussa 2.2 käsitellään rakennustuotteiden ja rakenteiden elinkaariarvioinnissa käytettävää tietoa eri toimijoilla. Luvussa 4 käsitellään materiaalien päästöjä eritasoisten tietojen avulla.

2.2 Laskentamenetelmät

Pohjoismaissa infrarakenteiden elinkaarilaskenta on yleensä panospohjaista. Nimikkeistö vastaa tällöin kokonaan tai osittain määrä- ja kustannuslaskennassa käytettävää nimikkeistöä. EN-standardien mukaisessa laskennassa päästöt saadaan kertomalla panoksen määrä sen yksikköpäästökertoimella. (Väylävirasto 2020b) Toimenpide on siis täysin analoginen kustannuslaskennan kanssa: määrät kerrotaan hinnaston mukaisilla yksikköhinnoilla.

Laskentapalveluita on kehitetty yleiseen käyttöön eri maiden väyläviranomaisten toimesta. Esimerkiksi Ruotsissa Trafikverket tarjoaa *Klimatkalkyl*-palvelua kaikkien halukkaiden käyttöön, ja vaatii sen käyttöä tilaamissaan projekteissa (Trafikverket 2016). Norjan Vegvesen tarjoaa vastaavaa *VegLCA*-palvelua (Statens vegvesen 2021b). Tanskassa julkaistiin vastaava *InfraLCA* loppukeväästä 2021 (Vejdirektoratet ja Banedanmark 2021). Norjassa ja Tanskassa työkalut kattavat ilmastonlämpenemispotentiaalin lisäksi muitakin ympäristöindikaattoreita. Laskentapalveluiden käytön vaatimista eri hankkeissa käsitellään tarkemmin kohdassa 3.1, jossa myös käsitellään Suomessa ja Tanskassa käyttöönotettavia vastaavia palveluja.

Pohjoismaisissa työkaluissa on eroja mm. laskentaan sisällytettävien elinkaarimoduulien osalta. Ruotsin *Klimatkalkyl* kattaa elinkaarimoduulit A1...A5 ja B2...B4 (Trafikverket 2020). Norjan *VegLCA* kattaa moduulit A1...A4 ja B4...B5 (Statens vegvesen 2021b). Tanskan *InfraLCA* kattaa moduulit A1...A5 ja B4...B5 (Vejdirektoratet ja Banedanmark 2021).

Yritykset ovat tuottaneet myös suljetumpia ratkaisuja, jotka toimivat yleensä osana palvelukonseptia. Kaupallisia, palvelukokonaisuuksiin kuuluvia laskureita ovat esimerkiksi One Click LCA Ltd:n (ent. *Bionova*) *One Click LCA* ja Rambollin *ZeroInfra*. Käytännössä kaikki suunnittelu- ja konsulttiyhtiöt tarjoavat nykyään vähähiiliseen rakentamiseen liittyviä palveluita, vaikkei niillä olisikaan omaa laskuria.

CEEQUAL on kestävän kehityksen arviointimenetelmä infrahankkeille. Menetelmää kehittää britannialainen BRE Ltd, jonka omistaa voittoa tavoittelematon BRE-säätiö. Varsinaisen päästölaskennan lisäksi menetelmä tarjoaa erityyppisiin urakoihin soveltuvia palkkioja seurantamalleja. (BRE 2018) On syytä ottaa huomioon, että menetelmä ei lähtökohtaisesti ota huomioon elinkaaripäästöjä, vaan pisteitä voi saada esimerkiksi vain tekemällä

päästölaskennan. Pisteisiin perustuva arviointimenetelmä on siis hyvin portaittainen. Norjassa kaikki yli 200 miljoonan kruunun (noin 20 miljoonan euron) hankkeet on sertifioitava *CEEQUAL*-menetelmän mukaisesti (Statens vegvesen 2021a). Myös muita infrarakentamiseen soveltuvia kestävyydenarviointimenetelmiä on olemassa.

Menetelmien käyttämät päästökertoimet ovat peräisin joko toimijan omista tai muuten saatavilla olevista tietokannoista. Esimerkiksi Pohjoismaissa on käytössä valtion ylläpitämiä tietokantoja, joita käsitellään tarkemmin kohdassa 3.1. Nämä tietokannat on sisällytetty maiden työkaluihin, jotka mahdollistavat myös projektikohtaisten päästökertoimien käytön.

Sveitsiläisperäinen *ecoinvent* on kansainvälinen yksikköpäästötietokanta, jota käytetään monilla eri aloilla ja monissa eri laskentapalveluissa. Maksullista tietokantaa ylläpitää voittoa tavoittelematon järjestö. Tietokanta sisältää kertoimia myös muillle kuin ilmastoindikaattoreille. (Wernet et al. 2016)

Aina tietokannat eivät sisällä kovin yksityiskohtaista tietoa yksikköpäästöjen lähteestä tai tehdyistä oletuksista. Yksikköpäästöjen ominaisuuksiin vaikuttavia merkittäviä tekijöitä ovat esimerkiksi maantieteellinen kattavuus ja julkaisuajankohta (SFS-EN 15978 2012). Esimerkiksi Väylän tulevan päästötietokannan arvot luodaan Suomen ympäristökeskuksessa ja päästökertoimille julkaistaan taustadokumentit tuoteryhmittäin (Häkkinen ja Pesu 2021).

Käytettävien päästöarvojen olisi tärkeää olla avoimia ja todennettavissa. Esimerkiksi pohjoismaisissa väylärakentamisen laskentatyökaluissa on yleisten päästöarvojen taustoja ei ole hirveästi avattu. Esimerkiksi Tanskan InfraLCA-työkalussa (Vejdirektoratet ja Banedanmark 2021) yleisiä arvoja on taustoitettu lähinnä materiaalin oletetuilla ominaisuuksilla ja päästökertoimen maantieteellisellä alueella. Osalle päästökertoimista tietoja on täydennetty selkeällä lähdeviittauksella. Suomalaisessa Rakentamisen päästötietokannassa jokaisen tuotteen päästöarvojen muodostamista on esitetty erillisissä, julkisesti saatavilla olevissa tuoteryhmäkohtaisissa taustaraporteissa. Näiden taustaraporttien perusteella tyypilliseen päästöarvoon on päädytty usein yhden päästöarvon perusteella, vaikka arvoja esitettäisiin useammastakin eri lähteestä.

Myös arvioinnissa käytettävien taustatietojen tulisi olla avoimia. Yleisesti käytetty One Click LCA -palvelu sisältää niin julkisesti saatavilla olevia päästö- ja ympäristötietoja kuin yrityksen itse kehittämiä ympäristötietoja. Osa *One Click LCA Ltd*:n tuoteryhmäkohtaisista EPD-generaattoreista on hyväksytty *Rakennustietosäätiö RTS*:n EPD-palveluun (RTS 2022). Kaikki RTS EPD:t on verifioitu ulkopuolisten tahojen toimesta, mutta *One Click LCA Ltd*:n tiedot eivät ole julkisesti saatavilla. Tämä liittynee suljettujen generaattorien yritykselle tuottamaan kilpailuetuun. Ympäristöselosteet ovat voimassa viisi vuotta (SFS-EN 15804 2019), mikä jo itsessään huonontaa niiden vertailukelpoisuutta: laskentatapojen kehittyessä esimerkiksi yleisesti käytetyt järjestelmärajaukset ja yksikköprosessien

päästöt voivat muuttua ajan saatossa. Jos taustatiedot eivät ole avoimia, on samankaltaistenkin tuotteiden selosteiden vertailukelpoisuuden varmentaminen vaikeampaa. Tällä on erityinen merkitys, kun ilmastopäästöjä aletaan hyödyntämään laajemmin valtion kilpailuttamissa infrastruktuurihankkeissa.

Vaikka käytössä olevat laskentamenetelmät ovatkin pääpiirteissään samankaltaisia, tehdään laskennan aikana monia lopputulokseen vaikuttavia valintoja. Osa näistä valinnoista seuraa suoraan kyseessä olevasta suunnitteluvaiheesta. Tällaisia ovat esimerkiksi käytettävien tietojen tarkkuus ja laatu. Merkittävää on yhtenäisten ohjeiden luonti, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia. Ohjeissa tärkeitä huomioon otettavia asioita ovat esimerkiksi arviointiin sisällytettävät elinkaaren moduulit ja järjestelmien rajaus. (Väylävirasto 2020b) Ympäristöministeriön vähähiilisyyssääntelyn puitteissa ei näillä näkymin ole luvassa erillisiä pätevyysvaatimuksia elinkaariarviointien tekijöille. Tähän liittyviä riskejä käsitellään lyhyesti kohdassa 3.3.

Larsson Ivanov et al. (2018) tutkivat elinkaariarviointiin liittyviä epävarmuustekijöitä. Tutkijat tunnistivat monia virhelähteitä, joista he nostivat esille kaksi kriittisintä jatkotutkimustarvetta: Epävarmuustekijöiden kerääminen nähtiin tärkeäksi niin uusien kuin olemassaolevienkin tietojen ja tietokantojen osalta. Lisäksi tutkijat esittävät, että jos elinkaariarviointeja aiotaan käyttää kilpailutuskriteereinä, on laskentaan liittyvät epävarmuudet otettava huomioon läpinäkyvyyden takaamiseksi.

Kanadassa Nahangi et al. (2021) tutkivat sillanrakentamisen investointipäästöjen arviointia tietomallin avulla. Suunnitteluvaiheen tietomallin perusteella laskettuja päästöjä verrattiin työmaan toteumatietojen pohjalta laskettuihin päästöihin. Vain 32 % päästöistä onnistuttiin arvioimaan puhtaasti tietomallin pohjalta. Merkittäväksi kehityskohteeksi tutkijat tunnistivat työmaatoimintojen sisällyttämisen tietomalliin. Huomioitavaa on, että myös raudoitteet puuttuivat tietomallista. Kun otetaan huomioon ainoastaan mallissa esitetyt materiaalit, onnistuttiin päästöistä arvioimaan 49 %. (Nahangi et al. 2021) Suomessa valtion siltojen tietomallista tehdään esimerkiksi rakennussuunnittelussa sillan täydellinen tuotemalli (Liikennevirasto 2014). Nahangi et al. (2021) tutkimukseen verrattuna Suomessa siltojen tietomallintaminen on siis oletettavasti tarkemmalla tasolla. Silti on syytä ottaa huomioon, että tutkijat onnistuivat arvioimaan alle puolet tietomallin määrien mukaisista päästöistä. Tämä selittyi niin yksikköpäästöjen saatavuudella kuin laadullakin. Erityisesti rakentamisen (A5) päästöjen arviointi tietomallin perusteella oli vaikeaa.

Esimerkiksi Norjassa Statens vegvesen on kehittämässä tietomallintamisen ja elinkaariarvioinnin integraatiota. Nykytilanteessa Pohjoismaissa on tapana tehdä päästölaskenta tietomallin pohjalta tehdyn määräluettelon kautta. Tulevaisuudessa määrätieto on tarkoitus siirtää pilvipalvelun kautta ilman erillisten määräluetteloiden tulostamista ja siirtämistä. Ongelmia on nykyisellään havaittu myös tietomallien nimikkeistöjen yhtenäisyydessä ja ajantasaisuudessa. Käytettävän tiedon on tarkoitus olla reaaliaikaista ilman erillisten

luettelotiedostojen luontiin, tarkistamiseen ja siirtämiseen liittyvää metatyötä. Pilvipalvelu on näillä näkymin verkkoversio nykyisin Excel-pohjaisesta VegLCA-työkalusta. (Begic 2021) Alankomaissa van Eldik et al. (2020) tutkivat infrahankkeen ympäristöarvioinnin automatisoinnin vaikutusta muun muassa arviointiin kuluvaan aikaan. Käytännössä elinkaariarvioinnin ja tietomallin integraatiolla arviointiin kuluvaa aikaa on tutkijoiden mukaan mahdollista vähentää joihinkin kymmeniin minuutteihin, kun nykyään siihen kuluu joitakin päiviä.

Ruotsissa Trafikverket on kehittänyt myös *Geokalkyl*-työkalun, jota voidaan käyttää tie- ja ratahankkeiden varhaisissa suunnitteluvaiheissa. Avoimella työkalulla voidaan vertailla eri väylälinjausten kustannus- ja ilmastovaikutuksia. Työkalu hyödyntää paikkatietoa, ja se laskee alustavat määrät väylän pohja- ja pintarakenteille, pohjanvahventamistoimenpiteille sekä esimerkiksi silloille. Työkalu vaatii toimiakseen ArcGIS- ja Excel-ohjelmistot. (Björkgren 2021)

2.3 Hiilen kulku rakentamisessa

Ihmisen aiheuttaman ilmastonmuutoksen merkittävin syy ovat kasvihuonekaasut. Ilmakehän keskilämpötila nousee hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen pitoisuuden noustessa. Esimerkiksi fossiilisista polttoaineista vapautuvat päästöt nostavat ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuksia jopa vuosisatoja. Ilmaston lämpenemistä ei siis pysty lyhyellä aikavälillä pysäyttämään, ainoastaan hillitsemään. (Arias et al. 2021)

Kasvihuonekaasuja ovat hiilidioksidin lisäksi muun muassa metaani ja alailmakehän otsoni. Kasvihuonekaasut on tapana ilmoittaa muunnoskerrointen avulla hiilidioksidiekvivalenteiksi muunnettuina. Päästöistä aiheutuva vaikutus ilmastonlämpenemiseen tarkastellaan ja ilmoitetaan yleensä sadan vuoden tarkastelujaksolle, jolloin käytetään termiä GWP100. (Arias et al. 2021)

Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan tuotteen tai palvelun elinkaarensa aikana synnyttämiä ilmastopäästöjä. *Hiilikädenjäljellä* taas tarkoitetaan sellaisia ilmastohyötyjä, jotka voidaan saavuttaa rakennuksen elinkaaren aikana ja jotka eivät syntyisi ilman hanketta. (Häkkinen et al. 2021; Ympäristöministeriö 2019)

Hiilikädenjäljen määritelmästä ei olla yksimielisiä. Esimerkiksi eurooppalaisessa standardikehyksessä hiilikädenjälki voidaan ajatella sijoitettavan moduuliin D, vaikka suuri osa käsitteen alle luettavista ilmiöistä voidaankin ottaa huomioon moduuleissa A...C. (Häkkinen et al. 2021) YM:n arviointimenetelmässä hiilikädenjälkeä ei vähennetä hiilijalanjäljestä, vaan ne esitetään rinnakkain (Ympäristöministeriö 2019).

Hiilivarastolla tarkoitetaan materiaalin sisältämää hiiltä. YM:n menetelmässä käsitettä voidaan hyödyntää vain eloperäisille materiaaleille, ei kuitenkaan fossiilisille materiaaleille. Eloperäisen materiaalin, esimerkiksi puun, alkuperän on oltava kestävästi hoidettu eikä

korjuu saa heikentää ekosysteemin luontaista hiilinielua pysyvästi. Varaston saa laskea vain kerran rakennusosan tai -tuotteen elinkaaren aikana, eli esimerkiksi osaa vaihdettaessa vähennystä ei saa tehdä uudelleen. Myös rakentamisen tai korjaamisen sivuvirrat, jotka eivät päädy hiilivarastoksi, jätetään ottamatta huomioon. (Ympäristöministeriö 2019)

Hiilinielulla tarkoitetaan ilmakehän hiilidioksidia sitovaa toimintaa. Hiilinieluja ovat esimerkiksi karbonatisoituva betoni, kasvava metsä sekä erilaiset hiilidioksidin talteenottojärjestelmät. (Ympäristöministeriö 2019)

Tutkimuksessaan Häkkinen et al. (2021) tarkastelivat hiilijalanjäljen käsitettä talonrakennuksessa. Tutkimuksessa tunnistettiin ja tarkasteltiin useita mahdollisia kädenjälkiä. Kypsyysarvioinnin perusteella materiaaleihin liittyvissä ratkaisuissa kehitettävää on erityisesti järjestelmärajoihin liittyvissä näkökulmissa, ei itse kädenjäljen laskennassa. Rakenneosien kiertotaloudessa taas merkittävimmiksi kehityskohdiksi arvioitiin skenaarioiden kelpoisuus, kun purkuvaiheessa uusien rakenneosien hiilijalanjälki saattaa olla huomattavasti nykyistä pienempi.

Esimerkiksi puun hiilivaraston suuruuden laskemisen arvioidaan olevan nykyisin hyvällä tasolla, mutta varaston ajallisen rajallisuuden huomioon ottamista olisi vielä huomattavasti kehitettävä (Häkkinen et al. 2021). Luonnonvarakeskus ja Suomen ympäristökeskus selvittävät hiilivarastojen huomioon ottamista puurakentamisen päästölaskennassa. Kesäkuussa 2021 lausuntokierroksella olleessa YM:n vähähiilisyyden arviointimenetelmän luonnoksessa puun hiilivarastona hyödyntämisen ehtona on, että puu on osa rakennusta vähintään 100 vuotta (Ympäristöministeriö 2021b). YM:n arviointimenetelmässä laskenta tehdään vain rakenteen ensimmäiselle 50 vuodelle. On syytä ottaa huomioon, että arvostelujakso ei ole sama kuin rakenteen suunniteltu tai todellinen käyttöikä.

Betonituotteiden osalta kädenjälkenä voidaan ajatella betoniin karbonatisoitumisessa sitoutuvaa hiiltä (CEN/TR 17310 2019). Toisaalta standardin CEN/TR 17310 (2019) mukaan karbonatisoituminen kuuluisi jaotella sen tapahtumisajankohdan mukaisiin elinkaarimoduuleihin. Ilmiön laajempi hyödyntäminen vaatii vielä kehitystyötä karbonatisoitumista nopeuttavien teknologioiden osalta (Häkkinen et al. 2021). Betonirakentamisessa karbonisoituminen on perinteisesti otettu huomioon haitallisena tekijänä, sillä sen edetessä suojabetonin läpi raudoite alkaa korrodoitua jo matalillakin kloridikonsentraatioilla.

Muiksi mahdollisiksi kädenjäljiksi Häkkinen et al. (2021) tunnistivat esimerkiksi päästökompensaatiot, hiilidioksidin teknisen talteenoton ja tilan tarjoamisen vähäpäästöisen energian tuottamiseen. Näissä kaikissa arvioitiin olevan vielä ongelmia teknologiaan, skenaarioihin tai allokaatioihin liittyen.

2.4 Päästöt hankinnoissa

Päästöt voidaan niin yksityisissä kuin julkisissa hankinnoissa ottaa huomioon eri tavoin. Kestävän rakentamisen periaatteiden mukaisesti päästövaatimukset on kytkettävä muun muassa teknillisiin ja taloudellisiin vaatimuksiin.

On kehitetty erilaisia malleja päästöjen muuttamiseen valuutaksi, jolloin tietyt teknilliset vaatimukset täyttäviä kohteita voidaan verrata yhden summan perusteella. Ongelmaksi on osoittautunut sopivien kertoimien löytäminen. Yksi vaihtoehto voisi olla päästökauppahintojen käyttäminen, jolloin täytyisi kuitenkin kehitellä skenaariot käyttö- ja purkuvaiheen aikaisten päästöjen hinnoitteluun.

Esimerkiksi Ruotsissa Trafikverket tekee päästöohjausta hanketasolla. Päästöjä vähennetään viraston ohjeistaman aikataulun mukaisesti kohti ilmastoneutraaliutta vuonna 2045. Vertailupohjana käytetään Klimatkalkylilla laskettua vuoden 2015 päästötasoa. (Trafikverket 2021b)

Yksi keino vähentää rakentamisen päästöjä on erikseen tukea tai vaatia tiettyjen materiaalien käyttöä, kuten on tehtykin talonrakentamisen puolella (Ympäristöministeriö 2021a). On kuitenkin esitetty, että tällainen poissulkeva poliittinen ohjaus hidastaa materiaali- ja rakennusteollisuuden tuotekehityspanoksia etenkin muilla materiaaleilla (RTT 2020).

EU:n rakennustuoteasetusta ollaan päivittämässä. Rakennustuotteen suoritustasoilmoituksen (DoP) osaksi on tarkoitus ottaa elinkaaren aikaiset nettopäästöt ulkoympäristöön ja luonnonvarojen kestävä käyttö. Hiilijalanjäljen laskennan kannalta suoritustasoilmoitukseen sisällytettäisiin siis GWP-total ja eloperäinen hiili. Myös uusiutumattomien luonnonvarojen ehtyminen (ADP) kuuluisi suoritustasoilmoitukseen. (Ilomäki 2021) Asetuksen päivityksestä ei ole julkaistu tarkempaa tietoa tai aikataulua.

3. VÄYLÄINFRASTRUKTUURIN ILMASTOPÄÄSTÖT JA -TAVOITTEET

3.1 Ilmastotavoitteet Pohjoismaissa

3.1.1 Euroopan unioni

Euroopan unioni on sitoutunut olemaan ilmastoneutraali vuoteen 2050 mennessä. Vuoteen 2030 mennessä on tarkoitus vähentää päästöjä 40 % vuoden 1990 tasosta. Lokakuussa 2020 Euroopan parlamentti hyväksyi omalta osaltaan tavoitteen tiukentamisen 60 prosenttiin. (Euroopan parlamentti 2021) Heinäkuussa 2021 julkaistun Euroopan komission säädösehdotuspaketin tarkoituksena on EU:n tavoitteen kiristäminen niin, että vuonna 2030 päästöjä on vähennetty 55 % vuoden 1990 tasosta (Työ- ja elinkeinoministeriö 2021).

Euroopan unionin päästöistä 40 prosenttia kuuluu päästökaupan piiriin. Välitavoitteena vuodelle 2030 on vähentää päästökaupan piiriin kuuluvia päästöjä 43 % ja päästökaupan ulkopuolisia 30 % vuoden 2005 tasosta. Päästökaupan ulkopuoliset päästöt, 60 prosenttia kokonaispäästöistä, aiheutuvat esimerkiksi liikenteestä, maataloudesta, rakentamisesta ja jätehuollosta. (Euroopan parlamentti 2021)

Vuonna 2021 EU:ssa on noussut jälleen esiin kysymys metsien hiilinielujen hyödyntämisestä osana ilmastopolitiikkaa. Euroopan unionin metsät sitovat EU:n kasvihuonepäästöistä 8,9 %, ja uudella lainsäädännöllä pyritään tasaamaan metsäkadon aiheuttamia päästövaikutuksia velvoittamalla jäsenmaat kompensoimaan maankäytön muutoksista johtuvat päästöt (Euroopan parlamentti 2021).

Euroopan unionin tavoitteena on sitoa rahan saatavuus ja hinta investointikohteen ympäristöystävällisyyteen. Tavoitetta varten luodaan kestävän rahoituksen luokittelujärjestelmä eli taksonomia. EU:n taksonomia-asetus tuli voimaan heinäkuussa 2020. Taloudellisen toiminnan ympäristövaikutuksia on tarkoitus arvioida kuuden eri ympäristötavoitteen näkökulmasta: (Vuorinen 2021)

- ilmastonmuutoksen hillintä,
- ilmastonmuutokseen sopeutuminen,

- vesivarojen ja merten tarjoamien luonnonvarojen kestävä käyttö ja suojelu,
- siirtyminen kiertotalouteen,
- ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen ja vähentäminen sekä
- luonnon monimuotoisuuden ja ekosysteemien suojelu ja ennallistaminen.

Kestävän taloudellisen toiminnan on merkittävästi edistettävä vähintään yhtä tavoitteista haittaamatta muita tavoitteita. Taksonomiauudistus on tarkoitus saattaa voimaan vuoden 2022 alusta, jolloin mukana olisivat ilmastonmuutoksen hillintään ja sopeutumiseen liittyvät tavoitteet tarkempine kriteereineen. Neljän muun ympäristöasetuksen tekniset kriteerit on tarkoitus julkaista vuoden 2021 lopulla ja niiden soveltaminen alkaisi vuoden 2023 alusta. Aluksi taksonomian piiriin kuuluisivat yli 500 työntekijän pörssiyhtiöt, pankit ja vakuutusyhtiöt. Myöhemmin taksonomia on tarkoitus laajentaa muihinkin elinkeinoelämän toimijoihin. Yhteiskuntavastuun osalta taksonomia sisältää ns. minimisuojatarkastelun, jolloin ympäristötavoitteita ei voida laittaa ihmisoikeuksien edelle. (Vuorinen 2021)

Kiinteistö- ja rakennussektorilla luokittelujärjestelmän kriteereistä korostuvat energiatehokkuus ja vähähiilisyys. Muut alalle merkittävät kriteerit liittyvät kiertotalouteen, pitkäaikaiskestävyyteen ja elinkaaren pidentämiseen. (Vuorinen 2021) Kriteereissä on paljon yhtäläisyyksiä muihin ilmastonmuutoksen hidastamiseen ja luonnonvarojen järkevään käyttöön liittyviin toimenpiteisiin. Taksonomiauudistus ei siis niinkään luo tyhjästä uusia vaatimuksia esimerkiksi rakennusalalle, vaan selkeyttää ilmasto- ja ympäristötavoitteiden huomioimista yritys- ja sijoitustoiminnassa.

Pohjoismaista Suomi, Ruotsi ja Tanska kuuluvat EU:hun. Näiden maiden ja Norjan kansallisia tavoitteita väyläinfrastruktuurin ilmastopäästöihin liittyen käsitellään seuraavissa alaluvuissa.

3.1.2 Suomi

Suomen tavoitteena on olla ilmastoneutraali valtio vuoteen 2035 mennessä ja hiilinegatiivinen 2040-luvulla. Ympäristöministeriössä kehitetään vähähiilisen talonrakentamisen ohjausta, johon liittyvän lainsäädännön on tarkoitus tulla voimaan vuonna 2025. (Ympäristöministeriö 2021b) Hankkeeseen liittyvä vähähiilisyyden arviointimenetelmä julkaistiin vuonna 2019 ja käyttöönotettavan kansallisen päästötietokannan ensimmäinen versio keväällä 2021. Lainsäädäntöä ja menetelmää kehitetään yhteistyössä teollisuuden ja muiden rajapintojen kanssa. Vähähiilisyyden arviointimenetelmän päivityksen luonnosversio lähetettiin kommenttikierrokselle kesäkuussa 2021 (Ympäristöministeriö 2021b).

Väyläviraston tulossopimuksessa (2021) on määritelty nykyistä hallitusohjelmaa toteuttavat tulostavoitteet vuosille 2020-2023. Tulostavoitteen *Parannamme liikennejärjestelmän energiatehokkuutta ja lisäämme kestävän liikenteen houkuttelevuutta* ensimmäinen mitta-

ri ja siihen liittyvät tavoitetasot vuosittain on esitetty taulukossa 3.1. Mittari liittyy läheisesti infrarakentamisen päästöjen vähentämiseen. Väyläviraston vuoden 2020 tilinpäätöksen (Väylävirasto 2021c) mukaan vuoden 2020 tavoitteet ovat toteutuneet. Vuoden 2021 tilinpäätöstä ei ole vielä saatavilla. Vuoden 2021 tavoitteet ovat kuitenkin sen verran laveita, että ne ovat oletettavasti toteutuneet: vähintään kahden asian valmistelu, tuottaminen tai tunnistaminen riittää oikeuttamaan tavoitteiden monikkomuodot.

Taulukko 3.1. *Kestävän liikenteen tavoitetasot väylänpidolle Väyläviraston tulossopimuksessa (VN/2753/2020-LVM-13 2021)*

Tulostavoite: **1.1 Parannamme liikennejärjestelmän energiatehokkuutta ja lisäämme kestävän liikenteen houkuttelevuutta**	
Mittari: *1.1.1 Liikenteen päästövaikutuksien huomioiminen väylänpidon ja liikennejärjestelmän suunnittelussa sekä hankesuunnittelussa ja -arvioinnissa (tarkentuu hallinnonalan yhteisenä)*	
2020	On tutkittu mahdollisuuksiamme edistää fossiilitonta tieliikennettä (infra latausalustana esiselvitys jne.) ja edistetty liikennejärjestelmän päästötutkimusta osana hallinnonalan ”fossiiliton liikenne” -työtä Hankesuunnittelussa on määritetty hankkeiden päästövaikutukset tuoden ne esille päätöksentekoon (hankearvioinnin perustelumuistiot) On lisätty asiantuntemusta olemassa olevan verkon vaikutuksista liikenteen päästövähennysmahdollisuuksiin On edistetty ilmasto- ja energiatavoitteiden sisällyttämistä väylien rakentamishankkeisiin ja pyritty käyttämään laajemmin päästövähennyskannustimia kunnossapidossa
2021	On valmisteltu Väyläviraston vastuulla olevia Fossiilittoman liikenteen tiekartan toimenpiteitä. On tehty tieverkon sähköistämiseen liittyvää jatkoselvittelyä. On tuotettu ajantasaista tietoa väyläverkon sopeutumisesta ilmastonmuutokseen. On tuotettu tietoa liikenteen päästöjen arvioinnista osana väylänpidon toimenpiteiden arviointia. On tunnistettu tehokkaita päästövähennystoimia väylien kunnossapidossa ja rakentamisessa. On tunnistettu sellaisia väyläverkon toimenpiteitä, joilla edistetään Fossiilittoman liikenteen tiekartan muiden toimenpiteiden toteutumista.

2022	On otettu käyttöön päästövähennystoimia kunnossapidossa ja rakentamisessa osana Liikenne 12 -suunnitelman toimeenpanoa. On toimeenpantu v. 2020 valmistuvan fossiilittoman liikenteen tiekartan toimenpiteitä. On toteutettu sähkötiepilottihankkeen esisuunnittelua. On tunnistettu keskeisiä väyläverkon toimenpiteitä, joilla edistetään liikennejärjestelmän sopeutumista ilmastonmuutoksen suoriin ja välillisiin vaikutuksiin. On otettu rakentamisen aikaiset päästöt osaksi hankearviointia. On otettu liikenteen päästöjen arviointi osaksi pienten parantamishankkeiden arviointia. On tunnistettu ja edistetty väyläverkkojen tärkeimpiä toimenpiteitä päästövähennysten edistämiseksi eri suunnittelun tasoilla.
2023	On huomioitu päästövähennystoimien vaikuttavuus osana kunnossapidon ja rakentamisen toimenpiteiden ohjelmointia. On toimeenpantu v. 2020 valmistuvan fossiilittoman liikenteen tiekartan toimenpiteitä. On aloitettu sähkötiepilotin hankesuunnittelu. On otettu liikenteen päästöjen arviointi ja rakentamisen aikaisten päästöjen arviointi osaksi väylänpidon toimenpiteiden arviointia eri tasoilla. Päästöjen vähentäminen on osa väyläverkkojen toimenpiteiden priorisointia ja toimeenpanoa.

Päästöjen arviointi hankkeissa aloitetaan tulostavoitteiden mukaan vuonna 2022 rakentamisen aikaisten päästöjen huomioimisella. Rakentamisen ja liikenteen päästöjen arviointi on tavoitteena ottaa käyttöön osaksi väylänpidon toimenpiteiden arviointia eri tasoilla. (VN/2753/2020-LVM-13 2021) Väyläviraston päästötietokanta julkaistaneen vasta syksyllä 2021 ja arviointimenetelmää kehitetään erillisellä aikataululla (Häkkinen ja Pesu 2021). Siten rakentamisen aikaisten päästöjen kattava huomiointi edes hankearvioinnissa vuoden 2022 puolella vaikuttaa hieman optimistiselta. Rakentamisen aikaiset päästöt vastaavat informaatiomoduuleja A4 ja A5. Usein rakentamisen päästöihin luetaan myös tuotevaiheen päästöt A1...A3. Tietokantatyö keskittyy nimenomaan A-moduuleihin (Häkkinen ja Pesu 2021).

Suomessa rakennusalan kasvihuonepäästöt ovat noin 35 % koko maan päästöistä ja vastaavaasti 40 % energiankulutuksesta. (Tuominen et al. 2020) Liikenneviraston selvityksen (2012) mukaan liikenneverkon vuosittaisista 11 773 CO_2e-kt päästöistä infrastruktuurin osuus on 803 CO_2e-kt eli 6,8 prosenttia. Tieliikenteen kokonaispäästöiksi arvioitiin 8 777 CO_2e-kt, josta infrastruktuurin osuus oli 511 CO_2e-kt. Rataliikenteen kokonaispäästöiksi arvioitiin 457 CO_2e-kt, josta infrastruktuurin osuus oli 142 CO_2e-kt. Kyseinen tieto on koh-

ta vuosikymmennen takaisesta tilanteesta. Siltojen osuutta liikenneverkkojen päästöistä ei ole erikseen arvioitu.

Rakennusteollisuus ry:n teettämän selvityksen (2020) mukaan rakennetun ympäristön vuosittainen hiilijalanjälki on 17 092 CO_2e-kt, josta materiaalien ja työmaatoimintojen osuus on 4 085 CO_2e-kt. Liikenneverkkojen rakentamisen materiaalipäästöjen osuudeksi on arvioitu 434 CO_2e-kt eli 2,5 prosenttia. Päästöistä valtaosa, 356 CO_2e-kt, aiheutuu betonista. Kun huomioon otetaan kuljetus- ja työmaatoimintojen selvityksessä arvioidut päästöt, on liikenneverkkojen osuus rakennetun ympäristön päästöistä 1035 CO_2e-kt eli 6,1 prosenttia. Selvityksen materiaalimäärät ovat teollisuuden arvioita. (Laine et al. 2020) Tulos on samassa kertaluokassa kahdeksan vuotta vanhemman Illman et al. (2012) arvion kanssa, vaikkakin puolet suurempi.

Liikenne- ja viestintäministeriön päästöohjaus keskittyy lähinnä ajoneuvojen päästöjen vähentämiseen. Väylävirasto on aloittanut kuitenkin vuonna 2021 infrarakentamisen kansallisen päästötietokannan kehittämisen. Tietokannan ja ohjausmenetelmien kehittämisessä hyödynnetään mahdollisuuksien mukaan YM:n alaisuudessa tehtyä kehitystyötä. (Saarniaho et al. 2021)

3.1.3 Ruotsi

Ruotsin tavoitteena on olla ilmastoneutraali yhteiskunta vuoteen 2045 mennessä. Valtio on sitoutunut sekä Pariisin ilmastosopimukseen 2016 että EU:n päästövähennystavoitteisiin. Väyläinfrastruktuuria hallinoiva Trafikverket on vaatinut ilmastoasioiden huomioimista hankkeissaan jo usean vuoden ajan.

Talonrakennuksessa ilmastoselvityksestä tulee lakisääteinen vuonna 2022. Rakennusten päästöjen raja-arvot otetaan käyttöön vuonna 2027 ja niitä on tarkoitus tiukentaa vuosina 2035 ja 2043. Tällä hetkellä päästörajoihin on tarkoituksena ottaa mukaan vain investointivaiheen päästöt A1...A5. (Kuittinen 2021)

Liikenteen kokonaispäästöiksi arvioidaan noin 27 000 CO_2e-kt vuodessa. Tieinfran osuus tästä on noin 1 800 ja ratainfran noin 600 CO_2e-kt vuodessa. Trafikverketin omien tieväylien osuus on noin 800 ja rataväylien 400 CO_2e-kt vuodessa. (Trafikverket 2021c)

Trafikverket on ohjeessaan *Klimatkrav i planläggning byggskede underhåll och på teknisk godkänt järnvägsmateriel* esitellyt suuntaviivoja, joilla valtion ilmastotavoitteisiin päästään. Tavoitteena on, että liikenneinfrastruktuuri on ilmastoneutraalia vuoteen 2045 mennessä. Tavoitteisiin pyritään vähentämällä päästöjä vähintään 15 % vuoteen 2020, 30 % vuoteen 2025 ja 50 % vuoteen 2030 mennessä verrattuna Klimatkalkylin vuoden 2015 tasoon. Tavoitteita suuremmista päästövähennyksistä palkitaan bonuksella. (Trafikverket 2021b)

Päästövähennyksissä Trafikverket ottaa huomioon vain todelliset vähennykset urakkaan kuuluvan rakentamisen sekä siinä käytettävien materiaalien päästöissä. Päästöoikeuskauppaa tai muita kompensaatioita ei siis lasketa mukaan vähennyksiin. Vaatimusten mukaiset päästöt on todennettava. (Trafikverket 2021b)

Suuntaviivat koskevat niin uudis- kuin korjausrakentamista sekä ylläpitoa. Ohjeistus koskee täysimääräisenä vähintään 50 miljoonan kruunun uudisprojekteja. Alle 50 miljoonan kruunun uudisprojekteissa ja kaikissa korjausprojekteissa vaatimukset koskevat käytettäviä materiaaleja ja polttoaineita. (Trafikverket 2021b)

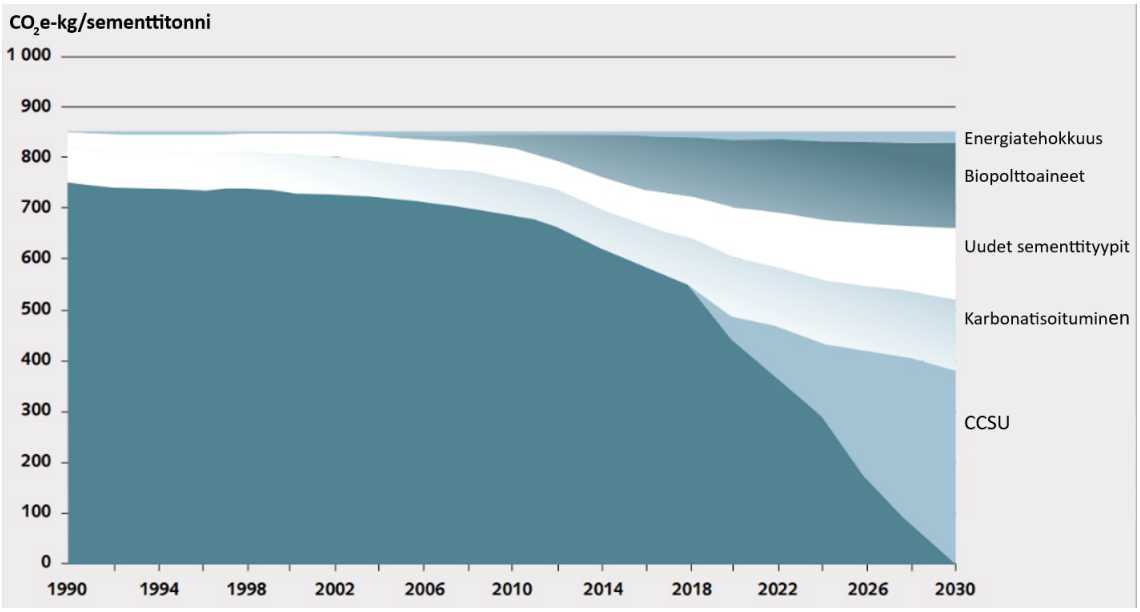
Trafikverket on kehittänyt Klimatkalkyl-työkalun infrahankkeiden elinkaarenaikaisen energiankulutuksen ja ilmastopäästöjen hallintaan. Klimatkalkyl otettiin käyttöön vuonna 2013 Excel-muotoisena ja vuodesta 2016 alkaen palvelu on ollut käytettävissä verkkoselaimella. Materiaaleihin liittyvät primäärienergiankulutus ja ilmastopäästöt otetaan huomioon päästökertoimilla. Päästökertoimet määrittää Trafikverket. (Trafikverket 2020) Klimatkalkylin tietokannasta puuttuu päästökertoimet esimerkiksi sillan vedeneristeille (Trafikverket 2021a). Tietokannan päästökertoimia betoni-, teräs- ja puurakennustuotteille on esitetty luvussa 4.

Trafikverketin ohjeessa *Klimatkalkyl- infrastrukturhållningens energianvändning och klimatpåverkan i ett livscykelperspektiv* (2018) kuvataan, missä väyläkohteen elinkaarivaiheissa Klimatkalkylia käytetään ja miten. Lisäksi ohjeessa kerrotaan laskentamenetelmästä, järjestelmärajoista ja päästöarvioinnin yhdistämisestä esimerkiksi kustannusarvioon. Ohjeen mukaan päästölaskenta on suoritettava hankearvioinnin jälkeen sekä useamman kerran tie- tai ratasuunnitelmaa tehtäessä, samoissa vaiheissa kuin kustannusarviotkin. Rakennussuunnitteluvaiheen lopuksi laskelma päivitetään tavallisesti viimeisen kerran. Hankkeen valmistuttua ilmastoselvitys tehdään toteutuneiden tuotteiden EPD:en mukaisesti. SR-urakassa (*suunnittele ja rakenna*) viimeinen Klimatkalkyl-laskelma tehdään ennen urakan alkua. (Trafikverket 2018)

Osana Fossilfri Sverige -hanketta eri teollisuuden alat ovat tehneet tiekarttoja, miten tavoitteisiin päästään. Rakennusala pyrkii kääntämään päästöjen kehittymisen laskuun vuoteen 2025 mennessä ja vähentämään päästöjään vähintään 50 % vuoteen 2030 ja 75 % vuoteen 2040 mennessä verrattuna vuoteen 2015 (Elmsäter-Svärd et al. 2018).

Betoniteollisuus lupaa markkinoille ilmastoneutraalia betonia vuoteen 2030 mennessä (Axelsson 2018). Betoni- ja sementtiteollisuus esittävät hiilineutraaliustavoitteiden toteutumisen vaativan hiilidioksidin talteenottoa, käyttöä ja varastointia (Axelsson 2018, Cementa AB 2018).

Paikallisen betoni- ja rakennusteollisuuden, Lundin yliopiston ja Trafikverketin yhteisessä BETCRETE 2.0 -hankeessa pyritään selvittämään, miten betoni todella olisi nollapäästöistä vuonna 2030. Kuvassa 3.1 on esitetty aiotut päästövähennyskeinot aika-päästö-



Kuva 3.1. *Ruotsalaisen BETCRETE 2.0 -hankkeen toimenpiteet ja aikataulu sementin päästöjen vähentämiselle. (Lindgren ja Malaga 2021, suomennettu)*

kuvaajassa toimenpiteittäin. Kuvassa ylimmät kaksi verhoa kuvaavat energiankäytön päästövähennyksiä, kolmanneksi ylin uusien sementtityyppien (esim. CEM III) päästövähennyksiä ja neljänneksi ylin karbonatisoitumisen huomioimisen vaikutusta. Alin verho kuvaa betonin päästöjen kehittymistä Ruotsissa. Väliin jäävä kolmio kuvaa hiilidioksidin talteenoton, varastoimisen ja käytön (CCSU) avulla tavoiteltavia päästövähennyksiä. (Lindgren ja Malaga 2021) Kuvasta voidaan nähdä, että betoniteollisuus haluaa pitäytyä nimenomaan varsin hyvin tunnettujen betonien valmistuksessa: noin puolet päästöistä on tarkoitus poistaa CCSU-teknologialla. Tätä teknologiaa käsitellään alaluvussa 4.2.6.

3.1.4 Tanska

Tanskan valtio pyrkii hiilineutraaliuteen vuoteen 2050 mennessä. Maa on sitoutunut vuoden 2016 Pariisin ilmastokokouksen tavoitteisiin. Tanskan ilmastolain mukaan kasvihuonepäästöjen täytyy pienentyä vuoteen 2030 mennessä 70 % vuoden 1990 tasosta. (Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet 2020)

Talonrakennuspuolella päästörajat tulevat portaittain tiukentuen voimaan vuosina 2023-2029. Lisäksi on käytössä vapaaehtoinen kestävän kehityksen sertifikaatti, jonka tavoitteet ovat raja-arvoja huomattavasti kunnianhimoisempia ja laaja-alaisempia. Tanskassa kehitetään ja ylläpidetään kansallista päästöjen ja elinkaarikustannusten laskentatyökalua. (Kuittinen 2021)

Tanskassa ei ole yhtä väyläviranomaista, vaan Vejdirektoratet vastaa pääteiden infrastruktuurista ja Banedanmark ratainfrastruktuurista. Tieliikenteen päästöiksi on arvioitu noin 11 000 CO_2e-kt vuodessa. Näistä päästöistä 391,4 CO_2e-kt eli 2,6 % arvioidaan ai-

heutuvan uuden infran rakentamisesta ja 313,5 CO_2e-kt eli 2,9 % infran huollosta ja ylläpidosta. Merkittävimmiksi päästövähennyskeinoikseen Vejdirektoratet arvioi vähähiilisen asfaltin ja betonin kehittämisen sekä LED-valaistukseen siirtymisen ja sähköautojen latausverkon laajentamisen. (Vejdirektoratet 2020) Ratapuolen päästöiksi arvioitiin vuonna 2020 kokonaisuudessaan 72 CO_2e-kt, josta infran osuus oli 60 CO_2e-kt (Banedanmark 2021).

Vejdirektoratet kehitti VejLCA-laskentapalvelun vuonna 2020, ja se julkaistiin alkukesästä 2021 (Vejdirektoratet 2021). Kesällä ohjelman nimeksi vaihdettiin InfraLCA ja myös rataviranomainen Banedanmark tuli sen käyttäjäksi ja kehittäjäksi. Se on tällä hetkellä täysin Excel-pohjainen. Työkalu sisältää päästökertoimet päästöjen arvioimiseen moduuleissa A1...A5 ja B4...B5, huolto ja ylläpito. Siitä, milloin työkalua aletaan käyttämään hankkeissa, ei ole vielä tietoa. (InfraLCA 2021) Periaatteiltaan InfraLCA on samankaltainen kuin ruotsalinen Klimatkalkyl ja norjalainen VegLCA, joista jälkimmäistä se muistuttaa erityisen paljon myös ulkonäöltään.

3.1.5 Norja

Norja pyrkii valtiona hiilineutraaliuteen vuoteen 2050 mennessä. Jos myös muut maat ottavat tiukemman tavoitteen, pyrkii Norja hiilineutraaliuteen vuoteen 2030 mennessä. Norja aikoo yhteistyössä EU:n kanssa vähentää kasvihuonepäästöjä 40 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä (Norjan hallitus 2021).

Norjassa julkisten teiden ylläpidosta vastaa Statens Vegvesen. Vuonna 2016 perustettiin uusista tiehankkeista vastaava Nye Veier AS, joka on täysin Norjan liikenneministeriön omistama yhtiö.

Suuriksi päästölähteiksi tunnistetuilta materiaaleilta, kuten betonilta ja teräkseltä, vaaditaan ympäristöselosteita. Kaikille uusille tiehankkeille asetetaan ilmastobudjetti, jota myös seurataan. Laskennassa käytetään VegLCA-palvelua. Kaikki yli 200 miljoonan kruunun hankkeet on lisäksi sertifioitava CEEQUAL-menetelmän mukaisesti. (Statens vegvesen 2021a)

Vuonna 2020 Statens vegvesen arvioi tieliikenteen kokonaispäästöiksi 8 500 CO_2e-kt. Tiehankkeiden arvioitiin aiheuttaneen noin 350 CO_2e-kt päästöt. Tieinfrastruktuurin ylläpidosta arvioitiin aiheutuneen 150...180 CO_2e-kt päästöt. Statens vegvesen pyrkii vähentämään sekä rakentamisen että ylläpidon päästöt puoleen vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2020 tasoon. (Statens vegvesen 2021a)

Tieinfran päästöjen arviointiin tarkoitettu VegLCA on samankaltainen työkalu kuin Ruotsin Klimatkalkyl. Se on täysin Excel-pohjainen. Sen avulla voidaan arvioida rakentamisvaiheen päästöt A1...A5 ja ylläpidon päästöt B4...B5. Statens vegvesen määrittää päästökertoimet ja työkalua päivitetään aktiivisesti. Myös hankekohtaisia päästökertoimia voi-

daan asettaa. (Statens vegvesen 2021b)

Julkisten rautateiden kehittämisestä vastaa Jernbanedirektoratet. Infrastruktuurin omistaa ja sitä hallinnoi viraston alainen valtionyhtiö Bane NOR SF, joka on perustettu vuonna 2017. Rautatieinfrastruktuurin rakentamisen päästöiksi vuonna 2020 arvioitiin 43,75 CO_2e-kt. Ylläpidon ja rautatieliikenteen päästöjen määräksi arvioitiin noin 50 CO_2e-kt vuodessa. (Jernbanedirektoratet 2021)

Jernbanedirektoratet ja Bane NOR ovat kehittäneet työkalua rautatiehankkeen päästöjen ja energiankulutuksen laskentaan varhaisissa suunnitteluvaiheissa. Työkalua koekäytettiin kolmessa hankkeessa vuonna 2020. (Jernbanedirektoratet 2021)

3.2 Pohjoismainen yhteistyö

Suomen, Norjan ja Ruotsin tieviranomaisten ETSI-yhteistutkimushankkeessa tutkittiin siltoja niiden koko elinkaaren kannalta. Nimi *ETSI* tulee käsitteestä *Elinkaareltaan Tarkoituksen mukainen SIlta*. Hanke oli kolmiosainen ja sitä koordinoi Teknillinen korkeakoulu, vuodesta 2010 alkaen nimellä Aalto-yliopisto. Hankkeen ensimmäinen vaihe alkoi vuonna 2006. Toinen vaihe aloitettiin vuonna 2007. Kolmas vaihe aloitettiin vuonna 2009, ja silloin mukaan tuli myös Tanskan Vejdirektoratet.

Ensimmäisessä ETSI-projektissa keskityttiin elinkaarikustannuksiin (Jutila ja Sundquist 2007). ETSI II -projektissa tarkasteltiin kustannusten lisäksi myös ympäristöasioita ja siltaestetiikkaa. Kaikkiin kolmeen tarkasteluun kehitettiin laskennalliset mallit (Salokangas 2009).

ETSI III -projektissa (2013) aiemmissa vaiheissa luotua tietämystä sillan elinkaaresta kehitettiin eteenpäin. Projektissa tutkitussa jälkijännitetyssä betonisillassa materiaalien tuotannon osuus kasvihuonepäästöistä oli noin 55 % ja betonin purkuvaiheen jälkeisten päästöjen osuus 29 %. Projektissa muut materiaalit kuin betoni oletettiin kierrätettävän täysin sillanrakennuksessa, kun taas betonin ajateltiin päätyvän tienpohjaksi, mitä ei päädytty hyödyntämään sillan päästöjen vähentämisessä (COWI 2012).

Vuonna 2017 alkaneessa NordLCA-hankkeessa suomalainen, ruotsalainen ja norjalainen väyläviranomainen sekä kolme konsulttiyritystä pyrkivät luomaan yhteiset käytännöt väylähankkeiden päästölaskentaan. Hankkeen aluksi tehtiin tilannekatsaus päästölaskennan tilasta. NordLCA-projektin lopputuloksena kirjoitettiin yhteispohjoismaalaiset periaatteet päästöjen huomioimisesta väylähankkeissa. Lopputuotoksen suomenkielinen versio julkaistiin Väyläviraston julkaisuna 64/2020 *Tie- ja ratainfrastruktuurin elinkaariarvioinnin opas*. (Väylävirasto 2020b)

NordLCA-hanketta jatkettiin vuonna 2021 NordLCA+-hankkeessa, jossa alkanutta yhteistyötä pyritään kehittämään eteenpäin. Hankkeen on tarkoitus päättyä vuonna 2023.

(Saarniaho 2021)

Muista pohjoismaisista yhteisistä tutkimushankkeista mainittakoon DuraTB, jossa tutkittiin puusiltojen kestävyyttä olosuhderasituksia vastaan ja niiden käyttöiän pidentämistä. Projektissa oli mukana suomalaisia, ruotsalaisia, norjalaisia sekä yhdysvaltalaisia väyläviranomaisia, yliopistoja, tutkimuslaitoksia, yrityksiä ja teollisuuden etujärjestöjä. (Pousette et al. 2017) Hankkeen tuloksia käsitellään tarkemmin tämän työn luvussa 4.

Pohjoismaisten talonrakentamisesta vastaavien ministeriöiden yhteinen *NordicLCA*-hanke on käynnissä vuodet 2021-2024. Suomen osalta hankkeessa on mukana Ympäristöministeriö. Ministerien tahtotilana on luoda yhteispohjoismainen rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmä. Kantavia ideoita hankkeessa on digitaalisuuden edistäminen. Hanke on jaettu kuuteen osatehtävään (Kuittinen 2021)

1. pohjoismaiset käytännöt, miten pitkälle harmonisoidaan;
2. tietokannat ja skenaariot, käyttöliittymät;
3. digitalisaatio, LCA osaksi BIM-suunnittelua, harjoittelualustat;
4. raja-arvojen luonti;
5. kapasiteetin rakentaminen koulutuksia varten;
6. hallinto, verkostoituminen ja koordinaatio (YM:n koordinoima).

Nordisk vejforum (NVF) eli *Pohjoismainen tie- ja liikennefoorumi (PTL)* on pohjoismaisten tie- ja liikennealan toimijoiden yhteistyöjärjestö. NVF on jakautunut eri ryhmiin, jotka kokoontuvat kukin muutaman kerran vuodessa. Tämän työn kannalta mainitsemisen arvoisia työryhmiä ovat siltoja ja ilmastovaatimuksia julkisissa hankinnoissa käsittelevät työryhmät. (NVF 2021)

Pohjoismainen betoniliitto NCF (*Nordic Concrete Federation*) on yhteispohjoismainen betonialan yhteistyöjärjestö. Järjestön Research Council toimii *Sciendon* julkaiseman kahdesti vuodessa ilmestyvän tieteellisen julkaisun *Nordic Concrete Research* tieteellisenä komiteana. Viiden pohjoismaan betoniteollisuudet myös koordinoivat esimerkiksi standardityötään järjestön kautta. (NCF 2021)

3.3 Siltojen osuus väylien päästöistä

Väylävirasto on teettänyt 2010-luvulla LCA-laskelmia muutamissa pilottiprojekteissa. Seuraavassa arvioidaan neljän päästöarvioidun hankkeen kautta sillanrakentamisen osuutta infrahankkeen kokonaispäästöistä Suomessa. Kolme hankkeista on tiehankkeita ja yksi ratahanke.

Uusi silta rakennetaan joko osana uutta tie- tai ratalinjausta tai korvaamaan vanha silta. Sillanrakentamisen osuus päästöistä vaihtelee siis hankkeittain. Tässä alaluvussa jäte-

tään yksittäisen sillan uusiminen triviaalina tapauksena pois, sillä tällaisessa hankkeessa kaikki tai vähintään suurin osa päästöistä aiheutuu sillanrakentamisesta.

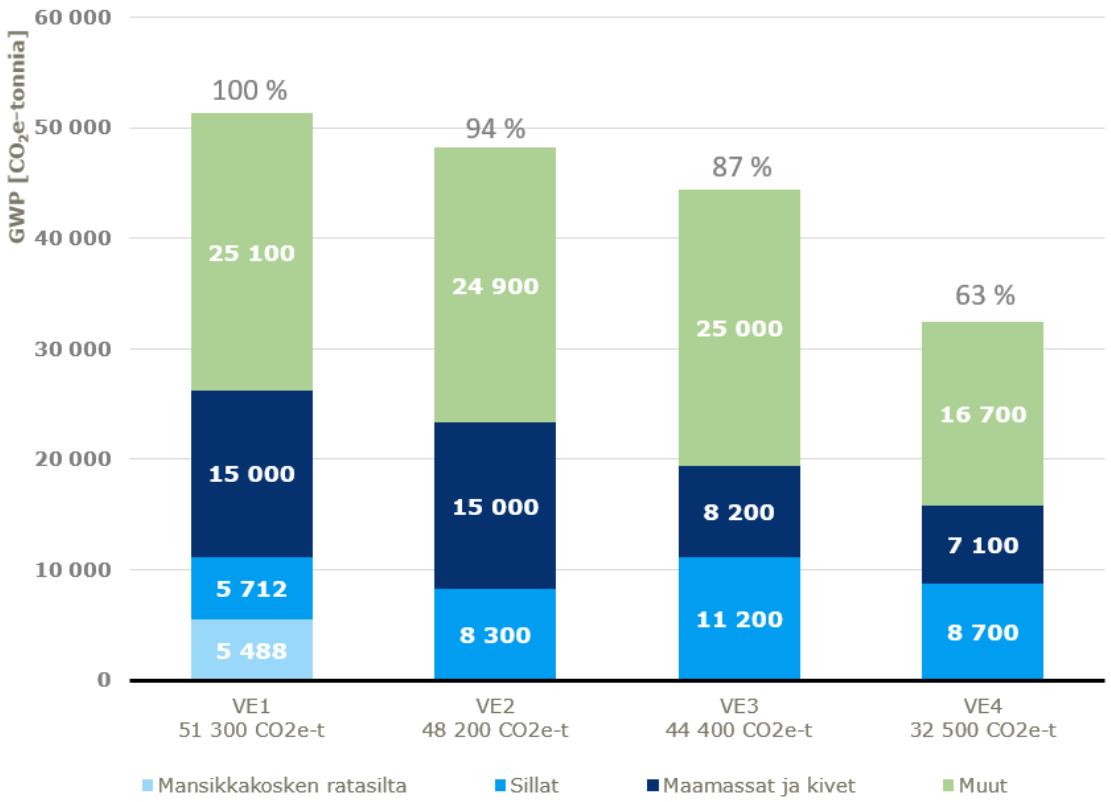
Kaikki tarkasteltavat hankkeet ovat Väyläviraston tai sen edeltäjien projekteja. Myös kunnat omistavat siltoja. Kuntien omistuksessa oli vuonna 2017 noin 3 100 siltaa (Pulkkinen et al. 2018). Myös muut kuin valtion omistamat sillat suunnitellaan yleensä Väyläviraston ohjeiden mukaisesti. Suurimmilla kaupungeilla on myös Väyläviraston ohjeita täydentäviä tai tiukentavia suunnitteluohjeita. Voidaan siis olettaa, että siltojen päästöt eivät ainakaan merkittävästi eroa tilaajien välillä.

Suomessa on valtion maanteitä noin 78 000 kilometriä ja rautatietä noin 6 000 kilometriä (Väylävirasto 2021c). Vastaavasti valtion omistamia tieliikenteen siltoja oli vuonna 2020 noin 15 000 kappaletta ja rautatiesiltoja noin 6000 (Väylävirasto 2021b). Näin ollen voidaan karkeasti arvioida tieverkon ”siltatiheydeksi” noin 0,2 siltaa tiekilometriä kohden. Rataverkon ”siltatiheydeksi” taas saadaan noin 0,4 siltaa ratakilometriä kohden.

Ensimmäisenä tarkastellaan **Luumäki-Imatra-rataosuudelle tehtyä lisäraidetta** (*LUIMA-hanke*). Raidetta rakennettiin 21 km ja hankkeeseen kuului 20 siltaa. Hankkeessa rakennettiin 17 uutta siltaa kahdelletoista siltapaikalle. Silloista pisin oli 140 metrinen Mansikkakosken ratasilta ja se tarkasteltiin elinkaariarvioinnissa myös erikseen. (Lähde et al. 2021) Hankkeen siltatiheys on siis noin 0,8 siltaa per ratakilometri. Siltojen osuus väylän pituudesta oli noin 3 prosenttia. Valtaosa, 12 kappaletta, silloista oli jännebetonisia ulokekaukalopalkkisiltoja. Siltojen pituudet ja rakennetyypit on haettu Taitorakennerekisteristä, ja ne on esitetty liitteessä A. Taitorakennerekisterin mukaan KaS-93 Mansikkakosken ratasillan kokonaispituus on 232,15 metriä. Rakenteen kolme noin 50-metristä pääaukkoa ovat jatkuvia, teräsbetonikantisia teräspalkkisiltoja ja molempien päätyjen kaksiaukkoiset, noin 30-metriset tulosillat ovat jatkuvia jännitettyjä betonisia palkkisiltoja.

LUIMA-hankkeessa tarkasteltiin väyläosuuden koko elinkaarta neljän vaihtoehtoisen skenaarion avulla. Tarkasteltavat moduulit olivat A1...A5, B4...B5, B9 ja C1...C4. Peruslaskelmassa VE1 hyödynnettiin One Click LCA:n päästötietokannan tietoja. Vaihtoehdossa VE2 nostettiin betonin sideaineiden ja teräksen kierrätysosuutta. Vaihtoehdossa VE3 tarkasteltiin kuljetusmatkojen lyhentämisen vaikutusta. Vaihtoehdossa VE4 tarkastelu tehtiin muista vaihtoehdoista poikkeavan päästötietokannan pohjalta. VE4:ssa hyödynnettiin Rapal Oy:ssä tehdyn Päästölaskennan kehityshankkeen tuloksia. (Lähde et al. 2021) Koko hankkeen päästöt eri tarkasteluvaihtoehdoilla on esitetty kuvassa 3.2.

Työn tulosten perusteella peruslaskennassa VE1 yli puolet elinkaaripäästöistä syntyy rakentamisvaiheessa. Ratakiskot, teräs ja muut metallit kuljetuksineen aiheuttivat noin kaksi viidennestä päästöistä. Noin 30 % päästöistä aiheutui maamassoista, kivistä ja niiden kuljetuksista. Mansikkakosken ratasillan osuus hankkeen peruslaskennan kokonaispäästöistä oli 12 % ja kaikkien siltojen noin 24 %. (Lähde et al. 2021)



Kuva 3.2. *LUIMA-hankkeen päästöjen muodostuminen eri tarkasteluvaihtoehdoissa. (Lähde et al. 2021, kuva tuotettu laskelman pohjalta)*

Vaihtoehdossa VE2 osa materiaaleista ja sideaineista korvattiin kierrätysmateriaaleilla tai kierrätysmateriaaleja sisältävillä materiaaleilla. Näin saavutetaan noin 6 % päästövähennys peruslaskentaan verrattuna. Terästuotteiden hiilijalanjälki pieneni kierrätysasteen nostolla noin 16 %. Vertailun perusteella betonin sideaineiden kierrätysastetta nostamalla betonin hiilijalanjälki kasvaa noin prosentin. Syyksi tälle esitetään, että sideaineiden kierrättäminen voi vaatia neitseellistä raaka-ainetta enemmän energiaa. (Lähde et al. 2021) Loppuraportissa ei ole eritelty, miten suuri osuus materiaaleista korvattiin kierrätysmateriaaleilla ja toisaalta paljonko peruslaskennassa käytettyjen tuotteiden oletettiin alunperin sisältävän kierrätysmateriaaleja. On kuitenkin vaikea keksiä klinkkerisementtiä energiaintensiivisempää sideainetta ja etenkään syytä käyttää sellaista. On varsin oletettavaa, että käytetyt yleiset arvot eivät olleet keskenään vertailukelpoisia. Niissä saattoi olla eroja esimerkiksi arviointiajankohdan ja maantieteellisen sijainnin osalta.

Vaihtoehdossa VE3 kiskojen ja raidesepelin kuljetusmatkoja lyhennettiin peruslaskentaan verrattuna. Kiskojen kuljetusmatka muutettiin peruslaskennan 1600 kilometristä 200 kilometriin ja raidesepelin 320 kilometristä 50 kilometriin. Päästöjä saatiin näin vähennettyä noin 13 %. Tarkastelu oli täysin teoreettinen, sillä ratakiskoja ei valmisteta Suomessa. (Lähde et al. 2021)

Vaihtoehdossa VE4 käytettiin peruslaskennan panostietoja, mutta päästökertoimet olivat

Rapalin julkaisemasta Päästölaskennan kehityshankkeesta. Kehityshankkeen tietoja on täydennetty VTT:n LIPASTOn yksikköpäästökertoimilla. Kehityshankkeen arvoja käytettäessä tulokset olivat 37 % peruslaskelmaa pienempiä. (Lähde et al. 2021) Päästölaskennan kehityshankkeen päästökertoimien tausta-aineistot eivät ole julkisesti saatavilla.

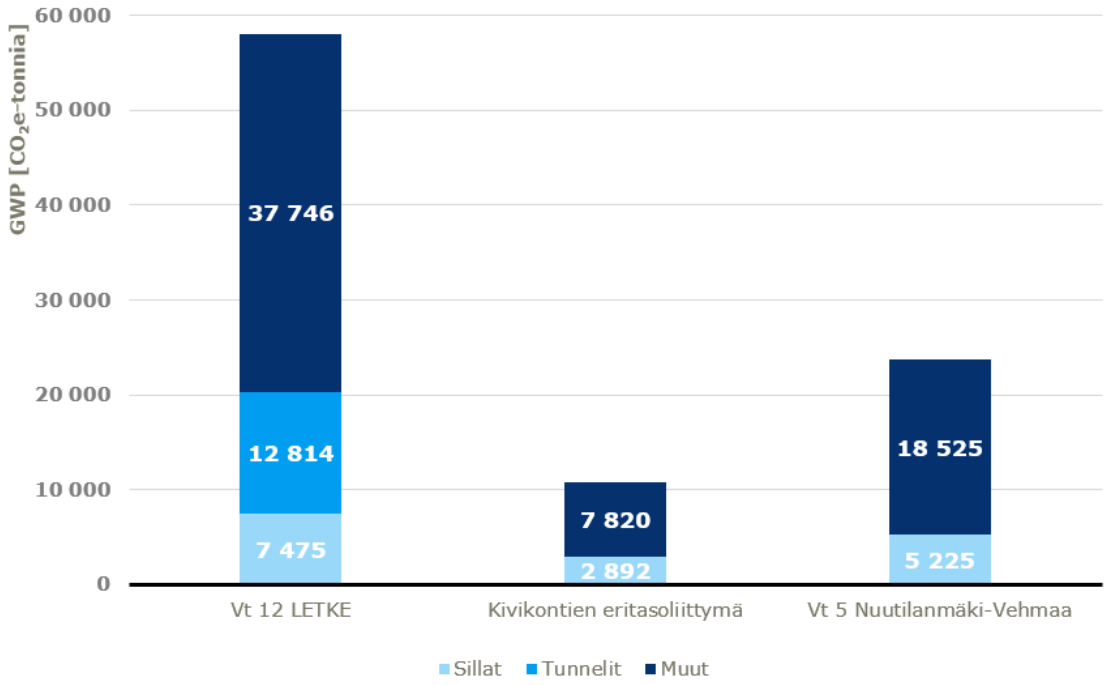
Toinen tarkasteltava kohde on **Vt 12 Lahden eteläinen kehätie -hankkeen hankeosa 1B** (*Vt 12 LETKE*), jonka toteutuksesta vastasi VALTARI-allianssi. Hankeosalle haettiin CEEQUAL-sertifiointi, jonka osana tehtiin todentava LCA-laskelma rakennusvaiheen päästöistä. Laskelma kattoi siis informaatiomoduulit A1...A5. Hankeosaan kuului 4,5 kilometriä uutta 2+2-kaistaista valtatietä sekä 2,5 kilometriä valtatietä, johon rakennettiin lisäkaistat. Hanke kattaa kolme eritasoliittymää ja kaksi tunnelia. Siltoja rakennettiin 15 kappaletta yhdelletoista siltapaikalle. Silloista seitsemän oli jännitettyjä betonisia palkkisiltoja, neljä teräsbetonisia ulokelaattasiltoja, yksi kehäsilta ja yksi teräsbetoninen holvisilta. Lisäksi rakennettiin melusuojauksia, maanteitä, katuja ja kevyenliikenteenväyliä. (Multanen 2019)

Vt 12 LETKE -hankkeen hankeosa 1B:n siltatiheys on siis noin 2,24 siltaa tiekilometriä kohden. Siltojen osuus väylän pituudesta on noin 10 prosenttia. Siltojen pituudet on haettu Taitorakennerekisteristä, ja ne on esitetty liitteessä A. Hanke on hyvä esimerkki seutukeskukseen rakennettavasta liikennettä sujuvoittavasta uudisväylästä, jossa taitorakenteiden rooli korostuu suhteessa väylän pituuteen.

Koko hankeosan päästöt olivat noin 58 305 CO_2e-tonnia, josta 53 419 CO_2e-tonnia eli noin 92 % päästöistä aiheutui materiaalien tuotannosta. Materiaalien tuotannon päästöistä sillanrakennuksesta aiheutui noin 14 %. Kahden tunnelin päästöt vastasivat 24 prosenttia hankkeen materiaalisidonnaisista päästöistä. (Multanen 2019) Koko hankkeen päästöistä sillanrakennuksesta aiheutui siis noin 15 prosenttia ja tunneleista noin 26 prosenttia. Päästöjen jakautuminen on esitetty kuvassa 3.3.

CEEQUAL-sertifikaatti edellyttää vain niiden elinkaaren vaiheiden arvioimisen, joihin tarkasteltavassa rakennushankkeessa voidaan vaikuttaa. VALTARI-allianssin laskelmassa arvioitiin siten ainoastaan moduulit A1...A5. Arvioinnin yhteydessä käsiteltiin kuitenkin sanallisesti myös muita elinkaaren vaiheita. Ylläpidon ja liikenteen arvioitiin aiheuttavan valtaosan hankeosan elinkaaripäästöistä. (Multanen 2019)

Kolmas hanke on **Kivikontien eritasoliittymä**, josta Rapal ja VTT laativat päästöselvityksen (2014). Hankkeessa parannettiin Kehä I:n ajorataa 1,5 kilometriä ja rakennettiin uusia ramppeja 1,2; katuja 2,1 ja kevyenliikenteenväyliä 3,5 kilometriä. Siltoja rakennettiin yhteensä seitsemän, kolme risteys-, yksi kevyenliikenteen ja kolme alikulkukäytäväsiltaa. Hankkeen siltatiheys oli siis noin 0,8 siltaa kilometriä kohden. Hanke toteutettiin Helsingin kaupungin ja Liikenneviraston yhteishankkeena ja siinä rakennettiin myös meluseiniä, portaita ja muita infrarakenteita. (Aulakoski et al. 2014)



Kuva 3.3. *Hankkeiden Vt 12 LETKE, Kivikontien eritasoliittymä ja Vt 5 Nuutilanmäki-Vehmaa kokonaispäästöt. (Aulakoski et al. 2014; Multanen 2019; Väylävirasto 2019)*

Hankkeessa laskettiin investointivaiheen päästöt panospohjaisesti. Laskelmissa viitattiin standardin SFS-EN 10440 vuoden 2006 versioon, jonka mukaisesti tuotteiden ja materiaalien päästöjen kerrottiin sisältäneen päästöt "kehdosta tehtaan portille". Materiaalipäästöjen lisäksi oli huomioitu kuljetusten ja työkoneiden päästöt. Voidaan siis sanoa, että päästöt oli huomioitu likimain moduuleissa A1...A5. Hankkeen investointivaiheen kokonaispäästöt olivat noin 10 712 CO_2e-tonnia, josta siltojen osuus oli noin 27 %. (Aulakoski et al. 2014) Päästöjen jakautuminen on esitetty kuvassa 3.3.

Neljäntenä tarkastellaan **Vt5 Nuutilanmäki-Vehmaa -hanketta**, jossa Väylävirasto pilotoi panosperusteista CO2-päästölaskentaa. Tieosuuden pituus on noin 15 kilometriä, josta osa oli täysin uutta tielinjausta ja osaa parannettiin. Siltoja rakennettiin 12 kappaletta, joista kuusi oli vinojalkaisia kehäsiltoja, neljä teräsbetonisia ulokelaattasiltoja ja kaksi jännebetonisia palkkisiltoja. Siltatiheydeksi saadaan noin 0,8 siltaa per tiekilometri. Siltojen osuus väylän pituudesta on noin 2 %. Siltojen pituudet on haettu Taitorakennerekisteristä, ja ne on esitetty liitteessä A.

Laskennassa on huomioitu vain materiaalien ”kehdosta portille” -päästöt A1...A3 ja rakentamisvaiheen päästöt A4...A5. Moduulissa A4 laskettiin vain maa- ja kiviainesmateriaalien, asfaltin sekä valmisbetonin kuljetuksesta aiheutuvat päästöt. Hankkeen investointipäästöt olivat noin 23 750 CO_2e-tonnia, josta siltojen osuus oli noin 22 prosenttia. (Väylävirasto 2019) Päästöjen jakautuminen on esitetty kuvassa 3.3.

LUIMA- ja Kivikontien eritasoliittymä -hankkeissa noin neljännes hankkeen päästöistä

aiheutui sillanrakennuksesta. Vt 5 Nuutilanmäki-Vehmaa -hankkeessa vastaava osuus oli noin viidennes. Näissä hankkeissa siltatiheys oli luokkaa silta per kilometri. LUIMA-hankkeessa huomioitiin investointipäästöjen lisäksi elinkaaripäästöjä.

Vt 12 LETKE 1B -hankeosassa siltojen osuus arvioiduista päästöistä oli noin 15 ja yhdessä tunnelien kanssa noin 40 prosenttia. Siltatiheys oli noin 1,6 siltaa per kilometri, missä ei ole otettu huomioon tunneleiden osuutta. Voidaan kuitenkin olettaa, että kahden pitkän tunnelin korvaamiseen olisi tarvittu useampi silta. Paljon betonia ja louhintaa vaativat tunnelit myös nostavat hankkeen kokonaispäästöjä. Taulukkoon 3.2 on koottu tietoja siltojen osuuksista tarkastelluissa hankkeissa.

Taulukko 3.2. *Siltojen ja niiden päästöjen osuus tarkastelluissa hankkeissa.*

	Lähde et al. *(2021)**	Multanen *(2019)*	Väylävirasto *(2019)*	Aulakoski et al. *(2014)*
Väyliä [km]	21,0	4,5	15,0	8,3
Siltapaikkoja [kpl]	12	11	12	-
Siltoja [kpl]	17	15	12	7
Siltatiheys [km^{-1}]	0,81	2,24	0,80	0,84
Siltakansien pituus [m]	581	650	249	-
- osuus	2,8 %	9,7 %	1,7 %	-
Siltojen kokonaispituus [m]	688	740	325	-
- osuus	3,3 %	11,0 %	2,2 %	-
Päästöt [CO_2e-kg]	51 300	58 305	23 750	10 712
Siltojen osuus päästöistä	24 %	15 %	22 %	27 %
Tarkastellut elinkaarimoduulit	A...D	A1...A5	A1...A5	”A1...A5”

** Ainoa tarkasteltu ratahanke ja myös ainoa koko elinkaaren kattava selvitys.*

Esiteltyjen hankkeiden perusteella voidaan todeta, että teoreettisesta suoraviivaisuudestaan huolimatta päästölaskelmia ei voida suoraan verrata. Elinkaariarvioinnin aikana tehdään useita valintoja, jotka vaikuttavat jopa merkittävästi laskennan tuloksiin. Esimerkiksi arviointiin sisällytettävät elinkaarimoduulit vaihtelivat hankkeiden välillä. CEEQUAL-sertifioidun VALTARI-allianssin ja Vt5 Nuutilanmäki-Vehmaa -hankkeen laskelmissa arvioitiin ainoastaan moduulit A1...A5. Vanhemmassa Kivikontien laskelmassa ei suoraan kerrottu laskettuja moduuleja, mutta tarkastelun laajuus vastasi kuitenkin moduuleja A1...A5. Se oli myös viisi vuotta muita tarkasteltuja tiehankkeita vanhempi.

Ongelmaksi voi tulla myös sopivan materiaalin löytäminen käytettävästä tietokannasta. Kyseessä on periaatteessa vastaava ongelma, kuin määrälaskennan litteroiden valinnassa jollekin erikoiselle tuotteelle. Luotettavan elinkaariarvioinnin tekemiseen tarvitaan ymmärrystä sovellettavista laskentaperiaatteista. Lisäksi tarvitaan niin arvioitavan kohteen kuin materiaalienkin ymmärtämistä, etenkin jos tarkoituksena on vertailla eri vaihtoehto-

ja.

Kivikon eritasoliittymän ja Pisararadan investointivaiheen kokonaispäästöt ilmoitettiin myös suhteessa investointihintaan. Kivikon eritasoliittymässä rakentamisen päästöt olivat 0,37 CO_2e-kg/€ sisältäen työmaatehtävät ja 0,44 CO_2e-kg/€ ilman työmaatehtäviä. Pisararadalla vastaava panos oli 0,28 CO_2e-kg/€ sisältäen työmaatehtävät. Jos erilaisten hankkeiden päästökertoimia määritetään tarpeeksi paljon, voidaan niiden pohjalta arvioida hankkeen päästöjä investointipäätöstä tehtäessä. Koska hankkeita on erilaisia, täytyy hankkeet luokitella jotenkin. Päästökertoimet olisivat siis taulukosta valittavia tai parametrisia. Valtaosa tutkittujen hankkeiden silloista oli jänne- tai teräsbetonirakenteisia. Ainoastaan LUIMA-hankkeessa yksi silloista oli puukantinen teräsristikkosilta ja Mansikkakosken silta oli betoni-teräsliittorakenteinen. On oletettavaa, että eri materiaaleista valmistettujen siltojen päästöt ja niiden muodostumisen ajankohta vaihtelevat. Eri materiaalien päästöjen muodostumista tarkastellaan tarkemmin luvussa 4.

Tässä työssä käytettiin suureita siltatiheys [siltaa/km] ja siltojen osuus väylän pituudesta [silta-km/väylä-km] jaottelemaan erilaisia hankkeita. Molemmat on helppo laskea Taitorakennerekisterin tai varhaisten suunnitelmien avulla, kun tarkasteltavan hankkeen laajuus tiedetään. Lisäksi niissä ei tarvitse ottaa huomioon panosten hintavaihtelua. Niiden avulla hankkeita voi siis vertailla melko vaivattomasti ilman, että niiden toteutusajankohtaa tarvitsee ottaa huomioon. Neljän hankkeen tarkastelun perusteella ei voida tehdä yleistyksiä siltojen osuudesta hankkeen päästöistä. Väyläviraston olisikin hyvä selvittää päästöjä useammassa hankkeessa kuin nykyään. Selvityksiä voitaisiin tehdä myös toteutuneiden hankkeiden määräluetteloiden ja urakka-asiakirjojen perusteella. Tällä tavoin olisi mahdollista saavuttaa hyvä tilannekuva investointipäästöjen muodostumisesta.

Väyläviraston allianssiperusteisesti kehittämän Infrahankkeiden kustannuslaskentajärjestelmä Ihkun hankeosalaskentaan ollaan kehittämässä esi- ja yleissuunnitteluvaiheessa toimivaa sillan määrien arviointityökalua, jonka avulla kustannukset voidaan arvioida ennen varsinaisen siltasuunnittelun aloitusta. Ihkun tuottaman määrämuotoisen määrätiedon pohjalta on mahdollista arvioida hankkeiden investointipäästöjen muodostumista. Tulevaisuudessa Ihku sisältää mahdollisesti myös päästölaskentaominaisuuksia.

3.4 Yhteenveto

Suomessa, Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa päästöjen huomioon ottamiseen infrahankkeissa on valittu hyvin samankaltaiset toimenpiteet. Ruotsissa arviointimenetelmät ja päästövähennysmääräykset ovat jo käytössä sekä rata- että tiehankkeissa. Norjassa ohjaus on käytössä vasta tiehankkeissa, mutta myös ratahankkeille kehitetään vastaavaa järjestelyä. Suomessa laskentatyökalut ja päästömääräykset ovat vasta kehitteillä. Laskenta tullaan suorittamaan vastaavilla työkaluilla kuin Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa. Tanskassakaan ei vielä tiedetä, miten laskenta tuodaan käytännössä hankkeisiin.

Tanskalainen EPD Danmark on julkaissut ympäristöselosteet 33 rakennustuotteelle, kun norjalainen EPD Norge on julkaissut noin tuhat EPD:tä eri tuotteille. (InfraLCA 2021) Monesti esimerkiksi muidenkin Pohjoismaiden kansallisissa tietokannoissa viitataankin norjalaisiin EPD:hin, jos paikallista tietoa ei ole saatavilla. Norjassa väyläinfrastrukuuriin on panostettu viime vuosina valtavasti, ja parin vuoden päästä on tarkoitus saavuttaa noin 9,5 miljardin euron vuosittainen rahoitustaso (Solem 2021). Saman lähteen mukaan rahoitustaso on vuonna 2005 ollut 2,5 miljardia ja vuonna 2019 noin 7 miljardia euroa.

Taulukko 3.3. *Suomen, Ruotsin, Tanskan ja Norjan maaliikenteen vuosittaiset päästöt ja infran osuus päästöistä viimeisimpien riittävät tiedot sisältävien arvioiden mukaan.*

	Suomi (2012)	Ruotsi (2021c)	Tanska (2020)/(2021)	Norja (2021a)/(2021)
Tieliikenteen päästöt [CO_2e-kt]	8 778	-	11 000	8 500
Rataliikenteen päästöt [CO_2e-kt]	457	-	72	94
Päästöt yhteensä [CO_2e-kt]	9 235	27 000	11 072	8 594
Tieinfran päästöt [CO_2e-kt]	511	1 800	705	530
- osuus tieliikenteestä	0,06	-	0,06	0,06
Ratainfran päästöt [CO_2e-kt]	142	600	60	44
- osuus rataliikenteestä	0,31	-	0,83	0,47
Infran osuus päästöistä	0,07	0,09	0,07	0,07

Pohjoismaiden tie- ja rataliikenteen päästöt on koottu taulukkoon 3.3. Infrastruktuurin osuus tieliikenteen päästöistä on Suomessa, Tanskassa ja Norjassa noin 6 %. Ratapuolella taas hajontaa on enemmän: infrastruktuurin osuus rataliikenteen päästöistä on Suomessa noin 31, Norjassa 47 ja Tanskassa 83 prosenttia. Tämä saattaa selittyä esimerkiksi Suomen ja Norjan suuremmilla välimatkoilla, jolloin junaliikennettä oletettavasti käytetään enemmän kuin lyhyiden etäisyyksien Tanskassa. Tämä taas lisää liikenteen suhteellista osuutta päästöistä. Yleisesti ottaen pääosin sähkövetureilla operoitavan rataliikenteen liikennöinnin päästöt ovat melko pienet.

Kokonaisuudessaan infrastruktuurin osuus maaliikenteen päästöistä on kaikissa maissa samaa luokkaa: Ruotsissa 9 ja muissa maissa 7 prosenttia. Jos päästöjä tarkastellaan suhteessa väkilukuun, saavutetaan hieman eroja. Norjassa liikenteen päästöt henkilöä kohden ovat noin 1 623, Suomessa 1 675, Tanskassa 1 915 ja Ruotsissa 2 668 CO_2e-kg. On syytä ottaa huomioon, että Suomen luku on lähes vuosikymmenen muita vanhempi.

Yleisesti ottaen liikenteen päästöt muodostuvat valtaosin liikenteestä. Siitä syystä Pohjoismaissa liikenneministeriöiden pääpaino onkin esimerkiksi autoilun päästöjen vähentämisessä. Norjassa ja Ruotsissa myös rakentamisen ja ylläpidon päästöjä arvioidaan pääosassa hankkeita. Suomessa ja Tanskassa ei olla vielä yhtä pitkällä kuin muissa Pohjoismaissa. Maiden väyläviranomaiset tekevät kuitenkin yhteistyötä. Jonkinasteisena ta-

voitteena ainakin talonrakentamisessa on, että päästöjen arviointimenetelmä ja käytettävät päästökertoimet eivät merkittävästi vaihtuisi maiden rajoilla.

4. SILLANRAKENNUKSESSA KÄYTETTÄVIEN MATERIAALIEN ILMASTOVAIKUTUKSET

4.1 Kestävä sillanrakennus

4.1.1 Suomen sillasto

Valtaosan Suomen silloista omistaa valtio tai kunnat. Myös yritykset ja tiekunnat omistavat siltoja. Valtio-omisteisten siltojen haltijana toimii Väylävirasto, joka vastaa sillaston ylläpidosta ja kehityksestä yhdessä ELY-keskusten kanssa. Myös muut kuin valtion omistamat sillat rakennetaan yleensä Väyläviraston ohjeiden mukaisesti. Joillakin kunnilla on myös omia tarkentavia ohjeita. Väyläviraston hallinnassa oli vuoden 2020 lopussa 15 093 tie- ja 2 477 ratasiltaa, joista varsinaisia siltoja oli 11 785 ja 2 381 (Väylävirasto 2021b).

Taulukossa 4.1 on esitetty vuosina 2010-2020 valmistuneet sillat, jotka on viety Taitorakennerekisteriin. Betonisiltojen osuus on 55,4 %, terässiltojen 35,6 % ja puusiltojen 6,6 %. Loput 2,4 prosenttia ovat joko muovisiltoja tai niiden päärakennusmateriaalia ei ole esitetty. Hakuehdot ja -tulokset löytyvät liitteestä B.

Taulukossa 4.2 on esitetty vuosina 2010-2020 valmistuneiden, Taitorakennerekisteriin vietyjen siltojen kokonaispinta-alat päärakennusmateriaaleittain. Hakuehdot ja -tulokset löytyvät liitteestä B. Betonisiltojen osuus on 84,8, terässiltojen 14,0 ja puusiltojen 1,2 prosenttia.

Keskimääräinen kokonaispinta-ala on jännitetyillä betonisilloilla 768, teräsbetonisilloilla 376, liimapuusilloilla 100, puusilloilla 33 ja terässilloilla 130 m^2. Kaikkien valmistuneiden siltojen keskimääräinen pinta-ala on 332 m^2. On syytä ottaa huomioon, että terässiltoihin sisältyvät myös putkisillat, mikä pienentää niiden keskimääräistä pinta-alaa.

Taulukoista 4.1 ja 4.2 voidaan nähdä, että valtaosa Suomeen rakennettavista silloista on betonisiltoja. Puuta käytetään nykyään melko pienissä silloissa. On otettava huomioon, että terässillat ovat usein liittorakenteita, mikä nostaa betonin käytön laajuutta. Myös perustukset valmistetaan yleensä[1] betonista, mikä myös nostaa betonin käytön laajuutta.

[1] Esimerkiksi valtion omistama vara- ja apusiltakalusto voidaan perustaa myös esimerkiksi puuarkkujen päälle.

Taulukko 4.1. *Vuosina 2010-2020 valmistuneiden siltojen kappalemäärät päärakennusmateriaaleittain jaoteltuna. (Väylävirasto 2021a)*

	Jännitetty betoni	Liimattu puu	Puu	Teräs	Teräsbetoni	Muu	Σ
2010	42	8	8	87	101	4	250
2011	44	11	5	102	98	1	260
2012	37	4	2	66	84	1	194
2013	57	6	2	72	79	3	218
2014	49	4	1	67	84	0	204
2015	55	1	0	66	83	3	209
2016	25	12	3	78	81	1	201
2017	42	6	6	66	43	12	176
2018	22	5	7	51	63	13	161
2019	28	4	56	87	83	10	273
2020	47	6	1	107	74	4	239
Σ	448	67	91	849	873	52	2 385

Taulukko 4.2. *Vuosina 2010-2020 valmistuneiden siltojen kokonaispinta-alat [m^2] päärakennusmateriaaleittain jaoteltuna. (Väylävirasto 2021a)*

	Jännitetty betoni	Liimattu puu	Puu	Teräs	Teräsbetoni	Muu	Σ
2010	22 940	354	110	9 354	41 124	43	73 925
2011	36 091	1 083	82	23 188	38 980	0	99 360
2012	25 834	373	3	4 118	31 552	0	61 412
2013	36 869	881	663	4 239	24 492	16	66 728
2014	35 786	639	0	8 195	34 104	0	76 468
2015	44 409	439	0	3 620	31 464	75	80 050
2016	27 343	522	221	5 893	35 084	153	69 233
2017	27 002	508	82	2 853	10 788	800	42 031
2018	12 534	542	114	23 589	24 810	255	61 845
2019	36 209	512	1 721	10 954	27 765	1 118	78 283
2020	39 095	837	0	14 657	27 826	205	82 621
Σ	344 112	6 690	2 995	110 660	327 989	2 664	791 957

Uusien siltojen maantieteellisen jakautumisen perusteella (liite B) voidaan todeta, että siltoja rakennetaan niin taajamiin kuin maaseudullekin. Rakennusvaiheen kuljetusmatkat siis vaihtelevat hankekohtaisesti. Kuljetuksen aiheuttamien päästöjen muodostumista arvioidaan yleisellä tasolla alaluvussa 4.1.2.

Luvuissa 4.2, 4.3 ja 4.4 käsitellään betoni-, teräs- ja puusiltojen materiaalien päästöjä. Terässiltojen osalta putkisiltoja ei tarkastella laajemmin tämän tutkimuksen puitteissa.

4.1.2 Kuljetus- ja asennuskalusto

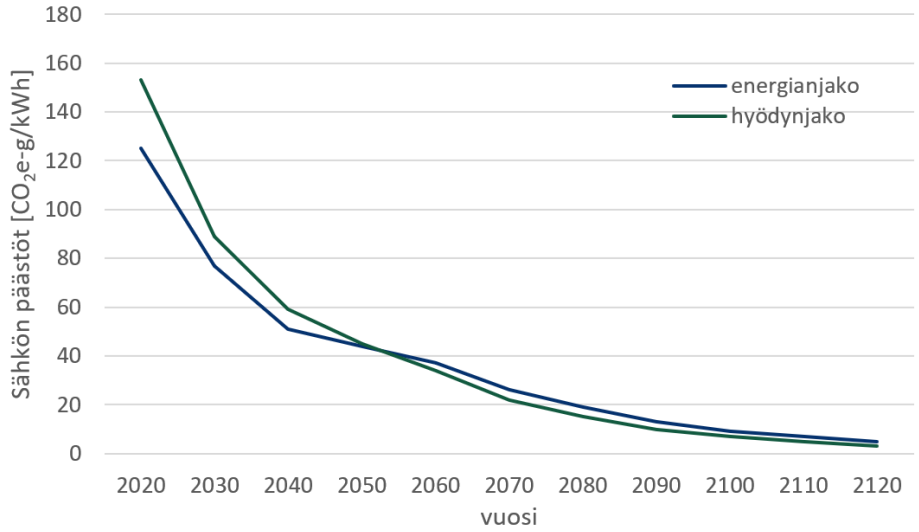
Suomessa siltoja rakennetaan ympäri maata, jolloin kuljetusmatkat vaihtelevat hankekohtaisesti. Työmaalla käytettävät työkoneet taas vaihtelevat siltatyypin mukaan. Tässä alaluvussa käsitellään kuljetuksen ja työkoneiden päästöjä yleisellä tasolla. Eri siltatyypeillä käytettävää työmaakalustoa käsitellään ytimekkäästi seuraavissa materiaalikohtaisissa luvuissa.

VTT:n mukaan työkoneiden vuosittaiset ilmastopäästöt Suomessa olivat vuonna 2020 hieman alle 2 500 CO_2e-kilotonnia. Työkoneiden sähköistymisen huomioon ottavan perusennusteen mukaan työkoneiden päästöt olisivat vuonna 2040 noin 1 800 CO_2e-kilotonnia. Ilman sähköistyksen vaikutusta, lähinnä biopolttoaineosuuksia kasvattamalla, vuoden 2040 päästöt olisivat noin 2 100 CO_2e-kilotonnia. (Markkanen ja Lauhkonen 2020)

Suomessa käytetyn sähkön päästösekoituksen ominaispäästönä on esimerkiksi Betoniteollisuuden ympäristöselosteissa (esim. Salminen et al. 2021) käytetty Bionovan vuoden 2018 arvoa 0,24 CO_2e-kg/kWh. Samoissa selosteissa kevyen polttoöljyn ominaispäästönä on käytetty Ecoinventin arvoa 0,34 CO_2e-kg/kWh. Tilastokeskuksen *Polttoaineluokitus 2021* mukaan vastaava päästö olisi 0,256 CO_2e-kg/kWh, missä on otettu huomioon 3,0 % bio-osuus (Tilastokeskus 2021). Kuvassa 4.1 on esitetty Suomen Ympäristökeskuksen tietokannan ominaispäästökertoimet rakennuksissa käytettävälle sähköenergialle eri vuosille (Soimakallio 2020).

VTT:n kehittämä LIPASTO-laskentajärjestelmä on työkalu eri liikennevälineiden päästöjen arviointiin. Järjestelmä sisältää myös Suomen työkoneiden päästömallin (*TYKO*), joka on tarkoitettu työkoneiden päästöjen laskentaan. Vuonna 2016 dieselkäyttöisten ajettavien työkoneiden päästöintensiteetti oli 803...866 ja siirrettävien 839...878 CO_2e-g/kWh. Ajettavia työkoneita ovat esimerkiksi jyrät, kaivukoneet, nosturit sekä erilaiset kurottajat ja kuormaajat. Siirrettäviä työkoneita ovat esimerkiksi generaattorit, kompressorit ja täryttimet. (VTT 2021) TYKO-mallin arvioidaan olevan vanhentunut nykytarpeisiin nähden (Markkanen ja Lauhkonen 2020).

Mallissa on esitetty nimellisteholuokittain eri työkoneiden keskimääräiset nimellistehot, keski-iät sekä vuosittaiset käyttöajat erikseen keski-ikää uudemmille ja vanhemmille koneille (VTT 2021). Taulukossa 4.3 on esitetty valittujen koneiden keskimääräiset nimellis-



Kuva 4.1. *Suomen sähkönkulutuksen ominaispäästökertoimen arvioitu kehittyminen vuosina 2020-2120 (Soimakallio 2020)*

tehot P_{nom}, keski-iät sekä vuosittaiset käyttöajat keski-ikää uudemmille koneille. Lisäksi taulukossa on esitetty tiedoista lasketut tyypilliset päästöt työpäivän ja työviikon aikana. Yksittäisen työpäivän käyttöaika on saatu jakamalla vuosittainen käyttöaika vuoden työpäivien likimääräisellä määrällä (Teknologiateollisuus 2021) 215.

Taulukko 4.3. *Työkoneiden kulutus- ja päästötiedot VTT (2021) ja niiden pohjalta lasketut työkoneiden päästöt työpäivää ja -viikkoa kohden*

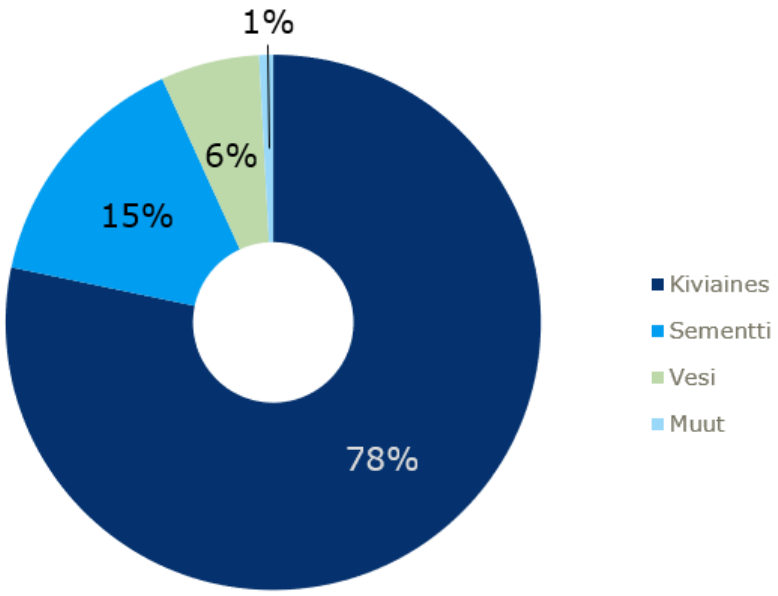
	P_{nom}	Keski -ikä	Käyttöaika *<keski-iän*	Päästö-kerroin	Päästöt per työpäivä	viikko
	[kW]	[a]	[h/a]	[CO_2e-g/kWh]	[CO_2e-kg]	
Kaivukoneet	88	15	1 500	834	512	2 560
Nosturit	99	15	1 000	828	381	1 906
Pyöräkuormaajat	94	15	800	828	290	1 448
Generaattorit	35	15	1 100	863	155	773
Kompressorit	70	15	1 000	839	273	1 366

Väylävirasto kehittää infrarakentamisen kaluston päästö- ja energiatehokkuusvaatimuksia. Selvitys aloitettiin vuonna 2020 ja sen oli tarkoitus valmistua elokuussa 2021. Selvityksen tavoitteena on laatia tiekartta vuosille 2022-2030 niin, että huomioon otetaan kasvihuone- ja muut päästöt, kustannukset ja vaikutukset markkinoihin. Tulokset on tarkoitus sisällyttää Väyläviraston ja ELY-keskusten kilpailutusasiakirjoihin. (Saarniaho et al. 2021)

4.2 Betoni

4.2.1 Betonin valmistus

Betoni on ominaisuutensa hydrataation kautta kehittävä materiaali, joka valmistetaan sekoittamalla sementtiä, karkea- ja hienojakoisia kiviaineksia sekä vettä. Seokseen voidaan lisätä myös lisäaineita, seosaineita tai kuituja. (SFS-EN 206 2021) Kuvassa 4.2 on esitetty tavallisen betonin eri osa-aineiden tyypilliset massaosuudet.



Kuva 4.2. *Normaalin betonin likimääräinen massajakauma, kun sementtiä on 350 kg/m^3 ja v/s-suhde on 0,4.*

Sementti on hydraulinen sideaine, jolla tarkoitetaan hienoksi jauhettua epäorgaanista materiaalia, joka veden kanssa sekoitettaessa muodostaa pastan, joka sitoutuu ja kovettuu hydrataatioreaktioiden kautta ja joka kovettumisen jälkeen pitää lujuutensa ja pysyvyytensä jopa veden alla. CEM-sementistä 50 % on oltava reaktiivista kalsiumoksidia tai reaktiivista piidioksidia. (SFS-EN 197-1 2012)

Betonin ja sen osa-aineiden valmistuksen osuus maailman päästöistä on noin seitsemän prosenttia. Suomessa vastaava osuus on Rakennusteollisuuden mukaan 1,5 %. Suomen ainoan sementtivalmistajan Finnsementin mukaan pelkkä sementtiteollisuus aiheuttaa 1,8 prosenttia Suomen päästöistä (Finnsementti 2021). Kun tämä luku jaetaan sementin suurpiirteisellä osuudella betonin päästöistä, saadaan 1,8 % / 80 % = 2,25 %. Voidaan siis olettaa, että Suomen päästöistä noin 2...2,5 prosenttia aiheutuu betonin ja sen osa-aineiden valmistamisesta.

Sillanrakennuksessa ja muissa infrakohteissa betonin toimintaympäristö on huomattavan erilainen verrattuna talonrakentamiseen. Karkeasti voitaneen sanoa, että talonrakentamisessa betonirakenteilta vaaditaan joko lujuutta hyvissä olosuhteissa tai hyvää säänkestä-

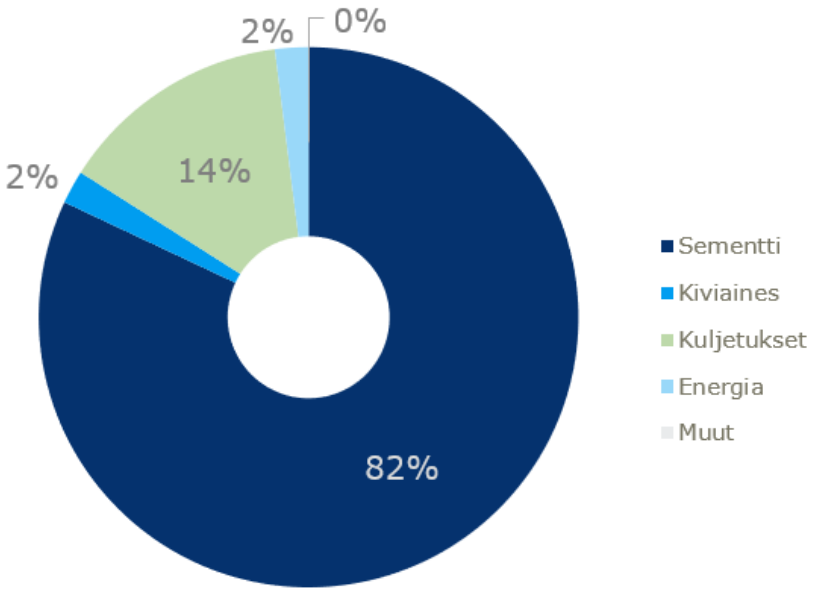
vyyttä julkisivuissa. Infrakohteissa, kuten toisaalta myös esimerkiksi pysäköintirakennuksissa, betonirakenteilta vaaditaan sekä hyviä lujuus- että kestävyysominaisuuksia. Ympäristöolosuhteissa korostuvat erityisesti jäätymis-sulamissyklit, kosteus- ja kloridirasitukset sekä näiden yhdistelmät. Betoniraudoitteiden kannalta olennaista on myös suojabetonin karbonatisoituminen.

Betonireseptit vaihtelevat hankekohtaisesti mm. kuljetusmatkojen ja vuoden- sekä vuorokaudenajan mukaan. Täysin tuotekohtaisten ympäristöselosteiden tai edes ilmastoarviointien tekeminen on tästä syystä työlästä. Betonivalmistajien laadunvalvonta perustuu tosin yleensä betoniperheisiin, ja samaa ideaa voitaneen soveltaa myös päästöjen arvioinnissa. Betoniteollisuus ry julkaisi vuonna 2021 tyypillisimpien talonrakentamisen valmisbetonien ja betonituotteiden yleiset elinkaariarvioinnit (Betoniteollisuus ry 2021). Suomessa ei ole vielä julkaistu infrarakentamisessa yleisesti käytettävien valmisbetonien päästöarvoja, eikä Ympäristöministeriön päästötietokannastakaan niitä vielä löydy. Lausuntokierroksella olevan Betoniyhdistyksen vähähiilisyysluokituksen (by 2021) perusteella P0-infrabetonien päästöt ovat noin 5 % tavallisia huokostamattomia betoneja korkeammat ja huokostettujen infrabetonien päästöt likimain samat kuin tavallisilla huokostetuilla betoneilla.

Esimerkin vuoksi valmisbetonilla C30/37 moduulien A1...A3 päästö on Ympäristöministeriön päästötietokannassa 113 CO_2e-kg/tonni ja säänkestävän C30/37 XF1 vastaava päästö 125 CO_2e-kg/tonni (Vares 2021). Ruotsissa käytettävän Klimatkalkyl-mallin yleinen päästöarvo tiesilloissa käytettävälle huokoistetulle valmisbetonille C35/45 XD3 XF4 on 166 CO_2e-kg/tonni (Byfors 2021).

Kuvassa 4.3 on esitetty suomalaisen C30/37 betonin päästöjakauma A1...A3. Valtaosa, noin 80 %, betonin päästöistä aiheutuu sementin valmistamisesta. Seuraavaksi suurin päästölähde on kuljetukset, joista aiheutuu noin 15 % päästöistä. Kiviaineksen valmistamisesta ja betoniaseman energiankulutuksesta aiheutuu kummastakin vain noin 2 % tavallisen betonin päästöistä. Muista toiminnoista ja materiaaleista aiheutuvat päästöt ovat käytännössä mitättömiä. (Salminen et al. 2021)

Betoniyhdistyksen vähähiilisyystyöryhmällä on työn alla betonituotteiden ilmastopäästöarvioinnit ja betonin vähähiilisyyden luokitteluohje. Työ käsittää myös infrabetoneja. Ensimmäiset arvioinnit ja luokitteluohjeen ensimmäinen versio on tarkoitus julkaista alkuvuodesta 2022. Ohje lähti lausuntokierrokselle loppuvuodesta 2021, mutta sekaannusten välttämiseksi lausuntoversion päästöarvoja ei esitetä tässä tutkimuksessa. Luokitteluohje tulee olemaan samankaltainen kuin taulukossa 4.4 esitetty norjalainen valmisbetonin luokittelujärjestelmä (Statens vegvesen 2020): betonit jaetaan raja-arvojen mukaan eri päästöluokkiin, joita voidaan käyttää suunnitelma- ja hankinta-asiakirjoissa. Logiikka on analoginen betonirakenteiden olosuhdeluokkien ja toisaalta elektroniikkalaitteiden energialuokittelun kanssa.



Kuva 4.3. *Betonin C30/37 keskimääräinen päästöjakauma A1...A3 (Salminen et al. 2021)*

Taulukko 4.4. *Norjalaiset valmisbetonin päästöraja-arvot (Statens vegvesen 2020)*

	Suurin sallittu kasvihuonekaasupäästö [CO_2e-kg/betoni-m^3]						
	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65
Referenssitaso *(Bransjereferanse)*	240	260	280	330	360	370	380
Vähähiili B *(Lavkarbon B)*	190	210	230	280	290	300	310
Vähähiili A *(Lavkarbon A)*	170	180	200	210	220	230	240
Vähähiili Plus *(Lavkarbon Pluss)*			150	160	170	180	190
Vähähiili Äärimmäinen *(Lavkarbon Ekstrem)*			110	120	130	140	150

Väyläviraston Infrabetonien valmistus -ohjeessa (2020) on kuvattu taitorakenteiden infrabetoneilta vaadittavat ominaisuudet ja esitetty rajoituksia ja ehtoja eri osa-aineille. Ohje tuli voimaan 1.1.2021 ja sen soveltamisessa on vuoden siirtymäaika. 1.1.2022 alkaen kaiken Väyläviraston hankkeisiin toimitettavan betonin on oltava uuden ohjeen mukaista. Ohjetta on noudatettava niin valmisbetoniasemilla kuin elementtitehtailla. Ohjeessa esitetään kuusi suositeltua infrabetonilaatua:

- C30/37 P0 ja P30
- C35/45 P0, P30 ja P50

- C45/55 P50.

Käytettävän kiviaineksen on oltava SFS-EN 12620 mukaista ja sen tulee olla CE-merkittyä. CE-merkitsemätöntä omaa kiviainesta saa käyttää, jos laadunvarmistus on vastaavan tasoinen. Uusiokiviaineksen käyttöä ei ole erikseen kielletty. Infrabetoneissa tulee käyttää vain erittäin epätodennäköisesti alkali-kiviainesreagoivia luokan I (*Päivittyvä ohje alkali-kiviainesreaktion hillitsemiseksi* mukaisesti) kiviaineksia. (Väylävirasto 2020)

Väyläviraston *Infrabetonien valmistus* -ohjeen mukaan sideaineen kokonaismäärän on oltava vähintään 300 kg/m^3. Mikäli betoniasemalla lisätään masuunikuonaa yli 35 % sideaineen kokonaismäärästä, on kokonaismäärän oltava vähintään 350 kg/m^3. Ohjeen mukaan sementin kalkkikivipitoisuus saa olla enintään 20 % ja kalkkikivifillerin seosainekerroin sekä sementissä että seosaineena on 0. Lentotuhkaa ei saa käyttää C45/55 tai korkeampi lujuuksisen betonin osa-aineena. Betoni ja sementti saavat yhteensä sisältää lentotuhkaa korkeintaan 25 % sideaineen kokonaismäärästä. Huokoistetut betonit saavat sisältää masuunikuonaa korkeintaan 50 % ja huokostamattomat korkeintaan 70 % sideaineen kokonaismäärästä. Jos käytetään myös muita seosaineita kuin masuunikuonaa, vähennetään masuunikuonaa muiden seosaineiden määrällä. (Väylävirasto 2020)

Sulfaattirasitetuissa kohteissa CEM I SR 0 tai SR 3 -sementtiin lisätään tiiviyden parantamiseksi silikaa 3...5 % kokonaismäärästä. Silikaa saa olla yhteensä enintään 5 %. Jos vesi-sideainesuhde (v/s-suhde) <0,35, saa silikaa olla 7 % sideaineen kokonaismäärästä. Käytettäessä CEM II/A-D -sementtiä on otettava huomioon em. raja tai lisättävä CEM I -sementtiä niin paljon, että ehto toteutuu. (Väylävirasto 2020)

Seuraavaksi käsitellään betonin osa-aineiden valmistusvaiheen päästöjä ja erilaisten osa-aineita korvaavien sivuvirtojen hyödyntämistä. Osa-aineista käsitellään erikseen kiviainekset, sementti ja seosaineet. Lisäksi käsitellään lyhyesti betonin ominaisuuksien muokkaamiseen käytettäviä lisäaineita, vaikkakin niiden osuus betonista on alle prosentin luokkaa. Osa-aineista vesi jätetään tässä työssä käsittelemättä, sillä sen aiheuttamat ilmastopäästöt ovat Suomessa erittäin pienet.

Kiviainekset - Yleistä

Valtaosa betonin tilavuudesta on kiviainesta. Kiviaineksen lujuus on yleensä merkittävästi sementtikiveä suurempi. Betoni sisältää suhteituksesta riippuen karkeaa ja hienoa kiviainesta sekä erittäin hienoa filleriä. Filleriä saatetaan hyödyntää myös betonin seosaineena, mitä tarkastellaan myöhemmin kohdassa Seosaineet.

Perinteisesti kiviaineksena on käytetty maastosta löytyviä kivimaalajeja, jotka on lajiteltu seuloilla. Näissä maalajeissa rakeet ovat yleisesti ottaen pyöreäreunaisia. Murskatulle kiviainekselle on ominaista teräväkulmainen pinnanmuoto. (SILKO 1.201 2021) Kohtuuetäisyydeltä löytyvien luonnonvarantojen hupeneminen ja kiristyneet ympäristöarvioinnit ovat

kuitenkin johtaneet siihen, että nykyään valtaosa Suomessa käytettävästä kiviaineksesta valmistetaan murskaamalla louhitusta kivestä (YM 2001). Nämä tunnetaan standardeissa nimellä luonnon kiviaines (*engl. natural aggregates, NA*) (SFS-EN 12620 2008).

Suomessa infrabetoneille sovelletaan standardia SFS-EN 12620 (Väylävirasto 2020). Standardissa hienon kiviaineksen yläraja on 0/4 mm ja karkean alaraja 2/4 mm. Fillerikiviaineksesta suurin osa läpäisee 0,063 mm seulan. Standardin SFS-EN 12620 mukaan luonnon kiviaineksen lisäksi voidaan käyttää epäorgaanisia uusiokiviaineksia (*engl. recycled aggregates, RA*). Karkeita uusiokiviaineksia voidaan valmistaa esimerkiksi betonituotteista (engl. usein *RCA*), tiilistä, bitumisista materiaaleista, lasista tai koheesiomaista. Uusiokiviaineksia voidaan käyttää korvaamaan vain karkeaa kiviainesta. (SFS-EN 12620 2008) Standardissa SFS-EN 206 (2021) esitettyjen raja-arvojen mukaan voidaan ulkona sijaitsevien betonirakenteiden karkeasta kiviaineksesta korkeintaan 30 % korvata uusiokiviaineksella.

Uusiokiviaineksia voidaan siis käyttää Suomessa sillanrakennuksessa (Väylävirasto 2020). On kuitenkin otettava huomioon, että uusiokiviaineksella voi olla huonompi kestävyys esimerkiksi alkali-kiviainesreaktiota vastaan (SFS-EN 12620 2008).

Kansallisen päästötietokannan mukaan Suomessa käytettävän luonnonhiekan ja -soran valmistuksen (A1...A3) tyypillinen päästö on 4,3 CO_2e-kg tonnia kohden (Vainio-Kaila 2021b). Kivimurskalla vastaava arvo on 6,0 CO_2e-kg tonnia kohden (Vainio-Kaila 2021a). Kierrätyskiviaineksella päästö on huomattavasti pienempi. Luvussa 2 esitetyn *saastuttaja maksaa* -periaatteen mukaisesti betonimurskeen valmistaminen kuuluu siihen järjestelmään, jossa betoni on tuotettu. Murskan päästöt muodostuvat siis käytännössä kuljetuksista, jotka taas riippuvat käytettävistä energianlähteistä.

Esimerkiksi suomalaisen betonimurskeen päästöt on arvioitu negatiivisiksi. EPD:n (Rudus Oy 2014) mukaan päästöt *A1...A3* ovat -18,6, kuljetuksen päästöt *A4* 3,1 ja käyttövaiheen *B1* päästöt -10,8 CO_2e-kg/tonni. Järjestelmään, josta murske on peräisin, allokoitiin käyttövaiheen *B1* karbonatisoituminen -13,7 CO_2e-kg/tonni. Vastaavaasti siihen allokoitiin purkujätteen kuljetusten *C2* päästöt 3,1 ja käsittelyn *C3* päästöt 1,6 CO_2e-kg/tonni. (Rudus Oy 2014) EPD on vanhentunut, eikä ajantasaisempaa ole saatavilla.

Tam et al. (2018) arvioivat vertailututkimuksessaan rakennuspurkujätteen käyttöä betonin kiviaineksena ympäri maailman. Rakennuspurkujätteen kiviaineena hyödyntämisen esteiksi tunnistettiin muun muassa luonnonkiviainesten halpuus, epäluottamus uusiokiviaineksen käyttöä kohtaan sekä uusiokiviaineksen laadun ja toisaalta tarjonnan vaihtelevuus. Tutkijat esittävät, että korkealujuuksinen betonijäte pitäisi käyttää ennemmin betonikiviaineksena kuin tien pohjaksi. Lisäksi valtioiden tulisi tehdä pitkäjänteisiä, uusiokiviainesten käyttöä betonissa edistäviä ohjelmia. Suomessa vuosina 2010-2015 tuotetusta kiviaineksesta vain 0...2,6 % oli kierrätyskiviainesta. (Tam et al. 2018) Noin kymmenen prosenttia Suomessa tuotetusta kiviaineksesta käytetään betonin valmistamiseen (Laine

et al. 2020).

Koontitutkimuksessaan Visintin et al. (2020) tutkivat toiminnallisen yksikön, päästöallokoinnin ja karbonatisoitumisen sekä uusiokiviainesten käytön välistä yhteyttä. Aineistona käytettiin 624 eri betonireseptiä, jotka kerättiin 61 tutkimuksesta. Tutkimuksen mukaan uusiokiviainesta voidaan käyttää lieriölujuuksiltaan korkeintaan 45 MPa betoneissa ilman, että lujuus- tai säilyvyysominaisuudet huononevat tai päästöt kasvaisivat. Tämä tosin vaatii uusiokiviaineksen huomioon ottamista suhteituksessa. Tätä lujemmilla betoneilla päästöt voivat kasvaa, sillä sementtiä tarvitaan enemmän, jotta tuoreen ja kovettuneen betonin muut ominaisuudet eivät muuttuisi. Tutkimuksen mukaan uusiokiviaineksen käytöllä ei tavallisessa, vain sementtiä sideaineena sisältävässä, betonissa ole mahdollista saavuttaa päästövähennyksiä, vaikka uusiokiviaineksen karbonatisoituminen otettaisiin huomioon. (Visintin et al. 2020)

Kiviaineksen osuus betonin päästöistä on vain noin kaksi prosenttia, kuten aiemmin tässä luvussa on kerrottu. Sen korvaaminen uusiokiviaineksella ei siis juurikaan vähennä betonin päästöjä. Uusiokiviaineksen käyttämisellä on kuitenkin mahdollista vähentää neitseellisten luonnonvarojen kulumista (Tam et al. 2018). Visintin et al. (2020) mukaan uusiokiviaineksen käytöllä säästettävät päästöt kumoutuvat, kun sementtimäärää joudutaan kasvattamaan saman lujuuden aikaansaamiseksi. Tutkimuksessa ei kuitenkaan otettu huomioon sementtiä korvaavien sideaineiden käyttöä. Tämä on merkittävä huomio, sillä uusiokiviaineksen käytöstä aiheutuneet päästövähennykset kumoutuivat, kun energiaintensiivistä sementtiä jouduttiin käyttämään enemmän vastaavien ominaisuuksien saavuttamiseksi. Jos sideaine onkin vähähiilisempi, ei kaikki kiviaineksella saavutettu päästöjen väheneminen välttämättä kumoudu sideaineen määrän kasvaessa.

Epäorgaanisten materiaalien uusiokäytön lisäksi myös orgaanisten sivuvirtojen hyödyntämistä betonin valmistuksessa on tutkittu. Esimerkkeinä mainittakoon Corduba-simpukoiden ja kookospähkinöiden kuoret. (Beddaa et al. 2020; Prakash et al. 2020) EN-standardien mukaan betonin uusiokiviaineksen pitää olla epäorgaanista. Diplomityötä varten tehdyn kirjallisuusselvityksen perusteella Suomessa tai muissa Pohjoismaissa ei myöskään ole orgaanista sivuvirtaa, jota olisi edes esitetty betonikiviaineksena käytettäväksi.

Kiviainekset - Karkea kiviaines

Pääosa betonin kiviaineksesta on yleensä *karkeaa kiviainesta*. Tutkimuksessaan Medina et al. (2014) selvittivät uusiokiviaineksen vaikutusta betonin mekaanisiin ominaisuuksiin. Uusiokiviaineksesta 93 % prosenttia oli peräisin betonituotteista, kiviaineksesta ja asfaltista. Uusiokiviaineksia oli kahta tyyppiä, joista toisen massasta 5,05 % oli kelluvaa materiaalia. Tutkittavia betoneita oli yhteensä kahdeksan ja kaikkien tavoitekuutiolujuus oli 30 MPa brittiläisten standardien mukaisesti. Kaikissa betoneissa käytettiin samaa CEM I 52.5 R -sementtiä. Viiden betonin v/s-suhde oli 0,65: yksi, joka sisälsi vain luonnonki-

viaineksesta, sekä neljä, joiden karkeasta kiviaineksesta 25 tai 50 prosenttia oli korvattu toisella uusiokiviaineksella. Lopuissa kolmessa betonissa karkeasta kiviaineksesta oli korvattu joko 0 tai 50 % toisella uusiokiviaineksista. Näiden v/s-suhde oli 0,60 ja niissä käytettiin tehonotkistinta.

Uusiokiviaineksella ei havaittu olevan vaikutusta tuoreen betonin koostumukseen. Betonin kapillaarisuus ei huonontunut betoneilla, joiden karkeasta kiviaineksesta 25 % oli korvattu uusiokiviaineksella. 50 % korvausosuus taas nosti kapillaarista kulkeutumista 10...20 %. Kaikki betonit saavuttivat tavoitelujuuden jo seitsemän vuorokauden iässä. Betonin lujuus pieneni, kun karkean kiviaineksen korvausosuus kasvoi. Notkistamattomilla betoneilla lujuus aleni alle 20 prosenttia. Notkistetuilla betoneilla vastaavat lujuudenalenemat olivat noin 25 prosenttia 50 % korvausosuudella. Tutkijat esittivät, että talonrakentamisessa betonin karkeasta kiviaineksesta 50 % voidaan korvata uusiokiviaineksella niin lujuuden kuin säilyvyydenkin puolesta. (Medina et al. 2014)

Toisaalta suuri uusiokiviaineksen suhteellinen määrä voi huonontaa esimerkiksi betonin halkeiluominaisuuksia. Fallahnejad et al. (2021) tutkivat RCA-betonin halkeilukäyttäytymistä. Uusiokiviaineksena käytettiin noin vuoden ikäisistä 25...30 MPa lujuisista koekuutioista murskattua mursketta. Betoneita valmistettiin kahta erilaista: toisessa karkea kiviaines oli korvattu täysin uusiokiviaineksella. Tämä tarkoittaa, että tutkitussa RAC-betonissa yli puolet, 792 kg, kokonaiskiviainesmäärästä, 1 544 kg, oli betonimursketta. Halkeilua tutkittiin RILEMin ohjeiden mukaisilla WFM- (*work of fracture method*) ja SEM-menetelmillä (*size effect method*), sekä kirjallisuudessa esitetyllä BEM-menetelmällä (*boundary effect method*). Esimerkiksi WFM-menetelmässä halkeamiseen vaadittava työ lasketaan kuorma-siirtymä-kuvaajan pinta-alasta. Tulosten perusteella tutkijat esittävät, ettei uusiokiviainesbetonia tulisi käyttää rakenteellisissa betoneissa. (Fallahnejad et al. 2021)

Fallahnejad et al. (2021) mukaan uusiokiviainesbetonia ei tulisi käyttää rakenteellisissa betoneissa. Tulos ei ole linjassa muun tutkimustiedon kanssa (esim. Medina et al. 2014; Visintin et al. 2020). Fallahnejad et al. (2021) tutkimuksessa käytetty uusiokiviaines oli peräisin vuoden ikäisistä 20...25 MPa koekuutioista, joiden koostumusta ei tarkemmin eritelty. RAC-betonin lujuus 28 vuorokauden iässä (39,5 MPa) oli noin 20 % pienempi kuin NA-betonin (58,7 MPa). Koska betonin lujuus ja halkeilukäyttäytyminen korreloivat, eivät betonit olleet vertailukelpoisia. Esimerkiksi Tam et al. (2018) esittivät, että betonissa pitäisi hyödyntää lujempia betoneja ja matalampi lujuuksisia betoneja voitaisiin käyttää tienpohjina. Kiviaines on lähtökohtaisesti sementtiliimaa lujempaa. On loogista, että betonin halkeilukäyttäytyminen muuttuu, kun yli puolet kiviaineksesta korvataan melko matalalujuuksisella betonimurskalla. Onkin perusteltua väittää, että Fallahnejad et al. (2021) tutkimuksessa uusiokiviainesta ei käytetty järkevällä tavalla.

Myös uusiokiviaineksen koostumuksella on merkitystä. Esimerkiksi kiviaineksen raekoko ja määrä vaikuttavat uusiokiviaineksen käyttäytymiseen uudessa betonimassassa. Tuo-

reen jätebetonin (*FCWA*) käyttöä uusiokiviaineksena tutkineet Wang et al. (2020) kehittivät suhteitustapaa, jolla voidaan arvioida uusiokiviainesbetonin lujuudenkehitystä, kimmomoduulia ja kutistumaa. Valtaosa FCWA-uusiokiviaineksesta koostuu sementtiliimasta. Tuoreen jätebetonin käyttö vaikuttaisi huonontavan betonin ominaisuuksia merkittävästi. Kirjallisuusselvityksen perusteella jo 30 % karkean kiviaineksen korvausosuudella puristuslujuus pieneni 36...59 %, kimmokerroin pieneni 36...55 % ja kutistuma kasvoi 66...108 %. (Wang et al. 2020)

Wang et al. (2020) totesivat tutkimuksessaan pääasiassa sementtikivestä koostuvan uusiokiviaineksen heikentävän betonin ominaisuuksia merkittävästi. Betonimurskassa kiviaineksen pintaan jää yleensä silmin havaittavia määriä sementtikiveä. Fallahnejad et al. (2021) havaitsivat tutkimuksessaan juuri näiden sementtikivijäämien heikentävän kiviaineksen ja uuden sementtikiven välistä rajapintaa. Uusiokiviaineksen pinnalta on mahdollista puhdistaa suuri osa vanhasta sementtikivestä. Myös vanhan sementtikiven sisältämät reagoimatta jääneet reaktiotuotteet vaikuttavat RAC-betonin ominaisuuksiin (esim. Duan et al. 2021). Lisäksi uusiokiviaineksen tiheys ja huokoisuus poikkeavat luonnon kiviaineksen vastaavista (esim. Duan et al. 2021; Fallahnejad et al. 2021). Kaikki nämä muuttujat tulisi pystyä hallitsemaan betonin suhteituksessa ja sekoittamisessa.

Tutkimuksessaan Verma et al. (2021) tutkivat kaksivaiheisen sekoitustavan vaikutusta RA-betonissa, jossa karkeasta kiviaineksesta 0, 25, 50, 75 tai 100 prosenttia korvattiin puhdistetulla RCA-uusiokiviaineksella. Uusiokiviaines oli peräisin noin 10 vuotta vanhoista puretuista rakennuksista ja kiviaineksesta poistettiin valtaosa vanhasta sementtikivestä. Kaksivaiheisessa sekoitustavassa osa-aineet lisätään määrätyssä järjestyksessä ja massa sekoitetaan kahdesti. Tutkimuksessa kehitetyissä sekoitustavan mukaelmissa ensiksi hiekasta, sementistä ja silikajauheesta joko kaikki tai osa esisekoitettiin, minkä jälkeen lisättiin kahdessa vaiheessa loput osa-aineet määrätyssä järjestyksessä. Sekoituskertoja on siis oikeastaan kolme. Puristus- ja taivutusvetolujuudet pienenivät uusiokiviaineksen osuuden funktiona, mutta saman kierrätysasteen koekappaleilla kaksivaiheinen sekoittaminen paransi lujuuksia perinteiseen sekoitustapaan verrattuna.

Duan et al. (2021) tutkivat betonirakennusjätteestä valmistetun karkean uusiokiviaineksen huomioimista suhteituksessa. Tällaisen uusiokiviaineksen rakeisuuskäyrä ei kuvaa todellista tilannetta sekoitetussa betonissa, sillä osa vanhasta sementtikivestä irtoaa sekoitettaessa. Ilmiön huomioimiseksi tutkimuksessa valettiin kaksi näytesarjaa. Ensimmäisessä sarjassa käytetty uusiokiviaines oli peräisin yhdestä lähteestä. Sarjan tarkoituksena oli määrittää, pystyttiinkö valitulla suhteitusmenetelmällä arvioimaan, kuinka paljon hienoa luonnonkiviainesta oli korvattava karkealla, jotta uusiokiviainesbetonin lujuus olisi optimaalinen. Toisessa sarjassa käytettiin kolmesta eri lähteestä peräisin olevia uusiokiviaineksia. Sarjan tarkoituksena oli kokeilla ensimmäisen sarjan perusteella suhteitusmenetelmän yleistettävyyttä. Kaikissa betoneissa käytettiin samaa hienoa kiviainesta sekä CEM I -sementtiä vastaavaa sementtiä.

Ensimmäisessä sarjassa kaikissa kuudessa betonissa oli sama vesi- ja sementtimäärä. Verrokkibetonissa oli hienoa kiviainesta 662 ja karkeaa kiviainesta 1 081 kg/m^3. Viisi uusiokiviainesbetonia sisälsivät kaikki 1 010 kg/m^3 karkeaa uusiokiviainesta RAC1 ja 1,1 massaprosenttia tehonotkistinta. Vaihteleva osa hienokiviaineksesta korvattiin luonnonkiviaineksella niin, että RC-0-betonissa 0 % ja RC-8-betonissa 8% oli korvattu. Tavoitelujuutta ei määritelty, vaan tavoitteena oli ainoastaan määritellä suhteitusmenetelmän toimivuus. Pienin lujuuden alenema saavutettiin betonilla RC-4, jolla myös saavutettiin verrokkibetonia lähes vastaava kokonaishuokoisuus. (Duan et al. 2021)

Toisessa sarjassa tavoitelujuusluokat olivat 45 ja 60 MPa, joista kumpaankin valmistettiin viittä eri betonilaatua. Kaikissa betoneissa käytettiin tehonotkistinta. Verrokkibetonien lisäksi valmistettiin kahdesta eri uusiokiviaineksesta RA2 ja RA3 kaksi erilaista betonia, joista toisessa rakeisuutta säädettiin ensimmäisessä sarjassa vahvistetun menetelmän mukaisesti. Kaikista betonilaaduista määritettiin puristuslujuuden lisäksi taivutusvetolujuus, kimmokerroin, kloridien tunkeutuminen sekä kuivumiskutistuminen. Tulosten perusteella kaikki tutkitut ominaisuudet paranivat, kun rakeisuutta säädettiin. Taivutusvetolujuus oli molemmilla uusiokiviaineksilla sama tai parempi kuin verrokkibetoneilla, kun rakeisuus säädettiin. (Duan et al. 2021)

RA-betonin ominaisuuksia on siis mahdollista parantaa, kun uusiokiviaineksen käyttö huomioidaan betonin suhteituksessa ja sekoituksessa (Duan et al. 2021; Verma et al. 2021). Osaa ominaisuuksista on näin mahdollista jopa parantaa suhteessa verrokkibetoniin (Duan et al. 2021). Oletettavasti myös verrokkibetonin lujuutta oltaisiin voitu parantaa optimoimalla suhteitusta sen eduksi.

Betoniseoksen optimoimisen lisäksi betonin ominaisuuksia on mahdollista parantaa myös lisäaineita käyttämällä. Kannan et al. (2021) tutkivat karkeaa RCA-uusiokiviainesta sisältävien betonien lujuus- ja muiden ominaisuuksien parantamista tehonotkistimen avulla. Tutkituissa yhdeksässä C20-betonisekoituksessa karkeasta kiviaineksesta 0, 20 tai 40 prosenttia oli korvattu uusiokiviaineksella ja silikaattipohjaista tehonotkistinta oli annosteltu 0, 3 tai 5 millilitraa sementtikiloa kohden. Tuoreen betonimassan kartiokokeessa RA-betonilla saatiin lisäaineen avulla vastaavia tuloksia kuin verrokkibetonilla. Tehonotkistimen käyttö myös paransi RA-betonien puristuslujuutta enemmän kuin verrokkibetonia. 20 % korvausosuudella ja 5 ml/kg lisäaineen annostuksella puristuslujuus jopa ylitti verrokkibetonin lujuuden. Kun lisäainetta oli 5 ml/kg, myös 40 % korvausosuuden betonin puristuslujuus oli lähes sama kuin verrokkibetonilla. (Kannan et al. 2021)

Betonin mekaaniset ominaisuudet on suunnittelussa tapana johtaa puristuslujuudesta (NCCI 2 2017). RAC-betonien jännitys-venymäkäyttäytyminen kuitenkin eroaa perinteisen betonin vastaavasta. Sousa et al. (2021) tutkivat eri standardien kimmomoduulin laskentamallien sopivuutta karkeaa uusiokiviainesta sisältävillä betoneilla. Tutkimuksen RA-betonissa 30 % karkeasta luonnonkiviaineesta oli korvattu uusiokiviaineksella. Tutki-

tut uusiokiviainekset olivat peräisin joko 20 tai 40 MPa betonista tai keraamisista tiilistä. Karkeana luonnonkiviaineksena käytettiin basalttia. Tutkimuksessa varioitiin vesisementtisuhdetta, joka oli 0,405; 0,540 tai 0,675. Tutkimuksen perusteella perinteiset puristuslujuuteen perustuvat kimmomoduulikaavat eivät sovellu RA-betonien arvioimiseen.[2] Sousa et al. mukaan puristuslujuuden ja ominaispainon lisäksi esimerkiksi uusiokiviaineksen vedensitomiskyky vaikuttaa merkittävästi RA-betonin kimmoiseen käyttäytymiseen. Tutkijat totesivat tarpeen kehittää erilliset laskentamallit uusiokiviaineksia käytettäessä. Koekappaleet olivat dxh 100x200 mm^2 sylintereitä, joita oli 2 puristuskoekappaletta ja 5 kimmomoduulikoekappaletta tilannetta kohden.

Huda ja Alam (2014) tutkivat Kanadassa RCA-uusiokiviaineksen vaikutusta betonin ominaisuuksiin, kun samaa betonia kierrätettiin kolme kertaa. Betonin karkea kiviaines siis korvattiin betonimurskalla, ja saatu betoni murskattiin käytettäväksi karkeana kiviaineksena seuraavan kierroksen betonissa. Kaikilla kierroksilla betonin tavoitelujuus oli 32 MPa ja suhteitusta ei muutettu kierrosten välillä. Kiviaineksen tiheys pieneni ja imukyky kasvoi sitä mukaan, mitä useampaan kertaan se oli kierrätetty. Ensimmäisellä kierroksella betonimassan painumatulos tai ilmapitoisuus eivät käytännössä muuttuneet, mutta myöhemmillä kierroksilla massasta tuli jäykempää ja ilmapitoisempaa.

Ensimmäisellä ja toisella kierroksella betonin lujuudenkehitys oli keskenään samanlaista ja betonit saavuttivat tavoitelujuuden 28 päivän iässä. Lujuus 56 päivän iässä oli 43,1 MPa alkuperäisellä betonilla, 35,9 MPa ensimmäisellä, 36,8 MPa toisella ja noin 29 MPa kolmannella kierroksella. Halkaisuvetolujuus taas oli noin 10 MPa kaikilla muilla paitsi kolmannen kierroksen uusiobetonilla, jolla se oli 6,5 MPa. Uusiokiviaineksen käytön havaittiin vaikuttavan myös jännitys-venymäyhteyteen niin, että myötövenymä kasvoi suuremmaksi ja murtolujuus pieneni. Tutkimuksen perusteella uusiobetonikiviainesbetonin ominaisuudet siis heikkenevät merkittävästi kolmannella käyttökerralla. (Huda ja Alam 2014) Nykyisin käytössä olevien suunnitteluohjeiden mukaisesti samaa betonia voitaisiin siis tulevaisuudessa hyödyntää kiviaineksena esimerkiksi talossa, johon uusiokiviaines on hankittu 100 vuotta vanhasta sillasta, johon uusiokiviaines on puolestaan hankittu 150 vuotta vanhasta talosta. Tutkimuksessa korvattiin kaikki karkea kiviaines edellisen kierroksen betonimurskalla, eikä tätä huomioitu suhteituksessa. Uusiokiviaineksen elinkaarta on oletettavasti mahdollista pidentää, kun sen käyttö huomioidaan suhteituksessa ja vain osa kiviaineksesta korvataan sillä.

Betonin karkean kiviaineksen korvaaminen uusiokiviaineksella vaikuttaa moniin betonin ominaisuuksiin. Edellä esitellyissä tutkimuksissa uusiokiviaineksena käytettiin yleensä purkubetonijätteestä, tiilistä tai laboratorio-olosuhteissa valmistetuista betonikappaleista valmistettua mursketta. Medina et al. (2014) käyttivät sekalaisesta epäorgaanisesta rakennusjätteestä valmistettua kiviainesta. Betonimurskan raejakauma muuttuu, kun se se-

[2] Tutkitut standardit olivat: ACI 209R-92, Eurokoodi 1992-1-1, NZS 3101:2006, fib Model Code 2010, ACI 318-11, ABNT NBR 6118

koitetaan uuteen betoniin, sillä heikoin sementtikivi irtoaa rakeiden pinnasta. Duan et al. (2021) tutkivat, miten betonista murskatun uusiokiviaineksen tilavuuden muutos voidaan ottaa huomioon suhteutuksessa. Verma et al. (2021) taas pyrkivät parantamaan RCA-betonin lujuutta kahdella tapaa: puhdistamalla betonimurskasta sementtikiven kokonaan pois ja kehittämällä sekoitustapaa.

EN-standardit sallivat tällä hetkellä osan betonin karkeasta kiviaineksesta korvaamisen uusiokiviaineksella. Jos kohteessa, jossa betonia käytetään nimenomaan lujuutensa takia, halutaan käyttää runsaasti uusiokiviainesta, tulee se ottaa huomioon joko lisäämällä sideainemäärää tai ottamalla pienempi lujuus huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Seuraavien betonieurokoodien lausuntokierroksella olleessa luonnoksessa esitetään liitteessä N kaavat, joilla uusiokiviaineksen vaikutukset betonin ominaisuuksiin voidaan ottaa huomioon (prEN 1992-1 2021). Standardissa SFS-EN 206 (2021) esitettyä suurempikin osuus karkeasta kiviaineksesta voidaan näin korvata uusiokiviaineksella, kunhan korvaamisen vaikutus otetaan huomioon suunnittelussa liitteen N mukaisesti.

Kiviainekset - Hieno kiviaines

Myös *hienon sideaineen* korvaamista uusiokiviaineksella on tutkittu. Hienon kiviaineksen korvaaminen uusiokiviaineksella ei kuitenkaan ole tällä hetkellä mahdollista EN-standardien puitteissa. Portugalissa Kurda et al. (2020) tarkastelivat aiempien tutkimusten tuloksia uusiokiviaineksen ja lentotuhkan vaikutuksista betonin lujuusominaisuuksiin. Hienon kiviaineksen korvaaminen uusiokiviaineksella johti noin 0,6...1,2-kertaisiin f_{cm}-lieriölujuuksiin, kun verrokkibetonin lujuus 28 vuorokauden iässä $f_{cm,28}$ oli 47...55 MPa ja lentotuhkaa ei käytetty. Tulosten vaihteluväli oli 25...40 % korvausosuudella 0,82...1,02 (tutkimusten n=3), 50...60 % korvausosuudella 0,78...1,06 (n=3) ja 80...100 % korvausosuudella 0,8...0,87 (n=2), kun ainoastaan hienoa kiviainesta korvattiin.

Lisäksi Kurda et al. (2020) tutkivat hienon ja karkean uusiokiviaineksen sekä lentotuhkan käytön vaikutusta betonin puristuslujuuteen $f_{cm,cube}$, kimmomoduuliin E_{cm}, halkaisuvetolujuuteen f_{ctm}, ilmastopäästöihin *GWP* (A1...A3) sekä uusiutumattoman energian kulutukseen *PE-NRe*. Hienon uusiokiviaineksen käyttö ei käytännössä muuttanut betonin ilmastopäästöjä tai uusiutumattoman energian kulutusta. Ne vähenivät parhaimmillaankin alle prosentin. Puristuslujuus taas heikkeni 17...26 %, halkaisuvetolujuus 12...29 % ja kimmokerroin 11...25 %. Suhteessa lujuusominaisuuksiin päästöt siis nousivat. Kurda et al. (2020) tekemän kokeellisen tutkimuksen ja heidän käsittelemensä aikaisemman tutkimustiedon perusteella betonin päästöt vaihtelevat kuitenkin esimerkiksi tavallisten betonien tai RA-betonien kesken todella paljon.

Meesala (2020) tutki hienon ja karkean uusiokiviaineksen käytön vaikutusta lujittuneen betonin ominaisuuksiin. Hienona uusiokiviaineksena tutkittiin erikseen tiilipölyä, kivipölyä ja kierrätettyä hienokiviainesta yhdistettynä NA-betoniin tai RA-betoniin, jossa karkeas-

ta luonnonkiviaineksesta puolet oli korvattu uusiokiviaineksella. Uusiokiviaineksen osuus hienosta kiviaineksesta oli kaikissa tapauksissa 30 %. NA-betonilla kaikilla hienoilla uusiokiviaineksilla saavutettiin tavallista betonia suuremmat puristus- ja halkaisuvetolujuudet 28 päivän ikäisenä. RA-betonilla saatiin vastaavia tuloksia lukuunottamatta tiilipölyä, joka vaikutti heikentävän puristuslujuutta. Parhaat tulokset saatiin sekä NA- että RA-betoneilla, kun 30 % hienosta kiviaineesta oli korvattu kivipölyllä, jolloin puristuslujuudet kasvoivat noin 36 ja 21 prosenttia verrokkibetoniin verrattuna. Tutkimuksen mukaan tulokset olivat linjassa aiemman tutkimustiedon kanssa. Kierrätetty hienokiviaines oli peräisin 20 vuoden käytön jälkeen puretusta rakennuksesta, ja myös se paransi betonien lujuusominaisuuksia. Jokaista betonilaatua kohden tutkittiin kolme näytettä per koe ja verrokkibetonin tavoitekuutiolujuus oli 25 MPa.

Bogas et al. (2016) tutkivat hienon RCA-uusiokiviaineksen käytön vaikutusta betonikuutioiden kestävyyteen jäätymis-sulamisrasituksessa. Tutkimuksessa käsiteltiin kolmea eri betoniryhmää: normaalilujuuksista betonia, korkealujuuksista betonia ilman huokoistavaa lisäainetta ja korkealujuuksista betonia huokoistavalla lisäaineella. Suhteituksessa tähdättiin samaan notkeuteen (S3). Normaalilujuusbetonien kuutiolujuus oli 43,1...50,2 MPa ja korkealujuusbetonien 44,9...81,0 MPa. Hienosta kiviaineksesta 0, 20, 50 tai 100 prosenttia korvattiin laboratoriossa valmistetulla C25/30-betonimurskalla. Tutkimuksen perusteella vain hienon kiviaineksen täysi korvaaminen uusiokiviaineksella aiheutti lujuuden alenemista kolmensadan jäätymis-sulamiskierron jälkeen. Normaalilujuinen betoni ei missään skenaariossa kestänyt jäätymis-sulamisrasitusta. (Bogas et al. 2016) On jälleen syytä huomata, että käytetty betonimurska oli varsin heikkoa suhteessa tutkittujen betonien lujuuteen.

Kiviainekset - Kiviaines hiilivarastona

Betonin valmistuksessa käytettävä betonimurska voi toimia myös *hiilivarastona*. Tutkimuksessaan Lu et al. (2019) selvittivät karkean uusiokiviaineksen karbonatisoitumisasteen vaikutusta lujittuneen betonin puristuslujuuteen ja kutistumaan. Tutkimuksessa käytettiin viittä eri betonilaatua: luonnonkiviaineksista valmistettua verrokkibetonia sekä RA-betonia, jossa 5...20 mm kiviaineesta joko puolet tai kaikki oli korvattu joko täysin tai ei yhtään karbonatisoituneella uusiokiviaineksella. Betonien v/s-suhde oli 0,5 ja joissa käytettiin samaa sementtiä ja hiekkaa. Myöskään kiviaineksen kokonaismassaa ei muutettu. Käytetty sementti vastasi CEM I 42,5 -sementtiä. Uusiokiviaines valmistettiin murskaamalla laboratoriossa 90 päivää lujittuneesta betonista. Uusiokiviaineksen käyttö pienensi puristuslujuutta NAC-betoniin verrattuna. Karbonatisoidun uusiokiviaineksen käytön havaittiin parantavan puristuslujuutta karbonatisoimattomaan uusiokiviainekseen verrattuna. Puolet karbonatisoitua karkeaa kiviainesta sisältävällä RA-betonilla päästiin jopa lähelle NA-betonin puristuslujuutta. Uusiokiviaineksen käyttö lisäsi kuivumiskutistumaa, karbonatisoitunut tosin vähemmän. Autogeeninen kutistuma pieneni käsittelemättömällä

ja kasvoi karbonatisoituneella RA-betonilla NA-betoniin verrattuna.

Sereng et al. (2020) tutkivat uusiokiviaineksen kiihdytettyä karbonatisoitumista. He tutkivat sekä rakennusjätteestä että laboratorio-olosuhteista peräisin olevia uusiokiviaineksia. Kiihdytettyä karbonatisoitumista tutkittiin kahdella konsentraatiolla: 100 % ja 15 %. Jälkimmäinen vastaa tutkijoiden mukaan klinkkeriuunista talteenotettavissa olevaa konsentraatiota. Tulosten perusteella konsentraation kasvattamisella yli 15 prosentin ei ole merkittävää vaikutusta karbonatisoitumiseen. Tutkimuksessa selvitettiin myös uusiokiviaineksen kosteuden merkitystä talteenotettavan hiilidioksidin määrään. Kosteuspitoisuudella on merkitystä karbonatisoitumiseen, mutta optimaalinen kosteuspitoisuus riippuu kiviaineksen lujuudesta ja raekoosta. Normaalilujuusbetoneista murskatun kiviaineksen optimaalinen vesipitoisuus oli tutkimuksessa luokkaa 0,2...0,5 ja korkealujuusbetoneista 2...4 prosenttia. Hienot kiviainekset pystyvät suuremman ominaispinta-alansa ansiosta sitomaan enemmän hiilidioksidia kuin karkeat. Myös niiden optimaalinen kosteuspitoisuus on karkeita korkeampi. (Sereng et al. 2020)

Uusiokiviaineen karbonatisoimisen avulla on mahdollista sitoa hiilidioksidia betonirakenteisiin pitkiksi ajoiksi. Hiili ei palaudu takaisin ilmakehään rakenteen käyttöiänkään jälkeen, ellei muodostunut kalsiumkarbonaatti pääse kalsinoitumaan. Betonirakenne toimisi tällöin hiilivarastona. Tavallisesti betoni lujenee ja haurastuu karbonatisoituessaan. Lu et al. (2019) tutkimuksen mukaan näin tapahtuu myös, kun käytettävä RCA-uusiokiviaines karbonatisoidaan. Karbonatisoitumista voidaan Sereng et al. (2020) mukaan kiihdyttää jo 15 prosentin hiilidioksidikonsentraatiolla. Tämä tarkoittaa, että kiviainesta voidaan karbonatisoida esimerkiksi klinkkeriuunista talteenotettavalla kaasulla. Infante Gomes et al. (2021) toteavat koontitutkimuksessaan, että kiviaineksen karbonatisoimisen vaikutusta pitkäaikaiskestävyyteen tulisi tutkia enemmän ennen laajamittaista soveltamista. He myös toteavat uusiokiviaineksen karbonatisoimisen parantavan lähes kaikkia betonin ominaisuuksia tavallisen uusiokivaineksen käyttöön verrattuna.

Sementti

Sementin tuotannosta aiheutuu merkittävä osuus niin maailman kuin betoninkin päästöistä. Tavallisessa betonissa CEM I -sementin osuus betonin painosta on 10...15 % ja päästöistä 70...80 %. Suomen päästöistä 1,8 prosenttia aiheutuu sementin valmistamisesta (Finnsementti 2021a). Osa aiheutuu klinkkerin polton suorasta energian kulutuksesta. Merkittävin osa aiheutuu kuitenkin klinkkerin poltossa tapahtuvasta kemiallisesta reaktiosta, joka antaa sementille sen ominaisuudet.

Klinkkeri valmistetaan kuumentamalla kiertouunissa kalkkikiveä ja muita materiaaleja, esimerkiksi savea ja hiekkaa, 1 450 °C lämpötilaan. Poltossa kalkkikivi kalsinoituu, jolloin se saavuttaa hydratoitumisominaisuutensa. Tästä kemiallisesta prosessista aiheutuu noin 60...65 % sementin valmistuksen päästöistä loppujen aiheutuessa uunin lämmityk-

sestä. Karbonatisoituminen on kalsinoitumiselle käänteinen reaktio. (CEMBUREAU 2020; Finnsementti 2020a)

Sementin koostumukselle asetetaan useita eri vaatimuksia. Sementtiä käsittelevässä standardissa *SFS-EN 197-1 Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus* (2012) esitetyt tavalliset sementit on jaettu sementin koostumuksen perusteella viiteen luokkaan CEM I...CEM V. CEM I -sementissä klinkkerin osuus on 95...100 %. Finnsementin CEM I -sementissä on 95 % klinkkeriä ja 5 % kipsiä. Niitä käytetään nykyään käytännössä vain elementtiteollisuudessa ja sulfaatinkestävyyttä vaativissa paikallavalukohteissa.

CEM II/A -sementeissä sideaineesta 6...20 % on korvattu masuunikuonalla, silikalla, pozzolaaneilla, lentotuhkalla tai kalkkikivellä. CEM II/B -sementissä vastaava korvausosuus on 21...35 %. Silikan osuus on rajoitettu kaikilla CEM-sementeillä 10 prosenttiin. CEM III -sementeissä masuunikuonan korvausosuus on 36...100 %. CEM IV -sementissä 11...55 % on korvattu silikan, pozzolaanien tai lentotuhkien yhdistelmällä. CEM V -seos-sementeissä masuunikuonalla ja pozzolaaneilla tai silikaattipitoisilla lentotuhkilla korvataan 36...60 % klinkkeristä. (SFS-EN 197-1 2012)

Sementit on jaettu kolmeen standardilujuusluokkaan niiden 28 päivän iässä määritetyn puristuslujuuden [MPa] mukaan: 32,5; 42,5 ja 52,5. Nämä luokat on edelleen jaettu kolmeen varhaislujuusluokkaan: normaali varhaislujuus N, korkea varhaislujuus R ja alhainen varhaislujuus L. Luokka L koskee ainoastaan CEM III -sementtejä. Sitoutumisajan alun alarajan määrää sementin standardilujuusluokka. (SFS-EN 197-1 2012)

Sementin sulfaatinkestävyys on ilmoitettava sementin nimessä SR-merkinnällä. SR-sementit voivat olla tyyppiä CEM I, CEM III tai CEM IV. Seostamattomia sulfaatinkestäviä sementtejä on kolme, CEM I-SR 0/3/5, jossa arabialainen numero ilmoittaa klinkkerin suurimman sallitun trikalsiumaluminaattipitoisuuden (C_3A) prosentteina. Käytettäessä lentotuhkaa tai luonnon pozzolaaneja sisältäviä CEM IV/A-SR ja IV/B-SR -sementtejä on klinkkerin suurin sallittu C3A-pitoisuus 9 prosenttia. Sulfaatinkestävillä masuunikuonasementeillä CEM III/B-SR ja III/C-SR ei ole erillistä vaatimusta klinkkerin C_3A-pitoisuudelle. (SFS-EN 197-1 2012)

Suomessa valmistetaan tällä hetkellä CEM I ja CEM II -sementtejä. Myös CEM III -sementtien valmistus on aloitettu, mutta täysi tuotantokapasiteetti saavutetaan vasta kesällä 2022 (Finnsementti 2021b). Maahantuotua CEM III -sementtiä on jo alettu käyttää osana vähähiilisten betonien valmistamista myös Suomessa. Suomessa valmistettavien CEM I ja CEM II -sementtien päästöjen vaihteluväli on noin 626...1 100 CO_2e-kg/tonni (Finnsementti 2020c). CEM III -sementin päästö on luokkaa 250 CO_2e-kg/tonni.

Sementti aiheuttaa nykyisellään valtaosan betonin päästöistä. Euroopan sementtituottajien järjestö CEMBUREAU pyrkii sementin koko arvoketjussa hiilineutraaliuteen vuoteen

2050 mennessä. Välitavoitteena on 40 % päästövähennys arvoketjussa vuoden 1990 sementin päästöistä vuoteen 2030 mennessä. Arvoketju alkaa klinkkerin poltosta ja päättyy valmiin rakenteen purkamiseen ja materiaalien kierrätykseen. Esitetyn tiekartan viisi pääkohtaa ovat klinkkeri, sementti, betoni, rakentaminen ja karbonatisoituminen. (CEMBUREAU 2020) On syytä ottaa huomioon, että järjestön tavoitteissa sementin valmistuspäästöjä vähennetään sekä vähentämällä sementin valmistuspäästöjä että ottamalla huomioon betonin valmistuksessa ja betonirakentamisessa toteutettavia päästövähennyksiä.

CEMBUREAUn alaisten toimijoiden sementin suhteelliset päästöt olivat 783 CO_2e-kg/t vuonna 1990. Koko arvoketjussa mitattavat tavoitteet ovat 472 CO_2e-kg/t vuoteen 2030 ja 0 CO_2e-kg/t vuoteen 2050 mennessä. Vuosina 1990-2017 arvoketjun suhteelliset päästöt ovat vähentyneet 116 CO_2e-kg/t. Järjestön täysjäseniä ovat melkein kaikkien EU-maiden sekä Britannian, Norjan, Sveitsin ja Turkin sementtiteollisuus. (CEMBUREAU 2020) Seuraavaksi päästötavoitteet esitellään tarkemmin ja ne ilmoitetaan sementtitonnia kohden.

Vuoden 2030 tavoitteeseen sisältyy sementin päästöjen vähentämisen lisäksi noin 99 CO_2e-kg/t betonin valmistamisen ja rakentamisen päästövähennyksiä. Näin ollen sementin päästöjä pyritään vähentämään oikeasti 212 CO_2e-kg/t vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Tämä vastaa vain noin 68 % päästötavoitteesta. Vuosien 2030 ja 2050 välillä sementtituotannon ulkopuolisten päästövähennyksien osuus on noin 11 CO_2e-kg/t, eli noin 2 prosenttia vuoden 2030 jälkeisistä päästövähennystoimenpiteistä.

Klinkkerin valmistusprosessissa päästöjä pyritään vähentämään 440 CO_2e-kg/t vuoden 2017 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Merkittävä 280 CO_2e-kg/t osuus vähennyksestä on tarkoitus saavuttaa hiilidioksidin talteenotolla, säilytyksellä ja hyödyntämisellä (*carbon capture, storage and utilisation, CCSU*). CCSU-teknologiaa käsitellään tarkemmin alaluvussa 4.2.6. (CEMBUREAU 2020)

Muita klinkkerin valmistamisen päästöjä vähentäviä keinoja ovat kalkkikiven korvaaminen muilla sivuvirroilla (27 CO_2e-kg/t) ja portlandsementin korvaajien kehittäminen spesifisiin käyttökohteisiin (17 CO_2e-kg). Klinkkerin valmistuksessa käytettävien polttouunien hyötysuhde on nykyisin 70...80 %. Lämpöhäviöiden pienentämisellä ja hyötykäytöllä on tarkoitus vähentää päästöjä 26 CO_2e-kg/t. Polttoaineen biomassalla korvaamisen arvioidaan vähentävän päästöjä 71 ja vetypolttoaineilla sekä sähköistämisellä 19 CO_2e-kg/t. (CEMBUREAU 2020)

Tiekartassa sementin päästövähennysosuus vuosina 2017-2050 on 117 CO_2e-kg/t. Vähennyksestä pienemmän klinkkeriosuuden vaikutus on 72, hiilineutraalin sähkön 35 ja hiilineutraalin kuljetuksen 10 CO_2e-kg/t. (CEMBUREAU 2020)

Betonin valmistuksen päästöjä pyritään vähentämään 52 CO_2e-kg/t kehittämällä betonin suhteitusta ja 7 CO_2e-kg/t hiilineutraalilla kuljetuksella. Suhteituksen kehittämiseen liittyy digitalisaation ja sementtiä korvaavien sideaineiden hyödyntäminen. (CEMBUREAU

2020)

Rakentamisen päästövähennyksen määräksi on arvioitu 71 CO_2e-kg/t vuosina 2017-2030 ja 89 CO_2e-kg/t vuosina 2017-2050. Lisäksi vähennystavoitteiden ulkopuolella on arvioitu käytössä olevan betonikannan sitovan itseensä merkittävän määrän hiilidioksidia. (CEMBUREAU 2020) Luvussa 4.2.3 käsitellään tarkemmin rakentamisen päästöjä ja kohdissa 4.2.4 ja 4.2.5 karbonatisoitumisen vaikutusta.

Seosaineet

Betonin valmistuksessa on perinteisesti käytetty sementin lisäksi seosaineita parantamaan niin tuoreen kuin kovettuneenkin betonin ominaisuuksia. Seosaineet ovat hienojakoisia epäorgaanisia materiaaleja, ja ne on jaettu kahteen luokkaan. Tyypin I seosaineet ovat reagoimattomia tai lähes reagoimattomia aineita. Tyypin II seosaineet ovat pozzolaanisia tai piilevästi hydraulisesti aktiivisia aineita. Standardissa SFS-EN 206 (2021) määriteltyjen yleisesti soveltuvien seosaineiden lisäksi on mahdollista käyttää myös muita soveltuvaksi osoitettuja aineita. Soveltuvuus voidaan osoittaa joko eurooppalaisella standardilla tai tuotehyväksynnällä, tai paikallisten säännösten mukaisesti. (SFS-EN 206 2021)

Tyypin I yleisesti soveltuviin seosaineisiin kuuluvat fillerikiviaines sekä pigmentit (SFS-EN 206 2021). Epäaktiivisten tyypin I fillerien määrä ovat yhdessä sementin määrän kanssa tärkeitä betonimassan muokkautuvuuden syntymiseksi. Riittävä fillerimäärä myös vähentää betonin erottumisriskiä. Väripigmenttejä ei yleensä käytetä sillanrakennuksessa.

Tyypin II yleisesti soveltuviin seosaineisiin kuuluvat lentotuhka, silika ja masuunikuona (SFS-EN 206 2021). Näillä hydratoitumisreaktioon osallistuvilla seosaineilla korvataan osa sementistä. Monet näistä sideaineista ovat muun teollisuuden sivuvirtoja, joten teknisten ominaisuuksien lisäksi niiden käytöllä on siis kiertotaloudellisia ja ympäristöllisiä vaikutuksia. Seosaineiden sementistä eroava käyttäytyminen otetaan standardin mukaisesti huomioon k-arvomenettelyllä. Tällöin suhteituksessa käytettävä v/s-suhde korvataan suhteella v/(s + k * seosaineen massa) eli *vesi-sideainesuhteella*. Tästä eteenpäin termiä v/s-suhde käytetäänkin tarkoittamaan vesi-sideainesuhdetta, jollei muuta mainita.

Standardin SFS-EN 206 (2021) mukaiset seosaineet korvaavat sementtiä betonin osa-aineena. Standardissa SFS-EN 197-1 (2012) esitetyt pääosa-aineet taas korvaavat portlandklinkkeriä sementissä. Sideaineiden lisäämistapa vaikuttaa lähtökohtaisesti vain vähäisesti betonin ominaisuuksiin, mutta esimerkiksi niiden kemiallisen koostumisen varmentaminen voi olla helpompaa sementtitehtaalla kuin betoniasemalla (De Belie et al. 2018). Esimerkiksi Infrabetonien valmistus -ohjeessa (Väylävirasto 2020) esitetyt rajaarvot eri seosaineiden määrille on esitetty kokonaismäärälle betonissa, sisältäen siis sekä SFS-EN 206 että SFS-EN 197-1 tarkoittamat vaihtoehtoiset sideaineet. Tässä alaluvussa näitä vaihtoehtoisia sideaineita tarkastellaan yhdellä nimikkeellä *seosaine*.

Hiilenpolton sivuvirtana muodostuvia **lentotuhkia** on 1960-luvulta käytetty laajasti betonin sideaineena ja fillerinä. Niiden käyttö on perustunut ennenkaikkea niiden lujuutta ja tuoreen betonimassan työstettävyyttä parantaviin ominaisuuksiin. Lentotuhkat ovat hiilen poltossa savukaasujen mukana nousevia hienoja partikkeleita. Aiemmin niiden annettiin päätyä ilmakehään, mistä aiheutui sakeaa savusumua teollisuusalueille. Nykyään lentotuhkat on suodatettava ja kerättävä kaasuista. (De Belie et al. 2018)

Käytettävät lentotuhkat sisältävät huomattavia määriä silikaatteja tai kalkkia. Yleisesti ottaen jalommat hiilet (hiilipitoisuus noin tai yli puolet) tuottavat silikaattipitoisia (V) ja vähäpitoisemmat hiilet kalkkipitoisia (W) lentotuhkia. Lentotuhkat ovat pozzolaanisia, eivätkä ne siis aktivoidu betonissa ilman sementin hydrataatiotuotteita. Kalkkipitoiset tuhkat voivat lisäksi olla piilevästi hydraulisia. Lentotuhkan sisältämän palamattoman hiilen liiallinen määrä voi vaikuttaa joidenkin lisäaineiden, kuten huokostimien, toimintaan. Lentotuhka jaetaan luokkiin A...C niiden hehkutushäviön (5,0...9,0 p-%) mukaan. (SFS-EN 197-1 2012)

Edellinen jaottelu vastaa standardin SFS-EN 197 jaottelua sementtiin lisättävistä lentotuhkista. Sementin seosaineena on mahdollista käyttää sekä V- että W-tuhkia, mutta kaikkien sementtiin lisättävien lentotuhkien on oltava peräisin vain hiilen poltosta. (SFS-EN 197-1 2012)

Nykyisellään betoniin lisättävänä seosaineena voidaan käyttää vain silikaattipitoisia lentotuhkia (SFS-EN 206 2021). Standardin SFS-EN 206 (2021) mukaan lentotuhkan k-arvo on 0,4, kun lentotuhkaa on korkeintaan 33 % CEM I -sementin massasta tai 25 % CEM II/A -sementin massasta. Ylimenevää osuutta ei saa hyödyntää aktiivisena sideaineena.

Betonin seosaineena käytettävää lentotuhkaa voidaan kerätä prosessista, jossa poltetaan joko hiiltä yksinään tai yhdessä oheispolttoaineiden kanssa (De Belie et al. 2018). Oheispolttoaineita käytettäessä tulee tuottajan osoittaa lentotuhkan käyttökelpoisuus. Euroopassa hyväksyttyjä oheispolttoainelajeja on kuusi: (SFS-EN 450-1 2013)

1. Kiinteät biopolttoaineet, pl. jätepuu
2. Eläinten liha- tai luujauho
3. Yhdyskuntajätevesiliete
4. Paperiliete
5. Petrolikoksi
6. Näennäisesti tuhkattomat neste- ja kaasupolttoaineet

Yhdyskunta- tai teollisuusjätteitä ei saa käyttää seosaineena käytettävän lentotuhkan osapolttoaineina (SFS-EN 450-1 2013). Nämä jätteet sisältävät vaihtelevissa määrin raskasmetalleja, joiden liukeneminen betonista ei ole hyvä asia betonin säilyvyyden eikä ympäristön kannalta. Hiilivoimaloiden vähentyessä etenkin Länsi-Euroopassa lentotuhkan

tuotantomäärät eivät vastaa betoniteollisuuden kysyntää (De Belie et al. 2018). On esitetty, että puunpolton yhteydessä suodatettavia puutuhkia voitaisiin käyttää korvaamaan lentotuhkaa (Lazik ja Garrecht 2020; Sirico et al. 2021).

Sirico et al. (2021) tutkivat puuvoimalaitosten biotuhkan käyttöä betonin seosaineena. Tuhkalla korvattiin 0...10 prosenttia CEM II/A-LL 42.5 R -sementistä. Kaikkien betonien v/s-suhde oli 0,5. Tuoreen massan tavoitenotkeusluokka oli S4. Notkeuden saavuttamiseksi referenssibetoniin lisättiin tehonotkistinta 0,95 % sementin massasta. Biotuhkaa 2,5; 5,0 ja 7,5 prosenttia sisältäviin betoneihin tarvittiin tehonotkistinta 1,25...2,50 % sementin massasta. Betonin, jossa 10 % sementistä oli korvattu tuhkalla, notkeusluokkaa ei saatu S1 korkeammaksi edes käyttämällä notkistinta 3,3 prosenttia sementin massasta. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla analysoitaessa tuhkan todettiin sopivan hyvin sementtikiven matriisiin. Puristuslujuus 28 vuorokauden ikäisenä oli korkeintaan 5 prosentin korvausosuuksilla 3...5 % verrokkibetonia suurempi, kun koekappaleet oli jälkihoidettu märkinä. Kuivassa jälkihoidetuilla vastaava lujuusero oli 17...25 %. Korkeammat korvausosuudet taas aiheuttivat märkinä jälkihoidetuissa näytteissä 19...33 % lujuuden alenemisen. Tutkijat suosittelivatkin korkeintaan 5 % korvausosuutta. (Sirico et al. 2021)

Sirico et al. (2021) käyttämän biotuhkan raekoko oli pääosin luokkaa 100 µm. Lazik ja Garrecht (2020) taas tutkivat kahta erikokoista puutuhkaa: syklonituhkaa (2...160 µm) ja sähkösuodatintuhkaa (< 10 µm). Puutuhkan raekoon lisäksi myös sen kemiallisella koostumuksella on merkitystä betonin ominaisuuksiin. Lazik ja Garrecht (2020) tutkivat neljän eri puutuhkan kemiallisen koostumuksen. Pyökin poltosta peräisin oleva sähkösuodatintuhka (WA1) oli noin 40-prosenttisesti kaliumoksidia. Sekapuun poltosta peräisin oleva sähkösuodatintuhka (WA2) taas oli sisälsi 31,1 % kalsiumoksidia, 16,4 % kaliumoksidia ja 11,2 % piidioksidia. Molemmat sisälsivät myös noin 17 % rikkitrioksidia. Pyökin poltosta peräisin oleva syklonituhka taas sisälsi 37,9 % kalsiumoksidia ja 13,8 % kaliumoksidia. Sekapuun poltosta peräisin oleva syklonituhka (WA4) sisälsi 52,7 % piidioksidia ja 17,3 % kalsiumoksidia. Viimeksi mainitun kemiallinen koostumus oli varsin lähellä tutkitun silikaattipitoisen lentotuhkan koostumusta.

Lazik ja Garrecht (2020) valmistivat CEM I 42.5 N -pohjaisen verrokkibetonin lisäksi kolmea betonia, joissa 25 % sementistä oli korvattu silikaattipitoisella lentotuhkalla tai toisella tutkituista sähkösuodatintuhkista. Verrokkibetonin puristuslujuus 28 vuorokauden iässä oli noin 89 MPa. WA1-tuhkaa sisältäneen betonin puristuslujuus[3] oli vain noin 23 MPa. Lentotuhkaa ja WA2-tuhkaa sisältäneiden betonien lujuudet olivat keskenään samaa luokkaa, noin 82 ja 78 MPa. Kummassakaan tutkimuksessa ei huomioitu lentotuhkan käytön vaikutusta esimerkiksi k-arvon avulla. Lentotuhkan korvaaminen puunpoltosta peräisin olevilla tuhkilla voi siis olla mahdollista, vaikka Lazik ja Garrecht (2020) tutkimista puutuhkista ainoastaan WA4 täytti lentotuhkien koostumukselle esitetyt vaatimukset.

[3]Lazik ja Garrecht (2020) julkaisusta ei käynyt ilmi, oliko kyse kuutio- vai lieriölujuudesta. Sillä ei kuitenkaan ole suurta merkitystä tämän tutkimuksen kannalta.

Kroatiassa Gabrijel et al. (2021) taas tutkivat kolmen erilaisen sekapuun poltosta peräisin olevien puutuhkien vaikutusta betonin ominaisuuksiin. Tuhkien mediaanihalkaisijat d_{50} olivat 71,9 (F4), 120,7 (F5) ja 17,8 µm (F6), ja sementin 9,4 µm. Pyökin, tammen ja kuusilajien poltosta peräisin olevan F4-tuhkan kemiallinen koostumus vastasi tutkimuksessa käytetyn CEM I -sementin koostumusta. Kaikki tutkitut tuhkat olivat emäksisempiä (pH 13,0...13,2) kuin sementti (pH 12,9). Tuhkat sisälsivät kalsiumoksidia ja pozzolaaneja 75,56 (F4), 70,93 (F5) ja 67,05 % (F6). Sementillä näiden pitoisuus oli 89,77 prosenttia. Tuhkien tiheydet olivat 2590, 2630 ja 2330, ja sementin 3100 kg/m^3. Verrokkibetonin lisäksi valmistettiin seitsemän betonia, joissa sementistä korvattiin tuhkalla 15 tai 30 % (F4), 15, 30 tai 45 % (F5), tai 5 tai 15 % (F6). Kaikissa betoneissa sideaineen kokonaismäärä oli 380 kg/m^3 ja v/s-suhde 0,5. Kiviaineksen määrä oli likimain vakio, 1791...1821 kg/m^3. Tuhkan aktiivisuutta ei siis tässäkään tutkimuksessa otettu huomioon suhteituksessa.

Verrokkibetonin kuutiolujuus oli 45,9 MPa. Betonien puristuslujuus pieneni 5...31 % ja 13...35 %, kun tuhkien F4 ja F5 korvausosuus kasvoi. Puristuslujuus taas kasvoi 6...19 % tuhkan F6 korvausosuuden kasvaessa. Puristuslujuuden lisäksi tutkijat tarkastelivat muun muassa betonien työstettävyyttä ja kapillaarisuutta. Useimpien betonien notkeus oli luokkien S2 ja S3 rajalla. F4-tuhkan 30 % korvausosuudella massan notkeus oli S1 ja F4-tuhkan 15 % korvausosuudella painuma oli vain 5 mm (ei luokkaa). Painuma oli 110 mm (S3), kun F4-tuhkaa oli vain 5 %. Jopa 45 prosentin korvausosuudella (F5) puutuhkien vaikutus veden kapillaariseen imeytymiseen oli tutkijoiden mukaan hyvin pieni. Tutkijat esittivätkin, että puunpolton tuhkia voitaisiin käyttää myös vain korvaamaan filleriä. (Gabrijel et al. 2021)

Puutuhkan vaikutukset betonissa riippuvat sekä sen raekoosta että kemiallisesta koostumuksesta. Esimerkiksi Gabrijel et al. (2021) tutkimuksessa tuhkan F4 kemiallinen koostumus oli melko lähellä käytetyn sementin koostumusta, mutta raekoko oli kertaluokkaa suurempi, jolloin puristuslujuus aleni 15 % korvausosuudella 6 prosenttia ja 30 % korvausosuudella jo 30 prosenttia. Lazik ja Garrecht (2020) tutkimuksessa taas likimain yhtä hienot tuhkat WA1 ja WA2 olivat kemialliselta koostumukseltaan erilaisia. Betonin puristuslujuus aleni 76 prosenttia, kun 25 % CEM I -sementistä oli korvattu WA1-tuhkalla. Tuhkaa WA2 käytettäessä lujuuden alenema oli vain 12 prosentin luokkaa. Puutuhkan raekoko ja kemiallinen koostumus taas riippuu voimakkaasti käytettävästä polttoteknologiasta, poltettavasta puumateriaalista sekä paikallisista olosuhteista (Gabrijel et al. 2021). Myös lentotuhkat, jotka eivät täytä standardin EN 450-1 vaatimuksia, vaikuttivat Lazik ja Garrecht (2020) tutkimuksessa lupaavilta seosaineilta. Toisaalta Sirico et al. (2021) ja Lazik ja Garrecht (2020) tutkimuksissa huomattiin, että osa puutuhkista jähmettää betonimassaa jo noin 10 % korvausosuudella. Puuperäisten lentotuhkien vaatimuksia olisikin suotavaa tutkivaa, ja tarvittaessa päivittää ohjeistusta.

Masuunikuonaa valmistetaan sivutuotteena raudan valmistuksen alkuvaiheessa masuuniin muodostuneesta sulatteesta jäähdyttämällä. Masuunikuonajauhe notkistaa betonia

ja sen avulla voidaan myös vähentää betonin lämmönkehitystä. Kuona vähentää betonimassan ilmapitoisuutta ja lisää kovettuneen betonin pitkäaikaisia muodonmuutoksia. (De Belie et al. 2018) Suomessa masuunikuonaa syntyy terästeollisuuden sivuvirroista tarpeeksi suomalaiseen betonituotantoon, mutta esimerkiksi Keski-Euroopassa sen määrä ei lähitulevaisuudessa välttämättä enää vastaa kasvavaa kysyntää. Onkin siis mahdollista, että kuonan markkinahinnat nousevat kysynnän kasvaessa. Myös terästeollisuuden sähköistyminen saattaa vaikuttaa kuonien saatavuuteen.

Masuunikuona on piilevästi aktiivinen seosaine, joka sisältää kalkkia, piidioksidia, alumiinioksidia sekä magnesiumoksidia. Kuonan kemialliseen koostumukseen vaikuttavat masuunissa käytetyt raaka- ja polttoaineet. Samasta masuunista peräisin olevien masuunikuonien koostumukset ovat kuitenkin keskenään samanlaisia, sillä pääprosessissa pyritään mahdollisimman tasalaatuisen raakaraudan valmistukseen. (De Belie et al. 2018)

Päätyessään tekemisiin veden kanssa masuunikuona hydratoituu rajallisesti, kunnes syntyy sitä suojaava, reaktiota hidastava vähäkalkkinen kalvo. Jos seoksessa on mukana myös aktivaattori ja sen pH on riittävän korkea, hydratoituminen kiihtyy. Betonin tapauksessa aktivaattori on portlandinsementti, mutta myös muita emäksisiä aktivaattoreita voidaan käyttää. Kuonaa käytetään yleensä 20...80 prosenttia sideaineen kokonaismäärästä. Sitä voidaan käyttää korvaamaan klinkkeriä sementissä ja sementtiä betonissa. (De Belie et al. 2018)

Esimerkiksi Finnsementin KJ400-masuunikuonan moduulien A1...A3 ilmastopäästöt ovat 50,11...55,39 CO_2e-kg/tonni (Finnsementti 2020b). Masuunikuonan päästöt massaa kohden ovat siis luokkaa kymmenesosa sementin vastaavista. Päästöihin ollaan Euroopassa lähitulevaisuudessa oletettavasti allakoimassa myös osa teräksen valmistusprosessin päästöistä, jolloin päästökertoimen voidaan olettaa olevan jatkossa vähintään 120...150 CO_2e-kg/tonni (Ilomäki 2021).

Piin valmistuksen sivuvirtana syntyvää piidioksidia eli **silikaa** käytetään betonin sideaineena ja hienona fillerinä. Sen suuren ominaispinta-alan ansiosta se lisää betonin lujuutta ja tiiviyttä. (De Belie et al. 2018) Standardin SFS-EN 206 (2021) mukaan silikan k-arvo on pääsääntöisesti 2,0. Rasitusluokissa XC ja XF v/s-suhteen ollessa yli 0,45 silikan k-arvo on 1,0. Sideaineena hyödynnettävää silikaa saa standardin mukaan olla korkeintaan 11 % sementin CEM I tai CEM II/A massasta.

Silikaa on aiemmin käytetty esimerkiksi Norjassa runsaastikin korvaamaan sementtiä, mutta sen betonin ominaisuuksia parantavien vaikutusten vuoksi sen hinta on kohonnut viime vuosikymmeninä. Nykyisin silikaa käytetään haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi mahdollisimman pieniä määriä. (Fidjestøl ja Dåstøl 2008)

Palamatonta **kalkkikiveä** voidaan käyttää joko seosaineena tai kiviainesfillerinä. (De Belie et al. 2018) Elgalhud et al. (2016) tekemän kansainvälisen koontitutkimuksen mukaan

kalkkikiveä voitaisiin klinkkeristä korvata korkeintaan 25 % ilman vaikutusta huokosrakenteeseen. He kuitenkin esittävät, että lujuuden kannalta tulisi korkeintaan 15 % klinkkeristä korvata polttamattomalla kalkkikivellä.

Väyläviraston Infrabetonien valmistus -ohjeen (Väylävirasto 2020) mukaan sementin kalkkikivipitoisuus saa olla korkeintaan 20 %. Kalkkikivifillerin seosainekerroin sementissä on 0, eikä betoniasemalla lisättävää kalkkikivifilleriä pidetä seosaineena. Esimerkiksi Finnsementin valmistama CEM I -sementti sisältää 5 prosenttia kalkkia ja 95 prosenttia klinkkeriä.

On myös mahdollista käyttää useampaa eri seosainetta samassa betonissa. Näin niiden erilaisia vaikutuksia betonin ominaisuuksiin voidaan optimoida (De Belie et al. 2018). Jossakin määrin tämä on jo nykyisin Suomessa käytössä olevien standardien ja ohjeiden mukaan mahdollista: esimerkiksi silikaa voidaan lisätä pieniä, noin 10 %, määriä parantamaan betonin tiiveyttä (Väylävirasto 2020).

Juhart et al. (2021) käyttivät masuunikuonaa ja erilaisia mikrofillereitä vähentääkseen betonin päästöjä huonontamatta sen ominaisuuksia. Mikrofillerit täyttävät sementtikiveen jääviä rakoja tihentäen näin sen rakennetta. Sideaineiden ja mikrofillerien kokonaismäärä oli kaikissa betoneissa 340 kg/m^3. Verrokkibetonin sideaineena käytettiin CEM II/A-L 42.5 N -sementtiä ja 40 kg/m^3 masuunikuonaa. Kahdessa kehitetyssä ekobetonissa taas käytettiin CEM I 52.5 R -sementtiä 187 kg/m^3. *UF Eco* -betonissa oli lisäksi 136 kg/m^3 masuunikuonaa ja 17 kg/m^3 erittäin hienoa kalkkikivifilleriä. *D Eco* -betonissa taas oli 136 kg/m^3 masuunikuonaa, 34 kg/m^3 reagoivaa kalkkikiveä sekä 17 kg/m^3 reagoimatonta kalkkikivifilleriä. Kaikkien betonien hieno ja karkea kiviaines oli täysin samanlaista ja kaikissa käytettiin tehonotkistimia ja huokostavia lisäaineita yhteensä 2,5...2,7 kg/m^3. Tuoreen massan notkeus oli kaikilla seoksilla samaa luokkaa. Ekobetonien puristuslujuudet olivat referenssibetonia suurempia 2 vuorokauden iästä lähtien. Kuutiopuristuslujuus 28 vuorokauden iässä oli referenssibetonilla 40,9 ja ekobetoneilla 50,3...56,7 MPa. Referenssibetonin karbonatisoitumisnopeus oli 3,9 ja ekobetonien 2,9...3,1 mm/$\sqrt{a}$. Myös kloridien tunkeutuminen oli vähäisempää ekobetoneilla. Ilmastopäästöt *GWP* (A1...A3) olivat referenssibetonilla 240 ja ekobetoneilla 167...168 CO_2e-kg/m^3. Primäärienergian kulutus *PEt* oli vastaavasti 1334 ja 1027...1037 MJ/m^3.

Standardissa SFS-EN 206 (2021) esitettyjen yleisesti hyväksyttyjen seosaineiden, standardissa SFS-EN 197-1 (2012) esitettyjen sementin pääosa-aineiden ja Ranskassa jo käytettävän metakaoliinin lisäksi myös lukuisia muita sivuvirtoja voidaan tai voidaan mahdollisesti käyttää rakennebetonissa. Tutkimuksen kohteena olevat sivuvirrat rajautuvat yleensä paikallisen saatavuuden mukaan. Suomessa ja Pohjoismaissa hyvin saatavilla olevia resursseja voisivat olla metsät, kallioperä ja terästeollisuus. Esimerkiksi louhos- ja porajätteiden käyttöä seosaineena on tutkittu runsaasti (Mashaly et al. 2018; Medina et al. 2017; Singh et al. 2016; Yingliang et al. 2020). Myös teräksen valmistuksessa synty-

vän senkkakuonan käyttöä seosaineena on tutkittu (Adesanya et al. 2018). Suomessa on tutkittu myös turvepuuta polttamalla saatavan lentotuhkan käyttöä seosaineena (Ohenoja et al. 2020; Rissanen et al. 2020). Suomessa vaihtoehtoisia sideaineita tutkitaan muun muassa Oulun ja Lappeenrannan yliopistoissa.

Infrabetonien sideaineiden päästövähennyspotentiaali

Kuten aiemmin on kerrottu, seosaineiden käyttöä on rajoitettu esimerkiksi Väyläviraston ohjeessa (2020). Lentotuhkaa saa olla korkeintaan 25 % sideaineiden massasta. Masuunikuonaa saa olla huokostetuissa infrabetoneissa korkeintaan 50 % ja huokostamattomissa 70 %. Silikaa taas saa olla korkeintaan 5 %, jos v/s-suhde on alle 0,35. Muutoinkin silikaa saa olla korkeintaan 7 % sideaineiden massasta. Ohje ei tunne muita seosaineita. Seosaineiden määrään lasketaan betoniasemalla lisättävien aineiden lisäksi käytettävän sementin sisältämä seosainemäärä. Jos käytetään masuunikuonaa ja muita seosaineita, tulee masuunikuonan raja-arvoista vähentää muiden seosaineiden määrä. Esitetyt massaosuudet ovat absoluuttisia, eikä seosainekerrointa k siis käytetä laskettaessa näitä enimmäismääriä. (Väylävirasto 2020)

Taulukossa 4.5 on esitetty infrabetoneissa seosaineiden käytöllä saavutettavissa olevia päästövähennyksiä. Vertailtavat sideaineet olivat CEM I 52.5 R, masuunikuona sekä lentotuhka. Nämä ovat Suomessa yleisesti käytössä olevia sideaineita. Silikalle ei löytynyt päästöarvoa, joten sitä ei käsitellä. Sen sallitut määrät ovat toisaalta hyvin pieniä, joten saavutettavissa olevat päästövähennykset olisivat myös oletettavasti triviaaleja verrattuna muihin seosaineisiin. Laskenta on esitetty liitteessä C.

Taulukko 4.5. *Infrabetonien suurimpien seosaineosuuksien vaikutus sideaineen valmistuspäästöihin ja massaan. Laskenta on esitetty liitteessä C.*

	GWP A1...A3 [CO_2e-kg]	Sideaineen massa [kg]
100 % CEM I	272	350
75 % CEM I + 25 % FA	240	412
50 % CEM I + 50 % GGFBS	162	389
50 % CEM I + 25 % FA + 25 % GGFBS	172	433
30 % CEM I + 70 % GGFBS	110	407
30 % CEM I + 25 % FA + 45 % GGFBS	119	461

Taulukossa 4.5 on lähtökohdaksi otettu 350 kg CEM I -sementtiä, joka voisi olla riittävä määrä yhden betoni-m^3 valmistamiseen. Seuraavilla riveillä on esitetty suurimmat vastaavat yhdistelmät sementtiä, lentotuhkaa ja masuunikuonaa niin, että sideaineen kokonaisaktiivisuus on vastaava, kun on otettu huomioon infrabetoneissa käytettävät seosainekertoimet. Masuunikuonan k-arvona on käytetty 0,8 ja lentotuhkan 0,4. Massoiltaan eri-

suuruiset seokset ovat siis teoriassa lujuusominaisuuksiltaan vastaavia. Ensin on esitetty 25 % lentotuhkaa sisältävä vaihtoehto. Tämän jälkeen on esitetty ensin 50 % masuunikuonaa tai sen ja lentotuhkan yhdistelmää sisältävät huokostetut vaihtoehdot. Viimeiseksi on esitetty vastaavat arvot 70 % seosaineita sisältäville huokostamattomille vaihtoehdoille.

Väyläviraston ohjeiden mukaisia infrabetoneja käytettäessä on siis mahdollista vähentää sideaineen päästöjä noin 60 prosenttia huokostamattomalla ja 40 % huokostetulla betonilla verrattuna klinkkerisementtiä sisältävään vaihtoehtoon. Kuten aiemmin on todettu, noin 80 % betonin päästöistä aiheutuu sideaineista. Näin ollen infrabetonien päästöjä on mahdollista vähentää huokostetuillakin betoneilla kolmanneksella. Kuten aiemmin on todettu, tullee masuunikuonan päästöjen allokointi muuttumaan ja siten sen päästöarvo kasvamaan lähivuosina. Toisaalta, myös hiilivoimaloita on tarkoitus ajaa lähivuosina alas Suomessa, jolloin hiilenpoltosta peräisin olevan lentotuhkan saatavuus todennäköisesti heikkenee. Tämä on kuitenkin oletettavasti mahdollista korvata aiemmin esitetyillä puunpolton lentotuhkilla.

On syytä huomata, että Väyläviraston *Infrabetonien valmistus* -ohjeen tavoitteena on varmistua silloissa ja muissa yleisten liikenneväylien rakenteissa käytettävän betonin riittävästä pitkäaikaiskestävyydestä. Ohjeen sovellusalue on siis hyvin laaja. Kuten muutkin rakennusalalla sovellettavat ohjeet, on *Infrabetonien valmistus* kokoelma tehtyjä varman puolella olevia valintoja. Etenkin hankekohtaiset poikkeukset sen soveltamisesta tulisi siis mahdollistaa myös tutkimustiedon ja ennakkokokeiden pohjalta.

Metakaoliinit

Erilaisista kaoliniittipitoisista maa-aineksista ja kierrätysmateriaaleista polttamalla valmistettavien *metakaoliinien* käytöstä sideaineena ei ole Suomessa käytännön kokemuksia. Betoniyhdistyksellä on metakaoliinien käyttöä tutkiva työryhmä. Euroopan maista ainoastaan Ranskassa on ohjeistus metakaoliinien käytöstä betonin seosaineena (De Belie et al. 2018).

Metakaoliinia saadaan kuumentamalla kaoliniittipitoista savea 600...900 °C lämpötilaan. Sitä voidaan valmistaa myös kierrätyspaperimassasta tai muusta kaoliniittipitoisesta sivuvirrasta. Metakaoliini sisältää yleensä 50...55 % piidioksidia ja 40...45 % alumiinioksidia. Metakaoliinin raekoko on luokkaa 0,5...5 µm, eli noin kymmenesosa sementtiin ja kymmenkertainen silikaan verrattuna. (Rashad 2013) Metakaoliini on pozzolaaninen materiaali, eli se reagoi sementtiliiman kalsiumhydroksidin kanssa (De Belie et al. 2018).

San Nicolas et al. (2014) tutkivat CEM I -sementin korvaamista 25 % metakaoliinilla. Seostetuilla sementeillä oli hieman suurempi tarve tehonotkistimelle vastaavan notkeuden saavuttamiseksi. Tutkitut pitkäaikaiskestävyysominaisuudet olivat samanlaisia seo-

saineesta riippumatta. Esimerkiksi kapillaarihuokosia oli sama määrä, mutta metakaoliinin avulla saavutettiin suurempi määrä pienempiä huokosia. Reseptien lujuusluokat vaihtelivat välillä C15...C50. (San Nicolas et al. 2014)

Hu ja He (2020) taas tutkivat metakaoliinien vaikutusta sulfaattipitoisissa olosuhteissa. Tutkijoiden mukaan metakaoliinin käytöllä on mahdollista parantaa myös betonin sulfaattikestävyyttä. Tutkimuksessa sulfaattikestävyys parani, kun sideaineesta 20 % oli korvattu metakaoliinilla. Paras puristuslujuus saavutettiin kuitenkin metakaoliinin osuuden ollessa 10 %. (Hu ja He 2020)

Bucher et al. (2021) tutkivat metakaoliinia sisältävän betonin kestävyyttä meriolosuhteissa. Verrokkibetoneita oli neljä: kaksi CEM I -pohjaista, joiden klinkkeri oli peräisin eri tehtailta (a ja b), yksi CEM II/A (klinkkeri b) ja CEM III/A (klinkkeri a). Kolmessa betonilaadussa 15, 20 tai 25 % CEM I -sementistä (klinkkeri b vain 15 %) ja kahdessa 10 tai 15 % CEM II -sementistä oli korvattu metakaoliinilla. Yhdessä tutkitussa laadussa 15 % CEM 1 a -sementistä oli korvattu metakaoliinilla, jota lisättiin vielä 5 % sideainemäärästä korvaamaan fillerikiviainesta. Käytetyssä CEM II -sementissä 11 ja CEM III -sementissä 62 prosenttia sideaineesta oli korvattu masuunikuonalla. Käytettyjen sementtien lujuusluokka oli 52,5 MPa ja suhteituksen tavoitelieriölujuus 40 MPa 28 päivän iässä.

Kloridien tunkeutuminen oli pienintä, kun 15 % sementistä oli korvattu metakaoliinilla. Metakaoliinin 20 ja 25 % osuuksilla saavutettiin sama kloridididiffuusiokerroin kuin verrokkibetoneilla. Kloridit kulkeutuivat metakaoliinipohjaisissa betoneissa samalla tavalla kuin sulfaatinkestävissä masuunikuonaa sisältävissä betoneissa. Metakaoliinin todettiin myös parantavan raudoitteiden korroosiosuojaa tavalliseen betoniin verrattuna. Korroosio alkoi sitä myöhemmin, mitä suurempi osuus sideaineesta oli korvattu metakaoliinilla. Kiihdytetyn kloriditunkeutumiskokeen perusteella laskettiin arvio ajanhetkestä, jolla kloridit saavuttavat raudoitteet 50 mm suojabetonikerroksella. Paras tulos, 47 vuotta, saavutettiin CEM I -pohjaisella betonilla, jossa sideaineesta 15 % oli korvattu metakaoliinilla. Huonoin tulos oli tavallisella CEM I -pohjaisella betonilla, jolla vastaavaksi tunkeutumisajaksi arvioitiin 27 vuotta. (Bucher et al. 2021)

Paiva et al. (2012) tutkivat metakaoliinin vaikutusta tuoreen betonin notkeuteen ja koostumukseen sekä lujittuneen betonin lujuuteen ja huokosrakenteeseen. He tutkivat myös notkistimen käytön vaikutusta näihin ominaisuuksiin. Tutkimuksessa sementistä 10, 20 tai 30 prosenttia korvattiin metakaoliinilla. Käytetty sementti oli CEM I 42.5 R. Verrokkibetonin v/s-suhde oli 0,60. Muista betoneista valmistettiin kustakin kaksi erilaista, suhteituksessa yhtä notkeaa (S2) versiota: yksi, jonka notkeus säädettiin kasvattamalla v/s-suhdetta ja toinen, jonka v/s-suhde oli sama kuin verrokkibetonilla ja notkeus säädettiin notkistimella. Lisäksi betonista, jonka sideaineesta 10 prosenttia oli metakaoliinia, valmistettiin kolmas vielä notkeampi seos käyttämällä 25 prosenttia enemmän notkistinta. Kaikissa betoneissa käytettiin sama määrä hiekkaa ja kalkkikivimurskaa.

Tutkimuksessa tuoreen betonin ominaisuuksia tutkittiin mittaamalla massan myötöjännitystä ja viskositeettia reometrilla ja painumaa kartiokokeella. Tulosten perusteella sopivalla notkistimen annostuksella metakaoliinia sisältävän betonin notkeutta ja reologisia ominaisuuksia on mahdollista muokata vastaavanlaisiksi kuin verrokkibetonilla. Verrokkibetonin lieriölujuus 28 päivän iässä oli keskimäärin 38,1 MPa. Lisäaineettomalla betonilla, jossa 30 % sementistä oli korvattu metakaoliinilla, vastaava lujuus oli 30,3 MPa. Kun v/s-suhde pidettiin samana, saavutettiin vastaavalla korvausosuudella keskimäärin 45,1 MPa lujuus. Tulosten perusteella sementin korvaaminen metakaoliinilla vaatii notkistimen käyttöä. Huokosrakenteesta selvitettiin kaksi parametria, keskimääräinen huokoshalkaisija sekä huokoisuus, 7 ja 28 päivän iässä. Metakaoliinin käyttö kasvatti betonin kokonaishuokoisuutta. Kokonaishuokoisuuden kasvu oli kuitenkin pienempää, kun käytettiin notkistinta. (Paiva et al. 2012)

Kovettuneen betonin differentiaalitermisellä (DTA) ja termisellä gravimetrisellä (TG) analyysilla selvitettiin reagoimatta jääneen kalsiumhydroksidin osuutta. Analyysit tehtiin 7 ja 28 päivän ikäiselle verrokkibetonille ja betonille, jonka sideaineesta 30 % oli korvattu metakaoliinilla ja jossa oli käytetty notkistinta. Molempien betonien v/s-suhde oli siis sama. Tulosten perusteella 30 prosentin sementistä korvaamisella metakaoliinilla valtaosa kalsiumhydroksidista oli reagoinut 28 päivän iässä. Lisäksi tutkittiin lisäaineettoman vastaavan korvausosuuden betonin koostumusta 28 päivän iässä. Sen v/s-suhde oli 0,75. Tulosten perusteella vesimäärän vähentäminen notkistimen avulla paransi kalsiumhydroksidin ja metakaoliinin reagointia. Kalsiumhydroksidin massapitoisuus edellä mainituissa betoneissa 28 vuorokauden iässä oli 15,0 %, 1,6 % ja 5,1 %. (Paiva et al. 2012)

Cyr et al. (2012) tutkivat tuhkaksi poltetun viemärikuonan ja yhdyskuntajätteen säilömistä sementtilaastiin metakaoliinin avulla. Tutkimuksessa käytetystä sideaineesta sementtiä oli 75, metakaoliinia 22,5 ja yhtä tai kahta jätetuhkaa 2,5 prosenttia. Lisäksi laastiin sekoitettiin hienoa 0...2 mm hiekkaa. Tuhkan käyttö ei vaikuttanut merkittävästi laastin mekaanisiin ominaisuuksiin tai kutistumiskäyttäytymiseen. Metakaoliini auttoi estämään jätetuhkien raskasmetallien liukenemista. (Cyr et al. 2012)

Berhanu et al. (2021) selvittivät tutkimuksessaan metakaoliinin ja karkean uusiokiviaineksen käytön yhteisvaikutusta betonin ominaisuuksiin. Betoneita valmistettiin 21 erilaista. Niiden karkeasta kiviaineksesta 0, 25, 50, 75 tai 50 % oli korvattu uusiokiviaineksella ja sementistä 6, 12 tai 18 % metakaoliinilla. Lisäksi valmistettiin NA-betoni, jonka sideaineesta 24 % oli korvattu uusiokiviaineksella. Kaikissa betoneissa käytettiin CEM I 42.5 R -sementtiä ja niiden v/s-suhde oli 0,58. Uusiokiviaineksena käytetty betonimurska oli valmistettu tutkimusta varten ja sen kuutiopuristuslujuus oli 33,9 MPa. Verrokkibetonin kuutiopuristuslujuus 28 vuorokauden iässä oli 31,7 MPa. Puristuslujuus laski RA-osuuden noustessa betoneilla, joissa ei käytetty metakaoliinia. Paras puristuslujuus 28 vuorokauden iässä (34 MPa) saavutettiin yhdistelmällä, jossa kaikki karkea kiviaines oli uusiokiviainesta ja metakaoliinin korvausosuus oli 6 %. Suuremmilla metakaoliinipitoisuuksilla

lujuuserot NA- ja RA-betonien välillä tasoittuivat. Verrokkibetonin puristuslujuus oli muita suurempi 56 vuorokauden iässä. Tutkijoiden mukaan uusiokiviaines ja metakaoliini vaikuttavat betonin työstettävyyteen vastakkaisin tavoin: uusiokiviaineksen osuuden kasvattaminen notkistaa betonia ja metakaoliinin osuuden kasvattaminen jäyhistää sitä. (Berhanu et al. 2021)

Metakaoliinit vaikuttaisivat siis varsin potentiaalisilta seosaineilta pienillä. Edellä esitellyissä tutkimuksissa korvausosuudet olivat kuitenkin varsin pieniä, korkeintaan 30 %, joten merkittäviä päästövähennyksiä ei niissä esitetyillä ja käyttökelpoisiksi osoitetuilla betoneilla voida saavuttaa. Vaikuttaisi kuitenkin siltä, että metakaoliinilla on hienoutensa ansiosta positiivisia vaikutuksia betonin pitkäaikaiskestävyyteen. Metakaoliineilla on myös mahdollista parantaa uusiokiviainesbetonin ominaisuuksia, mikä voi edistää päästötavoitteiden lisäksi myös esimerkiksi luonnonvarojen ehtymisen vähenemistä.

Lisäaineet

Tuoreen ja lujittuneen betonin ominaisuuksien muokkaamiseksi betonimassaan sekoitetaan usein *lisäaineita*. Lisäaineita käytetään esimerkiksi notkistamaan tuoretta massaa, vähentämään massan vedenerottumista, huokostamaan sekä hidastamaan tai kiihdyttämään sitoutumista. (SFS-EN 934-2 2013)

Eurooppalainen betonilisäainevalmistajien järjestö *EFCA* on julkaissut tuoteryhmäkohtaiset ympäristöselosteet notkistaville ja tehonotkistaville, sitoutumista kiihdyttäville ja hidastaville, kovettumista kiihdyttäville, huokostaville sekä veden imeytymistä estäville lisäaineille. Selosteissa ilmoitetut päästöt ovat kyseisen tuoteryhmän eurooppalaisten valmistajien suuripäästöisimmästä tuoteesta. Selosteista poiketen päästöt esitetään seuraavaksi yksikössä CO_2e-kg per tonni, eikä per kg.

Notkistimet ja tehonotkistimet ovat lisäaineita, jotka sallivat joko yhden tai molemmat seuraavista: (SFS-EN 934-2 2013)

- vesimäärän vähennyksen määrätyssä betoniseoksessa ilman notkeuden muutosta
- kasvattaa betonimassan painumaa tai leviämää vaikuttamatta veden määrään.

Notkistimia käytetään tyypillisesti 0,2...0,5 ja tehonotkistimia 0,4...2,0 prosenttia sementin massasta. Vaikuttavat aineet ovat tyypillisesti sulfonaatteja tai niiden estereitä tai hiilipolymeereja, tai näiden sekoituksia. EFCA:n ympäristöselosteen mukaan notkistimien päästö on korkeintaan 1880 CO_2e-kg/tonni. (EFCA 2015c)

Sitoutumista kiihdyttävillä ja hidastavilla lisäaineilla pyritään varhentamaan tai myöhentämään sitä ajanhetkeä, jolla massa alkaa siirtymään plastisesta jähmettyneeseen tilaan (SFS-EN 934-2 2013). Sitoutumista kiihdyttävät lisäaineet sisältävät yhtä tai useampaa epäorgaanista yhdistettä. Niitä käytetään tyypillisesti 1...3 prosenttia sementin massas-

ta ja aktiivisia yhdisteitä on 10...100 prosenttia lisäaineesta. Sitoutumista hidastavat yhdisteet sisältävät esimerkiksi sakkaroosia, glukonaatteja tai fosfaatteja. Niitä käytetään yleensä 0,2...2,0 prosenttia sementin massasta ja aktiivisia yhdisteitä on 10...20 prosenttia lisäaineesta. EFCA:n ympäristöselosteen mukaan päästö on korkeintaan 1 330 CO_2e-kg/tonni sitoutumista kiihdyttävillä ja korkeintaan 1 310 CO_2e-kg/tonni hidastavilla lisäaineilla. (EFCA 2015d; EFCA 2015e)

Kovettumista kiihdyttävillä lisäaineilla pyritään kasvattamaan betonin varhaislujuuden kasvunopeutta joko vaikuttaen tai olemalla vaikuttamatta sitoutumisaikaan (SFS-EN 934-2 2013). Lisäaineet sisältävät yhtä tai useampaa vaikuttavaa yhdistettä. Annostus on yleensä 1...3 prosenttia sementin massasta. EFCA:n ympäristöselosteen mukaan kovettumista kiihdyttävien lisäaineiden päästö on korkeintaan 2 280 CO_2e-kg/tonni. (EFCA 2015b)

Vedenimeytymistä estävien lisäaineiden avulla pyritään estämään veden kapillaarista imeytymistä kovettuneeseen betoniin (SFS-EN 934-2 2013). Niitä käytetään tyypillisesti 0,5...1 prosenttia sementin massasta. Vaikuttavat aineet on liotettu veteen, jota on 50...85 prosenttia lisäaineesta. Vaikuttavat aineet ovat tyypillisesti rasvahappojen suoloja, silaaneja, siloksaaneja tai kalsiumstearaatteja. EFCA:n ympäristöselosteen mukaan näiden päästö on korkeintaan 2 670 CO_2e-kg/tonni. (EFCA 2015f)

Huokostavilla lisäaineilla pyritään saamaan betonimassaan sekoituksen aikana sopiva määrä suojahuokosia (SFS-EN 934-2 2013). Huokostavia lisäaineita käytetään yleensä 0,05... 1,0 prosenttia sementin massasta. Vaikuttavina yhdisteinä käytetään pinta-aktiivisia tensidejä. Aktiivisia yhdisteitä on yleensä 0,5...5 prosenttia lisäaineen massasta. EFCA:n ympäristöselosteen mukaan huokostimien päästö on korkeintaan 527 CO_2e-kg/tonni. (EFCA 2015a)

Lisäaineiden kokonaismäärä seoksessa saa pääsääntöisesti olla korkeintaan 50 grammaa sementtikiloa kohden (SFS-EN 206 2021). Näin ollen ne jätetään yleensä huomioimatta betonin elinkaariarvioinnissa. Lisäaineilla voi olla myös korkeita ominaispäästöjä muissa standardin (SFS-EN 15804 2019) mukaisissa ympäristöindikaattoreissa.

Lisäaineita voidaan käyttää parantamaan myös seosaineita sisältävän betonin ominaisuuksia. Koska seosaineiden kemiallinen koostumus vaihtelee, eivät betonin lisäaineet välttämättä toimi sellaisenaan korkeasti seostetuissa betoneissa. Esimerkiksi Paiva et al. (2012) käyttivät tutkimuksessaan tehonotkistinta parantamaan metakaoliinia sisältävän betonin toimintaa. Medina et al. (2014) taas käyttivät tehonotkistinta kompensoimaan sitä, että uusiokiviaines sitoo itseensä vettä luonnonkiviainesta enemmän.

4.2.2 Raudoitteiden valmistus

Betonin huonon vetokestävyyden vuoksi betonirakenteisiin asennetaan yleensä raudoitteita. Jotta rakenne toimii oikein, on raudotteiden oltava kiinni betonissa. Betonin emäk-

sisyys tarjoaa hyvän korroosiosuojan raudoitteissa perinteisesti käytetylle hiiliteräkselle. Karbonatisoitunut betoni ei kuitenkaan suojaa terästä.

Suomen kansallisessa päästötietokannassa betoniteräksen tyypilliseksi päästöksi moduuleissa A1...A3 on arvioitu 560 CO_2e-kg/tonni ja kierrätysmateriaalipitoisuudeksi on oletettu 100 %. Moduulin D elinkaaren ulkopuolisina vaikutuksina 98 % teräksestä oletetaan päätyvän takaisin kiertoon ja 2 % poistuvan kierrosta. Jännepunoksille vastaavaksi päästöksi on arvioitu 1000 CO_2e-kg/tonni ja kierrätysmateriaalipitoisuudeksi 100 %. Jännepunosten ei oleteta päätyvän kiertoon. Tangoilla tai punoksilla ei oleteta olevan hiilikädenjälkeä. Noin puolet käytetystä betoniteräksestä valmistetaan Suomessa. Jännepunoksia ei valmisteta Suomessa. (Häkkinen 2020a)

Raudoitteiden yleisissä päästöarvoissa on eroja Pohjoismaiden välillä. Raudoitetangon yleinen päästöarvo on Tanskassa 1 057,4 CO_2e-kg/tonni (InfraLCA 2021), Ruotsissa 700 CO_2e-kg/tonni (Klimatkalkyl 2021) ja Norjassa 566 CO_2e-kg/tonni (VegLCA 2021). Jännepunoksen yleinen päästöarvo taas on Tanskassa 2 333 CO_2e-kg/tonni, Ruotsissa 1 100 CO_2e-kg/tonni ja Norjassa 2 510 CO_2e-kg/tonni.

Esimerkiksi Suomessa raudoitteita valmistava Celsa Steel Services valmistaa teräksensä Norjassa valokaariuunissa ja toimittaa kuumavalssatut tangot Suomeen, jossa ne muokataan raudoitustuotteiksi. EPD:n mukaan käytetystä teräksestä 73 % on kierrätysterästä, josta noin 62 % kerätään Norjasta ja loput toimitetaan Norjaan Ruotsista, Tanskasta ja Suomesta. Valmistuksen GWP-päästöiksi arvioidaan 456 CO_2e-kg/tonni (A1...A3), kun biogeeninen hiili jätetään huomioimatta. Hiilikädenjäljeksi arvioidaan -122 CO_2e-kg/tonni. EoL-skenaariona 95 % teräksestä uudelleenkäytetään teräksen valmistuksessa. (Almemark 2020)

Betonisiltojen teräsmäärän arvioinnissa hyvä yksikkö on teräsmassa betonikuutiota kohden [kg/m^3]. Teräsbetonisillassa betoniterästä on luokkaa 120...150 kg/m^3. Jälkijännitetyssä betoniterästä on noin 100 kg/m^3 ja jänneterästä luokkaa 35 kg/m^3. Muun muassa sillan hoikkuus ja kuormitus vaikuttavat tarvittavaan teräsmäärään, joten esitetyt määräarviot ovat suuntaa antavia. Rakentamisen päästötietokannan mukaisilla päästökertoimilla raudoituksista aiheutuu siis päästöjä A1...A3 teräsbetonisillassa luokkaa 80 CO_2e-kg/m^3 ja jännebetonisillassa 90 CO_2e-kg/m^3.

Ruostumattomalla betoniteräksellä päästö moduuleissa A1...A3 arvioidaan YM:n tietokannassa olevan 3 800 CO_2e-kg/tonni ja kierrätysmateriaalipitoisuuden 72 %. Elinkaaren ulkopuolisessa D-moduulissa 95 % teräksestä oletetaan kierrätettävän uusien tuotteiden valmistuksessa ja 5 % poistuvan kierrosta esimerkiksi maatäyttöihin. Kädenjäljeksi on arvioitu -1 200 CO_2e-kg/tonni. (Häkkinen 2020b) Vastaava yleinen päästöarvo on Tanskassa 3 260 CO_2e-kg/tonni (InfraLCA 2021), Ruotsissa 3 600 CO_2e-kg/tonni (Klimatkalkyl 2021) ja Norjassa 3 490 CO_2e-kg/tonni (VegLCA 2021).

Ruostumaton teräs sisältää raudan ja hiilen lisäksi muita metalleja, esimerkiksi kromia, kuparia tai nikkeliä, ja muita aineita, esimerkiksi typpeä. Outokummun RST-tankojen valmistuksessa teräs sulatetaan valokaariuunissa, jonka jälkeen siihen lisätään muut seosaineet ja seos valetaan pelleteiksi. Pellettien kuumavalssauksen jälkeen teräs peitataan ja muotoillaan tangoiksi. Keskimääräisiksi GWP-päästöiksi on arvioitu 3 780 ja kädenjäljeksi -1 150 CO_2e-kg/tonni. Kierrätysmateriaalin osuudeksi valmistuksessa on arvioitu 72 % ja EoL-skenaariossa 95 % teräksestä saadaan takaisin kiertoon. Vertailukäyttöikä on valmistajan mukaan jopa 1 000 vuotta karbonatisoituneessa betonissa. Kloridirasituksia vastaan käyttöikä on pienempi, eikä sitä esitetä EPD:ssä. (thinkstep AG 2019)

Mistry et al. (2016) tutkivat Meksikoon vuonna 1941 rakennetun Progreso Pier -aallonmurtajan elinkaaripäästöjä ja -kustannuksia. Aallonmurtaja on teräsbetonirakenteinen ja siinä on käytetty ruostumattomia betoniterästankoja. Vertailun vuoksi mallinnettiin myös samanlainen aallonmurtaja, jossa on käytetty tavallisia betoniraudoitteita. Laskennassa oletettiin todellisen aallonmurtajan käyttöiäksi 79 vuotta ja mallinnetun 50 vuotta. Mallinnettu siis uusitaan kerran vertailuajanjakson aikana. Aallonmurtajat vastasivat raudoitusta lukuunottamatta toisiaan täysin. Tulosten perusteella ruostumattomien raudoitteiden käyttö oli päästöjen kannalta parempi ratkaisu. Kustannusten kannalta kuitenkin mallinnettu vaihtoehto oli edullisempi jo neljän prosentin vuosikorolla. (Mistry et al. 2016)

Myös täysin metallittoman sillan rakentaminen on mahdollista. Japanissa Wada et al. (2020) suunnittelivat sillan, jossa raudoitus korvattiin pituussuunnassa jännitetyillä ulkoisilla aramidikuitutangoilla, suurien paikallisten rasitusten kohdalla lasikuitutangoilla ja muuten korkealujuuksisella kuitubetonilla. Kotelopoikkileikkauksen uumat rei'itettiin siten, että leikkausvoima välittyy teoreettisen ristikkorakenteen kautta normaalivoimana. Näin hakaraudoitusta ei tarvita ja pituussuunnassakin riittää ulkoinen jänne. Kansirakenne valmistetaan lohkoelementeistä, jotka yhdistetään työmaalla ulkoisilla jänteillä. Sillan jännemitta on 26,5 metriä ja kokonaisleveys 11,55 metriä. Pilottisilta oli kaksi vuotta työmaasiltana. (Wada et al. 2020)

4.2.3 Betonirakentaminen

Betonisillat ovat useimmiten paikallavalurakenteita. Betonimuotit voivat olla kertakäyttöisiä puumuotteja tai esimerkiksi asennusjärjestelmän osina uudelleenkäytettäviä rakenteita. Muotit rakennetaan joko puusta tai teräksestä rakennettujen telineiden varaan. Telineet saatetaan huonoissa pohjaolosuhteissa joutua perustamaan paaluille. Myös esimerkiksi jännitettyjä palkkielementtejä käytetään, jolloin päällysrakenteen muotit eivät tarvitse massiivisia telineitä.

Puumuotit valmistetaan yleensä joko sahatavarasta tai vesivanerista. YM:n päästötietokannan mukaan sahatavaran päästöt ovat 69 CO_2e-kg/tonni (Häkkinen 2021) ja pinnoitetun vanerin 400...550 CO_2e-kg/tonni (Häkkinen 2020c).

Tiehallinnon julkaisussa *Tiesiltojen ainemenekki- ja kustannusmallit* (2001) esitetään sillan päämittoihin perustuvat kaavat muottipinta-alan arviointiin eri siltatyypeillä. Teräsbetonisen laattasillan muottimenekki [m^2] saadaan kaavasta:

$$Q_f = bL_0(0.96 + 4.4\frac{1}{b} + 6.6\frac{1}{L_0}), \tag{4.1}$$

jännitetyn betonisillan kaavasta

$$Q_f = bL_0(1.143 + 2.86\frac{h}{b} + 10.1\frac{1}{L_0}), \tag{4.2}$$

liittopalkkisillan kaavasta

$$Q_f = bL_0(0.93 + 2.17\frac{1}{b} + 16\frac{1}{L_0}) \tag{4.3}$$

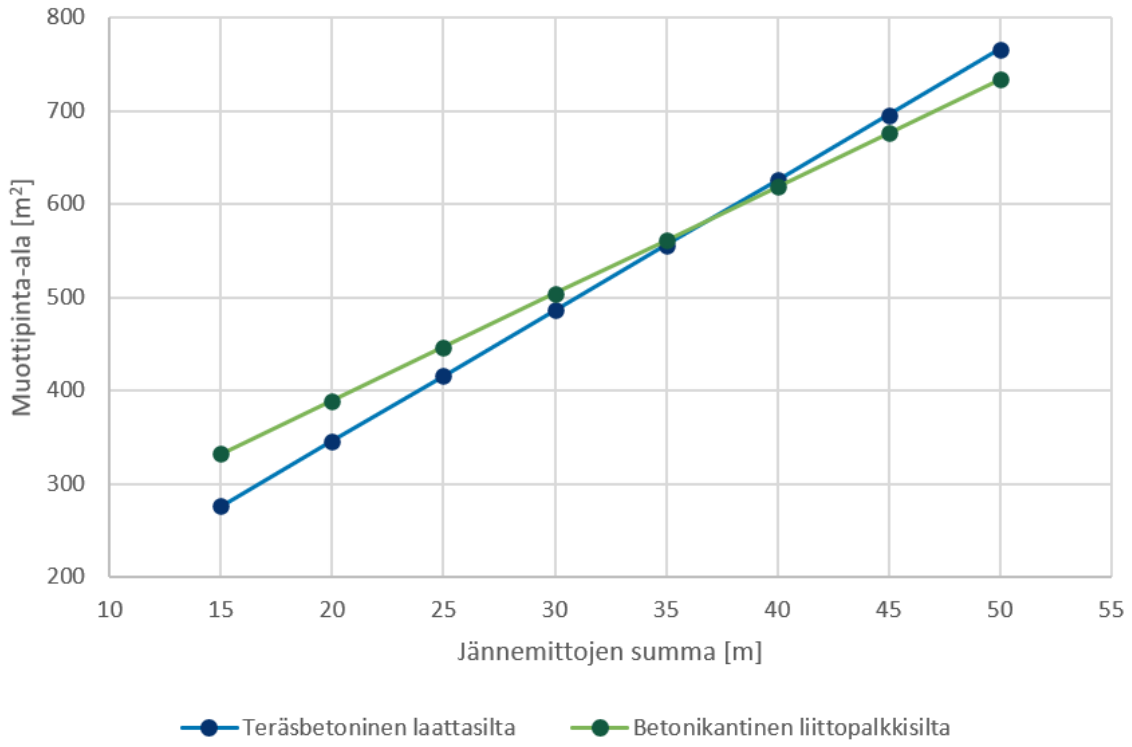
ja vinojalkaisen laattakehäsillan kaavasta

$$Q_f = bL_0(1.60 + \frac{28}{b} + 6.41\frac{h_a}{l_y}) + 4.69\frac{h_a^2}{bl_y}, \tag{4.4}$$

missä b on sillan hyödyllinen leveys, L_0 sillan jännemittojen summa, h siltakannen rakennekorkeus, h_a kehäsillan vapaa alikulkukorkeus ja l_y vinojalkaisen kehäsillan vapaan aukon leveys kansilaatan alapinnan tasolla. (Tiehallinto 2001)

Kuvassa 4.4 on esitetty kaavojen 4.1 ja 4.3 mukaiset muottimenekit teräsbetoniselle laattasillalle ja betonikantiselle liittopalkkisillalle eri jännemitoilla. Jos tarkastellaan esimerkiksi yksiaukkoista siltaa, jonka jänneväli on 35 metriä, on muottitarve noin 560 m^2. Jos otaksutaan, että muotit rakennetaan 25x100 mm^2 laudoista ja että pysyäkseen koossa muottiin tarvitaan sahatavaraa 1,25-kertainen määrä, saadaan sahatavaran määräksi 17,5 m^3. Puun tiheyden ollessa noin 450 kg/m^3 on siis tarvittavan sahatavaran massa noin 800 kg. Puutavarasta muodostuu siis päästöjä noin 55 CO_2e-kg. Päästö vastaa esimerkiksi puolta kuutiometriä valmisbetonia (Salminen et al. 2021) tai 76 litraa Italiassa alumiinitölkistä nautittua olutta (Carlsberg Italia S.p.a 2018). Edellä olevassa laskelmassa ei ole otettu huomioon muottien rakentamisessa käytettävien metalliliittimien päästöjä. Liittimien merkitystä puurakenteiden päästöihin tarkastellaan kohdassa 4.4.2.

Tiehallinnon julkaisussa *Siltojen tukitelineet* (2007) esitetään telinekustannuksiin vaikuttavia tekijöitä. Monet näistä tekijöistä vaikuttavat myös päästöihin. Kustannuksia ja päästöjä nostavat esimerkiksi paalujen tarve ja korkeat telineet. Kustannuksia ja päästöjä taas vähentävät mahdollisuus tukea telineet valmiisiin rakenteisiin ja suurissa hankkeissa siltojen poikkileikkausten vakiointi siten, että samoja telineen osia voidaan käyttää monta



Kuva 4.4. *Teräsbetonisen laattasillan ja betonikantisen liittopalkkisillan muottipinta-alat jännemittojen summan funktiona sillalla, jonka hyödyllinen leveys on 10 metriä.*

kertaa. (Tiehallinto 2007) Tämän tarkemmin tukitelineiden määriä tai päästöjä ei ole julkisissa lähteissä arvioitu.

Betonin valunaikaisia päästöjä muodostuu korkeintaan täryttimien, pumppujen tai muiden koneiden käytöstä. Valun kanssa samoihin aikoihin tapahtuva betonin kuljettaminen aiheuttaa päästöjä, jotka riippuvat pääsääntöisesti betoniaseman ja työmaan välisestä etäisyydestä ja toissijaisesti auton täyttöasteesta. Usein siltavalut vaativat kuitenkin useamman täyden auton ja kaikki autot palaavat joka tapauksessa ilman kuormaa, joten vajaata kuormaa voidaan pitää päästöjen kannalta triviaalina seikkana. Betonin tapauksessa myös massan säilyvyys rajaa kuljetusmatkojen pituutta.

Betonin jälkihoito tehdään yleensä peittämällä rakenne muovilla tai käyttämällä jälkihoitoainetta. Kylminä aikoina rakennetta voidaan joutua suojaamaan pakkaselta esimerkiksi pakkasmatoilla. (Pulkkinen et al. 2018) Pakkasmatot ovat yleensä 10 mm paksuja PE-muovimattoja. Valuun saatetaan myös asettaa lämmityskaapeleita, joita käytetään ainoastaan valun aikana.

Jännitetyillä silloilla punosten asettamiseen ja jännittämiseen käytetään hydraulisia tunkkeja. Niiden päästöt muodostuvat käytettävän energialähteen mukaisesti.

4.2.4 Käyttöiän aikaiset vaikutukset

Monet käyttöiän aikaiset päästöt muodostuvat betonirakenteen ylläpidosta, ja eivät siis ole varsinaisesti materiaalin ominaisuuksia. Tällaisia toimenpiteitä silloilla voivat olla esimerkiksi pinnoitteen uusiminen, halkeamien injektointi ja rikkoutuneiden kohtien paikkaaminen. Kaikki rakenteet vaativat huolellista ylläpitoa, jotta ne saavuttavat tavoitekäyttöikänsä. Uudella betonisillalla tavoitekäyttöikä on Suomessa yleensä 100 vuotta. Tällä hetkellä korjataan ja uusitaan paljon noin 50...60 vuoden ikäisiä siltoja.

Karbonatisoitumisessa betonin kalsiumyhdisteet, esimerkiksi kalsiumhydroksidi ja kalsiumsilikaattigeeli, reagoivat hiilidioksidin kanssa. Esimerkiksi kalsiumhydroksidi muuttuu kalsiumkarbonaatiksi reagoidessaan hiilidioksidin kanssa. Kalsiumhydroksidin pH on noin 13, eli se voimakkaasti emäksinen, kun taas kalsiumkarbonaatin pH on 8, eli se on vain hieman emäksinen. Karbonatisoituminen on teräsbetonirakenteelle ei-toivottava reaktio, sillä betonin terästä suojaava vaikutus perustuu nimenomaan sen emäksisyyteen. Karbonatisoituminen kuitenkin yleensä hidastuu edetessään pinnasta syvemmälle. Kaikki ilman kanssa kosketuksissa olevat betonirakenteet karbonatisoituvat jonkin verran. (by 201 2018)

Karbonatisoituneen vyöhykkeen saavuttaessa raudoitteet ne alkavat yleensä korrodoitua. Myös muut tekijät vaikuttavat korroosion alkamiseen. Esimerkiksi kloridipitoisessa betonissa korroosio voi alkaa jo karbonatisoitumisen alkuvaiheessa. Melko matalillakin betonin kloridipitoisuuksilla (esim. 0,5 % sideaineen määrästä) raudoitteiden korroosio voi alkaa jo pH:n ollessa yli 12. (Angst et al. 2020)

Kaikki betonirakenteet voidaan siis ajatella hiilinieluna. Esimerkiksi Betoniteollisuus onkin *CO_2ncrete Solution* -hankkeessaan laskenut olemassa olevan rakennuskannan hiilensidontakykyä osoittaakseen, että betoni on oikeastaan hiilinielu. Tämä ei tietenkään pidä paikkaansa ainakaan siinä mielessä, että betonin valmistamisen päästöjä voitaisiin kompensoida olemassa olevan rakennuskannan hiilensidonnalla. On myös syytä ottaa huomioon, ettei betoni karbonatisoidu kuin ilman kanssa kosketuksissa olevilta pinnoiltaan.

Suunnittelukäyttöiän merkitys betonirakenteiden elinkaariarvioinnissa. (Marinković et al. 2021)

Lentotuhkan ja kierrätyskiviaineen vaikutus vihreän betonin karbonatisoitumiseen. Määrittelivät suojabetonin kerrospaksuudet. (Carević ja Ignjatović 2021)

4.2.5 Loppukäyttö

Nykyisin jätebetoni lajitellaan purkutyömailla. Kokonaisten betonirakenteiden purkamiseen käytetään yleensä työkoneita, jolloin päästöt palautuvat jälleen niiden käyttämään energialähteeseen ja työkonekannan päivittymiseen. Betoniteräksestä valtaosa lajitellaan

purkamisen yhteydessä. (Pulkkinen et al. 2018) Betonin saattaminen esimerkiksi jätteenkäsittelylaitokselle tai uusiokiviainekseksi kuuluu sen järjestelmän vastuulle, mihin betoni on alunperin valmistettu.

Useimmiten betonimurske käytetään infrarakentamisessa esimerkiksi tien pohjarakenteena. Tässä yhteydessä betoni karbonatisoituu osin. Murskatun betonin karbonatisoitumisen voidaan katsoa sitovan ilmakehän hiilidioksidia itseensä, jolloin betonimurska voi toimia hiilivarastona käytettäessä esimerkiksi väylänpohjana tai betonin valmistuksessa uusiokiviaineksena.

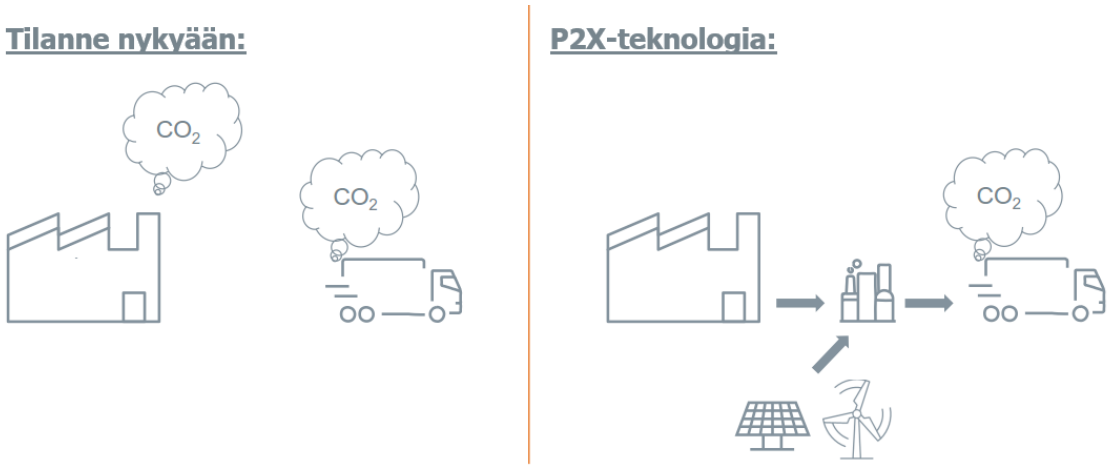
4.2.6 Tulevaisuus

Sementin tuotannon ilmastopäästöt muodostuvat kahdesta osasta: itse kalkkikiven kalsinoitumisesta eli prosessipäästöistä ja uunin lämmittämiseen käytetyn energian päästöistä eli palamispäästöistä. Koska prosessipäästöt aiheuttavat noin 60...65 % sementin valmistuksen päästöistä, pelkkä lämmöntuotannon hiilineutraalius ei tee valmistuksesta hiilineutraalia. On siis välttämätöntä ottaa prosessissa muodostuva hiilidioksidi talteen. CCUS eli hiilidioksidin talteenotto, käyttö ja varastointi saattaa tulevaisuudessa vähentää sementin tuotannosta ilmakehään vapautuvaa hiilidioksidia. (Tsupari et al. 2021)

Talteenotetusta hiilidioksidista on mahdollista valmistaa metanolia synteesillä, kun siihen yhdistetään vetyä. Esimerkiksi Lappeenrannan yliopistossa ja VTT:llä tutkittavassa Power-to-X- eli P2X-menetelmässä uusiutuvan energian avulla tislatusta vedestä erotetaan vetymolekyylit. Kun talteenotettu hiilidioksidi yhdistetään vedestä erotettuun vetyyn, saadaan aikaiseksi hiilivetyjä, esimerkiksi metanolia. Metanolista on mahdollista jatkojalostaa dieseliä, kerosiinia tai bensiiniä. Prosessissa on mahdollista käyttää myös teollisuuden sivuvirtana syntyvää vetyä. Vetyä syntyy esimerkiksi Suomessakin tuotettavan natriumkloraatin valmistuksen sivuvirtana. Uusiutuvan energian halpenemisen myötä myös vedyn erottaminen vedystä tulee kannattavammaksi. (Kosonen 2021)

VTT:n ja suomalaisten teollisuusyhtiöiden Decarbonate-hankkeessa pyritään luomaan tehokas vety- ja hiilidioksiditalouden arvoketju. Esimerkiksi Finnsementin klinkkerituotannosta vapautuvista prosessipäästöistä on tarkoitus valmistaa matalahiilipolttoaineita. Hankkeessa on mukana myös akku-, paperi- ja terästeollisuusyhtiöitä. (Tsupari et al. 2021)

P2X-teknologioiden perusidea on esitetty kuvassa 4.5. Tavoitteena on siis se, että lähtökohtaisesti kiinteissä sijainneissa olevat teollisuuslaitokset ja muut saastuttavat toiminnot eivät päästä hiilidioksidia suoraan ilmakehään. Hiilidioksidi hyödynnetään esimerkiksi fossiilisten kaltaisten polttoaineiden valmistamisessa. Teoriassa tällöin näiden toimintojen päästöt siis voisivat puolittua. Erityisen hyvä etu CCUS- ja P2X-teknologioissa on se, ettei esimerkiksi koko autokantaa olisi uusittava kerralla. Vuosikymmeniä vanhatkin au-



Kuva 4.5. *P2X-teknologian perusidea (Tsupari et al. 2021)*

tot voitaisiin siis käyttää elinkaarensa loppuun. On tietenkin syytä ottaa huomioon, että hiilidioksidia päätyy silti ilmakehään.

Suomessa betonituottajat ovat tuoneet markkinoille vähäpäästöisiä betoneja, joilla päästöjen sanotaan jopa puolittuvan perinteiseen betoniin verrattuna. Päästövähennys perustuu klinkkerin korvaamiseen masuunikuonalla sementissä. Masuunikuonan vaikutuksesta betonin lujuudenkehittyminen hidastuu, mutta myös lämmönkehittyminen on pienempää. Vastaavia betoneja onkin käytetty sillanrakennuksen massiivisissa valuissa jo pitkään.

Suomessa on perinteisesti käytetty lähinnä normaalilujuuksisia betoneita, joiden lieriölujuus on alle 60 MPa. Etenkin sillanrakennuksessa poikkileikkausmitat voivat olla hyvinkin suuria. Esimerkiksi palkkisillan keskimääräinen korkeus voi olla yli metrin. Vastaavasti välituet voivat koostua tavallisillakin silloilla pilareista, joiden poikkileikkauspinta-ala on yli neliömetrin. Näissä mittasuhteissa voi betonin puristuslujuudella olla merkittäväkin vaikutus poikkileikkausmittoihin, eli käytettävän betonin määrään. Esimerkiksi Jacobsen ja Kanstad (2021) tutkivat Norjan valtavassa *Ferry-free E39* -tiehankkeessa yhden betonikoteloisen pylonirakenteen C45-betonin korvaamista C90-betonilla. Korvaamisella saatiin laskennallisesti rakenteen betonimäärää vähennettyä 32,1 % ja rakenteen betonin päästöjä 25 %. Edelleen C90-betonin suhteitusta kehittämällä Jacobsen ja Kanstad onnistuivat pienentämään betonin päästöjä rakenteessa 61 %. Myös raudoitusteräsmäärä pieneni korkealujuusbetonia käytettäessä.

Uusien sivuvirroista tai vähähiilisesti valmistettavien sideaineiden kehittämisellä voidaan betonin päästöjä vähentää merkittävästi. Betonissa käytettävässä sementissä on kuitenkin EN-standardien mukaisesti oltava klinkkeriä vähintään 20 %, tai 5 % käytettäessä pelkästään masuunikuonaa. Jos tämä ehto ei täyty, eivät nykyiset suunnitteluohjeet välttämättä ole käyttökelpoisia. Seuraavaksi käsitellään sementittömiä, betonin kaltaisia materiaaleja.

Geopolymeerikomposiitit

Pääasiassa uusiomateriaaleista valmistettavia *geopolymeerikomposiitteja* on tutkittu jo vuosikymmeniä. Niiden on havaittu olevan monilla mittareilla betonia lujempia ja kestävämpiä materiaaleja ja niiden avulla voitaisiin säästää jopa 80 % ilmastopäästöistä tavalliseen betonirakenteeseen verrattuna. Suunnittelu- ja valmistusstandardeja ei ole. Pitkäaikaiskäyttäytymisestä ja kestävyydestä ei ole vielä tarpeeksi tietoa. (Hassan et al. 2019)

Betonin ja betoninkaltaisten materiaalien yhteydessä on syytä olla tarkka terminologiasta. Eurooppalaisten standardien mukainen betoni sisältää aina CEM-sementtiä. Yleisesti onkin tullut tavaksi käyttää perinteisen betonin yhteydessä termiä *tavallinen betoni* tai *OPC (ordinary portland cement)*, uusia tai aiempaa enemmän aktiivisia seosaineita sisältävän betonin yhteydessä termiä *sementtipohjaiset materiaalit, cement-based materials,* ja täysin sementittömien materiaalien yhteydessä termiä *geopolymeerikomposiitti*. Myös nimitystä *geopolymeeri* käytetään. Se ei välttämättä ole paras termi kuvaamaan niitä betoninkaltaisina materiaaleina, mutta se vaikuttaisi kirjallisuuden perusteella olevan varsin yleisesti käytetty. YM:n Vähähiilisen rakentamisen vuosiseminaarin 20.4.2021 keskusteluketjussa ehdotettiin geopolymeerikomposiittien suomenkieliseksi nimikkeeksi peräti *betoriinia* viitaten maitoteollisuuden takavuosien nimikiistaan.

Perinteisen betonin tapaan geopolymeerikomposiitit sisältävät vettä, hienoa ja karkeaa kiviainesta sekä sideaineita. Geopolymeerikomposiiteissa sementti on korvattu yleensä alkaliaktivoituvalla materiaalilla, joka yhdessä riittävän emäksisen aktivaattorin ja veden kanssa muodostaa sidosmassan. (Hassan et al. 2019)

Koontitutkimuksessaan Meesala et al. (2019) arvioivat lentotuhkapohjaisten geopolymeerikomposiittien ominaisuuksia. Tutkimuksessa koottiin yhteen noin sata artikkelia pääasiassa 2000-luvulta. Kalkkipitoista lentotuhkaa sisältävien geopolymeerien sitoutuminen vaikuttaisi alkavan nopeammin kuin silikaattipitoista lentotuhkaa sisältävien. Monissa tutkimuksissa geopolymeerikoekappaleet oli lämpökäsitelty, joten ne koskivat käytännössä vain elementtirakenteita. Joissakin tutkimuksissa geopolymeerit oli säilytetty huoneolosuhteissa tai olosuhderasituksessa ennen koestamista. Tutkijat esittivät, että jälkimmäisiä tulisi tutkia enemmän, jotta geopolymeerien käyttäytyminen paikallavalurakenteissa selviäisi paremmin. Tutkijoiden mukaan vaikuttaisi kuitenkin siltä, että masuunikuonan lisääminen parantaa olosuhdesäilytettyjen geopolymeerien puristus- ja taivutusvetolujuutta. Tutkimusten perusteella geopolymeereillä vaikutti olevan tavallisia betoneja pienempi kutistuminen ja parempi kestävyys rikkihappoa ja magnesiumsulfaatteja vastaan. Geopolymeerien säilymistä oli tutkijoiden mukaan kuitenkin tutkittu melko vähän. (Meesala et al. 2019)

Tutkimuksessaan Li et al. (2019) arvioivat 27 erilaista geopolymeerikomposiittien suhteitustapaa. Menetelmät jaettiin kolmeen luokkaan: tavoitelujuus-, vastaavien toiminnallisten

ominaisuuksien ja tilastollisiin menetelmiin. Tavoitelujuusmenetelmät jaettiin edelleen kolmeen luokkaan sen mukaan, onko vesi-, sideaine- vai sidospastan määrä lukittu. Tilastolliset menetelmät jaettiin Taguchi- ja monimuuttujaregressiomalleihin. Yleisimmin käytetään tavoitelujuusmenetelmää. Vastaavien toiminnallisten ominaisuuksien menetelmässä geopolymeerin ominaisuuksia tarkastellaan verrokkibetonin ominaisuuksia vasten. Menetelmän arvioitiin lisäävän luottamusta materiaalin markkinoihin. (Li et al. 2019)

Anbarasan ja Soundarapandian (2020) tutkivat käytettävän hienon kiviaineksen vaikutusta geopolymeerikomposiittien ominaisuuksiin. Geopolymeerien sideaineesta 70 % oli silikaattipitoista lentotuhkaa ja 30 % masuunikuonaa. Aktivaattoreina käytettiin natriumhydroksidia ja -silikaattia. Kaikkien geopolymeerien v/s-suhde oli 0,12 ja niissä käytettiin tehonotkistinta. Karkea kiviaines oli kaikissa luonnonkiviainesta. Ainut varioitu tekijä seitsemän eri reseptin välillä oli hienon kiviaineksen alkuperä. Verrokkireseptissä käytettiin jokihiekkaa, jota käytetään Intiassa yleisesti. Kahdessa reseptissä kaikki hienoaineksesta oli joko merestä ruopattua hiekkaa tai murskehiekkaa. Lopuissa neljässä reseptissä 20, 40, 60, tai 80 % oli ruopattua hiekkaa ja loput murskehiekkaa. Näytteet jälkihoidettiin huoneenlämmössä. Ainoastaan yhtä hiekkaa sisältäneet reseptit saavuttivat tavoitelujuuden 28 vuorokaudessa. Ainoastaan 100 % ruopattua hiekkaa sisältänyt betoni saavutti verrokkibetonia vastaavat ominaisuudet kaikissa tutkimuksen mittauksissa. (Anbarasan ja Soundarapandian 2020)

Paul (2021) tutki silikaattipitoisesta lentotuhkasta, masuunikuonasta ja kuparikuonasta valmistetun geopolymeerikomposiitin ominaisuuksia. Reseptejä oli yhteensä 6, joissa jokaisessa oli sama määrä kiviainesta ja natriumhydroksidia ja -silikaattia. Kaikkien reseptien v/s-suhde oli 0,1. Sarjan M1 sideaineista 65, 55 tai 45 prosenttia oli lentotuhkaa ja loput masuunikuonaa. Niihin lisättiin myös tehonotkistinta. Sarjan M2 resepteissä oli kaikissa masuunikuonaa 10 % sideaineesta eikä niitä notkistettu. Sideaineista 65, 55 ja 45 prosenttia oli lentotuhkaa ja loput 25, 35 tai 45 prosenttia oli kuparikuonaa. Tulosten perusteella masuunikuona jäykistää massaa ja kuparikuona notkistaa sitä. Masuunikuonan ansiosta jälkihoito voitiin tehdä huoneenlämmössä. Sarja M1 saavutti suuremman puristuslujuuden kuin kuparikuonaa sisältänyt M2. Toisaalta sarjan M2 geopolymeerit olivat halvempia. (Paul 2021) Tutkimus tehtiin Intiassa, joten kustannusvertailua ei pysty suoraan yleistämään esimerkiksi Suomeen.

Bouaissi et al. (2019) taas tutkivat silikaattipitoisesta lentotuhkasta ja masuunikuonasta tai nikkelikuonasta valmistettujen geopolymeerikomposiittien ominaisuuksia. Nikkelikuona koostui pääosin silikasta, magnesiumoksidista ja ferrioksidista ja on tutkijoiden mukaan vaarallista jätettä, vaikkakin se päätyykin useissa maissa tavalliselle kaatopaikalle. Aktivaattoreina käytettiin natriumhydroksidia ja -silikaattia. Paras puristus- ja halkaisuvetolujuus saavutettiin seoksella, jonka sideaineesta 70 % oli lentotuhkaa, 20 % masuunikuonaa ja 10 % nikkelikuonaa. Osaksi nikkelikuonan korkean magnesiumpitoisuuden ansiosta sementtikivestä tuli erittäin tiivisrakenteista. (Bouaissi et al. 2019)

Tutkimuksessaan Albitar et al. (2017) vertailivat lentotuhkapohjaisen geopolymeerikomposiittien ja tavallisen betonin kestävyysominaisuuksia. Tavallinen betoni sisälsi ainoastaan sementtiä, kiviainesta ja vettä. Geopolymeereja oli kahta erilaista, joista toinen sisälsi ainoastaan silikaattipitoista lentotuhkaa ja toisessa oli lentotuhkan lisäksi lyijynsulattamosta peräisin olevaa kuonaa. Kuona oli ferro-oksidipitoista, joten se sisälsi masuunikuonaa vähemmän piidioksidia ja kalsiumoksidia. Kuona koostui 90 prosenttisesti edellä mainituista yhdisteistä. Geopolymeereissä käytettiin aktivaattoreina natriumhydroksidia ja -silikaattia, ja niissä käytettiin tehonotkistinta. Näytteet altistettiin yhdeksän kuukauden ajan natriumkloridiliuokselle, natriumsulfaattiliuokselle, rikkihappoliuokselle tai liuokselle, jossa oli natrium- ja magnesiumsulfaatteja. Tutkimuksessa mitattiin näytteiden massanmenetystä ja lujuudenkehitystä säilytyksen aikana. Altistuksen päätteeksi koekappaleista ja huoneenlämmössä säilytetyistä verrokkikappaleista määritettiin jännitys-venymäyhteys, vedenimeytymiskyky sekä huokoisuus. Tulosten perusteella tavallisen betonin vedenimemiskyky oli pienempi kuin tutkituilla geopolymeereilla. Toisaalta geopolymeerit kestivät paremmin kemiallisia rasituksia, natriumsulfaattia lukuunottamatta. Natriumsulfaatti aiheuttaa nimittäin natriumhydroksidin suotovirtautumisen betonista. Tutkijat esittävätkin, että olisi hyvä tutkia muiden aktivaattorien käytön vaikutusta natriumsulfaattirasituksen kestämiseen. Yleisesti ottaen geopolymeerien arvioitiin kestävän kemiallisia rasituksia erinomaisesti. (Albitar et al. 2017)

Tutkimuksessaan Pasupathy et al. (2021) säilyttivät lentotuhkapohjaisesta geopolymeerikomposiitista ja tavallisesta betonista valmistettuja kappaleita australialaisessa suolajärvessä kymmenen vuoden ajan. Lentotuhka oli erittäin silikaattipitoista: sen massasta 53 % oli silikaa, 26 % alumiinioksidia ja vain 1,5 % kalkkia. Aktivaattorina käytettiin natriumhydroksidia ja -silikaattia. Lisäksi siinä käytettiin tehonotkistinta. Betoni koostui sementistä, kiviaineksesta ja vedestä. Järviveden kloridipitoisuuden arvioitiin olevan 8-kertainen ja kokonaissuolamäärän 13 kertainen tyypilliseen meriveteen verrattuna. Koekappaleet asetettiin olosuhderasituksiin 90 vuorokauden iässä, jolloin geopolymeerin puristuslujuus oli 39 ja betonin 42 MPa. Tulosten perusteella kloridien ja sulfaattien tunkeutuminen oli suurempaa geopolymeerissa kuin betonissa. Geopolymeeri pystyi myös sitomaan vähemmän kloridia. Sulfaatin havaittiin muuttavan geopolymeerin geeliä eri tavalla kuin betonin: geopolymeeriin ei syntynyt kipsiä ja ettringiittiä. Lisäksi kappaleisiin oli asennettu raudoitetangot, joiden suojabetonikerros oli 50 mm. Terästen tartuntaa ja ruostumista arvioitiin silmämääräisesti. Betonissa teräs oli säilynyt hyvin eikä sen pintaan ollut muodostunut mainittavia määriä ruostetta. Geopolymeerissa taas teräksissä oli ruosteinen pinta. Tutkijat tosin arvioivat, että se saattaisi olla peräisin geopolymeerin sisältämästä ferro-oksidista. Olosuhderasituksen jälkeen geopolymeerin pH oli 7...8 ja betonin 12...12,5. (Pasupathy et al. 2021)

Koontitutkimuksessaan Chen et al. (2021) selvittivät geopolymeerikomposiittien kestävyyttä aggressiivisissa ympäristöissä. Tutkimuksessa tarkasteltiin karbonatisoitumisen,

happojen, sulfaattien, korkean lämpötilan sekä kloridien tunkeutumisen vaikutuksia geopolymeereilla. Vertailupohjana käytettiin tavallista sementtipohjaista betonia. Yleisimmät käytetyt aktivaattorit olivat natriumhydroksidi ja -silikaatti. Tulosten perusteella geopolymeerit vaikuttavat kestävän aggressiivisia ympäristöjä pääasiassa paremmin kuin tavallinen betoni. Poikkeuksena tästä on karbonatisoituminen, joka aiheuttaa matalakalkkisten geopolymeerien rapautumista. Geopolymeerin kalsiumpitoisuus vaikuttaa siihen, miten se rapautuu. Alumiinisilikaattipitoisten geopolymeerien arvioitiin olevan kestävimpiä. (Chen et al. 2021)

Pilehvar et al. (2019) tutkivat parafiinin vaikutusta geopolymeerikomposiitin ja tavallisen betonin pakkasenkestävyyteen. Parafiinia, jolla on suuri lämpökapasiteetti, käytettiin tasaamaan keinokiven lämpötilaa. Parafiini oli kapseloitu, jotta se ei reagoisi seoksen kanssa. Geopolymeerista ja betonista tehtiin kummastakin kaksi versiota, jotka olivat muuten samanlaisia, mutta toisessa 20 % hiekasta oli korvattu kapseloidulla parafiinilla. Geopolymeerin perusaineena käytettiin lentotuhkaa ja masuunikuonaa ja aktivaattoreina natriumhydroksidia ja -silikaattia. Kaikissa neljässä seoksessa käytettiin tehonotkistinta. Betonien v/s-suhde oli 0,5. Koekappaleiden mikrorakennetta ja massan muutosta tutkittiin 0 ja 28 pakkaskokeen jälkeen. Lisäksi puristuslujuus koestettiin 0, 7, 14 ja 28 pakkaskokeen jälkeen. Molemmilla materiaaleilla syntyi mikrohalkeamia kiviaineksen pinnan transitiovyöhykkeeseen. Massanmenetys oli kaikilla näytteillä alle prosentin luokkaa. Geopolymeerin puristuslujuus vaikutti heikkenevän pakkasrasituksessa betonin lujuutta vähemmän. Parafiinia sisältävien kappaleiden puristuslujuus laski pakkasrasituksessa alle 2,5 %. Geopolymeerin lujuus laski kaikissa tapauksissa alle 5 %. Parafiinittoman betonin lujuus laski pakkasrasituksessa noin viidenneksen.

Massan muutos ja puristuslujuus selvitettiin myös olosuhdekoekappaleista, joita säilytettiin ulkona eteläisessä Norjassa kolmen talvikuukauden ajan. Sitoutumisen alkamista tutkittiin pastoilla, jotka valmistettiin ilman kiviainesta ja notkistinta, 0 ja 20 °C lämpötiloissa. Parafiini lyhensi geopolymeerin lopullista sitoutumisaikaa 20 °C lämpötilassa. Sementin sitoutumiseen parafiini ei käytännössä vaikuttanut. Betoni sitoutui odotetusti hitaammin 0 °C lämpötilassa. Geopolymeeri taas sitoutui nopeammin 0 °C lämpötilassa, minkä arveltiin johtuvan seoksen sakkautumisesta matalassa lämpötilassa. (Pilehvar et al. 2019)

Nazarpour ja Jamali (2019) tutkivat RCA-uusiokiviaineksen käytön vaikutusta masuunikuonapohjaisen geopolymeerikomposiitin mekaanisiin ominaisuuksiin ja pakkasenkestävyyteen. Tutkittavia reseptejä oli kaksikymmentä, ja niissä varioitiin sekä uusiokiviaineksen korvausosuutta (20, 30 tai 40 % karkeasta kiviaineksesta) että masuunikuonan kokonaismäärää. Vesi-masuunikuonasuhde pidettiin vakiona 0,60. Kun sideainepitoisuus tuplattiin, havaittiin lujuuden kasvavan yli nelinkertaiseksi. Kiviaineksen korvaaminen RCA-uusiokiviaineksella laski puristus-, veto-, sekä taivutuslujuutta. Kolmensadan jäätymissulamiskierroksen jälkeen puristuslujuus aleni korkeintaan 14 % ja massa pieneni noin 7,6 %. Tutkijoiden mukaan lujuudenaleneminen pakkaskokeen johdosta ei näin ollen ollut

merkittävä. (Nazarpour ja Jamali 2019)

Alzaza et al. (2021) tutkivat geopolymeerikomposiittien lujuudenkehitystä pakkaslämpötiloissa laastiprismakokein. Koekappaleet valmistettiin natriummetasilikaatilla aktivoitavasta masuunikuonapohjaisesta geopolymeerimassasta. Verrokkikappaleet valmistettiin CEM 52.5 R-SR5 -sementistä. Koekappaleet säilytettiin 20, -5, -10 tai -20 °C lämpötilassa 56 päivän ajan. Lisäksi osa pakkasessa säilytetyistä prismoista siirrettiin 28 vuorokauden jälkeen huoneenlämpöön. Tulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että geopolymeerit kehittävät lujuuttaan myös pakkasessa. Tutkijat totesivat, että pakkasessa valettujen geopolymeerirakenteiden pitkäaikaiskestävyyttä tulisi edelleen tutkia. (Alzaza et al. 2021)

Aly et al. (2019) tutki masuunikuonapohjaisen geopolymeerikomposiitin kiviaineksen korvaamista kumirouheella. Tutkituissa resepteissä masuunikuona aktivoitiin natriumhydroksidilla ja -silikaatilla. Hienona kiviaineksena käytettiin luonnonhiekkaa ja karkeana dolomiittimursketta. Kiviaineksesta 35 % oli hienoa ja 65 % karkeaa. Myös kumirouhetta valmistettiin sekä hienoa (1/4 mm) että karkeaa (0/40 mm). Neljässä reseptissä 0, 10, 20 tai 30 % hienosta ja karkeasta kiviaineksesta korvattiin vastaavalla kumirouheella. Korvaus tehtiin osuutena kiviainesten tilavuudesta. Geopolymeerit koestettiin puristuslujuuden, halkaisuvetolujuuden sekä taivutusvetolujuuden selvittämiseksi. Lisäksi selvitettiin geopolymeerien iskunkestokykyä. Kymmenen prosentin korvausosuudella saavutettiin viitisen prosenttia parempi puristuslujuus kuin verrokkibetonilla, vaikkakin halkaisu- ja taivutusvetolujuudet alenivat 20...35 prosenttia. Puristuslujuus aleni korvausosuuden kasvaessa niin, että 28 vuorokauden kohdalla 30 % korvausosuuden reseptillä se oli vain kaksi kolmasosaa verrokkibetonin vastaavasta. Toisaalta korvausosuuden kasvattaminen paransi iskunkestävyyttä. Tutkijat esittävät, että 10 % korvausosuudella voitaisiin sopivissa kohteissa hyödyntää autoteollisuuden kumijätettä ilman, että betonin ominaisuudet merkittävästi huononevat. Tutkijat myös esittävät, että kumia sisältävät geopolymeerit vaikuttavat lupaavilta käytettäväksi tie- ja kiitoratalaatoissa tai silloissa. (Aly et al. 2019)

Geopolymeerikomposiitit vaikuttaisivat edellä tarkasteltujen tutkimusten pohjalta olevan kelpo vaihtoehto betoneille ainakin joissain käyttökohteissa. Sillanrakennuksen kannalta erityisen olennaisia ovat lujuus- ja säilyvyysominaisuudet. Suomessa kestävyysominaisuuksista korostuvat koko maassa pakkasenkestävyys sekä kestävyys klorideja vastaan. Rannikkoseuduilla sillat saatetaan perustaa esimerkiksi sulfidimaihin, jolloin alusrakenteiden on kestettävä sulfaattirasitus.

Puristuslujuuden vertailu betonin ja geopolymeerikomposiittien välillä ei ole mielekästä, sillä niiden suhteitus eroaa keskenään paljon. Geopolymeereilla on mahdollista saavuttaa vastaavia lujuuksia kuin betonilla (Meesala et al. 2019). Betonista poiketen geopolymeerien lujuus voi kehittyä hyvin myös alle 5 °C lämpötiloissa (Alzaza et al. 2021).

Lentotuhkaa sisältävät geopolymeerikomposiitit vaikuttavat kestävän hyvin kemiallisesti aggressiivisia ympäristöjä (Chen et al. 2021; Meesala et al. 2019). Geopolymeereis-

sä usein aktivaattorina käytettävä natriumhydroksidi on kuitenkin altis suotoliukenemaan natriumsulfaattipitoisessa ympäristössä (Albitar et al. 2017).

Pilehvar et al. (2019) mukaan lentotuhkaa ja masuunikuonaa sisältävä geopolymeerikomposiitti kestää pakkasrasituksia tavallista betonia paremmin. Nazarpour ja Jamali (2019) totesivat saman täysin masuunikuonapohjaisella geopolymeerilla. Alzaza et al. (2021) havaitsivat, että masuunikuonapohjaisen geopolymeerin lujuudenkehitys ei hidastu merkittävästi pakkasessa. He kuitenkin huomauttivat, että vastaavien säilytysolosuhteiden vaikutusta pitkäaikaiskestävyyteen tulisi vielä tutkia. Myös Pilehvar et al. (2019) huomasivat geopolymeerien sitoutuvan alhaisissa lämpötiloissa. Sitoutumisen havaittiin olevan jopa nopeampaa, minkä tosin oletettiin johtuvan massan sakkautumisesta.

Paras puristus- ja halkaisuvetolujuus saavutettiin seoksella, jonka sideaineesta 70 % oli lentotuhkaa, 20 % masuunikuonaa ja 10 % nikkelikuonaa. Osaksi nikkelikuonan korkean magnesiumpitoisuuden ansiosta sementtikivestä tuli erittäin tiivisrakenteista. (Bouaissi et al. 2019)

4.3 Teräs

4.3.1 Teräksen valmistus

Teräs koostuu pääasiassa raudasta, minkä lisäksi siinä on jonkin verran seosaineita. Teräksen hiilipitoisuus on alle 2 %. Suomessa sillanrakennuksessa nykyisin käytettävän teräksen hiilipitoisuus on alle 0,2 %. (SILKO 1.301 2021) Teräksen tuotanto aiheuttaa merkittävän osuuden Suomen ilmastopäästöistä. Esimerkiksi yksinään SSAB:n Raahen tehdas aiheuttaa 7 prosenttia Suomen päästöistä (Leppänen 2021). SSAB:n terästuotannon lisäksi Suomessa on lähinnä vähemmän hiili-intensiivistä teräksen muokkausta.

Osa teräksestä valmistetaan kaivoksessa louhitusta rautamalmista. Louhittu malmi poltetaan masuunissa raakaraudaksi, josta poistetaan seuraavaksi rikki. Tämän jälkeen sulasta raakaraudasta ja valokaariuunissa sulatetusta kierrätysteräksestä valmistetaan terästä. Sulaan massaan lisätään seosaineeksi tarkoin valittu määrä muita metalleja haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Yleisiä seosaineita ovat kupari, alumiini, nikkeli, niobi, vanadiini ja titaani. Lopuksi sula teräsmassa valetaan haluttuun muotoon. Terästuotteet, joita ei saada suoraan valettua haluttuun muotoon, valmistetaan työstämällä tai muokkaamalla. Rakenneteräksen sulamispiste on noin 1 500 °C ja ruostumattoman teräksen noin 1 230...1 280 °C. (SILKO 1.301 2021) Teräksen korkean sulamislämpötilan takia teräksen valmistus kuluttaa hyvin paljon energiaa.

Ensimmäinen tapa raudan valmistamiseen malmista oli suora pelkistäminen, jossa rautaa ei täysin sulatettu. Suorapelkistyksen lopputuloksena syntyi rautasientä, jota voitiin takoa. Myöhemmin kehitettiin epäsuora pelkistäminen, jossa rautamalmi sulatettiin masuunissa. Lopputuotoksena muodostui erittäin haurasta, hiiltä yli 4 % sisältävää rautaa, jota ei voitu sellaisenaan takoa. Mellottamalla sen hiilipitoisuutta saatiin pienennettyä alle 1,7 %, jolloin voitiin puhua teräksestä. Happipuhallus- eli LD-menetelmän yleistyttyä 1950-luvulta alkaen syntyi nykyaikainen laajamittainen terästeollisuus. Happipuhallusmenetelmä on kustannustehokas tapa vähän hiiltä sisältävien terästen tuottamiseen. Masuunituotannon rinnalla myös suorapelkistysmenetelmiä käytetään nykyisin. (Väisänen 2007)

Teräksen tuotannossa käytetään kahta sulatuskeinoa, polttoaineella toimivia masuuneja ja sähköllä toimivia valokaariuuneja (*EAF*). Hiilipitoinen rautamalmi voidaan sulattaa vain masuuneissa, kun taas jo valmiiksi vähähiilinen kierrätysteräs voidaan sulattaa myös suoraan sähköllä. SSAB:lla on Pohjoismaissa ainoastaan masuunitoimista terästuotantoa (SSAB 2021). Yleensä masuunissa sulatettavan raakaraudan sekaan lisätään kierrätysterästä. Teräksen valmistusvaiheen päästöistä valtaosa aiheutuu energiankulutuksesta. Valokaariuunin osalta päästöjen vähentäminen palautuukin pääosin käytettävän sähkön päästöjen vähentämiseksi. Koska teräksen kemiallisella koostumuksella on suuri merkitys sen ominaisuuksiin, ei masuunin päästöjä voida välttämättä helposti vähentää polttoainetta vaihtamalla. Esimerkiksi SSAB:lla on kuitenkin kehitteillä sähkö- ja vetytoiminen

suorapelkistysmenetelmä, jolla myös malmiteräksen valmistuksen päästöjä voidaan alentaa. Tätä teknologiaa tarkastellaan tarkemmin kohdassa 4.3.6.

Ruukin arvion mukaan teräksen maailmanlaajuinen tuotanto kasvaa vuosien 2016-2050 välillä 1 600 megatonnista 2 800 megatonniin. Arvioiden mukaan malmiteräksen osuus kaikesta valmistettavasta teräksestä on 50 % vielä vuonna 2050. Vuonna 2016 sen osuus oli 75 %. (Kesti 2021) On syytä ottaa huomioon, että terästä käytetään rakentamisen lisäksi muussakin teollisuudessa.

Sillanrakennuksessa ja muissa infrakohteissa teräksen toimintaympäristö on erilainen verrattuna talonrakentamiseen. Infrarakentamisessa korostuvat erityisesti ympäristöolosuhteet, joista terákselle erityisen haitallisia ovat kosteus- ja kloridirasitukset. Teräs on siis pinnoitettava tai on käytettävä säänkestävää tai ruostumatonta terästä. Vastaavasti säärasitetut teräsrakenteet täytyy talonrakentamisessakin suojata. Talonrakentamisessa teräsrakenteet on sisätiloissakin yleensä suojattava palotilanteiden varalta. Olosuhderasitusten lisäksi väsyttävät kuormat aiheuttavat siltojen teräskokoonpanoille ja niiden liitoksille erityisiä vaatimuksia.

Rakentamisen päästötietokannan mukaan teräsrakenteen päästöt A1...A3 ovat 2 500 CO_2e-kg/tonni, riippumatta onko rakenne suojattu tai säänkestävä. Kierrätysmateriaaliosuudeksi oletetaan 20 %. Elinkaarensa lopussa 8 % oletetaan päätyvän uudelleen käytettäväksi, 90 % kierrätykseen ja 2 % loppusijoitukseen. Kädenjäljeksi oletetaan -1 300 CO_2e-kg/tonni. (Häkkinen 2020a)

Toisaalta erään valmistajan mm. Saksassa ja Luxemburgissa valmistetun teräksen valmistuspäästöt A1...A3 ovat 1 130 ja jätteenkäsitelypäästöt C3 18,4 CO_2e-kg/tonni. Moduulissa D hiilikädenjäljeksi on arvioitu -413 CO_2e-kg/tonni. Erilaisia terästuotteita koskeva EPD on voimassa 2018-2023. EPD:n mukaiset raskaat levyt valmistetaan Saksassa ja Ranskassa. Kuumavalssatut tuotteet taas valmistetaan Luxemburgissa, Saksassa ja Puolassa. (bauforumstahl e.V. 2018) Esimerkiksi Nordecin Euroopasta tuomien tuotteiden ympäristöselosteen mukaan kuumavalssattujen teräslevyjen päästöt A1...A3 ovat 2 760 ja kädenjälki D -1 420 CO_2e-kg/tonni, kun kuumavalssattujen teräsprofiilien vastaavat arvot ovat 1 700 ja -1 260 CO_2e-kg/tonni (Nordec Oy 2020).

Ilmastokorroosiota kestävä, tai säänkestävä, teräs on niukasti seostettu teräs. Teräksen pintaan muodostuu oksidikerros, eli patinaa, joka suojaa terästä ruosteen tunkeutumiselta syvemmälle. Käytännössä pinnan ruostuminen ja siitä seuraava väri riippuvat olosuhteista. (ECCS 2021) Se onkin eräänlainen välimalli hiili- ja ruostumattoman teräksen välillä. Säänkestävää terästä ei kuitenkaan saa käyttää silloissa korkeasti suolapitoisilla alueilla ja lähellä vedenpintaa (NCCI 4 2016). Säänkestävää terästä kutsutaan usein myös erään tuotemerkin mukaisesti corten-teräkseksi.

Ympäristöministeriön tietokannan mukaan ruostumattoman teräslevyn päästö A1...A3 on

3 400 CO_2e-kg/tonni. Sen kierrätysmateriaalipitoisuuden arvioidaan olevan 65 %. Elinkaaren lopussa teräksestä 95 % kierrätetään ja 5 % päätyy hävitettäväksi. Kädenjäljeksi on arvioitu -1 500 CO_2e-kg/tonni. (Häkkinen 2020b)

Rakenneteräksen yleinen päästöarvo on Tanskassa 2 175 CO_2e-kg/tonni (Vejdirektoratet ja Banedanmark 2021), Ruotsissa 2 200 CO_2e-kg/tonni (Trafikverket 2021) ja Norjassa kierrätetylle 1 240 ja kierrättämättömälle 2 510 CO_2e-kg/tonni (Statens vegvesen 2021). Vastaavat arvot ruostumattomalle teräkselle ovat 3 281 CO_2e-kg/tonni, Ruotsissa 3 600 CO_2e-kg/tonni ja Norjassa 2 010 CO_2e-kg/tonni.

Malmiteräksen päästöt ovat kierrätysterästä suuremmat, sillä malmi täytyy louhia ja kuljettaa, jotta siitä saadaan valmistettua raakarautaa. Samassa yhteydessä luodaan kuitenkin välillisesti uutta kierrätysterästä, sillä suurella todennäköisyydellä kaikki, tai vähintäänkin valtaosa, valmistetusta teräksestä päätyy ensimmäisen elinkaarensa jälkeen sulatettavaksi uuden teräksen valmistusta varten. Tätä vaikutusta ei nykyisellään voida ottaa huomioon moduuleissa A...C, vaan se kirjataan moduuliin D. Terästeollisuus haluaisi kuitenkin, että tämä laskettaisiin mukaan teräksen varsinaisiin päästöihin. (Hauke et al. 2017; Kesti 2021) Terästuotteiden elinkaariarvioinnin tuoteryhmäsäännöt olivat lausuntokierroksella alkukesästä 2021 (prEN 17662 2021).

Teräksen valmistuksen sivuvirtana syntyvää masuunikuonaa käytetään esimerkiksi sideaineena betoni- ja sementtiteollisuudessa. EN-standardien *saastuttaja maksaa* -periaatteen mukaisesti masuunikuonan hyödyntämistä ei voida käyttää teräksen hyväksi esimerkiksi niin, että osa masuunin energiankulutuksesta aiheutuvista päästöistä siirrettäisiin masuunikuonan päästöiksi. Euroopassa on kuitenkin käyty viranomaistason keskusteluja, joiden perusteella masuunikuonalle allokoidaan tulevaisuudessa myös teräksen valmistamisesta aiheutuvia päästöjä (Ilomäki 2021). Ilomäen (2021) mukaan betonin valmistuksessa käytettävän masuunikuonan ominaispäästöksi voidaan tulevaisuudessa olettaa vähintään 120...150 CO_2e-kg/tonni.

4.3.2 Konepajavalmistus

Nykyään teräsrakenteet pyritään valmistamaan pääosin konepajoilla. Esimerkiksi työmaalla hitsattavien liitosten määrää pyritään minimoimaan. Konepajalla terästuotteet esikäsitellään, leikataan ja muotoillaan oikeaan muotoon sekä niihin tehdään tarvittavat liitokset, reiät ja aukot. (Pulkkinen et al. 2018)

Ennen leikkaamista osat esikäsitellään. Puhdistustapana käytetään yleensä sinkopuhdistusta tai paikallisesti hiontaa. Esikäsittelyssä kuluu siis pääosin sähköä ja jonkin verran materiaaleja, esimerkiksi laikkoja. Levyosien valmistuksessa käytetään joko poltto- tai laserleikkausta. Näidenkin päästöt syntyvät käytettävistä kaasuista ja sähköstä. Polttoleikkauksessa yleisesti käytettyjä fossiilisia kaasuja ovat propaani ja asetyleeni. (Pulkkinen

et al. 2018)

Yleisesti käytetyt MIG/MAG-, puikko- ja jauhekaarihitsaus ovat sulahitsausmenetelmiä. Niissä haluttu liitos saadaan aikaan sulattamalla liitospinnat. Laserhitsauksessa ja muissa puristushitsausmenetelmissä liitos saadaan aikaan lämmön ja liitospintojen toisiinsa puristamisen avulla. Käytettävän hitsausmenetelmän ja siinä käytettävien aineiden valinta perustuu muun muassa teräksen koostumukseen. Hitsauksesta aiheutuu liitokseen jäännösjännityksiä, joihin voidaan vaikuttaa käytettävillä työmenetelmillä. (SILKO 1.301 2021)

Sproesser et al. (2015) tutkivat neljän eri hitsaustekniikan merkitystä 1 metrin mittaisen hitsin ympäristövaikutuksiin. Hitsiä käytettiin 20 mm paksuisten teräslevyjen läpihitsaamiseen. Tutkitut menetelmät olivat: puikkohitsaus (*MMAW*), tavallinen MIG/MAG-hitsaus (*GMAW*), modifioitu MIG/MAG-hitsaus (*GMAW*) ja laserhitsauksen ja MIG/MAG-hitsauksen yhdistelmä (*LAHW*). Kolmella ensiksi mainitulla hitsattiin tupla-V-hitsi, LAHWilla taas Y-railohitsi. Päästöt vaihtelivat välillä 0,95...5,6 CO_2e-kg/metri niin, että pienin päästö saavutettiin LAHW-tekniikalla ja suurin MMAW-tekniikalla. MMAW-tekniikka oli tutkituista ainut manuaalinen, muita ohjattiin koneellisesti. (Sproesser et al. 2015)

Tutkimus tehtiin Saksassa, joten päästöarvot kuvaavat todennäköisesti hyvin myös hitsaamisen päästöjä Suomessa ja Pohjoismaissa. Tutkijat ottivat elinkaariarvioinnissaan huomioon materiaalien valmistamisesta ja kuljettamisesta, hitsausprosessista sekä jätteenkäsittelystä syntyvät päästöt. Laitteiston valmistuspäästöjä ei otettu huomioon. Tarkastelluista päästöistä valtaosa muodostui sähköstä ja juotelangasta. Esimerkiksi suojakaasun osuus päästöistä oli vain joitakin prosentteja. (Sproesser et al. 2015)

Valmis kokoonpano voidaan pinnoittaa konepajalla esimerkiksi maalaamalla. Kuumasinkittävät rakenteet voidaan myös kuljettaa sinkittäväksi muualle. (Pulkkinen et al. 2018) Livi-maalausjärjestelmien ympäristöselosteita ei vielä ole saatavilla. Garcia Gonzalez et al. (2017) kehittivät Italiassa biopohjaista polyesteriliimaa PU-päällysteelle. Biopohjaisen PU-päällysteen päästöiksi saatiin noin 3,1 CO_2e-kg/kg ja fossiilipohjaisten noin 8,3 CO_2e-kg/kg (Garcia Gonzalez et al. 2017).

Valmis teräskokoonpano kuljetetaan konepajalta työmaalle yleensä tieliikenteessä. Isoilla rakenteilla konepajavalmistusta ja sitä kautta kokoonpanojen suunnittelua rajoittaakin juuri kuljetuskapasiteetti. Tarvittaessa isoimmat kokoonpanot on mahdollista toimittaa työmaalle erikoiskuljetuksena. (Pulkkinen et al. 2018)

4.3.3 Teräsrakenteen asentaminen

Terässillat asennetaan Suomessa yleensä joko työntö- tai nostoasennuksena. Työntöasennuksessa eli vaihesiirtomenetelmässä päällysrakenne kasataan penkereelle niin, että valmis lohko siirretään tukien päälle ja seuraava lohko kasataan edelliseen kiinni. Nos-

toasennuksessa eli paikalleen asentamisessa taas päällysrakenne nostetaan tukien päälle nosturilla lohko kerrallaan ja lopuksi paikoillaan olevat lohkot liitetään yhteen. (Pulkkinen et al. 2018)

Sekä hydraulisten tunkkien että nosturien energianlähteenä voidaan käyttää poltto- tai sähkömoottoria. Teräsrakenteen asentaminen palautuukin tältä osin toisaalta kaluston sähköistymiseen ja toisaalta polttoaineiden ja sähkön tuotantomuodon päästöihin. Asennusaikaiset telineet ovat yleensä teräsrakenteisia ja uudelleenkäytettäviä.

Kuten aiemmin esitettiin, teräsrakenteet on suojattava korroosiolta. Yleisin menetelmä on suojamaalaus. Pinnoitus voidaan siltatyypistä ja hankkeesta riippuen tehdä joko kokonaan tai osittain konepajalla. Etenkin siltapaikkaluokissa I ja II on vähintään sillan viimeinen maalikerros maalattava vasta, kun teräsrakenne on valmis. (Pulkkinen et al. 2018)

Koska terässillat ovat yleensä betoni-teräs-liittorakenteita, asennetaan joko lohkoihin tai paikoillaan jo oleviin teräsrakenteisiin betonimuotit. Betonimuotit voivat olla kertakäyttöisiä puumuotteja tai esimerkiksi asennusjärjestelmän osina uudelleenkäytettäviä rakenteita. Betonimuottien päästöjä on käsitelty tarkemmin betonirakentamisen yhteydessä kohdassa 4.2.3.

4.3.4 Käyttöiän aikaiset vaikutukset

Oikein ylläpidetty teräsrakenne on pitkäikäinen. Tavallisesta teräksestä valmistetut sillat tulee suojata korroosiota vastaan. Tämä tehdään yleensä suojamaalaamalla. Maalaus on uusittava noin 35 vuoden kohdalla ja siitä eteenpäin noin 30 vuoden välein (LTS 26/2015 2015). Sadan vuoden käyttöiällä terässilta maalataan siis yhteensä 3 kertaa. Koska sillan kansilaatta on yleensä betonia, tehdään siihen vastaavat ylläpitotoimet kuin betonisilloilla.

Väyläviraston ohjeiden mukaan tulee käyttää Livi-hyväksyttyjä maalausjärjestelmiä. Silloissa käytettävistä maalausjärjestelmistä tai niiden liuotinpohjaisista maaleista ei ole vielä tehty EPD:tä. Vesiohenteisista maaleista on tehty ympäristöselvityksiä, mutta niitä ei käytetä suojamaalauksissa.

4.3.5 Loppukäyttö

Terässillan purkamisessa voidaan käyttää esimerkiksi samoja menetelmiä kuin levyosien valmistuksessa. Kaikki purkamiseen käytettävät menetelmät aiheuttavat päästöjä niissä käytettävän energian lähteen mukaisesti. Esimerkiksi polttoleikkauksessa päästöt aiheutuvat siis pääosin poltettavasta hiilivetykaasusta. Valtaosa teräksestä palautuu kiertoon osana uuden teräksen valmistusta. Teräsromun seassa saa olla muuta romua korkeintaan 2 painoprosenttia. (Pulkkinen et al. 2018)

Rakenneosien uudelleenkäyttöä on tutkittu lähinnä talopuolella (mm. Hradil 2021; Pon-

giglione ja Calderini 2014). Pieni terässilta voidaan melko helposti uudelleenkäyttää samalla tai uudella siltapaikalla. Esimerkiksi vanhoja teräsristikkorakenteisia ratasiltoja on siirretty ajoneuvo- ja kevyenliikenteen silloiksi [4]. Väyläviraston hallinnoimat teräksiset varasillat ovat hyvä esimerkki siitä, että terässiltojen suunnittelu uudelleenkäytettäväksi on mahdollista. Varsinkin taajamissa ja niiden lähistöllä maankäyttö ja tarve liikenneväylille voi muuttua sillan käyttöikään nähden melko nopeastikin. Esimerkiksi 100 vuoden käyttöiälle suunniteltu silta, joka sijaitsee taajaman lähellä, ei välttämättä ole koko elinkaartaan juuri oikeassa paikassa suhteessa ympäristöönsä. Tällaiset sillat tulisikin suunnitella siirrettäviksi.

4.3.6 Tulevaisuus

Ruukin (2021) mukaan vuoteen 2050 mennessä teräksen vuosituotanto on noin 2 800 megatonnia, josta noin puolet valmistetaan malmista ja puolet kierrätysteräksestä. Terärakenteiden kierrätyksen ja uudelleenkäyttämisen lisäksi onkin siis päästöjen vähentämiseksi välttämätöntä kehittää myös malmiteräksen valmistusprosessia.

Teräsyhtiö SSAB:n, energiayhtiö Vattenfallin ja kaivosyhtiö LKAB:n yhteisessä HYBRIT-hankkeessa tavoitteena on luoda terälselle kokonaan fossiilivapaa arvoketju malmin louhimisesta valmiiseen terästuotteeseen asti. Merkittävin päästövähennys, noin 90 %, on tarkoitus saavuttaa raakateräksen valmistuksessa korvaamalla käytössä oleva masuunituotanto sähkö-vetysuorapelkistyksellä. Prosessissa syntyvä, terässienen muodossa oleva raakateräs voidaan käsitellä valokaariuunissa kierrätysteräksen tavoin. (Kesti 2021) Myös muilla teräsvalmistajilla on kehitteillä vähäpäästöisiä teräksiä (SEI ja LeadIT 2021).

HYBRIT-hankkeessa käytettävä teknologia vaatii paljon sähköenergiaa. Nykyisin esimerkiksi Raahen tehtaan sähköntarve on noin 0,8 TWh vuodessa. Tulevaisuudessa vuosittaiseksi tarpeeksi arvioidaan tuotannonlaajuudesta riippuen 2...12 TWh. SSAB onkin aloittanut keväällä 2021 selvitykset 400 kV voimalinjan rakentamiseksi Raahen tehtaalle. Fossiilivapaan teräksen kaupallinen tuotanto on tarkoitus aloittaa Ruotsissa 2026. Suomessa tuotannon on tarkoitus olla puoliksi fossiilivapaata vuodesta 2030 ja täysin fossiilivapaata vuodesta 2040 alkaen. Koko SSAB:n tuotannon on tarkoitus olla hiilineutraalia vuonna 2045. (Leppänen 2021)

Sillanrakennuksessa voidaan käyttää myös muita metalleja, esimerkiksi terästä kevyempää alumiinia. Ensimmäinen alumiinikantinen silta rakennettiin Yhdysvaltoihin vuonna 1933. Sen jälkeen alumiinia on käytetty noin 100 sillan rakentamisessa tai korjaamisessa. Alumiininen kansilaatta on yleensä 80 % betonilaattaa kevyempi. (Siwowski 2015) Alumiinin avulla pääkannattimen painoa on mahdollista pienentää myös teräkseen verrattuna (Mosaker 2021).

[4] Esimerkiksi V-1500 Ylipään silta, V-1764 Kainastonjoen silta ja O-1179 Temmesjoen silta ovat teräksisiä, puukantisia ristikkosiltoja, jotka on siirretty esimerkiksi yksityisteiden silloiksi. (Väylävirasto 2021)

Alumiinin keskimääräinen päästö A1...A3 on Euroopassa keskimäärin 6 700 ja maailmalla 16 700 CO_2e-kg/tonni. Norjassa erään valmistajan alumiinirakennustuotteilla päästö on 2 300...5 700 CO_2e-kg/tonni. Alumiinin suuret ominaispäästöt voivat kuitenkin kompensoitua kevyemmän rakenteen ja hyvän säilyvyyden kautta. Esimerkiksi Kanadaan vuonna 1950 rakennettu 120 metrinen Arvidan kaarisilta sekä Norjaan vuonna 1995 rakennettu Forsmoon kotelolaattasilta ovat säilyneet hyvässä kunnossa ilman mainittavia ylläpitotoimenpiteitä. (Mosaker 2021)

Alumiini on materiaalina erittäin hyvin säilyvä. Sillanrakennuksessakaan se ei vaadi erillistä pintakäsittelyä tai esimerkiksi kosteuden poistamista kotelokannattimen sisältä. Näin ollen alumiinin käyttö vähentää myös kustannuksia ja päästöjä aiheuttavien ylläpitotoimenpiteiden tarvetta sillan elinkaaren aikana. (Mosaker 2021)

Kanadassa Pedneault et al. (2021) tutkivat betoni-teräsliittopalkkisillan kannen alumiinikannella korvaamisen vaikutusta elinkaarikustannuksiin ja päästöihin. Toiminnalliseksi yksiköksi määritettiin kaksikaistainen, 20 metrinen silta 75 vuoden käyttöiällä. Tulokset on esitetty taulukossa 4.6. Kun ylläpidon päästöt ja kustannukset otettiin huomioon, oli betonikantinen edelleen halvempi, mutta sen päästöt olivat 1,84-kertaiset alumiinikantiseen verrattuna. Lisäksi tarkasteltiin ylläpidosta aiheutuvien liikennekatkosten vaikutusta. Tarkastelussa oletettiin kiertotien pituudeksi 25 km. Betonikantisen sillan oletettiin olevan suljettuna korjausten vuoksi 107 päivää ja alumiinikantisen 7 päivää. Betoninen siltakansi vaihdetaan kerran, minkä arvioitiin vievän 55 päivää, ja korjataan 2 kertaa, mihin arvioitiin kuluvan 21 päivää/kerta. Muut huollot olivat näitä pienempiä. Lisäksi taulukossa 4.6 on esitetty tutkimuksen tulosten pohjalta kiertotien pituuden vaikutus elinkaarikustannuksiin ja -päästöihin. (Pedneault et al. 2021)

Taulukko 4.6. *Pedneault et al. (2021) tulokset siltakannen materiaalin vaikutuksista elinkaaripäästöihin sekä niiden pohjalta tehty kiertotien pituuden herkkyystarkastelu.*

	Kustannukset [t USD]		Päästöt [CO_2e-t]	
	betoni	alumiini	betoni	alumiini
Rakentaminen	302	648	1 010	1 830
Rakentaminen + Ylläpito	435	685	2 250	1 220
R + Y + Kiertotie 25 km	4 383	957	84 200	10 720
R + Y + Kiertotie 5 km	1 225	740	18 640	3 120
R + Y + Kiertotie 1 km	593	696	5 528	1 600

Norjan Statens vegvesen on teettänyt vaihtoehtoselvityksen (2020) Langenuenin riippusillan toteuttamisesta teräksen sijasta alumiinista. Perusvaihtoehdossa pääkannatin oli teräskotelo. Alumiinivaihtoehtoja kehitettiin useita, joista kahta tarkasteltiin laajemmin. Tehtyjen tarkastelujen perusteella hiilikädenjäljen ja -jalanjäljen summa olisi kaikilla vaihtoehdoilla likimäärin sama, noin 31...32 CO_2e-kilotonnia. Jos hiilikädenjälkeä ei

oteta huomioon, on terässilta vähäpäästöisempi vaihtoehto. Päästölaskelmissa tarkasteltiin ainoastaan päärakenneosien valmistuspäästöjä. Teräsvaihtoehdon kokonaiskustannusarvio oli 2 406 miljoonaa Norjan kruunua. Pääkannattimet maksoivat enemmän alumiinivaihtoehdoissa, mutta pylonien ja kaapeleiden kustannukset toisaalta pienenivät. Kahden tarkemmin tarkastellun alumiinivaihtoehdon arvioidut kokonaiskustannukset olivat 2 299...2 347 miljoonaa kruunua, eli noin 230 miljoonaa euroa. (Berge Kristensen 2020) YM:n Vähähiilisyyden arviointimenetelmässä hiilijalanjälki ja -kädenjälki on esitettävä erillään.

4.4 Puu

4.4.1 Puutuotteiden valmistus

Puuta on käytetty rakentamisessa läpi ihmiskunnan historian. Puun tärkein ominaisuus rakentamisessa on sen hyvä lujuus suhteessa painoon.

Sillanrakennuksessa ja muissa infrakohteissa puun toimintaympäristö on huomattavan erilainen verrattuna talonrakentamiseen. Karkeasti voitaneen sanoa, että talonrakentamisessa puurakenteilta vaaditaan lujuutta hyvissä olosuhteissa. Infrakohteissa puurakenteelta vaaditaan sekä hyviä lujuus- että kestävyysominaisuuksia. Ympäristöolosuhteissa korostuvat erityisesti kosteudenvaihtelu sekä erilaiset sienet ja mikrobit. Toisaalta, puun suojaamiseen käytettävät aineet saattavat aiheuttaa vahinkoja levitessään ympäristöön. Toisin kuin talonrakentamisessa, sillanrakennuksessa puurakenteille ei aseteta palonkestovaatimuksia.

Metsän kasvaessa puut yhteyttävät ilman hiilidioksidista ja juurensa kautta keräämistä ravintoaineista ja vedestä selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä. Näin hiilidioksidin hiili varastoituu puuhun ja osa hapesta palautuu ilmakehään. Kasvava metsä toimii siis hiilinieluna. Hiili säilyy puussa siihen asti, kunnes se lahoaa, palaa tai muutoin yhtyy happeen, jolloin osa hiilestä vapautuu ilmakehään hiilidioksidina. Kesäkuussa 2021 lausuntokierroksella olleessa YM:n vähähiilisyyden arviointimenetelmän luonnoksessa puun hiilivarastona hyödyntämisen ehtona on, että puu on osa rakennusta vähintään 100 vuotta (Ympäristöministeriö 2021).

Nykyään puut kaadetaan ja kuljetetaan metsästä konevoimaisesti. Tästä aiheutuu päästöjä, jotka palautuvat käytettävän polttoaineen päästöiksi. Puunkeruuta varten voidaan päätyä rakentamaan metsäautoteitä, mistä aiheutuu myös päästöjä. Rakennusmateriaaliksi päätyvä puu viedään kaatamisen jälkeen jatkokäsiteltäväksi, esimerkiksi sahattavaksi ja kuivattavaksi. Sahojen energialähteenä käytetään yleensä sähköä, jolloin käsittelyn päästöt palautuvat käytettävän sähkön tuotantopäästöiksi. Kuivatuksen energialähteenä voidaan käyttää polttoaineita tai sähköä.

Sillanrakennuksessa käytetään *sahatavaran* lisäksi erilaisia liimoilla koottuja puurakennustuotteita. Sahatavaran lisäksi sillanrakennuksessa voidaan käyttää esimerkiksi GLT-liimapuuta tai LVL-viilupuuta. Tässä tutkimuksessa edellä mainituista, sillanrakentamisessa käytetyistä puurakennustuotteista käytetään yleisnimitystä *insinööripuu* erotuksena sahatavaraan. Sahatavaran lujuusluokat esitetään standardissa SFS-EN 338 (2016) ja vaatimukset suorakaidepoikkileikkauksille standardissa SFS-EN 14081-1 (2019). Liimapuun vaatimukset esitetään standardissa SFS-EN 14080 (2013).

Rakentamisen tietokannassa sahatavaran tyypillinen päästö A1...A3 on 69 CO_2e-kg/tonni. Valmistusmateriaaleista 100 % ajatellaan olevan peräisin uusiutuvista lähteistä ja lop-

pukäyttönä 100 % puusta päätyy energiakäyttöön. Kädenjäljeksi, moduuli D, on ajateltu -1 550 CO_2e-kg/tonni. Höylätyn sahatavaran päästöt A1...A3 ovat 73 CO_2e-kg/tonni. (Häkkinen 2021)

Kyllästetyn sahatavaran tyypilliseksi päästöksi A1...A3 arvioidaan 140 CO_2e-kg/tonni. Valmistusmateriaaleista 99 % ajatellaan olevan peräisin uusiutuvista lähteistä ja loppukäyttönä 100 % puusta päätyy energiakäyttöön. Kädenjäljeksi, moduuli D, on ajateltu -1 500 CO_2e-kg/tonni. Kyllästysaine on yleensä kuparisuolapohjainen. (Häkkinen 2020b)

Liimapuun tyypilliseksi päästöksi A1...A3 arvioidaan 110 CO_2e-kg/tonni. Valmistusmateriaaleista 99 % ajatellaan olevan peräisin uusiutuvista lähteistä ja loppukäyttönä 100 % puusta päätyy energiakäyttöön. Kädenjäljeksi, moduuli D, oletetaan -1 600 CO_2e-kg/tonni. (Häkkinen 2020a)

Viilupuun tyypilliseksi päästöksi A1...A3 arvioidaan 300 CO_2e-kg/tonni. Valmistusmateriaaleista 94 % ajatellaan olevan peräisin uusiutuvista lähteistä ja loppukäyttönä 94 % puusta päätyy energiakäyttöön ja 5 % jätteeksi. Kädenjäljeksi, moduuli D, on ajateltu -1 600 CO_2e-kg/tonni. (Häkkinen 2020c)

Esimerkiksi betonimuoteissa voidaan käyttää myös vaneria. Pinnoittamattoman vanerin tyypillinen päästö A1...A3 on 300...400 ja pinnoitetun 400...550 CO_2e-kg/tonni. Vastaavasti valmistusmateriaaleista 86 tai 81 prosenttia oletetaan olevan peräisin uusiutuvista lähteistä. Kaiken vanerin oletetaan päätyvän käyttöikänsä jälkeen energiakäyttöön. Kädenjäljeksi, moduuli D, arvioidaan pinnoittamattomilla -1 580 ja pinnoitetuilla -1 500 CO_2e-kg/tonni. (Häkkinen 2020d)

Ruotsissa sahatavaran tyypilliseksi päästöksi A1...A3 on arvioitu 69 ja liimapuun 136 CO_2e-kg/tonni (Trafikverket 2021). Norjan ja Tanskan väyläviranomaisten päästölaskentatyökaluissa ei ole esitetty päästöarvoja puulle tai puutuotteille (Statens vegvesen 2021; Vejdirektoratet ja Banedanmark 2021).

Edellä esitettyjen päästöarvojen perusteella siis korkeampi jalostusarvo kasvattaa puutuotteen päästöjä. Pienemmät, alle 30-metriset puusillat voidaan rakentaa sahatavarasta tai insinööripuutuotteista. Isommat puusillat rakennetaan nykyisin pääosin insinööripuutuotteista. Seuraavaksi tarkastellaan insinööripuutuotteiden muiden osa-aineiden, käytännössä liimojen, päästöjä.

Liimapuussa käytetään standardin SFS-EN 14080 (2013) mukaisesti joko kosteutta kestävää yksikomponenttista polyuretaaniliimaa (*PU*-), emulsiopolymeeri-isosyanaattiliimoja (*EPI*-) tai fenoli- ja aminoplastisia liimoja. Jälkimmäisiä ovat esimerkiksi ureaformaldehydi- (*UF*-), melamiiniureaformaldehydi- (*MUF*-) ja fenoliformaldehydihartsit (*PF*-), joiden vaatimukset on esitetty standardissa SFS-EN 301. MUF-, UF- ja PF-hartsit ovat varsin yleisesti liimapuutuotteissa käytettyjä kemikaaleja. Niitä on liimapuun kokonaismassasta noin 1 % (Häkkinen 2020a). Viilupuun kokonaismassasta liimaa voi olla noin 6 % (Häkkinen

2020c). Vanerin massasta liimaa on noin 8...9 % ja lisäksi pinnoitetun vanerin massasta noin 5 % on fenolipinnoitetta.

Rakentamisen päästötietokannassa MUF-hartsin yleisenä päästöarvona on käytetty 3,5 CO_2e-kg/kg (Häkkinen 2020a). Yhdysvalloissa UF:n ominaispäästöksi on laskettu 2,04 ja PF:n 2,88 CO_2e-kg/kg (Yang ja Rosentrater 2020). Brasiliassa taas MUF:n päästöksi on arvioitu noin 16,0 CO_2e-kg/kg, kun melamiinipitoisuus oli 10 % (Silva et al. 2015). Silva et al. (2015) arvossa saattaa olla pilkkuvirhe, sillä lähtötietotaulukossa hiilidioksidipäästöt on ilmoitettu kymmenpotenssissa E-01 ja lopullisessa taulukossa GWP kymmenpotenssissa E+00. Muiden kasvihuonekaasujen määrä oli luokassa E-05...E-06. MUF:n päästö erosi tutkimuksessa alle 5 % UF:n päästöstä.

Kosteissa ja suojaamattomissa olosuhteissa puu täytyy suojata. Suojaamiseen voidaan käyttää esimerkiksi fossiilipohjaista kreosiittia. Spekreijse et al. (2019) tutkivat kreosiittien korvaamista biomassan tislausjakeilla. Kreosiitin ominaispäästöksi laskettiin 9,07 CO_2e-kg/tonni. Tutkimuksessa varsinaisen vertailun kohteena oli kyllästetty puu. Biomassan tislausjakeilla kyllästetyn puun kohdalla saavutettiin 82 % päästövähennys kreosiittikyllästettyyn verrattuna. (Häkkinen 2020b)

4.4.2 Puurakentaminen

Puusillat on mahdollista rakentaa paikan päällä joko osin tai kokonaan. Pienet puusillat on mahdollista kuljettaa siltapaikalle kokonaisina ja käytännössä vain nostaa alusrakenteiden päälle. (Pulkkinen et al. 2018)

Kuparisuolakylläste aiheuttaa tavallisten teräskiinnikkeiden korroosiota, jolloin kyllästetyn puutavaran teräskiinnikkeiden on syytä olla sinkittyjä tai haponkestäviä (Pulkkinen et al. 2018). Kiinnikkeiden osuudesta siltojen päästöistä tai määristä ei ole saatavilla koottua tietoa. Taitorakennerekisteristäkään ei löydy määräluetteloita, joten kohteiden kattava tarkastelu on vaikeaa. Kahden sillan päällysrakenteen tarkastelun perusteella teräskiinnikkeidenmäärä voi olla luokkaa 50 kg/puu-m^2. Toinen silloista, Hämeen linnan vallihaudan ylittävä puusilta, on sahatavarasta rakennettu palkkisilta ja toinen, Hikipingon silta, puinen kaarisilta. Ainoastaan palkiston ja kaarien materiaalit otettiin tarkastelussa huomioon. Jos teräsliittimien päästöarvoksi oletetaan teräksen päästöarvo 1 130 CO_2e-kg/tonni (baufo-rumstahl e.V. 2018), aiheutuu liittimistä päästöjä noin 60 CO_2e-kg puukuutiometriä kohden. Puutonnia kohden päällysrakenteen päästöt siis kasvavat noin 130 CO_2e-kg. Tarkastelu on hyvin karkea, mutta sillä päästään mahdollisesti käsiksi teräsliittimistä aiheutuvien päästöjen suuruusluokkaan.

Puuelementit, esimerkiksi siltojen kaaret tai palkit, valmistetaan tehdasolosuhteissa. Tehtaassa työkalujen ja -koneiden pääasialliseksi energialähteeksi voitaneen olettaa sähkö. Kuljetuksesta aiheutuvat päästöt taas riippuvat käytettävästä polttoaineesta.

Työmaalla asennuskalustona voidaan käyttää erilaisia kurottimia ja nostureita. Työmaaliitokset tehdään työkaluilla, joiden energia on peräisin joko polttoöljygeneraattorista tai sähköverkosta. Puinen pääkannatin asennetaan yleensä betonialusrakenteiden päälle. Betonirakentamisen päästöjä on tarkasteltu kohdassa 4.2.3.

4.4.3 Käyttöiän aikaiset vaikutukset

DuraTB-hankkeessa (*Durable Timber Bridges*) tutkittiin puusiltojen kestävyyttä olosuhderasituksia vastaan ja niiden käyttöiän pidentämistä suunnitteluvaiheessa. Projekti oli käynnissä vuodet 2014-2017. Siinä oli mukana suomalaisia, ruotsalaisia, norjalaisia sekä yhdysvaltalaisia väyläviranomaisia, yliopistoja, tutkimuslaitoksia, yrityksiä ja teollisuuden etujärjestöjä. (Pousette et al. 2017)

Puurakenteen säilyvyys sieniä vastaan perustuu yksinkertaistettuna kahteen asiaan: puumateriaalin kestävyyteen ja siihen, onko rakenne alttiina vesisateelle tai auringonvalolle. Pohjoismaissa sillat rakennetaan pääosin männystä, joten materiaalin kestävyyteen voidaan käytännössä vaikuttaa vain kyllästämisellä. Kromia, arsenikkia ja kreosootteja sisältävillä kyllästysaineilla käsitelty puu on ympäristölle haitallista. Jos rakenne on altis olosuhderasituksille, kuten satavalle ja tiellä valuvalle vedelle, on varmistuttava että se pääsee kuivumaan. (Pousette et al. 2017) Näistä kuivatuksen järjestäminen ei oletettavasti vaikuta rakenteen päästöihin. Nykyisin EU:n alueella käytettävät kyllästysaineet ovat kuparipohjaisia. Puusillan rakenteissa voidaan Suomessa käyttää kreosiittikyllästystä, jos valmiit rakenteet eivät ole ihmisen kosketettavissa (NCCI 5 2013).

Ajoneuvosilloilla koko rakenteen suojaaminen esimerkiksi kattamalla[5] ei ole suositeltavaa, sillä päällysrakenne ei tällöin pääse kuivumaan (Pousette et al. 2017). Puusillat suunnitellaan Suomessa nykyisin lähtökohtaisesti 50 vuoden käyttöiälle (NCCI 5 2013). Muut sillat suunnitellaan lähtökohtaisesti 100 vuoden käyttöiälle. Uudistuvassa NCCI 5 -soveltamisohjeessa tarkennetaan säilyvyyssuunnitteluun liittyviä asioita ja esitetään esimerkkejä rakenteellisesta suojaamisesta (Väylävirasto 2021c). Rakenteellisen suojaamisen avulla voi olla mahdollista suunnitella puusiltoja sadan vuoden käyttöiälle.

Väylävirasto tarkastutti 400 puukantista siltaa lahottajasienen varalta vuosina 2020-2021. Joka kymmenennessä havaittiin viitteitä lahottajasienistä ja lahovaurioista. Tarkastettavat sillat oli rakennettu pääosin vuoden 2005 jälkeen. Uusin vaurioitunut silta oli vain 4 vuoden ikäinen. Puun kyllästysprosessissa ei havaittu ongelmia ja vaurioituneita siltoja havaittiin ympäri maata. (Väylävirasto 2021a)

[5] Puusillan kantavia rakenteita voidaan suojata rakentamalla sillan päälle katto. Vettä voi ajoneuvoliikenteen silloilla kuitenkin päätyä rakenteisiin, jolloin katto hidastaa rakenteiden kuivumista.

4.4.4 Loppukäyttö

Puusillan tai sen osan purkaminen voidaan suorittaa käsityökalujen ja nostavan kaluston, esimerkiksi nosturin tai kurottajan, avulla. Silta voidaan myös purkaa esimerkiksi kaivinkoneella, mikäli sitä tai sen osia ei haluta hyödyntää. Kyllästämätön puu voidaan toimittaa poltettavaksi. Kyllästetty puu taas on ongelmajätettä ja lajitellaan erikseen. Puhdistamattoman, kiinnikepitoisen kestopuun kierrätyshinta on noin 40 % puhtaan kestopuun vastaavaa korkeampi. Kreosiitti- ja metallikyllästetyt puut lajitellaan erilleen muusta puusta. (Pulkkinen et al. 2018)

Puun uudelleenkäyttömahdollisuuksia on tutkittu talonrakentamisessa (Huuhka et al. 2018). Rakennuksissa puurakenteet ovat julkisivuja lukuunottamatta täysin olosuhteilta suojassa. Elinkaarensa loppupäässä puusiltojen osia tuskin pystyy laajemmin käyttämään uudelleen. Tosin, keveytensä ansiosta puusillan paikkaa voi olla mahdollista vaihtaa, mikäli alueen käyttö muuttuu sen elinkaaren aikana[6]. Tämä voidaan lukea eduksi etenkin tiiviisti rakennettujen asuinalueiden sisällä ja liepeillä: tiheästi rakennetun alueen laajentuessa voidaan sillan paikkaa vaihtaa melko edullisesti, jolloin silta ei toimi kaavoituksen rajoitteena. Tämä tietysti edellyttää, että silta kestää suunnitellusti.

4.4.5 Tulevaisuus

Sillan alus- ja päällysrakenteissa käytettävän puun suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta kantavissa ja 25 vuotta sekundäärisissä rakenteissa (NCCI 5 2013). Näin ollen puusiltaa ei voida yleisesti pitää hiilivarastona. Kun uuden sillan rakennusmateriaaleja valitaan, onkin tarkasteltava ja vertailtava kustannuksia ja päästöjä tavoitellun käyttöiän aikana. Eräs tapa lähestyä puun käyttämistä sillanrakennuksessa on laajentaa sen käyttökohteita. Puu on kevyt materiaali, joten sen avulla on mahdollista pienentää esimerkiksi teräs- tai betonipäällysrakenteen omaa painoa. Puun säilyvyys jatkuvasti märkänä on myös erinomainen. Sopivissa kohteissa voisikin olla mahdollista käyttää paalutuksessa puupaaluja.

NCCI 5 -soveltamisohjeen (2013) mukaisesti on mahdollista suunnitella myös puu-betoniliittorakenteita, joissa puupalkiston päälle valetaan betonikansi. Päivitetty NCCI 5 ollaan julkaisemassa lähiaikoina. Uudessa ohjeessa on esitetty liittopalkkisiltojen suunnittelussa sovellettavaksi kelpaavia tutkimuksia (Väylävirasto 2021c).

Diplomityössään Hooli (2020) tutki puupaalujen käyttöä Suomessa. Puupaalujen käyttö on käytännössä loppunut Suomessa talonrakentamisessa 1950-60-luvuilla ja infrarakentamisessa 1980-luvulla. Puupaalut voivat olla kitka-, koheesio- tai tukipaaluja ja ne voidaan asentaa paalutuskoneella tai ponttivasaralla. Puhtaassa pohjavedessä paalut voivat

[6] Esimerkiksi H-13 Santalahden ylikulkusillan päällysrakenne on tarkoitus hyödyntää uudessa sijainnissa Tampereella. Puukantinen puinen liimattu palkkisilta valmistui 2016, mutta se täytyi siirtää vuonna 2021 Tampereen Ratikan 2-vaiheen tieltä. (Väylävirasto 2021b)

säilyä pitkiäkin aikoja. Esimerkiksi Venetsiassa ja Lontoossa nykyisinkin käytössä olevia siltoja on perustettu puupaaluille, jotka ovat olleet käyttökelpoisia vielä satojen tai jopa tuhannen vuoden jälkeen. (Hooli 2020) On syytä ottaa huomioon, että pohjavedenpinnan vaihtelu on pyrittävä arvioimaan siltojen tapauksessa 100 tai 200 vuoden päähän tulevaisuuteen. Tähän arviointiin liittyy samanlaisia epävarmuuksia kuin muuhunkin pitkän aikavälin ennustamiseen. Esimerkiksi ilmastonmuutos saattaa nostaa pohjavedenpintaa rannikkoalueilla merivedenpinnan noustessa, ja toisaalta laskea sitä kuivuvilla alueilla.

Puupaaluja voidaan *RIL PO-2016* mukaisesti käyttää myös Suomessa. Diplomityön perusteella Ruotsissa voidaan kuitenkin puumateriaalille käyttää suurempia puristuslujuuksia kuin Suomessa. Jatkuvasti veden alla olevia puupaaluja ei ole välttämätöntä suojata erikseen. Säilymisen kannalta ongelmallisilla pohjavedenpinnan vaihtelualueilla voidaan puupaalua jatkaa betonipaaluna. Ruotsin ohjeissa ja tulevan geoeurokoodin luonnoksessa paaluissa käytettävän pyöröpuun suositellaan olevan tuoretta. Puupaalujen säilyvyyden takia ne voidaan luokitella pitkäkestoisiksi hiilivarastoiksi. (Hooli 2020) Diplomityön (2020) tulosten perusteella puupaaluja käyttämällä voisi olla mahdollista saavuttaa päästövähennyksiä myös sillanrakentamisessa. Perustusten käsittely laajemmin on rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

4.5 Yhteenveto

4.5.1 Betonin päästöt

Betoni on erittäin käytetty sillanrakennusmateriaali Suomessa. Pienimmät betonisillat ovat yleensä teräsbetonisia laattakehäsiltoja. Tätä suuremmat betonisillat ovat yleensä laatta- tai palkkisiltoja. Palkkisillat voivat olla teräs- tai jännebetonisia rakenteita. Betonia käytetään myös liittorakenteisissa silloissa etenkin yhdessä teräksen kanssa. Monesti ajoneuvoliikenteen silloilla kansi on betoninen, vaikkei se toimisi liittovaikutuksessa pääkannattimen kanssa. (Pulkkinen et al. 2018)

Betonin valmistuspäästöt A1...A3 muodostuvat betonin osa-aineiden valmistamisen sekä betonin sekoittamisen päästöistä. Betonin valmistuspäästöissä korostuvat sementin valmistuksesta aiheutuvat päästöt. (Salminen et al. 2021)

Suurin osa betonimassasta on kiviainesta. Jo nykystandardeilla osa karkeasta kiviaineksesta voidaan korvata uusiomateriaaleilla myös sillanrakennuksessa (SFS-EN 206 2021). Kiviaineksen osuus betonin päästöistä on nykyisin noin 2 % (Salminen et al. 2021). Tätä päästöä voidaan pienentää käyttämällä uusiokiviainesta yhdessä klinkkerisementtiä korvaavien sideaineiden kanssa. Tavallista sementtiä käytettäessä uusiokiviaineksen aiheuttama lujuuden alenema ei mahdollista päästövähennyksiä lisääntyneen sideainetarpeen takia (Visintin et al. 2020). Seuraavan sukupolven Eurokoodin luonnoksessa prEN 1992-1 (2021) on esitetty kaavat uusiokiviaineksen käytön huomioon ottamiseksi suunnitteluarvoissa. Lisäksi uusiokiviaineksen tehostetulla karbonatisoitumisella on mahdollista saavuttaa hiilivarastovaikutusta (He et al. 2020). Uusiokiviaineksen käyttö olisi tärkeää myös uusiutumattomien luonnonvarojen käytön ja luonnon monimuotoisuuden näkökulmista (Tam et al. 2018).

Valtaosa, noin 70...80 %, betonin päästöistä aiheutuu nykyisin sementistä (Salminen et al. 2021). Tämän päästön vähentämiseksi edistetään nykyään kahta erilaista uudistusta. Sementinvalmistajat pyrkivät vähentämään päästöjään uusiutuvan energian ja CCUS-teknologian avulla (Finnsementti 2021). Lisäksi betonin päästöjä pyritään vähentämään korvaamalla sementtiä pääasiassa masuunikuonalla. CCUS-teknologiaa ollaan vasta tuomassa teolliseen mittakaavaan, mutta sideaineiden korvausosuutta voidaan kasvattaa jo nykyisellään käytännössä 80 prosenttiin.

Hiilenpolton vähentyessä Suomessa lentotuhkan tuotantomäärät pienenevät (Lazik ja Garrecht 2020). Masuunikuonaa maassa riittää toistaiseksi hyvin. Toisaalta muualla kasvava kysyntä saattaa nostaa kuonan hintaa. Nykyään verrattain kallista silikaa käytetään noin 5...10 % korvausosuudella parantamaan esimerkiksi betonin tiiviyttä (Fidjestøl ja Dåstøl 2008). Kalkkikiveä voidaan infrabetoneissa käyttää fillerinä korkeintaan 20 %, eikä sen korvausosuutta voida lisätä huonontamatta betonin ominaisuuksia (Väylävirasto

2020). Lentotuhkaa on tulevaisuudessa mahdollista korvata puuta polttavissa voimalaitoksissa syntyvällä lentotuhkalla (mm. Gabrijel et al. 2021; Lazik ja Garrecht 2020).

Väyläviraston infrabetoneiden sideaineen päästöjä on mahdollista vähentää huokostamattomilla infrabetoneilla 60 prosenttia ja huokostetuilla 40 prosenttia verrattuna pelkän CEM I -sementin käyttöön. Näin ollen sideaineilla saavutettavissa oleva päästövähennys P-lukubetoneilla on noin 32 %. Huokostamattomillakin infrabetoneilla vastaava suurin mahdollinen päästövähennys on noin 48 %.

Uusista sementtiä korvaavista sideaineista esimerkiksi metakaoliinien käyttöä myös Suomessa selvitetään Betoniyhdistyksen toimesta. Ne ovat sementtiä hienorakeisempia, joten ne voivat parantaa betonin pitkäaikaiskestävyyttä (De Belie et al. 2018). Niiden päästöt voivat valmistustavasta riippuen olla noin viidenneksen tavallisen sementin päästöistä (De Belie et al. 2018). Puhtaasti hiilenpoltosta peräisin olevia lentotuhkia voidaan mahdollisesti korvata muista prosesseista peräisin olevilla lentotuhkilla (esim. turpeenpoltosta Rissanen et al. 2020). Myös monet muut teollisuuden sivuvirrat voivat toimia seosaineena sementtikiven muodostumisessa. Tutkimuksen kohteena olevat sivuvirrat valikoituvat yleensä paikallisen saatavuuden mukaan. Suomessa ja Pohjoismaissa hyvin saatavilla olevia resursseja voitaisiin saada metsistä, kallioperästä ja terästeollisuudesta.

Betonin lisäaineet yleensä sivuutetaan päästöjä arvioitaessa, sillä niitä käytetään melko pieniä, alle prosentin määriä betonin massasta (Salminen et al. 2021). Lisäaineiden avulla on mahdollista tehostaa myös korvaavien sideaineiden tai uusiokiviaineksen käyttöä betonissa (esim. Medina et al. 2014; Paiva et al. 2012). Toisaalta ne eivät välttämättä toimi oletetulla tavalla vahvasti seostetuissa betoneissa (De Belie et al. 2018).

Teräsbetonisillassa raudoitteet kasvattavat betonin päästöjä noin 80 ja jännebetonisillassa noin 90 CO_2e-kg/m^3. Ruostumattoman teräksen päästöt ovat noin kaksinkertaiset hiiliteräkseen nähden (Häkkinen 2020b). Ruostumattoman teräksen käytöllä on mahdollista saavuttaa merivesirasitetuissa olosuhteissa säästöjä niin elinkaarikustannuksissa kuin -päästöissäkin (Mistry et al. 2016). Raudoitteet voidaan korvata myös kuitutankoja ja -betonia käyttämällä (Wada et al. 2020). Tämän vaikutuksesta sillan investointi- tai elinkaaripäästöihin tai kustannuksiin ei ole kattavaa tutkimusaineistoa.

Päästöt materiaalien kuljettamisesta työmaalle, A4, muodostuvat valtaosin välimatkoista ja käytettävistä energialähteistä. Niissä on siis suuri vaihtelu hankkeiden välillä, eikä niitä tarkastella tämän tutkimuksen puitteissa. Myös elementti- tai paikallavalurakenteiden työmaatoiminnoista, A5, aiheutuu päästöjä. Paikallavalettavien siltojen muottien ja telineiden päästöistä ei löydy tietoa kovinkaan kattavasti. Ainemenekkien arvioimiseen tarkoitettuja kaavoja (Tiehallinto 2001) käyttämällä 35 metrisen sillan sahatavarasta valmistettujen muottien materiaalipäästö on puun osalta alle 100 CO_2e-kg. Muottien ja telineiden lisäksi päästöjä aiheutuu työmaalla tai elementtitehtaalla käytettävästä kalustosta. Nämä päästöt palautuvat käytettävien koneiden energialähteen päästöiksi.

Käyttövaiheen B-moduuleista tarkastellaan silloilla yleensä ainoastaan huoltoon ja ylläpitoon liittyviä moduuleja B2, B3, B4 ja B5. Ne eivät kuitenkaan varsinaisesti kohdistu materiaaliin vaan valmiiseen rakenteeseen, minkä takia niitä on tarkasteltu tässä tutkimuksessa vain kahdesta laveasta näkökulmasta. Oikein rakennettu ja ylläpidetty betonirakenne säilyy pitkään, kun olosuhderasitukset on otettu huomioon rakenteen suunnittelussa ja betonin valmistuksessa. Käyttöikänsä aikana betoni karbonatisoituu. Käytössä olevan teräsbetonirakenteen karbonatisoitumisessa tasapainoillaan rakenteen säilyvyyden ja siihen varastoituvan hiilen välillä. Moduuli B ei siis ole paras elinkaaren vaihe betonin hiilinieluna toimimiselle.

Käyttöiän lopussa betonirakenne puretaan, C1, ja puretut osat kuljetetaan, C2, jatkokäsiteltäväksi, C3, tai hävitettäväksi, C4. Purkaminen tehdään pääasiassa polttonestekäyttöisillä työkoneilla (Pulkkinen et al. 2018). Purkamisen päästöt muodostuvat siis käytettävän energianlähteen mukaan. Betonisiltojen betoni yleensä murskataan ja hyödynnetään maatäyttönä tai tienpohjana. Murskaa voidaan käyttää myös uusiokiviaineksena betonin valmistuksessa. Talteensaatavat raudoitteet päätyvät pääosin kiertoon käytettäväksi uusien terästuotteiden valmistuksessa (Häkkinen 2020a). Betonisiltojen uudelleen käyttäminen toisessa paikassa ei todennäköisesti ole mahdollista.

Betoni karbonatisoituu, kun se on riittävän kosteana kosketuksissa hiilidioksidin kanssa (by 201 2018). Kun betoni karbonatisoituu tai siinä käytetään karbonatisoitunutta kiviainesta, sen lujuus kasvaa ja se haurastuu (Lu et al. 2019). Murskatun betonin karbonatisoitumisen voidaan katsoa sitovan ilmakehän hiilidioksidia itseensä, jolloin betonimurske voi toimia hiilivarastona käytettäessä esimerkiksi väylänpohjana tai betonin valmistuksessa uusiokiviaineksena. Betonin karbonatisoitumista voidaan kiihdyttää sijoittamalla se tilaan, jonka hiilidioksidikonsentraatio on tavallista ilmaa suurempi (Sereng et al. 2020). Betonimurskeen kiihdytetty karbonatisointi onnistuu myös klinkkeriuunin noin 15 % hiilidioksidipitoisella kaasulla (Sereng et al. 2020).

CCUS-teknologia ja siihen läheisesti liittyvä vetytalous ovat vielä kehitysvaiheessa (Finnsementti 2021). Joitakin teollisuustason CCUS-pilotteja on tehty tai ollaan tekemässä lähivuosina (Tsupari et al. 2021). Teknologian käyttökelpoiseksi saaminen on kalsinoitumisen takia käytännössä pakollista, jos sementtiteollisuus haluaa jatkaa sementin valmistamista (Finnsementti 2021).

Työn alla olevan Betoniyhdistyksen betonien vähähiilisyyden luokitteluohjeen käyttöönottaminen on suositeltavaa. Siinä tullaan esittämään betoneille myös vaatimusluokkia, joita ei toistaiseksi ole laajasti saatavilla. Tästä aiheutuva kustannusvaikutus tulisikin ottaa huomioon myös Ihkun[7] kustannuslaskennassa, jottei tulisi kiusausta käyttää suunnitelmissa tiukinta päästöluokkaa ja todeta rakennettaessa, ettei sitä olekaan saatavilla.

[7] Ihku eli Infrahankkeiden kustannuslaskentajärjestelmä ja -palvelu on Väyläviraston, kaupunkien ja yritysten yhdessä tuottama.

Suomessa käytetään lähinnä normaalilujuusbetoneita. Päästöjen kannalta etenkin suuremmissa silloissa voisi olla mielekästä käyttää korkealujuusbetoneita, jolloin poikkileikkausmittoja olisi mahdollista pienentää (Jacobsen ja Kanstad 2021). Korkealujuusbetonien valmistamisen ja käytön rajoitteita sekä kustannusvaikutuksia voisikin olla mielekästä selvittää.

Geopolymeerikomposiitit eivät ole betoneita, sillä ne eivät sisällä portlandklinkkeriä. Niiden käyttämistä betonia korvaavana materiaalina kantavissa rakenteissa on tutkittu paljon etenkin viime vuosina. Tietyillä suhteutuksilla niillä vaikuttaisi olevan mahdollista vähentää rakenteen päästöjä niin, etteivät lujuus- ja pitkäaikaisominaisuudet heikkene (mm. Chen et al. 2021; Meesala et al. 2019; Pilehvar et al. 2019). Geopolymeerikomposiitit voivat etenkin aggressiivisissa ympäristöissä olla betonia kestävämpiä (esim. Chen et al. 2021). Geopolymeerikomposiittien käyttöä sillanrakentamisessa olisikin syytä selvittää esimerkiksi pohjoismaisella yhteistyöhankkeella.

4.5.2 Teräksen päästöt

Teräksestä voidaan valmistaa käytännössä minkä tahansa pituisia siltoja. Lyhyimmät terässillat ovat yleensä putki- tai teräspalkkisiltoja. Betoni-teräs-liittopalkkisiltojen jännemitta on yleensä luokkaa 20...150 metriä. Pitkät köysisillat voivat olla teräsrakenteisia, vaikkakin niissä käytetään yleensä värähtelyn rajoittamiseksi betonia lisäämään rakenteen massaa. Myös erilaisia kaari- ja ristikkosiltoja voidaan valmistaa teräksestä. (Pulkkinen et al. 2018)

Suurin osa rakenneteräksen päästöistä A1...A3 syntyy malmin hankinnasta ja erityisesti raakaraudan valmistamisesta malmista. Päästöjä aiheutuu myös raakaraudan ja kierrätysteräksen terákseksi valmistamisesta. Teräksen valmistuksessa ei vielä käytetä Suomessa tai Ruotsissa valokaariuunia, jossa valtaosa päästöistä on käytettävän sähkön päästöä (SSAB 2021). SSAB:n on kuitenkin tarkoitus aloittaa teollisuusmittakaavan vähäpäästöisen teräksen valmistus Ruotsissa vuonna 2026 ja koko tuotannon on tarkoitus olla päästötöntä vuonna 2045 (Leppänen 2021).

Päästöt teräksen kuljettamisesta konepajalle ja tehtaalle, A4, muodostuvat valtaosin välimatkoista ja käytettävistä energialähteistä. Niissä on siis suuri vaihtelu hankkeiden välillä, eikä niitä tarkastella tämän tutkimuksen puitteissa. Teräskokoonpanon ja -sillan valmistamisen päästöt, A5, koostuvat pääosin leikkauksessa ja hitsauksessa käytettävistä kaasuista ja sähköstä.

Käyttövaiheen B-moduuleista tarkastellaan silloilla ainoastaan huoltoon ja ylläpitoon liittyviä moduuleja B2, B3, B4 ja B5. Ne eivät kuitenkaan varsinaisesti kohdistu materiaaliin vaan valmiiseen rakenteeseen, minkä takia niistä oltaisiin tarkasteltu lähinnä suojamaalauksen vaikutusta päästöihin. Tarvittavia tietoja Livi-maalausjärjestelmien päästöistä ei

kuitenkaan ollut vielä saatavilla. Yksi valmistaja kertoi, että heillä on laskenta vielä kesken. Lisätietoja suojamaalauksen päästöistä on siis odotettavissa.

Käyttöiän lopussa rakenne puretaan, C1, ja puretut osat kuljetetaan, C2, jatkokäsiteltäväksi, C3, tai hävitettäväksi, C4. Purkaminen tehdään kaasu- tai sähkökäyttöisin työkaluin käyttäen apuna siirrettäviä työkoneita (Pulkkinen et al. 2018). Purkamisen päästöt muodostuvat siis käytettävän energianlähteen mukaan. Terässiltojen tapauksessa yleinen loppuskenaario on käyttö kierrätysteräksenä uusien terästuotteiden valmistuksessa (mm. Häkkinen 2020a). Toisaalta, jos sillan purkaminen ei johdu teknisen käyttöiän saavuttamisesta, voidaan silta tai sen osia käyttää sellaisenaan uudella siltapaikalla.

Tavallisen teräksen lisäksi sillanrakennuksessa voidaan käyttää säänkestävää tai ruostumatonta terästä. Myös alumiinisiltoja on rakennettu muissa maissa. Säänkestävän teräksen päästöt ovat samaa luokkaa tavallisen teräksen päästöjen kanssa (Häkkinen 2020a). Alumiinista valmistetuilla silloilla rakennusvaiheen päästöt ovat pääsääntöisesti suuremmat kuin tavallisesta teräksestä rakennetulla (Mosaker 2021). Kuitenkin pitkän elinkaaren aikana niillä on mahdollista saavuttaa vähennyksiä kustannuksiin ja päästöihin niiden vähäisen ylläpitotarpeen takia (Mosaker 2021; Siwowski 2015).

4.5.3 Puun päästöt

Puusiltojen käyttökohteet ovat yleensä olleet kevyen liikenteen tai vähäliikenteisten väylien tai yksityisteiden sillat, joiden jännemitta on korkeintaan 30 metriä. Pidempiäkin siltoja on rakennettu, myös valtateille. Puisia syrjälankkukansia voidaan käyttää niin puu- kuin terässilloissakin keventämään kannen omaa painoa (Pulkkinen et al. 2018) Puusilloissa on tasapainoiltava säilyvyyden ja käytettävien kyllästysaineiden ympäristöhaittojen välillä.

Kestävästi hoidetusta metsästä hankitun puun tuotantopäästöjen A1 voidaan ajatella koostuvan puun kaatamisesta. Muita valmistusvaiheen A1...A3 päästöjä aiheuttavia toimenpiteitä ovat raakapuun ja välivalmisteiden kuljetukset A2 ja esimerkiksi kuivaus, sahaus, kyllästäminen ja liimaus moduulissa A3. Valmistusvaiheen päästöistä kyllästämisellä ja liimaamisella on merkittäviä vaikutuksia yksikköpäästöihin.

Päästöt puun kuljettamisesta rakennuspaikalle tai tehtaalle, A4, ja saattamisesta osaksi rakennetta, A5, muodostuvat valtaosin välimatkoista ja käytettävistä energialähteistä. Niissä on siis suuri vaihtelu hankkeiden välillä, eikä niitä tarkastella tämän tutkimuksen puitteissa. Puusillan päällysrakenteessa käytettävistä teräskiinnikkeistä aiheutuvaksi päästöksi arvioitiin noin 130 CO_2e-kg puutonnia kohden. Tarkastelussa otettiin huomioon vain puupalkisto ja -kaaret. Toteutuneiden siltojen määräluetteloiden pohjalta voitaisiin tehdä laajempi tarkastelu kiinnikkeiden osuudesta puusillan päästöistä.

Käyttövaiheen B-moduuleista tarkastellaan silloilla ainoastaan huoltoon ja ylläpitoon liittyviä moduuleja B2, B3, B4 ja B5. Ne eivät kuitenkaan varsinaisesti kohdistu materiaaliin

vaan valmiiseen rakenteeseen, minkä takia niitä tarkasteltiin vain pintapuolisesti. Puumateriaali ei itsessään aiheuta merkittäviä käyttövaiheen päästöjä. Puusiltojen käyttöikäsuunnittelua on käsitelty kattavasti DuraTB-hankkeen loppuraportissa Pousette et al. (2017).

Käyttöiän lopussa rakenne puretaan, C1, puretut osat kuljetetaan, C2, jatkokäsiteltäväksi, C3, tai hävitettäväksi, C4. Purkaminen tehdään käsityökaluin tai siirrettävin työkonein (Pulkkinen et al. 2018). Purkamisen päästöt muodostuvat siis käytettävän energianlähteen mukaan. Puusiltojen tapauksessa yleinen loppuskenaario on käyttö energiantuotannon polttoaineena (mm. Häkkinen 2020c). Toisaalta, jos sillan purkaminen ei johdu teknisen käyttöiän saavuttamisesta, voidaan kevyt puupäällysrakenne tai sen osat mahdollisesti käyttää sellaisenaan toisella siltapaikalla (Pulkkinen et al. 2018).

Puutuotteiden mahdollinen hiilikädenjälki, moduuli D, muodostuu puun hiilivarastovaikutuksesta. Koska ilmastopäästöt GWP lasketaan yleensä sadan vuoden tarkastelujaksolle, on materiaalin säilyttävä kierrossa 100 vuotta, jotta se voidaan lukea hiilivarastoksi.

Niu ja Fink (2019) tarkastelivat tutkimuksessaan puusillan elinkaariarvion tekemistä ja siihen liittyviä näkökohtia. Se käsitteli kuitenkin nimenomaan rakennetta, joten sitä ei käsitelty tämän tutkimuksen puitteissa tätä mainintaa laajemmin.

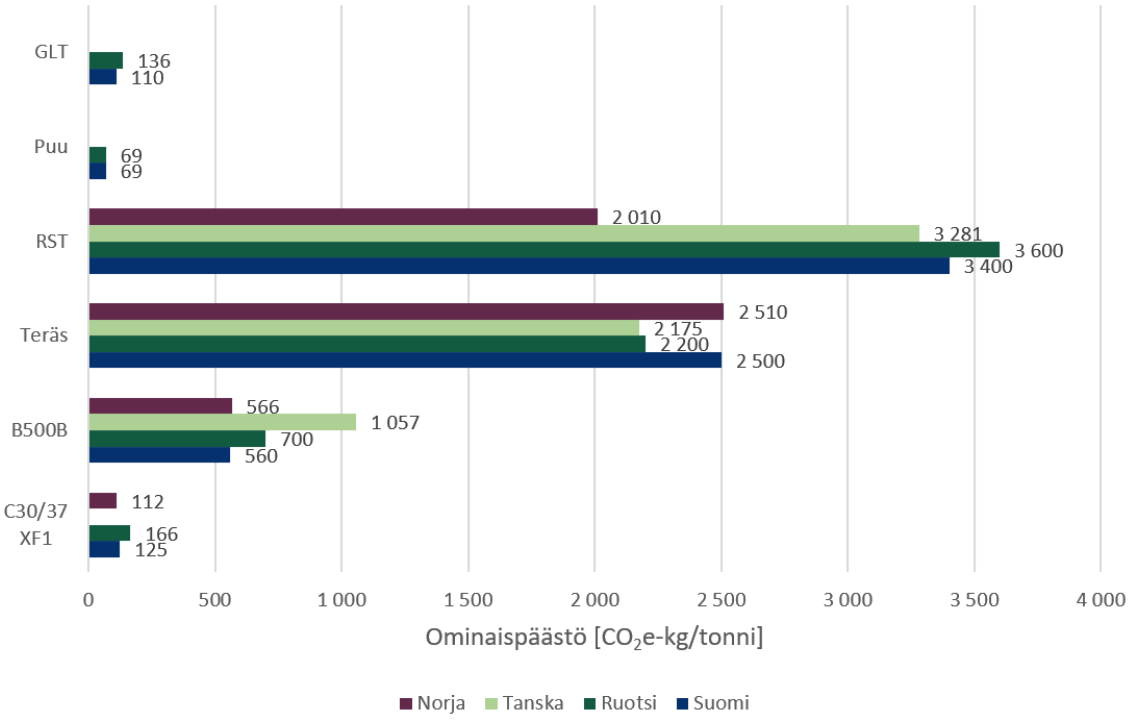
Puuta voidaan myös hyödyntää rakenteissa myös yhdessä muiden materiaalien kanssa. Keveytensä ansiosta sen käytöllä on mahdollista vähentää esimerkiksi omista painoista aiheutuvia rasituksia. Esimerkiksi NCCI 5 mukaan jo nykyään on mahdollista rakentaa puu-betoni-liittosiltoja, joissa puupalkiston päälle valetaan liittovaikutteinen betonilaatta.

Puun säilyvyysominaisuudet jatkuvasti märkänä ovat erinomaiset. Esimerkiksi Venetsiassa ja Lontoossa on siltoja, jotka on perustettu yli sata tai jopa yli tuhat vuotta vanhojen puupaalujen varaan. Suomessa ja etenkin Ruotsissa on viime vuosinakin käytetty puupaaluja erilaisissa infrakohteissa. Niiden käyttöä sillanrakentamisessa voisi edistää jo teknisessäkin mielessä. Myös mahdolliset kustannus- ja päästövaikutukset olisi syytä selvittää.

4.6 Materiaalien päästöistä ja niiden vertailusta

Kestävän rakentamisen periaatteiden mukaisesti tulee huomioida niin ympäristö-, taloudelliset kuin sosiaalisetkin vaikutukset. Tässä työssä keskitytään rajauksen mukaisesti vain ilmastopäästöihin. Tässä alaluvussa käsitellään eri materiaalien päästöjen huomioon ottamista ja vertailua. On syytä huomata, että materiaalien vertaileminen keskenään ei ole tarkoituksenmukaista. Vertailun tulisi aina tapahtua toiminnallisten yksiköiden kautta.

Kuvassa 4.6 on esitetty materiaalien ominaispäästöjen yleiset arvot niiltä osin kuin ne tarkastelluista tietokannoista löytyivät. Suomen osalta päästöarvot ovat peräisin Rakentamisen päästötietokannasta. Muiden maiden arvot ovat peräisin niiden väyläviranomaisten päästölaskentatyökalujen tietokannoista. Ruotsin osalta ilmoitettu päästö on betonille C35/45, joka oli ainut tietokannasta löytynyt betonimateriaalin arvo. Norjan VegLCA:ssa oli esitetty teräkselle kaksi arvoa, toinen täysin kierrätysteräksestä ja toinen täysin uudesta teräksestä koostuvalle. Kuvassa on esitetty täysin kierrättämättömän arvo. Kierrätysteräspitoisen teräksen norjalainen päästöarvo on 1 240 CO_2e-kg/tonni.

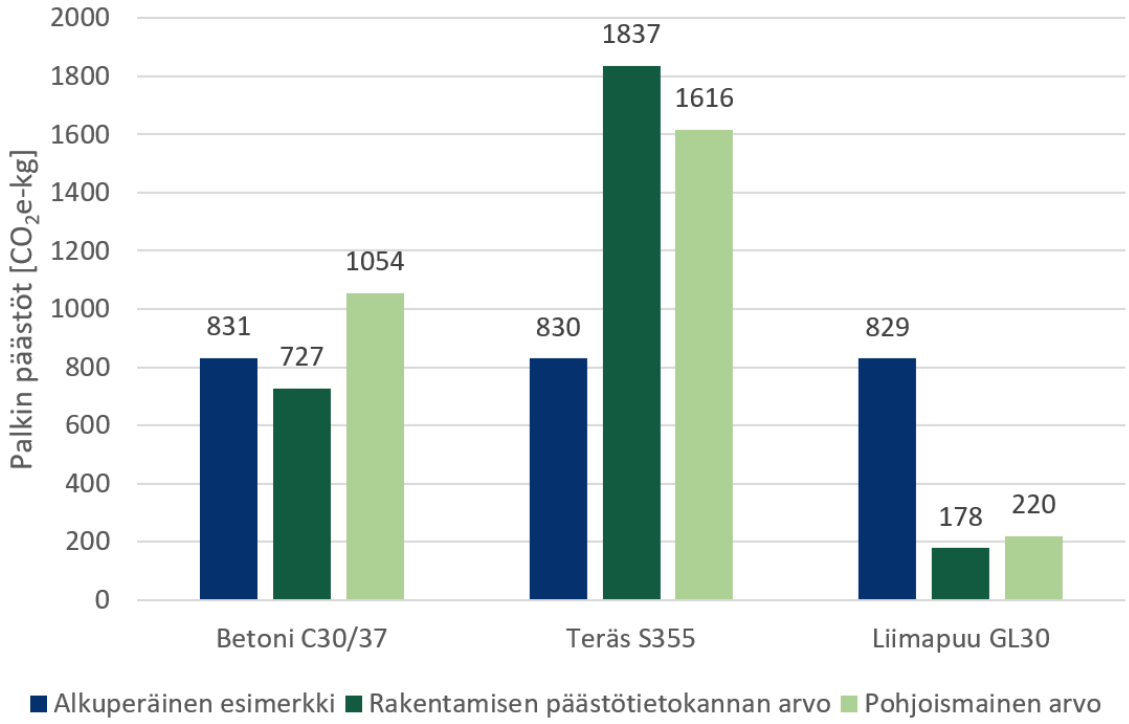


Kuva 4.6. *Sillanrakennusmateriaalien geneeriset päästöarvot A1...A3 Pohjoismaissa.*

Esitetyt päästöarvot kuvaavat eri Pohjoismaissa valittuja yleisiä päästöarvoja, joita voidaan käyttää ennen materiaalitoimittajan valitsemista. Ne ovat siis määritelmällisesti korkeampia, kuin teollisuuden tuottamista ympäristöselosteista laskettujen päästöarvojen keskiarvo. Ympäristöministeriön Rakentamisen päästötietokannassa on saatavilla yleisten päästöarvojen valintaa kuvaavat taustaraportit. Muiden maiden työkaluissa on lyhyet viittaukset valitun arvon alkuperään.

Yleisiä päästöarvoja käytetään hankkeessa, kunnes materiaalitoimittajasta on tarkempaa tietoa (Väylävirasto 2020b). Vähemmän hiili-intensiiviset rakennusmateriaalit voivat varsinkin kehityksen alkuvaiheessa olla kalliimpia, osin koska myös niiden tarjonta on pienempää. Rakentamisen päästötietokannan arvot eivät kuitenkaan kuvaa kaikkien tuotteiden osalta tuotteiden nykyään tyypillistä päästöä. Esimerkiksi kantaville terästuotteille on esitetty vain yksi, varsin korkea arvo. Lisäksi Ympäristöministeriön menetelmässä esitetty yleinen päästö tulee rakennuslupaa hakiessa kertoa varmuuskertoimella 1,20 (Häkkinen ja Pesu 2021). Valmisbetonin osalta by:n tuleva vähähiilisyyden luokitteluohje ratkaisee ongelmaa betonin osalta, kun päästöille asetetaan yläraja jo suunnitteluvaiheessa. Vastaavasti tämä olisi otettava huomioon myös kustannusarviossa. Väyläviraston tulevassa tietokannassa päästöarvot voisivat toisaalta toimia myös raja-arvoina by:n luokitteluohjeen tapaan. Hiilikädenjäljen esittäminen ei ole hyödyllistä, jos sitä ei voida vähentää hiilijalanjäljestä. Esimerkiksi YM:n arviointimenetelmän luonnosversiossa hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki on esiteltävä erikseen.

Arnold et al. (2020) esittivät brittiläisessä *The Structural Engineer* -julkaisussa, että materiaaleja ei itsessään voida vertailla ympäristöystävällisyyden mukaan. Koska materiaali on aina osa rakennetta, voidaan vertailu heidän mukaansa tehdä vain vastaavien rakenteiden välillä.



Kuva 4.7. *Saman palkin hiilijalanjälki A1...A3 eri materiaaleilla ja ominaispäästöillä (mukaillen Arnold et al. (2020))*

Arnold et al. (2020) artikkeliin oli tehty myös laskuharjoitus sisätiloissa sijaitsevan palkin valmistuspäästöistä sisältäen moduulit A1...A3. Tarkastellun palkin jänneväli oli 9 metriä.

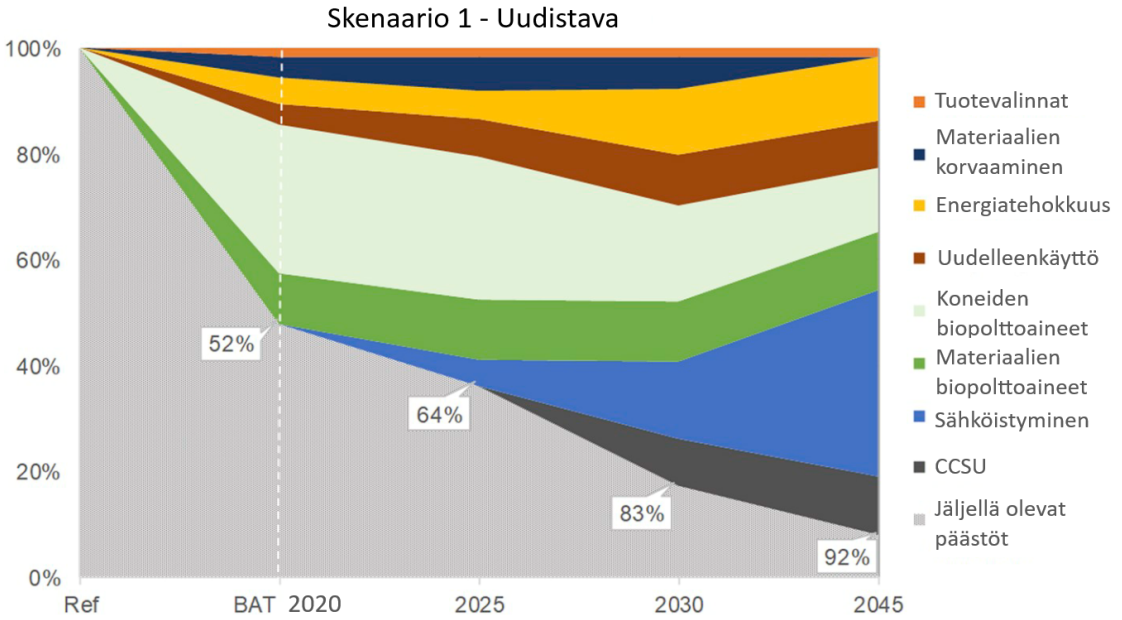
Mitoitetut palkit olivat materiaaliltaan joko teräsbetonia, terästä tai liimapuuta. Kuvassa 4.7 on esitetty kunkin palkin esimerkissä esitetyt valmistuspäästöt vasemmanpuoleisissa pylväissä. Keskimmäisissä pylväissä on esitetty vastaavien palkkien päästöt niin, että päästökertoimeksi on vaihdettu suomalaisen Rakentamisen päästötietokannan mukaiset yleiset päästökertoimet. Oikeanpuoleisissa pylväissä päästökertoimina on käytetty teräkselle, betonille ja betoniteräkselle Norjan VegLCA:n kertoimia ja liimapuulle Ruotsin Klimatkalkylin tietoja.

Kuten voidaan huomata, eri materiaaleista valmistettujen rakenteiden päästöt on tietyillä mitoilla, tietyssä tilanteessa ja tietyillä arvoilla mahdollista saada vastaamaan toisiaan. Arnold et al. (2020) laskuharjoitus ei kuitenkaan Pohjoismaissa toimi esimerkkinä tarkoituksensa mukaisesti. On syytä ottaa huomioon, että esimerkissä arvioinnin kohteena oli palkki sisäolosuhteissa ja sen päästöistä arvioitiin ainoastaan valmistusvaiheen päästöt.

Hiilikädenjälkeen ja muihin sillan pitkän elinkaaren aikana tapahtuviin mahdollisiin ilmastovaikutuksiin liittyy merkittäviä ennustamisen vaikeuksia. Päästöjen kehittyminen tulevaisuudessa on monellakin tapaa mielenkiintoinen epävarmuus elinkaariarvioinnin kannalta. Tulevaisuuden ennustaminen on vaikeaa. Monet päästövähennystoimenpiteet perustuvat teknologiaan, jota ei vielä ole kaupallisesti mahdollista toteuttaa. Eräällä tavalla voidaankin sanoa, että ilmastonmuutoksen vaikutusten minimoiminen on jätetty kaikin puolin tekniikan varaan: muutoksen vakavuuteen on herätty myöhään, joten esimerkiksi sään ääri-ilmiöihin tulee varautua, ja lisäksi ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuus on saatava käännetyksi mahdollisimman ripeästi. Ilmastonmuutokseen varautumista ei käsitellä tämän työn puitteissa, mutta se vaikuttaa myös sillanrakentamiseen. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen laajassa mittakaavassa taas vaaditaan CCSU-teknologian kaltaisia uusia teknologioita. Myös esimerkiksi kulkuneuvojen ja työkoneiden sähköistymisen oletetaan vähentävän ilmastopäästöjä merkittävästi.

Rakennusmateriaalien ja -palveluiden päästöjen vähentäminen riippuu myös paljon teknologian kehityksestä. Kuvassa 4.8 on esitetty Karlsson et al. (2020) tutkimuksessaan arvioima tiehankkeen päästöjen A1...A5 vähentyminen Ruotsissa. Nykyään noin 52 % päästöjen vähentämisen suhteessa referenssitasoon uskotaan olevan teknologisesti mahdollista (*BAT, Best Available Technology*). Vuonna 2030 päästöistä arvioidaan voitavan vähentää noin 83 % ja vuonna 2045 noin 92 % referenssitasoon verrattuna. Referenssitasona on käytetty materiaalien perustasoa ilman mitään päästöjä vähentävää toimenpidettä, mikä tarkoittaa esimerkiksi referenssibetonia, jossa kaikki sideaine on klinkkerisementtiä. Tutkimuksessa tarkasteltiin ”suurta” 2+1 kaistaista tiehanketta uuteen maastokanavaan. Hankkeeseen kuului myös 9 siltaa ja hankeosan pituus oli 8 kilometriä. Hankkeesta ei julkaisussa kerrottu laajemmin. (Karlsson et al. 2020)

Kuvassa 4.8 esitetyssä uudistavassa skenaariossa kaikkien osa-alueiden oletettiin edistyvän tasaisesti. Tutkijat kehittivät myös neljä muuta skenaariota (suluissa skenaarion



Kuva 4.8. *Tiehankkeen rakentamisvaiheen (A1...A5) ilmastopäästöjen arvioitu kehittyminen Ruotsissa. BAT tarkoittaa parasta saatavilla olevaa teknologiaa (*Best Available Technology*). (Karlsson et al. 2020, kuva suomennettu)*

mukaiset kokonaispäästövähennykset BAT, 2025, 2030 ja 2045):

- Ei kaluston biopolttoaineita (23, 35, 63 ja 80 %)
- Ei biomassaa: kuten edellinen, mutta materiaaleissakaan ei hyödynnetä biomassaa (14, 23, 53 ja 69 %)
- Vaihtoehtoinen: kuten edellinen, mutta muiden teknologioiden hyödyntäminen alkaa aikaisemmin (18, 40, 65 ja 75 %)
- Ei-uudistava: ilman sähköistymistä ja CCSU-teknologiaa (52, 63, 66 ja 70 %)

Karlsson et al. (2020) mukaan (kuva 4.8) vuoteen 2025 infrahankken päästöjä vähennetään pääosin jo nykyisin käytössä olevalla teknologialla: materiaalien korvaamisella vähäpäästöisemmillä, materiaalivalmistuksen energiatehokkuuden parantamisella, rakenneosien ja materiaalien uudelleenkäytöllä ja kierrättämisellä sekä etenkin biopolttoaineiden käytöllä. Konekannan päästöjä vähennetään ensin siirtymällä biopolttoaineisiin. Vuodesta 2025 eteenpäin koneiden ja kulkuneuvojen sähköistymisen arvioidaan korvaavan biopolttoaineiden käyttöä. Vielä vuonna 2045 biopolttoaineita käytetään kuitenkin niin kalustossa kuin esimerkiksi asfaltissakin. Sähköistyminen ja CCSU-teknologian hyödyntäminen alkaa 2020-luvun loppupuolella, ja niiden arvioidaan johtavan kokonaisuudessaan noin 40 prosentin päästövähennykseen referenssitasosta vuoteen 2045 mennessä. Loput noin 50 % päästövähennyksistä ovat mahdollisia 2020-luvun teknologialla. (Karlsson et al. 2020)

Karlsson et al. (2020) arvioivat betonin ja teräksen päästöjen vähentämisen nettonollata-

solle olevan mahdollista skenaariosta riippuen vuoteen 2030-2045 mennessä. Teräksen osalta päästövähennysten arvioidaan 2030-luvulle asti olevan mahdollista biopolttoaineiden ja CCSU-teknologian avulla. Vetypelkistämisen arvioidaan vähentävän teräksen valmistuspäästöjä merkittävästi vasta vuoteen 2045 mennessä. Betonin osalta 2030-luvulle asti valtaosa päästövähennyksestä arvioidaan saavutettavan vaihtoehtoisten sideaineiden ja biopolttoaineiden käytöllä. Myös CCSU:n arvioidaan vähentävän klinkkerin valmistuksen päästöjä 2030-luvulla. Vuoteen 2045 mennessä myös sähköistyminen vähentää betonin päästöjä. (Karlsson et al. 2020) Tässä tutkimuksessa (alaluvussa 4.2) arvioitiin Väyläviraston infrabetoneissa olevan mahdollista saavuttaa tällä hetkellä noin kolmanneksen päästövähennys vaihtoehtoisten sideaineiden käytöllä. Päästövähennys oli laskettu suhteessa betoniin, jonka sideaine on CEM I -sementtiä. Referenssitaso oli siis vastaava, kuin Karlsson et al. tutkimuksessa.

Materiaalien päästöjen kehittyminen liittyy läheisesti myös eri materiaaleista rakennettavien siltojen elinkaaripäästöihin. Päästöjen vähenemisen aikatauluttaminen on kuitenkin epävarmaa. Triviaaliratkaisuna voisi tulla mieleen suunnitella nyt rakennettavat sillat huomattavasti lyhyemmälle käyttöiälle, jolloin materiaalipäästöjä voitaisiin oletettavasti vähentää edes vähän. Tämä voisikin olla yksisilmäisesti päästöjen kannalta tarkasteltaessa järkevää. Tästä seuraisi kuitenkin suuri kustannuserä esimerkiksi 20 vuoden päähän. Triviaaliratkaisu ei siis missään mielessä ole realistinen. Oletettavasti suunnittelukäyttöiän lyhentämisellä ei edes saavutettaisi merkittäviä päästövähennyksiä.

YM:n arviointimenetelmän luonnosversiossa laskentaikänä käytetään rakennuksen 50 ensimmäistä toimintavuotta. Eurokoodien mukaan rakennusten suunnittelukäyttöikä on yleensä 50 vuotta. Sillat taas suunnitellaan lähtökohtaisesti 100 vuodeksi. Jos sillan kaiteet uusitaan vaikkapa 50 vuoden päästä, on ne todennäköisesti mahdollista valmistaa hiilineutraalisti. Sama koskee muun muassa teräsbetonisia reunapalkkeja. Tälläisiä tulevaisuuden ennustamiseen liittyviä näkökulmia onkin syytä tarkastella, kun Väylävirasto luo omaa päästöarviointimenetelmäänsä.

Kiertotalous voidaan sillanrakentamisessa tiivistää kolmeen pääkohtaan: käytä vähemmän, käytä uudelleen ja kierrätä. Professori Ian Firth on esittänyt (2020), että kiertotalouden kriteerien mukaisesti myös sillan rakentamisen tarvetta ylipäänsä tulisi harkita (*refuse*). Kun ajatusta hieman jalostetaan, saadaan ilmastonmuutoksen kannalta erityisen olennaisiksi kiertotalouden tavoitteiksi sillanrakentamisessa:

1. Jätä tekemättä (*refuse*)
2. Tee paremmin (*rethink*)
3. Uudelleenkäytä rakenteita ja osia (*re-use*)
4. Käytä vähemmän ja vähähiilisempiä materiaaleja (*reduce*)
5. Käytä kierrätettyjä ja kierrätettäviä materiaaleja (*recycle*)

Väylähankkeessa yksittäisen sillan tekemättä jättämisen tarkastelu ei ole mielekästä. Etenkin uuteen maastokanavaan rakennettavan hankkeen päästöissä korostuvat maankäytön ja sen muutoksen aiheuttamat hiilivarastojen pienenemiset (Dettenborn et al. 2020). Yksi lähestymistapa investointipäästöjen vähentämiseen on väylähankkeen lykkääminen tulevaisuuteen. Näin mahdollisesti saavutettava päästöjen väheneminen perustuu oletukseen, että materiaalituotannon päästöt putoavat seuraavien vuosikymmenien aikana. Näin esimerkiksi ratahankkeen investointipäästöt voisivat olla vuonna 2035 20...50 % ja vuonna 2050 45...84 % pienemmät kuin nykyään (Dettenborn et al. 2020). Tarkastelu koski ainoastaan investointipäästöjä. Hankkeella tavoitettava liikenteen päästöjen vähentäminen alkaisi kuitenkin myöhemmin.

Dettenborn et al. (2020) selvityksessä rakentamisajankohdan vaikutusta tarkasteltiin ainoastaan vuosina 2035 ja 2050. Selvityksessä käytetyt skenaariot olivat peräisin Työ- ja elinkeinoministeriön Rakennusteollisuus RT:lta vuonna 2019 tilaamasta ja vuonna 2020 julkaistusta selvityksestä, jonka on tarkoitus tukea Suomen tavoitetta hiilineutraaliudesta vuonna 2035.

Kiertotalouteen ja ilmastovaikutuksiin liittyvää rakentamisen tutkimusta on tehty lähinnä talonrakentamisen näkökulmasta. Tällöin korostuvat erityisesti rakennusten käytönaikaisesta energiankulutuksesta aiheutuvat päästöt. Vastaavasti väyläpuolella on ministeriötasolla keskitytty liikenteen päästöjen vähentämisessä nimenomaan liikennesuoritteiden päästöjen vähentämiseen. Toisaalta väyläpuolella tilaajia on vähemmän kuin talonrakentamisessa, jolloin yksittäisen toimijan vaatimusten ohjausvaikutus on parempi.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Siltojen osuus väylähankkeiden päästöistä

Tutkimuskysymys 1 oli:

> Kuinka suuri osuus väylähankkeen päästöistä aiheutuu sillanrakentamisesta?

Kysymystä käsiteltiin kohdassa 3.3 tutkimalla siltojen osuutta neljän Väyläviraston teettämän hankkeen päästöarvioinnin kautta. Tutkittavien hankkeiden perusteella silloista voi aiheutua esimerkiksi 15...30 % väylähankkeen päästöistä. Valtaosassa hankkeita oli tarkasteltu vain investointivaiheen päästöjä. Yleensä kuljetukset laskettiin ainoastaan betonille, asfaltille ja kiviainekselle. Hankkeissa rakennetut sillat olivat pääosin teräs- tai jännebetonisia. Ainoastaan yhdessä hankkeessa oli lisäksi kaksi varsinaista terässiltaa.

Tarkastelun perusteella olisi syytä teettää päästöarvioinnit useammasta hankkeesta keskenään samoilla periaatteilla. Lisäksi hankkeet tulisi voida luokitella jollakin tapaa, jotta saatuja tuloksia voitaisiin hyödyntää tulevien hankkeiden arvioinnissa. Tässä diplomityössä esitettiin kaksi luokitteluun käytettävissä olevaa suuretta: siltatiheys [siltaa/km] ja siltojen osuus väylän pituudesta [silta-km/väylä-km]. Tällainen tutkimus voisi olla mahdollista toteuttaa myös takautuvasti toteutuneiden hankkeiden määräluettelojen ja urakka-asiakirjojen avulla.

Hankkeiden päästöarviointeja tarkasteltaessa nousi esiin myös kysymys päästöarvioinnin suorittajan osaamisesta. Ympäristöministeriön arviointimenetelmään ei tällä tietoa ole tulossa pätevyysvaatimuksia arvioinnin suorittajalle. Väyläviraston voisi olla kuitenkin hyödyllistä pohtia, pitäisikö päästöarvioijalle asettaa jonkinlaiset vaatimukset. Parhaimmillaan arvioitsijalla olisi kattavat perustiedot niin arvioinnissa käytettävistä menetelmistä, arvioitavasta hankkeesta kuin hankkeessa käytettävistä materiaaleistakin. Ehtona voisi olla esimerkiksi Väyläviraston järjestämä koulutus samaan tapaan kuin Taitorakennerekisterin kanssa.

5.2 Elinkaariarvioinnin nykytila Pohjoismaissa

Tutkimuskysymys 2 oli:

> Miten Pohjoismaissa arvioidaan sillanrakentamisen ilmastovaikutuksia tällä

hetkellä?

Kysymystä on käsitelty luvuissa 2 ja 3. Luvussa 2 esiteltiin mm. päästöjen arvioimisessa sovellettavat eurooppalaiset kestävän rakentamisen standardit. Pääpaino oli ilmaston-lämmityspotentiaalin *GWP* arvioimiseen käytettävissä standardeissa. Samoja standardeja sovelletaan myös muihin ympäristöindikaattoreihin. Luvussa 3 esiteltiin EU:n ja Pohjoismaiden päästövähennystavoitteet ja päätettyjä keinoja niihin pääsemiseksi. Lisäksi tarkasteltiin neljän Pohjoismaan aiheeseen liittyviä yhteistyöhankkeita.

Eurooppalaisen kestävän rakentamisen standardit kattavat tällä hetkellä kestävän rakentamisen kaikki kolme ulottuvuutta puite- ja hanketasolla. Tuotetasolla standardit on kirjoitettu vasta ympäristövaikutusten arviointiin. Standardit ovat päivittyneet viime aikoina nopeaan tahtiin, ja vuonna 2022 on odotettavissa päivitykset moniin keskeisiin standardeihin. Niiden ilmestyminen onkin otettava huomioon kansallista infrarakentamisen päästöarviointityökalua tehtäessä.

Väylävirasto on ollut paljon mukana päästöarviointiin liittyvissä pohjoismaisissa tutkimushankkeissa tällä vuosituhannella. Tällä hetkellä käynnissä on neljän Pohjoismaan yhteinen NordLCA+-projekti, jossa jatketaan NordLCA-projektin työtä yhtenäisten päästöarviointimenetelmien kehittämisessä. Käynnissä on myös Pohjoismaiden rakentamisesta vastaavien ministeriöiden yhteistyöhanke NordicLCA, jossa samaa kysymystä tutkitaan talonrakentamisen näkökulmasta.

Kolmessa Pohjoismaassa infrastruktuurin rakentamisen ja ylläpidon osuus liikenteen päästöistä oli samaa luokkaa, noin 7 prosenttia. Ruotsissa vastaava osuus oli noin 9 prosenttia. Tuorein arvio liikenteen ja väyläinfrastruktuurin päästöistä Suomessa on vuodelta 2012. Vastaava tutkimus olisikin hyvä tehdä nyt uudestaan. Erityisen suotavaa olisi samassa yhteydessä kehittää menetelmä, jolla arviota voitaisiin helposti päivittää vuosittain.

Suomessa, Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa päästöjen huomioon ottamiseksi infrahankkeissa on valittu hyvin samankaltaiset toimenpiteet. Ruotsissa arviointimenetelmät ja päästövähennysmääräykset ovat jo käytössä sekä rata- että tiehankkeissa. Norjassa ohjaus on käytössä vasta tiehankkeissa, mutta myös ratahankkeille kehitetään vastaavaa järjestelyä.

Suomessa laskentatyökalut ja päästömääräykset ovat vasta kehitteillä. Laskenta tullaan suorittamaan vastaavilla työkaluilla kuin Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa. Tanskassakaan ei vielä tiedetä, miten laskenta käytännössä tuodaan hankkeisiin. Työkalussa käytettävät päästöjen yleiset arvot on syytä valita kuvaamaan mahdollisimman hyvin hankkeissa pääasiallisesti käytettäviä tuotteita. Sen sijasta, että valittaisiin korkeimman käytettävän tuotteen arvo, voidaan myös valita raja-arvona toimivat yleiset arvot. Erityisesti Ruotsin Trafikverketin tavoitetaso-palkkio-järjestelmän voi nähdä teollisuudelle reiluna

päästövähennystapana.

5.3 Sillanrakennusmateriaalien päästöjen huomiointi hankkeissa

Tutkimuskysymys 3 oli:

> Millä periaatteilla materiaalien ilmastovaikutuksia tulisi arvioida, kuinka suuria niiden ilmastovaikutukset ovat ja miten ne kehittyvät tulevaisuudessa?

Siltojen ilmastoarvioinnissa tulisi käyttää tuotekohtaisia EPD-tietoja niissä projektin vaiheissa, kun käytettävät tuotteet tiedetään. Yleisten arvojen käyttämisen rinnalla myös aiemmissa suunnitteluvaiheissa tulisi olla mahdollista käyttää projekti- ja tuotekohtaisia päästökertoimia. Näiden yleisiä arvoja pienempien päästökertoimien tulisi kuitenkin olla velvoittavia, minkä vuoksi niiden toteutumista tulisi valvoa hankkeen loppuun asti. Hiilikädenjäljen esittäminen ei ole hyödyllistä, jos sitä ei voida vähentää hiilijalanjäljestä.

Sillat ovat lähtökohtaisesti hyvin pitkäikäisiä rakenteita. Toisaalta ne ovat myös tärkeä ja esimerkiksi erikoiskuljetusten tapauksessa usein kriittinen osa liikenneinfrastruktuuria. Päästövähennyskeinoja ei siis välttämättä ole järkevää kokeilla ensimmäisenä siltakohteisiin. Toisaalta esimerkiksi vähäpätöisillä teillä sijaitsevat pienet sillat tai rummut voisivat olla hyvä paikka kokeilla monia eri päästövähennyskeinoja todellisissa olosuhteissa. Myös arviointijakson pituutta ja esimerkiksi päästöjen oletettavaa suuruutta 50 tai 100 vuoden päästä on syytä tarkastella, kun Väylävirasto luo omaa päästöarviointimenetelmäänsä.

Materiaalien nykyisten ja tulevien ilmastovaikutusten osalta tutkimuskysymystä käsiteltiin varsin kattavasti luvussa 4. Myös kuljetusten ja työmaatoimintojen päästöjä tarkasteltiin karkeasti. Tarkasteltavaksi valittujen materiaalien merkityksellisyys sillanrakennukselle osoitettiin kohdassa 4.1. Betoni-, teräs- ja puurakenteet ovat kaikki varsin yleisiä sillanrakennuksessa. On merkitsevää ottaa huomioon, että lähes kaikki sillat perustetaan betonirakenteille. Tässä tutkimuksessa keskityttiin kuitenkin päällysrakenteisiin.

Perinteisen betonin valmistuspäästöistä noin 80 % aiheutuu sementistä ja noin 15 % kuljetuksista. Ensivaiheessa suurin osa päästövähennyksistä saavutettaneen vaihtoehtoisten sideaineiden ja uusiokiviaineksen käytöllä. Vuoteen 2030 mennessä myös esimerkiksi sähköistymisen ja CCSU-teknologian avulla on luultavasti mahdollista vähentää betonin valmistuspäästöjä. Eräs mahdollinen kehityssuunta on geopolymeerikomposiittien käyttö. Lisäksi tutkimuksessa käsiteltiin raudoite- ja jänneteräksen vaikutusta betonirakenteen investointipäästöihin. Teräsbetonisilloissa kannen raudoitteet aiheuttavat päästöjä noin 80 ja jännebetonisilloissa noin 90 CO_2e-kg betonikuutiometriä kohden. Myös muita elinkaaren vaiheita käsiteltiin, mutta valtaosan päästöistä voidaan nykyään olettaa muodostuvan materiaalien valmistamisesta. Esimerkiksi muottien vaikutus sillan investointipäästöihin arvioitiin hyvin pieneksi. Lopuksi esiteltiin myös masuunikuona- ja lentotuhkapohjaisten geopolymeerien mahdollista käyttökelpoisuutta sillanrakennuksessa. Betonin eri

osa-aineiden merkitystä betonin valmistuspäästöihin A1...A3 ja ominaisuuksiin tarkasteltiin kattavasti alaluvussa 4.2.

Valtaosa terässillan päästöistä muodostuu teräksen valmistamisen päästöistä. Myös rakenteen valmistamisesta ja suojaamisesta aiheutuu päästöjä. Tavallinen teräs on suojamaalattava useamman kerran 100 vuoden elinkaarensa aikana. Livi-maalausjärjestelmien ympäristöselosteet olivat tätä työtä tehdessä vasta työn alla. Seuraavan kymmenen vuoden aikana markkinoille on odotettavissa vähäpäästöisiä teräslaatuja. Etenkin sitä ennen tehtäviksi mahdollisiksi päästövähennystoimiksi tässä tutkimuksessa nostettiin taajamissa ja niiden lähettyvillä sijaitsevien siltojen suunnittelu uudelleenkäytettäviksi sekä siltojen rakentaminen säänkestävästä teräksestä tai alumiinista. Jälkimmäiset vaikuttaisivat sillan ylläpidon päästöihin, vaikkakin etenkin alumiinin käytöstä aiheutuu oletettavasti suurempi hiilipiikki investointivaiheessa. Teräksen päästöjen muodostumista tarkasteltiin alaluvussa 4.3.

Puutuotteiden valmistuksen päästöihin A1...A3 vaikuttaa erityisesti puun jatkojalostamisen aste, eli käytettävä kylläste sekä liimat. Myös liitinten osuus arvioitiin alustavasti merkittäväksi pääkannattimien osalta, puutuotteesta riippuen 0,4...2-kertaiseksi puun materiaalipäästöihin nähden. Liitinten osuutta päästöistä on kuitenkin syytä selvittää tarkemmin. Materiaalin merkittävimmiksi päästövähennystoimenpiteiksi esitettiin siltojen suunnittelua uudellenkäytettäviksi sekä puupaalujen käyttöönottamista. Sillanrakennuksessa puun ei voida käytännössä olettaa toimivan hiilivarastona. Puun päästöjen muodostumista arvioitiin alaluvussa 4.4.

Laajemmat yhteenvedot käsiteltyjen materiaalien päästöistä on esitetty kohdassa 4.5. Samassa kohdassa on myös käsitelty rakennusmateriaalien päästöjen arvioinnin ongelmallisuutta. Materiaalien sijasta päästöjä tulisi vertailla rakennekohtaisesti, toisin sanoen toiminnallisen yksikön on oltava vastaava kaikilla vertailtavilla kohteilla. Eri materiaaleista valmistettujen siltojen päästöjen vertailemisesta julkaistaan alkukeväästä 2022 Katariina Martikkalan Väylävirastolle tekeillä oleva YAMK-opinnäytetyö.

On syytä huomata, että tässä tutkimuksessa materiaaleja tarkasteltiin kestävän kehityksen kolmesta ulottuvuudesta vain ympäristövaikutusten näkökulmasta. Ympäristövaikutuksia taas tarkasteltiin vain yhden mittarin, ilmastonlämmityspotentiaalin *GWP* kannalta. Tätä tutkimusta ja sen tuloksia ei voi siis yksinään käyttää vertailtaessa eri materiaalien ”hyvyyttä” tai ”pahuutta”. Tutkimuksen tulokset on tarkoitettu kestävän kehityksen parissa työskentelevien henkilöiden ja organisaatioiden käytettäväksi yhdessä muun tutkimustiedon ja standardien kanssa.

Standardin SFS-EN 15804 mukaiset rakennustuotteiden tai -palveluiden tuoteselosteet eivät ole vertailuväittämiä. Vertailuväittämien tekemistä koskevia erityisiä vaatimuksia on käsitelty standardeissa SFS-EN ISO 14040 ja SFS-EN ISO 14044.

5.4 Jatkotoimenpide-ehdotukset

Tässä tutkimuksessa tutkittiin materiaaleja pelkästään niiden ilmastonlämmityspotentiaalin GWP kannalta. Lähitulevaisuudessa olisi suotavaa tutkia vastaavalla laajuudella ainakin *uusiutumattomien luonnonvarojen ehtymistä ADP*. Kestävän rakentamisen periaatteiden mukaisesti olisi hyvä ottaa huomioon kaikki ympäristöindikaattorit samalla kun tarkastellaan päästöjä. Ympäristö- ja kustannusvaikutusten lisäksi myös sillan- ja väylärakentamisen sosiaaliset vaikutukset tulisi ottaa huomioon.

Tässä tutkimuksessa havaittiin eri materiaaleista tehtyjen siltojen elinkaaren vaiheita, joista ei ole vielä tehty tarkempia selvityksiä. Havaitut elinkaaren vaiheet koskivat pääosin rakentamisvaihetta. Niiden päästöjen selvittämiseen on jo olemassa tarvittavat tiedot, mutta ne eivät ole yleisesti saatavilla. Tällaisia toteutuneiden tai toteutumassa olevien hankkeiden määräluetteloiden tai koneiden käyttötietojen perusteella tehtävissä olevia tarkasteluja ovat esimerkiksi

- paikalla valettavan betonisillan telineistä ja muoteista aiheutuvat päästöt A5,
- terässillan konepajavalmistuksesta aiheutuvat päästöt A5 ja
- teräskiinnikkeiden osuus puusillan päästöistä A1...A3.

Myös monia laajempia tutkimuskohteita löydettiin. Niitä voitaisiin lähteä selvittämään esimerkiksi yhteistyössä muiden pohjoismaisten väyläviranomaisten kanssa. Tällaisia tutkimuskohteita ovat esimerkiksi

- kuituraudoitteiden käytön päästövähennyspotentiaali ("teräksetön silta"),
- geopolymeerit sillanrakentamisessa,
- puupaalujen käyttäminen sillanrakennuksessa ja
- teräs- ja puusiltojen uudelleenkäyttömahdollisuuksien selvittäminen.

Erityisesti viimeksi mainittu on oiva esimerkki siitä, että päästöjä vähennettäessä ei ole syytä unohtaa kiertotalouden periaatteita. Kiertotalouden ja laajemmin kestävän kehityksen tavoitteita hyödyntämällä on mahdollista rakentaa kokonaisedullisia siltoja ja väyliä tulevaisuuden tarpeisiin.

Vähähiilisen rakentamisen vuosiseminaarissa 20.4.2021 eräs esittäjistä sanoi oivaltavasti rakentamisen päästöjen vähentämisestä:

> *Päästöjä vähennetään vain vähentämällä päästöjä.*

Onkin syytä aloittaa päästöjen vähentäminen kaikin mahdollisin keinoin viimeistään nyt.

LÄHTEET

1. Yleiset

Arias, P., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M., Plattner, G.-K., Rogelj, J., Rojas, M., Sillmann, J., Storelvmo, T., Thorne, P., Trewin, B., Rao, K. A., Adhikary, B., Allan, R., Armour, K., Bala, G., Barimalala, R., Berger, S., Canadell, J., Cassou, C., Cherchi, A., Collins, W., Collins, W., Connors, S., Corti, S., Cruz, F., Dentener, F., Dereczynski, C., Luca, A. D., Niang, A. D., Doblas-Reyes, F., Dosio, A., Douville, H., Engelbrecht, F., Eyring, V., Fischer, E., Forster, P., Fox-Kemper, B., Fuglestvedt, J., Fyfe, J., Gillett, N., Goldfarb, L., Gorodetskaya, I., Gutierrez, J., Hamdi, R., Hawkins, E., Hewitt, H., Hope, P., Islam, A., Jones, C., Kaufman, D., Kopp, R., Kosaka, Y., Kossin, J., Krakovska, S., Lee, J., Li, J., Mauritsen, T., Maycock, T., Meinshausen, M., Min, S., Monteiro, P., Ngo-Duc, T., Otto, F., Pinto, I., Pirani, A., Raghavan, K., Ranasinghe, R., Ruane, A., Ruiz, L., Sallée, J., Samset, B., Sathyendranath, S., Seneviratne, S., Sörensson, A., Szopa, S., Takayabu, I., Tréguier, A., Hurk, B. van den, Vautard, R., von Schuckmann, K., Zaehle, S., Zhang, X. ja Zickfeld, K. (2021). Technical Summary. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Toim. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. Matthews, T. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu ja B. Zhou.

Arnold, W., Burridge, J., Moore, D., Ranasinghe, K. ja Wilkins, S. (2020). Making low-carbon material choices. *The Structural Engineer* 98.2, s. 20–22.

Aulakoski, A., Montin, P., Lydman, P. ja Häyrinen, K. (2014). *Panospohjaisen CO2-laskennan pilotointi väylähankkeessa. Kehä I liittymän parantaminen Kivikontien eritasoliittymän kohdalla*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 18/2014. Liikennevirasto.

Axelsson, S. (2018). *Färdplan för fossilfri konkurrenskraft Betongbranschen*.

Banedanmark (2021). *Banedanmarks Klimaplan 2030*. Banedanmark.

Begic, A. (2021). *Combining 3D modelling and LCA. Nordic Best Practice on LCA in Infrastructure. NordFoU. Webinaari 22.4.2021*. Esitysmateriaali. Norwegian Public Roads Administration.

Björkgren, M. (2021). *Geokalkyl - a powerful GIS-based tool. Nordic Best Practice on LCA in Infrastructure. NordFoU. Webinaari 22.4.2021*. Esitysmateriaali. AFRY Sweden.

BRE (2018). *An introduction to CEEQUAL*. Tekninen raportti. BRE.

Cementa AB (2018). *Färdplan för fossilfri konkurrenskraft Bygg-och Anläggningssektorn*.

CEN/TR 15941 (2010). *Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Methodology for selection and use of generic data*. CEN/TR 15941. CEN/TC 350 Sustainability of construction works.

CEN/TR 17310 (2019). *Carbonation and CO2 uptake in concrete*. CEN/TR 17310. CEN/TC 350 Sustainability of construction works.

COWI (2012). *Demonstration of ETSI LCC and LCA tools*. en. Tekninen raportti. URL: http://etsi.aalto.fi/Etsi3/PDF/TG1/Verification_Report.pdf.

Dettenborn, T., Hallipelto, M., Pahkakangas, S., Teittinen, T., Savolainen, L., Koutonen, H., Elmnäinen, E., Rinta-Piirto, J., Känkänen, R. ja Härö, E. (2020). *Pääradan välityskyvyn parantamisen kahden sijaintivaihtoehdon ilmastovaikutusten arviointi. Toteuttamisen CO2-päästöt ja kulkutapajakauman muutos*. Selvitys. Ramboll Finland Oy.

Elmsäter-Svärd, C., Hagman, G., Landelius, H., Wifvesson, H., Meyer, M. ja Johnsson, F. (2018). *Färdplan för fossilfri konkurrenskraft Bygg-och Anläggningssektorn*.

Euroopan parlamentti (9. maaliskuuta 2021). *Hiilidioksidipäästöjä vähentämässä: EU:n tavoitteet ja toimet*. Euroopan parlamentti. URL: https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20180305STO99003/hiilidioksidipaastoja-vahentamassa-eu-n-tavoitteet-ja-toimet (viitattu 22. 06. 2021).

Firth, I. (2020). *Future Sustainable Bridge Building. The future belongs to sustainable bridges -webinaari 9.12.2020*. Esitysmateriaali. Outokumpu.

Häkkinen, T., Nibel, S. ja Birgisdottir, H. (2021). *Definition and methods for the carbon handprint of buildings*. Ympäristöministeriö.

Häkkinen, T. ja Pesu, J. (2021). *Infrarakentamisen CO2-päästötietokantatyön tilannekatsaus. Sidosryhmäseminaari 1.12.2021*. Esitysmateriaali. Väylävirasto.

Herva, M., Jauhiainen, J. ja Lilja, K. (2015). *CO2-päästö- ja kustannusohjaus mallipohjaisesti*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 47/2015. Liikennevirasto.

Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K., Engelbrecht, F., Guiot, J., Hijioka, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S., Thomas, A., Warren, R. ja Zhou, G. (2018). Impacts of 1.5 ℃ Global Warming on Natural and Human Systems. *Global Warming of 1.5 ℃. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5℃ above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, s. 175–311.

Illman, J., Kumpulainen, A., Pesola, A. ja Vanhanen, J. (2012). *Merenkulun ja liikenteen hiilijalanjälki*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2012. Liikennevirasto.

Ilomäki, A. (2021). *EU:n rakennustuoteasetuksen päivitys. Vähähiilisen rakentamisen vuosiseminaari 20.4.2021*. Esitysmateriaali. Ympäristöministeriö.

InfraLCA (2021). *InfraLCA. Publicering webinar 24.6.2021*. Esitysmateriaali. Vejdirektoratet ja Banedanmark.

IPCC (2021). *Sixth Assessment Report. Fact sheet*. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/06/Fact_sheet_AR6.pdf (viitattu 22. 01. 2022).

Jernbanedirektoratet (2021). *Årsrapport 2020*. Jernbanedirektoratet.

Juhola, T. (2021). *Mahdollisesti merkittävä ennakkopäätös: Hollannissa oikeus määräsi Shellin leikkaamaan merkittävästi nopeammin päästöjään*. URL: https://yle.fi/uutiset/3-11949885 (viitattu 15. 01. 2022).

Jutila, A. ja Sundquist, H. ((2007). *ETSI project (Stage 1): Bridge Life Cycle Optimisation*. en. Tekninen raportti.

Karlsson, I., Rootzén, J. ja Johnsson, F. (2020). Reaching net-zero carbon emissions in construction supply chains – Analysis of a Swedish road construction project. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120, s. 109651. ISSN: 1364-0321. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109651.

Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet (2020). *Lov om klima*. LOV nr 965 af 26/06/2020. Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet.

Kuittinen, M. (2021). *Eurooppalainen ja pohjoismainen kehitys. Vähähiilisen rakentamisen vuosiseminaari 20.4.2021*. Esitysmateriaali. Ympäristöministeriö.

Lähde, P., Laukkanen, E., Mikkonen, J., Lindgren, T., Aarras, N. ja Nöjd, K. (2021). *Infrastruktuurihankkeiden elinkaaren hiilijalanjälkilaskenta. CASE-tarkastelut ratahankkeiden elinkaaren CO2-päästövaikutuksista*. Loppuraportti. Väylävirasto.

Laine, A., Raivio, T., Jonsson, H., Heino, A., Klimscheffskij, M. ja Lehtomäki, J. (2020). *Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035. Osa 1. Rakennetun ympäristön hiilielinkaaren nykytila*. Taustaraportti. Rakennusteollisuus.

Larsson Ivanov, O., Honfi, D. ja Stripple, H. (2018). *Uncertainty and variation in LCA - Implementation of probabilistic methods to assess environmental impacts of infrastructures*. TVBK 3070. Lunds tekniska högskola, Avdelningen för konstruktionsteknik.

Liikennevirasto (2014). *Siltojen tietomalliohje*. Liikennevirasto ohjeita 6/2014. Liikennevirasto.

Lindgren, Å. ja Malaga, K. (2021). *BETCRETE 2.0 -hankkeen esittely. Åtgärder i infrastruktur som minskar klimatpåverkan -webinaari 28.9.2021*. Esitysmateriaali. Trafikverket.

Markkanen, J. ja Lauhkonen, A. (2020). *Työkoneiden päästöjen perusennuste ja sähköistymisen vaikutus päästöihin*. Tekninen raportti VTT-CR-00245-21. VTT.

Multanen, E. (2019). *VALTARI-allianssi. Vt12 VALTARI*. LCA-raportti. Pöyry.

Nahangi, M., Guven, G., Olanrewaju, B. ja Saxe, S. (2021). Embodied greenhouse gas assessment of a bridge: A comparison of preconstruction Building Information Model and construction records. *Journal of Cleaner Production* 295, s. 126388. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126388.

NCF (2021). Nordic Concrete Foundation. URL: https://nordicconcrete.net/ (viitattu 21. 10. 2021).

Norjan hallitus (8. tammikuuta 2021). *Norway's comprehensive climate action plan*. Norwegian Government. URL: https://www.regjeringen.no/en/aktuelt/heilskapeleg-plan-for-a-na-klimamalet/id2827600/?expand=factbox2834806 (viitattu 26. 03. 2021).

NVF (2021). Nordisk Vejforum. URL: https://nvfnorden.org/ (viitattu 21. 10. 2021).

Pousette, A., Malo, K., Thelandersson, S., Fortino, S., Salokangas, L. ja Wacker, J. (2017). *Durable Timber Bridges. Final Report and Guidelines*. English. SP Rapport. Project code: 100873. Sweden: RISE Research Institutes of Sweden.

prEN 15941 (2021). *Sustainability of construction works - Data quality for environmental assessment of products and construction works - Selection and use of data*. prEN 15941. CEN/TC 350.

prEN 17662 (2021). *Execution of steel structures and aluminium structures - Environmental Product Declarations - Product category rules complementary to EN 15804 for Steel, Iron and Aluminium structural products for use in construction works.* prEN 17662. CEN/TC 135.

prEN 17672 (2021). *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Horizontal rules for business-to-consumer communication*. prEN 17672. CEN/TC 350.

Pulkkinen, P., Aalto, O., Laaksonen, A., Rantala, S., Söderqvist, M., Tirkkonen, T., Vilonen, I. ja Åström, G., toim. (2018). *Sillat - suunnittelu, toteutus ja ylläpito*. [Päivitetty versio]. RIL 179-2018. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. ISBN: 978-951-758-629-0.

RTS (2022). *Selaa julkaistuja RTS EPD-ympäristöselosteita. Suodattimen oneclick antamat hakutulokset. Rakennustietosäätiö RTS sr*. URL: https://cer.rts.fi/epd-ymparistoseloste/selaa-epd-ymparistoselosteita/?filter=oneclick (viitattu 03. 02. 2022).

RTT (2020). *Kivirakentajat peräävät ympäristöministeriöltä aidosti vaikuttavia toimia ilmastonmuutoksen torjuntaan. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Betonijaosto*. URL: https://www.rakennusteollisuus.fi/Ajankohtaista/Tiedotteet1/2020/kivirakentajat-peraavat-ymparistoministeriolta-aidosti-vaikuttavia-toimia-ilmastonmuutoksen torjuntaan2/ (viitattu 30. 01. 2022).

Ruuska, A. (2018). Sustainability of buildings - New perspectives on material-related environmental impacts of buildings. en. Tohtorinväitöskirja, 63 + app. 87. URL: http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-7902-8.

Saarniaho, K. (2021). *Väyläviraston ympäristöpäivä. Webinaari 12.10.2021*. Esitysmateriaali. Väylävirasto.

Saarniaho, K., Anttila, V., Laakso, K., Kuittinen, M., Suominen, M., Huvila, H., Pesu, J. ja Häkkinen, T. (2021). *Infrarakentamisen päästötietokantahankkeen infotilaisuus 8.6.2021*. Esitysmateriaali. Väylävirasto.

Salminen, E., Anttonen, R. ja Marttila, L. (2021). *Ympäristöseloste. Valmisbetonit*. EPD. Vahanen Environment Oy.

Salokangas, L. ((2009). *ETSI project (Stage 2): Bridge Life Cycle Optimisation*. en. Tekninen raportti.

– (2013). *ETSI project: Bridge Life Cycle Optimisation : stage 3*. en. D4 Julkaistu kehittämistai tutkimusraportti tai -selvitys, s. 165. URL: http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-5052-2.

SFS-EN 15643 (2021). *Sustainability of construction works. Framework for assessment of buildings and civil engineering works*. SFS-EN 15643. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 15804 (2019). *Kestävä rakentaminen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt*. SFS-EN 15804:2012 + A2:2019. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 15942 (2021). *Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Methodology for selection and use of generic data*. SFS-EN 15942. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 15978 (2012). *Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method*. SFS-EN 15978. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 16485 (2014). *Round and sawn timber. Environmental product declarations. Product category tules for woon and wood-based products for use in construction*. SFS-EN 16485. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 16757 (2017). *Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Product Category Rules for concrete and concrete elements*. SFS-EN 16757. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 16908 (2017). *Cement and building lime. Environmental product declarations. Product category rules complementary to EN 15804*. SFS-EN 16908. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 206 (2021). *Concrete. Specification, performance, production and conformity*. SFS-EN 206:2014 + A2:2021. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 14025 (2010). *Ympäristömerkit ja -selosteet. Tyypin III ympäristöselosteet. Periaatteet ja menettelyt*. SFS-EN ISO 14025. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 14040 (2020). *Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet*. SFS-EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 14044 (2018). *Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja*. SFS-EN ISO 14044:2012 + A1:2018. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

Soimakallio, S. (2020). *Specific emissions for district heat, district cooling and electricity used in buildings*. Suomen ympäristökeskus.

Solem, B. (2021). *Brukonstruksjoner i tre - klimagassberegninger. NVF Bridges webinar 19.5.2021*. Esitysmateriaali. Nordisk Vejforum.

Statens vegvesen (2021a). *Årsrapport 2020*. Statens vegvesen.

– (30. elokuuta 2021b). *VegLCA v5.04*.

Teknologiateollisuus (2021). *Työntekijöiden työaika 2019 – 2021. PDF-tiedosto*. URL: https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/2020-01/Vuosity%C3%B6aika_2019-2021_2.pdf (viitattu 21. 10. 2021).

Tilastokeskus (2021). *Polttoaineluokitus 2021*.

Trafikverket (2016). *Klimatkalkyler inom Planera åtgärder*. Riktlinje 2015:0068. Trafikverket.

– (2018). *Klimatkalkyl- infrastrukturhållningens energianvändning och klimatpåverkan i ett livscykelperspektiv*. Riktlinje 2015:0007. Trafikverket.

– (2020). *Klimatkalkyl – Beräkning av infrastrukturens klimatpåverkan och energianvändning i ett livscykelperspektiv. Modellversion 7.0*. Rapport. Trafikverket.

– (2021a). *Klimatkalkyl*. URL: https://klimatkalkyl-pub.ea.trafikverket.se/Klimatkalkyl/Modell (viitattu 10. 10. 2021).

– (2021b). *Klimatkrav i planläggning byggskede underhåll och på teknisk godkänt järnvägsmateriel*. Riktlinje 2015:0480. Trafikverket.

– (2021c). *Miljörapport 2020*. Trafikverket.

Tuominen, P., Ruonala-Lindgren, A., Pöhler, T., Torvinen, K., Varjes, S., Erho, T., Vienamo, T., Kay-Jones, S., Hernandez, R., Lahti, J., Pelsmakers, S. ja Fernandez, F. (2020). *Build4Clima final report*. Tekninen raportti. VTT.

Turtiainen, S. (2021). *Minä voitin*. URL: https://yle.fi/uutiset/3-11959497 (viitattu 15. 01. 2022).

Työ- ja elinkeinoministeriö (14. heinäkuuta 2021). *EU:n Fit for 55 -ilmastopaketti tiukentaisi uusiutuvan energian ja energiatehokkuuden tavoitteita. Tiedote*. Työ- ja elinkeinoministeriö. URL: https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/eu-n-fit-for-55-ilmastopaketti-tiukentaisi-uusiutuvan-energian-ja-energiatehokkuuden-tavoitteita (viitattu 20. 10. 2021).

Vainio, S. (2021). *Oikeus tuomitsi Ranskan valtion riittämättömistä ilmastotoimista – seurauksena yhden euron korvaus ympäristöjärjestöille*. URL: https://www.hs.fi/ulkomaat/art-2000007782798.html (viitattu 15. 01. 2022).

van Eldik, M. A., Vahdatikhaki, F., dos Santos, J. M. O., Visser, M. ja Doree, A. (2020). BIM-based environmental impact assessment for infrastructure design projects. *Automation in Construction* 120, s. 103379. ISSN: 0926-5805. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103379.

Väylävirasto (2019). *Sisäinen lähde. CO2 –päästölaskennan pilotointi, Vt 5 Nuutilanmäki – Vehmaa -hankkeessa*. Väylävirasto.

– (2020a). *Infrabetonien valmistus*. Väyläviraston ohjeita 41/2020. Väylävirasto.

Väylävirasto (2020b). *Tie- ja ratainfrastruktuurin elinkaariarvioinnin opas*. Väyläviraston julkaisuja 64/2020. Väylävirasto.

– (2021a). *Taitorakennerekisteri*. URL: https://extranet.vayla.fi/trex/#/ (viitattu 01. 03. 2021).

– (2021b). *Väyläviraston sillat 31.12.2020*. Väyläviraston julkaisuja 38/2021. Väylävirasto.

– (2021c). *Väyläviraston tilinpäätös 2020*. Väyläviraston julkaisuja 10/2021. Väylävirasto.

Vejdirektoratet (2020). *Statsvejnettet 2020*.

– (2021). *VejLCA slides*. VejLCA webinar 25.3.2021.

Vejdirektoratet ja Banedanmark (13. elokuuta 2021). *InfraLCA v1.51*.

VN/2753/2020-LVM-13 (2021). *Liikenne- ja viestintäministeriön hallinnonalan tulossopimukset 2020-2023. Väyläviraston tulossopimus*. VN/2753/2020. Valtioneuvosto.

VTT (2021). *LIPASTO*. URL: http://lipasto.vtt.fi/ (viitattu 21. 10. 2021).

Vuorinen, P. (2021). KIRA-sektori osana EU:n kestävän rahoituksen luokitusjärjestelmää. *Rakennustekniikka* 77.2, s. 44–45.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-ruiz, E. ja Weidema, B. (syyskuu 2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. English. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21.9. Copyright - Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016; Last updated - 2020-03-18, s. 1218–1230.

WorldGBC (2021). *The Net Zero Carbon Buildings Commitment*. World Green Building Council. URL: https://www.worldgbc.org/thecommitment (viitattu 09. 06. 2021).

Ympäristöministeriö (2019). *Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä*. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22. Ympäristöministeriö.

– (2021a). *Puurakentamisen ohjelman väliarviointi: Puurakentamisella jo vahva tuki, mutta kunnianhimon tasoa varaa nostaa*. URL: https://valtioneuvosto.fi/-//1410903/puurakentamisen-ohjelman-valiarviointi-puurakentamisella-jo-vahva-tuki-mutta-kunnianhimon-tasoa-varaa-nostaa (viitattu 30. 01. 2022).

– (2021b). *Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2021. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän ohjeen luonnos lausuntokierrosta varten 6/2021*. Ympäristöministeriön julkaisuja. Ympäristöministeriö.

2. Betoni

Adesanya, E., Sreenivasan, H., Kantola, A. M., Telkki, V.-V., Ohenoja, K., Kinnunen, P. ja Illikainen, M. (2018). Ladle slag cement – Characterization of hydration and conversion. *Construction and Building Materials* 193, s. 128–134. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.179. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818325893.

Albitar, M., Mohamed Ali, M., Visintin, P. ja Drechsler, M. (2017). Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials* 136,

s. 374–385. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.056.

Almemark, M. (2020). *Ympäristöseloste. Betoniterästuotteet - Celsa Steel Service OY:n tuotanto Suomessa*. EPD S-P-00307. IVL Swedish Environmental Research Institute.

Aly, A. M., El-Feky, M., Kohail, M. ja Nasr, E.-S. A. (2019). Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials* 207, s. 136–144. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.121.

Alzaza, A., Ohenoja, K. ja Illikainen, M. (2021). One-part alkali-activated blast furnace slag for sustainable construction at subzero temperatures. *Construction and Building Materials* 276, s. 122026. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122026.

Anbarasan, I. ja Soundarapandian, N. (2020). Investigation of mechanical and micro structural properties of geopolymer concrete blended by dredged marine sand and manufactured sand under ambient curing conditions. *Structural Concrete* 21, s. 992–1003. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.201900343.

Angst, U., Moro, F., Geiker, M., Kessler, S., Beushausen, H., Andrade, C., Lahdensivu, J., Köliö, A., Imamoto, K.-i., Greve-Dierfeld, S. von ja Serdar, M. (joulukuu 2020). Corrosion of steel in carbonated concrete: mechanisms, practical experience, and research priorities – a critical review by RILEM TC 281-CCC. *RILEM Technical Letters* 5, s. 85–100. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2020.127.

Beddaa, H., Fraj, A. B., Lavergne, F. ja Torrenti, J. M. (2020). Drying shrinkage and mechanical properties of concrete based on Corbicula shells, from river, sediments, as coarse aggregates. *Proceedings of the 2020 session of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*. Toim. F. Gatuingt ja T. Jean-Michel. International Federation for Structural Concrete, s. 18–24.

Berhanu, A., Gebreyouhannes, E., Zerayohannes, G. ja Zeleke, E. (2021). The Effect of Metakaolin on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Proceedings of the fib Symposium 2021 held online from Lisbon, Portugal*. Toim. E. Júlio, J. Valença ja A. Louro. International Federation for Structural Concrete, s. 815–824.

Betoniteollisuus ry (2021). Suomalaisten betonituotteiden keskimääräiset kasvihuonepäästöt on selvitetty. *Betoni* 91.2, s. 108–109.

Bogas, J. A., de Brito, J. ja Ramos, D. (2016). Freeze–thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates. eng. *Journal of cleaner production* 115, s. 294–306. ISSN: 0959-6526.

Bouaissi, A., Li, L.-y., Al Bakri Abdullah, M. M. ja Bui, Q.-B. (2019). Mechanical properties and microstructure analysis of FA-GGBS-HMNS based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials* 210, s. 198–209. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.202.

Bucher, R., Cyr, M. ja Escadeillas, G. (2021). Performance-based evaluation of flash-metakaolin as cement replacement in marine structures – Case of chloride migration and corrosion. *Construction and Building Materials* 267, s. 120926. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120926.

by (2021). *BY-vähähiilisyysluokitus. Luokituksen kuvaus. 12.11.2021*. Betoniyhdistys.

by 201 (2018). *Betonitekniikan oppikirja 2018*. Kuudes päivitetty painos. Oppikirjat, 201. Helsinki: BY-Koulutus Oy. ISBN: 978-952-68619-4-4.

Byfors, K. (2021). *Environmental Product Declaration. Betong för vägbro*. EPD NEPD-1294-420-SE. Svensk Betong.

Carević, V. ja Ignjatović, I. (2021). Evaluation of concrete cover depth for green concretes exposed to carbonation. *Structural Concrete* 22.S1, E1009–E1021. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.202000086.

Carlsberg Italia S.p.a (2018). *Environmental product declaration. Tuborg Beer*. The International EPD Consortium (IEC).

CEMBUREAU (2020). *Cementing the European Green Deal*. The European Cement Association.

Chen, K., Wu, D., Xia, L., Cai, Q. ja Zhang, Z. (2021). Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments – A review of influence factors and comparison with ordinary Portland cement. *Construction and Building Materials* 279, s. 122496. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122496.

Cyr, M., Idir, R. ja Escadeillas, G. (2012). Use of metakaolin to stabilize sewage sludge ash and municipal solid waste incineration fly ash in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials* 243, s. 193–203. ISSN: 0304-3894. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.019.

De Belie, N., Soutsos, M. ja Gruyaert, E., toim. (2018). *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4*. English. Vol. 25. RILEM State-of-the-Art Reports. Springer. ISBN: 9783319706054. DOI: 10.1007/978-3-319-70606-1.

Duan, Z., Li, B., Xiao, J. ja Guo, W. (2021). Optimizing mix proportion of recycled aggregate concrete by readjusting the aggregate gradation. *Structural Concrete* 22.S1, E22–E32. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.201900517.

EFCA (2015a). *Environmental Product Declaration. Concrete admixtures - Air Entrainers*. EPD-EFC-20150086-IAG1-EN. Institut Bauen und Umwelt e.V.

– (2015b). *Environmental Product Declaration. Concrete admixtures - Hardening Accelerators*. EPD-EFC-20150089-IAG1-EN. Institut Bauen und Umwelt e.V.

– (2015c). *Environmental Product Declaration. Concrete admixtures - Plasticisers and Superplasticisers*. EPD-EFC-20150091-IAG1-EN. Institut Bauen und Umwelt e.V.

– (2015d). *Environmental Product Declaration. Concrete admixtures - Retarders*. EPD-EFC-20150088-IAG1-EN. Institut Bauen und Umwelt e.V.

EFCA (2015e). *Environmental Product Declaration. Concrete admixtures - Set Accelerators*. EPD-EFC-20150087-IAG1-EN. Institut Bauen und Umwelt e.V.

– (2015f). *Environmental Product Declaration. Concrete admixtures - Water Resisting Admixtures*. EPD-EFC-20150090-IAG2-EN. Institut Bauen und Umwelt e.V.

Elgalhud, A. A., Dhir, R. K. ja Ghataora, G. (2016). Limestone addition effects on concrete porosity. *Cement and Concrete Composites* 72, s. 222–234. ISSN: 0958-9465. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.006.

Fallahnejad, H., Davoodi, M. R. ja Nikbin, I. M. (2021). The influence of aging on the fracture characteristics of recycled aggregate concrete through three methods. *Structural Concrete* 22.S1, E74–E93. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.202000119.

Fidjestøl, P. ja Dåstøl, M. (2008). The history of silica fume in concrete from novelty to key ingredient in high performance concrete. *Proceedings of the Congresso Brasileiro do Concreto. 4th-9th Sept*.

Finnsementti (2020a). *Ympäristöraportti 2020*. Finnsementti.

– (2020b). *Ympäristöseloste. KJ400*. EPD. Finnsementti.

– (2020c). *Ympäristöselosteet Oiva, Pika ja Rapid. Parainen ja Lappeenranta.* EPD. Finnsementti.

– (2021a). *Ympäristöraportti 2021*. Finnsementti.

– (2021b). *Uusi vähäpäästöinen CEM III sementti saatavilla syyskuusta alkaen*. Finnsementti. URL: https://finnsementti.fi/nosto/uusi-vahapaastoinen-cem-iii-sementti-saatavilla-syyskuusta-alkaen (viitattu 10. 10. 2021).

Gabrijel, I., Rukavina, M. J. ja Štirmer, N. (2021). Influence of Wood Fly Ash on Concrete Properties through Filling Effect Mechanism. English. *Materials* 14.23, s. 7164. URL: https://www.proquest.com/scholarly-journals/influence-wood-fly-ash-on-concrete-properties/docview/2608144134/se-2.

Häkkinen, T. (2020a). *Generic data for metal products / steel products (excluding stainless)*. Suomen ympäristökeskus.

– (2020b). *Generic data for metals - stainless steel*. Suomen ympäristökeskus.

– (2020c). *Generic data for wood products / Plywood*. Suomen ympäristökeskus.

– (2021). *Generic data for wood products / Sawn Timber*. Suomen ympäristökeskus.

Hassan, A., Arif, M. ja Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of Cleaner Production* 223, s. 704–728. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.051.

Hu, L. ja He, Z. (2020). A fresh perspective on effect of metakaolin and limestone powder on sulfate resistance of cement-based materials. *Construction and Building Materials* 262, s. 119847. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119847.

Huda, S. B. ja Alam, M. S. (2014). Mechanical behavior of three generations of 100 % repeated recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 65,

s. 574–582. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.010.

Ilomäki, A. (2021). *RE: Masuunikuonan päästöallokointi. Yksityinen sähköpostiviesti 12.11.2021*.

Infante Gomes, R., Brazão Farinha, C., Veiga, R., de Brito, J., Faria, P. ja Bastos, D. (2021). CO2 sequestration by construction and demolition waste aggregates and effect on mortars and concrete performance - An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 152, s. 111668. ISSN: 1364-0321. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111668.

InfraLCA (13. elokuuta 2021). *InfraLCA v1.51. Vejdirektoratet ja Banedanmark*.

Jacobsen, S. ja Kanstad, T. (2021). *Robust Eco-friendly C100 concrete: From particle packing to bridge tower analysis in the Ferry-free E39 project. NVF Bridges webinar 19.5.2021*. Esitysmateriaali. Nordisk Vejforum.

Juhart, J., Autischer, M. ja Krüger, M. (2021). The Micro-Filler, Eco-Filler Concept for Clinker Reduced, Performance-Based and Sustainable Concrete. *Proceedings of the fib Symposium 2021 held online from Lisbon, Portugal*. Toim. E. Júlio, J. Valença ja A. Louro. International Federation for Structural Concrete, s. 322–331.

Kannan, S., Arunachalam, K. ja Brindha, D. (2021). Performance analysis of recycled aggregate concrete with chemical admixture. *Structural Concrete* 22.S1, E8–E21. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.201900380.

Klimatkalkyl (2021). *Klimatkalkyl. Trafikverket*. URL: https://klimatkalkyl-pub.ea.trafikverket.se/Klimatkalkyl/Modell (viitattu 10. 10. 2021).

Kosonen, A. (2021). *Miten taklataan CO2 – Materiaali kiertoon ja CO2 talteen: Hiilidioksidin hyötykäyttö Power-to-X –teknologian avulla. Sustainable building and new innovations -webinaari 21.1.2021.* Esitysmateriaali. LUT-yliopisto.

Kurda, R., de Brito, J. ja Silvestre, J. D. (2020). A comparative study of the mechanical and life cycle assessment of high-content fly ash and recycled aggregates concrete. *Journal of Building Engineering* 29, s. 101173. ISSN: 2352-7102. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101173.

Laine, A., Raivio, T., Jonsson, H., Heino, A., Klimscheffskij, M. ja Lehtomäki, J. (2020). *Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035. Osa 1. Rakennetun ympäristön hiilielinkaaren nykytila*. Taustaraportti. Rakennusteollisuus.

Lazik, P.-R. ja Garrecht, H. (2020). Wood ashes from electrostatic filter as a replacement for the fly ashes in concrete. *Proceedings of the 2020 session of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*. Toim. F. Gatuingt ja T. Jean-Michel. International Federation for Structural Concrete, s. 118–124.

Li, N., Shi, C., Zhang, Z., Wang, H. ja Liu, Y. (2019). A review on mixture design methods for geopolymer concrete. *Composites Part B: Engineering* 178, s. 107490. ISSN: 1359-8368. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107490.

Lu, B., Shi, C., Cao, Z., Guo, M. ja Zheng, J. (2019). Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete. eng. *Journal of cleaner production* 233, s. 421–428. ISSN: 0959-6526.

Marinković, S., Carević, V. ja Dragaš, J. (2021). The role of service life in Life Cycle Assessment of concrete structures. *Journal of Cleaner Production* 290, s. 125610. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125610.

Mashaly, A. O., Shalaby, B. N. ja Rashwan, M. A. (2018). Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. *Construction and Building Materials* 169, s. 800–818. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.046.

Medina, C., Zhu, W., Howind, T., Sánchez de Rojas, M. I. ja Frías, M. (2014). Influence of mixed recycled aggregate on the physical – mechanical properties of recycled concrete. *Journal of cleaner production* 68, s. 216–225.

Medina, G., Sáez del Bosque, I., Frías, M., Sánchez de Rojas, M. ja Medina, C. (2017). Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations. *Journal of Cleaner Production* 148, s. 467–476. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.048.

Meesala, C. (elokuu 2020). Influence of brick dust, stone dust, and recycled fine aggregate on properties of natural and recycled aggregate concrete. *Structural Concrete* 22, E105–E120. DOI: 10.1002/suco.202000103.

Meesala, C., Verma, N. ja Kumar, S. (2019). Critical review on fly-ash based geopolymer concrete. *Structural Concrete* 21, s. 1013–1028. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.201900326.

Mistry, M., Koffler, C. ja Wong, S. (marraskuu 2016). LCA and LCC of the world's longest pier: a case study on nickel-containing stainless steel rebar. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21, s. 1637–1644. DOI: https://doi.org/10.1007/s11367-016-1080-2.

Nazarpour, H. ja Jamali, M. (lokakuu 2019). Mechanical and freezing cycles properties of geopolymer concrete with recycled aggregate. *Structural Concrete* 21, s. 1004–1012. DOI: 10.1002/suco.201900317.

NCCI 2 (2017). *Eurokoodin soveltamisohje. Betonirakenteiden suunnittelu - NCCI 2 (30.6.2017)*. Tekninen raportti. Liikennevirasto.

Ohenoja, K., Rissanen, J., Kinnunen, P. ja Illikainen, M. (2020). Direct carbonation of peat-wood fly ash for carbon capture and utilization in construction application. *Journal of CO2 Utilization* 40, s. 101203. ISSN: 2212-9820. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101203.

Paiva, H., Velosa, A., Cachim, P. ja Ferreira, V. (2012). Effect of metakaolin dispersion on the fresh and hardened state properties of concrete. *Cement and Concrete Re-*

search 42.4, s. 607–612. ISSN: 0008-8846. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.01.005.

Pasupathy, K., Singh Cheema, D. ja Sanjayan, J. (2021). Durability performance of fly ash-based geopolymer concrete buried in saline environment for 10 years. *Construction and Building Materials* 281, s. 122596. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122596.

Paul, E. (2021). Performance assessment of geopolymer concrete using various industrial wastes. *Materials Today: Proceedings* 45. Second International Conference on Aspects of Materials Science and Engineering (ICAMSE 2021), s. 5149–5152. ISSN: 2214-7853. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.660.

Pilehvar, S., Szczotok, A. M., Rodríguez, J. F., Valentini, L., Lanzón, M., Pamies, R. ja Kjøniksen, A.-L. (2019). Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials* 200, s. 94–103. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.057.

Prakash, R., Thenmozhi, R., Raman, S. N. ja Subramanian, C. (2020). Characterization of eco-friendly steel fiber-reinforced concrete containing waste coconut shell as coarse aggregates and fly ash as partial cement replacement. *Structural Concrete* 21.1, s. 437–447. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.201800355.

prEN 1992-1 (2021). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules - Rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Draft*. Luonnos prEN 1992-1:2021. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

Pulkkinen, P., Aalto, O., Laaksonen, A., Rantala, S., Söderqvist, M., Tirkkonen, T., Vilonen, I. ja Åström, G., toim. (2018). *Sillat - suunnittelu, toteutus ja ylläpito*. [Päivitetty versio]. RIL 179-2018. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. ISBN: 978-951-758-629-0.

Rashad, A. M. (2013). Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview. *Construction building materials* 41, s. 303–318. ISSN: 0950-0618.

Rissanen, J., Ohenoja, K., Kinnunen, P. ja Illikainen, M. (2020). Peat-Wood Fly Ash as Cold-Region Supplementary Cementitious Material: Air Content and Freeze–Thaw Resistance of Air-Entrained Mortars. *Journal of materials in civil engineering* 32.6. ISSN: 0899-1561.

Rudus Oy (2014). *Betoroc-murskeen hiilijalanjälki, EN-15804:2012:A1*. Bionova Consulting.

Salminen, E., Anttonen, R. ja Marttila, L. (2021). *Ympäristöseloste. Valmisbetonit*. EPD. Vahanen Environment Oy.

San Nicolas, R., Cyr, M. ja Escadeillas, G. (2014). Performance-based approach to durability of concrete containing flash-calcined metakaolin as cement replacement. *Con-*

struction and Building Materials 55, s. 313–322. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.063.

Sereng, M., Djerbi, A., Omikrine Metalssi, O., Dangla, P. ja Torrenti, J.-M. (2020). Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates. *Proceedings of the 2020 session of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*. Toim. F. Gatuingt ja T. Jean-Michel. International Federation for Structural Concrete, s. 238–245.

SFS-EN 12620 (2008). *Betonikiviainekset*. SFS-EN 12620 + A1. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 15804 (2019). *Kestävä rakentaminen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt*. SFS-EN 15804:2012 + A2:2019. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 197-1 (2012). *Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus*. SFS-EN 197-1. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 206 (2021). *Concrete. Specification, performance, production and conformity*. SFS-EN 206:2014 + A2:2021. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 450-1 (2013). *Betoniin käytettävä lentotuhka. Osa 1: Määritelmät, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus*. SFS-EN 450-1. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 934-2 (2013). *Betonin, laastin ja injektointilaastin lisäaineet. Osa 2: Betonin lisäaineet. Määritelmät, vaatimukset, vaatimustenmukaisuus ja merkintä*. SFS-EN 934-2 + A1:2012. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SILKO 1.201 (2021). *Betonirakenteet. Betoni sillankorjausmateriaalina. Yleiset laatuvaatimukset*. Tekninen raportti. Väylävirasto.

Singh, S., Khan, S., Khandelwal, R., Chugh, A. ja Nagar, R. (2016). Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. *Journal of Cleaner Production* 119, s. 86–98. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.008.

Sirico, A., Bernardi, P., Sciancalepore, C., Vecchi, F., Malcevschi, A., Belletti, B. ja Milanese, D. (2021). Biochar from wood waste as additive for structural concrete. *Construction and Building Materials* 303, s. 124500. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124500.

Sousa, F. H. F., Kazmierczak, C. d. S., Quinino, U. C. D. M., Fernandes, A. J. M. M. ja Kulakowski, M. P. (2021). Applicability of models provided by technical standards to estimate the static modulus of elasticity of concretes produced with recycled coarse aggregates. *Structural Concrete* 22.S1, E94–E104. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.201900420.

Statens vegvesen (2020). *Dokumentasjon VegLCA v4.01*. Tekninen raportti. Statens vegvesen.

Tam, V. W., Soomro, M. ja Evangelista, A. C. J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials* 172, s. 272–

292. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240.

thinkstep AG (2019). *Stainless Steel Rebar. Outokumpu Oyj*. EPD-OTO-20190108-IBC1-EN. Institut Bauen und Umwelt e.V.

Tiehallinto (2001). *Tiesiltojen ainemenekki- ja kustannusmallit*.

– (2007). *Siltojen tukitelineet*.

Tsupari, E., Berg, C.-G., Katajisto, O., Leveelahti, U. ja Juutilainen, T. (2021). *Decarbonate. Tutkimuslaitteiston virtuaaliavajaiset 12.10.2021*. Esitysmateriaali. VTT.

Vainio-Kaila, T. (2021a). *Generic data for crushed aggregates*. Suomen ympäristökeskus.

– (2021b). *Generic data for sand and gravel*. Suomen ympäristökeskus.

Vares, S. (2021). *Generic data for ready mix concrete*. Suomen ympäristökeskus.

Väylävirasto (2020). *Infrabetonien valmistus*. Väyläviraston ohjeita 41/2020. Väylävirasto.

VegLCA (30. elokuuta 2021). *VegLCA v5.04. Statens vegvesen*.

Verma, A., Sarath Babu, V. ja Arunachalam, S. (2021). Influence of mixing approaches on strength and durability properties of treated recycled aggregate concrete. *Structural Concrete* 22.S1, E121–E142. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.202000221.

Visintin, P., Xie, T. ja Bennett, B. (2020). A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake. *Journal of Cleaner Production* 248, s. 119243. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119243.

Wada, Y., Fujii, Y., Ashizuka, K., Sanga, T. ja Fujioka, T. (2020). Construction of the actual non-metal bridge. *Proceedings of the fib Symposium 2020, Concrete structures for resilient society*. Toim. B. Zhao ja X. Lu. International Federation for Structural Concrete, s. 1195–1201.

Wang, Q., Zhang, Y., Fang, Y., Zhang, Y. ja Wu, F. (2020). Prediction of the mechanical behavior of recycled concrete with fresh concrete waste aggregate. *Structural Concrete* 21.2, s. 761–771. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.201900115.

Yingliang, Z., Jingping, Q., Hui, L. ja Zhengyu, M. (2020). Utilization of quarry dust for low carbon cementitious materials and the immobilization capacity for mine tailings. *Construction and Building Materials* 262, s. 120091. ISSN: 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120091.

YM (2001). *Maa-ainesten ottaminen ja ottamisalueiden jälkihoito. Ympäristöopas 85*. Ympäristöministeriö.

3. Teräs

bauforumstahl e.V. (2018). *Structural Steel: Sections and Plates*. EPD-BFS-20180116-IBG2-EN. Institut Bauen und Umwelt e.V.

Berge Kristensen, V. (2020). *Langenuen Suspension Bridge. Aluminium bridge girder alternative*. Report. Statens vegvesen.

ECCS (2021). *European design guide for the use of weathering steel in bridge construction*. 2nd Edition. ECCS – European Convention for Constructional Steelwork. ISBN: 978-92-9147-171-3.

Garcia Gonzalez, M. N., Levi, M. ja Turri, S. (2017). Development of polyester binders for the production of sustainable polyurethane coatings: Technological characterization and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 164, s. 171–178. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.190.

Häkkinen, T. (2020a). *Generic data for metal products / steel products (excluding stainless)*. Suomen ympäristökeskus.

– (2020b). *Generic data for metals - stainless steel*. Suomen ympäristökeskus.

Hauke, B., Kuhnhenne, M. ja Kreissig, J. (2017). 21.14: Life cycle analysis of steel structures: Why the recycling potential must be considered. *ce/papers* 1.2-3, s. 4614–4619. DOI: https://doi.org/10.1002/cepa.522.

Hradil, P. (2021). *Recommendations for reuse of conctructional steel products. Teräs kiertotaloudessa -webinaari 28.4.2021*. Esitysmateriaali. VTT.

Ilomäki, A. (2021). *RE: Masuunikuonan päästöallokointi. Yksityinen sähköpostiviesti 12.11.2021*.

Kesti, J. (2021). *Terästuotteiden hiilijalanjälki. Vähähiilinen teräsrakentaminen -webinaari 24.3.2021*. Esitysmateriaali. Ruukki.

Leppänen, H. (2021). *Fossil free steel value chain. Green and Digital Steel Technologies webinar 27.5.2021*. Esitysmateriaali. SSAB.

LTS 26/2015 (2015). *Taitorakenteiden ylläpidon toimintalinjat. Taustaselvitys*. Liikennevirasto tutkimuksia ja selvityksiä 26/2015. Liikennevirasto.

Mosaker, G. (2021). *Advantages by use of aluminium in bridges. NVF Bridges webinar 19.5.2021*. Esitysmateriaali. Nordisk Vejforum.

NCCI 4 (2016). *Eurokoodin soveltamisohje. Teräs- ja liittorakenteiden suunnittelu - NCCI 4 (25.8.2016)*. Tekninen raportti. Liikennevirasto.

Nordec Oy (2020). *Environmental product declaration. Welded and painted structural steel products. Based on European steel material*. Rakennustietosäätiö RTS.

Pedneault, J., Desjardins, V., Margni, M., Conciatori, D., Fafard, M. ja Sorelli, L. (2021). Economic and environmental life cycle assessment of a short-span aluminium composite bridge deck in Canada. *Journal of Cleaner Production* 310, s. 127405. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127405.

Pongiglione, M. ja Calderini, C. (2014). Material savings through structural steel reuse: A case study in Genoa. *Resources, Conservation and Recycling* 86, s. 87–92. ISSN: 0921-3449. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.02.011.

prEN 17662 (2021). *Execution of steel structures and aluminium structures - Environmental Product Declarations - Product category rules complementary to EN 15804 for Steel, Iron and Aluminium structural products for use in construction works.* prEN 17662. CEN/TC 135.

Pulkkinen, P., Aalto, O., Laaksonen, A., Rantala, S., Söderqvist, M., Tirkkonen, T., Vilonen, I. ja Åström, G., toim. (2018). *Sillat - suunnittelu, toteutus ja ylläpito*. [Päivitetty versio]. RIL 179-2018. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. ISBN: 978-951-758-629-0.

SEI ja LeadIT (2021). *Green Steel Tracker*. URL: https://www.industrytransition.org/green-steel-tracker/ (viitattu 10. 11. 2021).

SILKO 1.301 (2021). *Metallit sillankorjausmateriaalina. Yleiset laatuvaatimukset*. Tekninen raportti. Väylävirasto.

Siwowski, T. (2015). *Bridge Engineering: Selected Issues*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.

Sproesser, G., Chang, Y.-J., Pittner, A., Finkbeiner, M. ja Rethmeier, M. (2015). Life Cycle Assessment of welding technologies for thick metal plate welds. *Journal of Cleaner Production* 108, s. 46–53. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.121.

SSAB (2021). *Annual Report 2020*. SSAB.

Statens vegvesen (30. elokuuta 2021). *VegLCA v5.04*.

Trafikverket (2021). *Klimatkalkyl*. URL: https://klimatkalkyl-pub.ea.trafikverket.se/Klimatkalkyl/Modell (viitattu 10. 10. 2021).

Väisänen, P. (2007). Teräs. Perustietoa arkkitehtiopiskelijalle.

Väylävirasto (2021). *Taitorakennerekisteri*. URL: https://extranet.vayla.fi/trex/#/ (viitattu 01. 03. 2021).

Vejdirektoratet ja Banedanmark (13. elokuuta 2021). *InfraLCA v1.51*.

4. Puu

bauforumstahl e.V. (2018). *Structural Steel: Sections and Plates*. EPD-BFS-20180116-IBG2-EN. Institut Bauen und Umwelt e.V.

Häkkinen, T. (2020a). *Generic data for wood products / Glued Laminated Timber*. Suomen ympäristökeskus.

– (2020b). *Generic data for wood products / Impregnated*. Suomen ympäristökeskus.

– (2020c). *Generic data for wood products / LVL*. Suomen ympäristökeskus.

– (2020d). *Generic data for wood products / Plywood*. Suomen ympäristökeskus.

– (2021). *Generic data for wood products / Sawn Timber*. Suomen ympäristökeskus.

Hooli, J. (2020). Puupaalujen käyttö infrarakentamisessa. Finnish. Master's thesis. Aalto University. School of Engineering, s. 110 + 107. URL: http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202010256047.

Huuhka, S., Köliö, A., Annila, P. ja Poti, A. (2018). *Puurakenteiden uudelleenkäyttömahdollisuudet*. Suomi. Muuttuva rakennettu ympäristö 4. Tampere University of Technology.

NCCI 5 (2013). *Eurokoodin soveltamisohje. Puurakenteiden suunnittelu - NCCI 5 (17.6.2013)*. Tekninen raportti. Liikennevirasto.

Pousette, A., Malo, K., Thelandersson, S., Fortino, S., Salokangas, L. ja Wacker, J. (2017). *Durable Timber Bridges. Final Report and Guidelines*. English. SP Rapport. Project code: 100873. Sweden: RISE Research Institutes of Sweden.

Pulkkinen, P., Aalto, O., Laaksonen, A., Rantala, S., Söderqvist, M., Tirkkonen, T., Vilonen, I. ja Åström, G., toim. (2018). *Sillat - suunnittelu, toteutus ja ylläpito*. [Päivitetty versio]. RIL 179-2018. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. ISBN: 978-951-758-629-0.

SFS-EN 14080 (2013). *Puurakenteet. Liimapuu ja liimattu sahatavara. Vaatimukset*. SFS-EN 14080. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 14081-1 (2019). *Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements*. SFS-EN 14081-1:2016 + A1:2019:en. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 338 (2016). *Structural timber. Strength classes*. SFS-EN 338. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

Silva, D. A. L., Lahr, F. A. R., Varanda, L. D., Christoforo, A. L. ja Ometto, A. R. (2015). Environmental performance assessment of the melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin manufacture: a case study in Brazil. *Journal of Cleaner Production* 96. Integrating Cleaner Production into Sustainability Strategies, s. 299–307. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.007.

Spekreijse, J., Weide, T., Hageman, S. P., Reumerman, P., Wetter, C., Brügging, E. ja Vis, M. (2019). Life cycle assessment on a biorefinery approach to pyrolysis oil for wood modification treatment. eng. *Applied sciences* 9.20, s. 4233–. ISSN: 2076-3417.

Statens vegvesen (30. elokuuta 2021). *VegLCA v5.04*.

Trafikverket (2021). *Klimatkalkyl*. URL: https://klimatkalkyl-pub.ea.trafikverket.se/Klimatkalkyl/Modell (viitattu 10. 10. 2021).

Väylävirasto (12. toukokuuta 2021a). *Lahottajasienten aiheuttamat vauriot puusilloissa on kartoitettu*. Väylävirasto. URL: https://vayla.fi/-/lahottajasienten-aiheuttamat-vauriot-puusilloissa-on-kartoitettu (viitattu 10. 10. 2021).

– (2021b). *Taitorakennerekisteri*. URL: https://extranet.vayla.fi/trex/#/ (viitattu 01. 03. 2021).

– (2021c). *Taitorakenneyksikön konsulttipäivät. Suunnittelijat. Webinaari 22.4.2021*. Esitysmateriaali. Väylävirasto.

Vejdirektoratet ja Banedanmark (13. elokuuta 2021). *InfraLCA v1.51*.

Yang, M. ja Rosentrater, K. (kesäkuu 2020). Life Cycle Assessment of Urea-Formaldehyde Adhesive and Phenol-Formaldehyde Adhesives. *Environmental Processes* 7. DOI: 10.1007/s40710-020-00432-9.

Ympäristöministeriö (2021). *Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2021. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän ohjeen luonnos lausuntokierrosta varten 6/2021*. Ympäristöministeriön julkaisuja. Ympäristöministeriö.

LIITE A: TARKASTELTUJEN HANKKEIDEN SILTOJEN TIETOJA

Hanke: Luumäki-Imatra välinen kaksoisraide

Silta	Sillan nimi	Siltatyyppi	Kannen pituus [m] *etel.*	Kannen pituus [m] *pohj.*	Kokonaispituus [m] *etel.*	Kokonaispituus [m] *pohj.*
KaS-3261	Joutsenon eteläinen alikulkusilta	Tb jatkuva ulokekaukalopalkkisilta	49.00		55.50	
KaS-3262	Kesolantien alikulkusilta	Jännitetty betoninen ulokelaattasilta	25.50		32.60	
KaS-57	Vanhan valtatie 6 alikulkusilta	Jännitetty betoninen ulokekaukalopalkkisilta	27.50		35.50	
KaS-3460/KaS-3450	Rauhan aseman alikulkusillat	Betoninen laatakehäsilta	9.21	9.58	17.46	17.46
KaS-3601/KaS-3600	Rauhan alikulkusillat	Jännitetty betoninen ulokekaukalopalkkisilta	26.00	26.00	38.60	38.60
KaS-86/KaS-85	Poventsan alikulkusillat	Jännitetty betoninen ulokekaukalopalkkisilta	23.00	23.00	28.00	28.00
KaS-3269	Korvenkannantien alikulkusilta	Jännitetty betoninen jatkuva ulokekaukalopalkkisilta	34.50		41.00	
KaS-84	Asemäen alikulkusilta	Jännitetty betoninen ulokelaattasilta	41.62		48.60	
KaS-3302/KaS-3301	Tainionkosken alikulkusilta	Jännitetty betoninen ulokekaukalopalkkisilta	67.10	67.02	82.30	82.32
KaS-93	Mansikkakosken uusi ratasilta	Teräksinen jatkuva palkkisilta, teräsbetonikantinen, liittorakenteinen	218.40		232.15	
KaS-88/KaS-87	Vuoksenniskan alikulkusillat	Jännitetty betoninen ulokekaukalopalkkisilta	26.50	26.50	32.70	32.70
KaS-154	Sienimäen ylikäytäväsilta	Teräksinen ristikkosilta, puukantinen	32.40		43.62	
			580.73	581.02	688.03	688.05

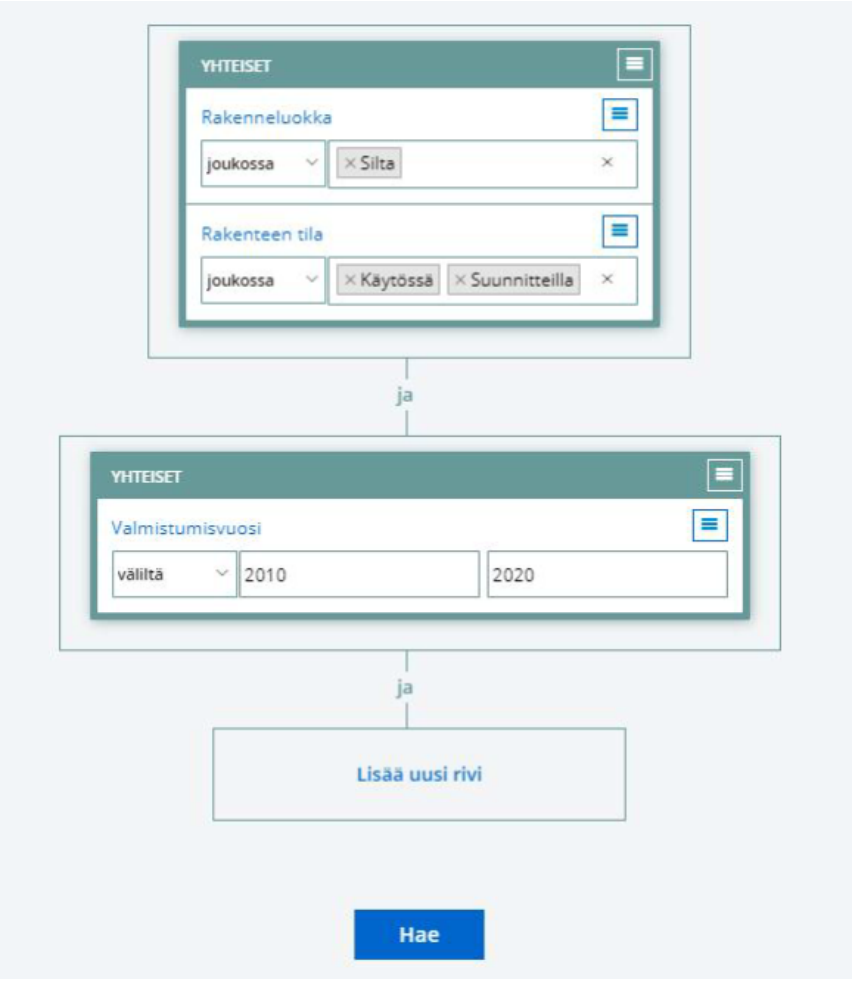
Hanke: Vt 12 LETKE, hankeosa 1B

Silta	Sillan nimi	Siltatyyppi	Kannen pituus [m] *etel.*	Kannen pituus [m] *pohj.*	Kokonaispituus [m] *etel.*	Kokonaispituus [m] *pohj.*
U-42/U-41	Kukonkosken sillat	Teräsbetoninen jatkuva ulokelaattasilta	46.25	46.25	53.20	54.20
U-77	Nikulan ramppisilta	Jännitetty betoninen jatkuva palkkisilta	69.20		76.60	
U-79	Nikulan risteyssilta	Jännitetty betoninen jatkuva ulokepalkkisilta	54.90		63.95	
U-39/U-38	Ali-Juhakkalan sillat	Teräsbetoninen jatkuva ulokelaattasilta	44.00	44.00	50.60	50.60
U-76	Porvoonjoentien alikulkukäytävä	Teräsbetoninen laattakehäsilta	6.11		6.11	
U-71	Paskurinojan silta	Teräsbetoninen holvisilta, elementtirakenteinen	8.94		18.25	
U-33	Ajokadun risteyssilta	Jännitetty betoninen jatkuva ulokepalkkisilta	56.50		64.63	
U-34	Huovilanmäen risteyssilta	Jännitetty betoninen jatkuva palkkisilta	97.70		109.00	
U-87	Kujalan risteyssilta	Jännitetty betoninen jatkuva palkkisilta	177.65		192.60	
U-35	Lotilan risteyssilta	Jännitetty betoninen jatkuva ulokepalkkisilta	60.50		69.20	
U-36	Pipon alikulkusilta	Jännitetty betoninen ulokekaukalopalkkisilta	28.00		35.00	
			649.75	649.75	739.14	740.14

Hanke: Vt 5 Nuutilanmäki - Vehmaa

Silta	Sillan nimi	Siltatyyppi	Kannen pituus [m]	Kokonais-pituus [m]
SK-24	Nuutilanmäen risteyssilta	Teräsbetoninen ulokelaattasilta	25.00	33.00
SK-1062	Pekurilan risteyssilta	Teräsbetoninen vinojalkainen laattakehäsilta	6.62	11.36
SK-1054	Kilpolankosken silta	Jännitetty betoninen jatkuva palkkisilta	59.20	65.26
SK-16	Luikujärven risteyssilta	Teräsbetoninen vinojalkainen laattakehäsilta	6.58	13.70
SK-1056	Kilpolan risteyssilta	Teräsbetoninen ulokelaattasilta	25.00	33.00
SK-1063	Parkasentien risteyssilta	Teräsbetoninen vinojalkainen laattakehäsilta	6.62	11.36
SK-1064	Häkkiläntien risteyssilta	Teräsbetoninen vinojalkainen laattakehäsilta	6.62	10.44
SK-1050	Pöllän risteyssilta	Teräsbetoninen ulokelaattasilta	25.00	33.00
SK-22	Taskilan risteyssilta	Teräsbetoninen vinojalkainen laattakehäsilta	6.58	13.70
SK-27	Hatsolan risteyssilta	Jännitetty betoninen jatkuva palkkisilta	56.70	63.00
SK-1060	Raviradan risteyssilta	Teräsbetoninen vinojalkainen laattakehäsilta	6.62	11.36
SK-1049	Myllyjoen vesistösilta	Teräsbetoninen ulokelaattasilta	18.00	25.00
			248.54	324.18

LIITE B: TAITORAKENNEREKISTERISTÄ HAETUT SILTOJEN MÄÄRÄT



Kuva B.1. *Käytetyt hakuehdot*

Tilastointi

2 385 HAKUTULOSTA

PYSTYAKSELI:	VAAKA-AKSELI:	RYHMITTELY:	FUNKTIO:
Valmistumisvuosi	Päärakennusmateriaali	ei valintaa	Lukumäärä
1			

Tyhjennä valinnat

	Jännitetty b...	Kivi	Liimattu puu	Muovi	Puu	Teräs	Teräsbetoni	Ei arvoa	Yhteensä
2010	42		8		8	87	101	4	**250**
2011	44		11		5	102	98	1	**260**
2012	37		4	1	2	66	84	1	**194**
2013	57		6		2	72	79	3	**218**
2014	49		4		1	67	84	0	**204**
2015	55		1	1		66	83	3	**209**
2016	25		12	1	3	78	81	1	**201**
2017	42		6	1	6	66	43	12	**176**
2018	22		5		7	51	63	13	**161**
2019	28	3	4	2	56	87	83	10	**273**
2020	47		6		1	107	74	4	**239**
Ei arvoa								**0**	**0**
Yhteensä	**448**	**3**	**67**	**6**	**91**	**849**	**873**	**52**	**2 385**

Tilastointi

2 385 HAKUTULOSTA

PYSTYAKSELI:	VAAKA-AKSELI:	RYHMITTELY:	FUNKTIO:
Valmistumisvuosi	Päärakennusmateriaali	ei valintaa	Summa
1			Kokonaispinta-ala (m2)

Tyhjennä valinnat

	Jännitetty b...	Kivi	Liimattu puu	Muovi	Puu	Teräs	Teräsbetoni	Ei arvoa	Yhteensä
2010	22 940		354		110	9 354	41 124	43	**73 925**
2011	36 091		1 083		82	23 188	38 980	0	**99 360**
2012	25 834		373	0	3	4 118	31 552	0	**61 412**
2013	36 869		881		663	4 239	24 492	16	**66 728**
2014	35 786		639		0	8 195	34 104	0	**76 468**
2015	44 409		439	42		3 620	31 464	75	**80 050**
2016	27 343		522	17	221	5 893	35 084	153	**69 233**
2017	27 002		508	0	82	2 853	10 788	800	**42 031**
2018	12 534		542		114	23 589	24 810	255	**61 845**
2019	36 209	0	512	5	1 721	10 954	27 765	1 118	**78 283**
2020	39 095		837		0	14 657	27 826	205	**82 621**
Ei arvoa								**0**	**0**
Yhteensä	**344 112**	**0**	**6 690**	**63**	**2 995**	**110 660**	**327 989**	**2 664**	**791 957**

Sillat 2010-2020 ELY-keskuksittain

Rataverkko

	Jännitetty betoni	Liimattu puu	Teräs	Teräsbetoni	NA	Yht.
POP	1				0	1
UUD					1	1
NA	118	1	67	122	8	314
Yht.	119	1	67	122	9	316

Tieverkko

	Jännitetty betoni	Liimattu puu	Muovi	Puu	Teräs	Teräsbetoni	Ei arvoa	Yht.
EPO	14				85	36	0	135
KAS	28	4			42	74	1	149
KES	9				28	25	0	62
LAP	16	3			28	43	0	90
PIR	8	3			29	17	0	57
POP	12	1			57	46	0	116
POS	27	3			132	84	2	248
UUD	35		1		99	116	3	254
VAR	27	3			109	46	4	189
NA	67	11	1	4	54	109	16	260
Yht.	243	28	2	4	663	596	26	1 560

Vesiväylät

	Teräs	Ei arvoa	Yht.
POS	1	0	1
Ei arvoa		0	0
Yht.	1	0	1

Yhteensä

	Jännitetty betoni	Liimattu puu	Muovi	Puu	Teräs	Teräsbetoni	NA	Yht.
EPO	14				85	36	0	135
KAS	28	4			42	74	1	149
KES	10				30	25	0	65
LAP	16	3			28	43	0	90
PIR	8	3			29	17	0	57
POP	13	1			57	46	0	117
POS	29	3			135	88	3	258
UUS	35		1		100	116	4	256
VAR	27	3			109	46	4	189
NA	253	48	3	84	212	360	65	1 021
Yht.	433	65	4	84	827	851	77	2 337

LIITE C: INFRABETONIEN MUKAISTEN SEOSAINEOSUUKSIEN VAIKUTUS SIDEAINEEN VALMISTUSPÄÄSTÖIHIN

Taulukko C.1. *Seosaineen sallittu osuus huomioitavan sideaineen määrästä (SFS-EN 206 2021; Väylävirasto 2020a)*

Vaatimus		Seosaineen sallittu osuus huomioitavan sideaineen määrästä		
		masuunikuona	lentotuhka	silika
SFS-EN 206 + SFS 7022	CEM I	50%	25%	11%
	CEM II/A	50%	20%	11%
Infrabetoni - huokostettu	v/s <0,35	50%	25%	5%
	v/s >0,35	50%	25%	7%
Infrabetoni - huokostamaton	v/s <0,35	70%	25%	5%
	v/s >0,35	70%	25%	7%

Taulukko C.2. *Infrabetonien suurimpien seosaineosuuksien vaikutus sideaineen valmistuspäästöihin ja massaan.*

	GWP A1...A3	Sideaineen massa	CEM I	FA	GFBS
	[CO_2e-kg]	[kg]	[kg]	[kg]	
100 % CEM	272	350.0	350.0	0.0	0.0
50 % CEM + 25 % FA	240	411.8	308.8	102.9	0.0
50 % CEM + 50 % GFBS	162	388.9	194.4	0.0	194.4
50 % CEM + 25 % FA + 25 % GFBS	172	432.6	213.9	109.4	109.4
30 % CEM + 70 % GFBS	110	407.0	122.1	0.0	284.9
30 % CEM + 25 % FA + 45 % GFBS	119	460.5	138.2	115.1	207.2
Päästökerroin	[CO_2e-kg/kg]		0.776	0.002	0.055
k-kerroin			1.0	0.4	0.8