



Väylävirasto
Trafikledsverket

Väyläviraston julkaisu
76/2022

Siltojen ilmastopäästöistä

Sillanrakentamisen ja materiaalien
päästöjen muodostuminen ja
yksiaukkoisen sillan case-tarkastelu



Katariina Martikkala, Kasper Pirttikoski

Siltojen ilmastopäästöistä

Sillanrakentamisen ja materiaalien päästöjen muodostuminen ja
yksiaukkoisen sillan case-tarkastelu

Väyläviraston julkaisuja 76/2022

Kannen kuva: Ramboll Finland Oy

Verkkajulkaisu pdf (www.vayla.fi)

ISSN 2490-0745

ISBN 978-952-405-026-5

Väylävirasto
PL 33
00521 HELSINKI
puh. 0295 343 000

Katariina Martikkala, Kasper Pirttikoski: Siltojen ilmastopäästöistä - Sillanrakentamisen ja materiaalien päästöjen muodostuminen ja yksiaukkoisen sillan case-tarkastelu. Väylävirasto Helsinki 2022. Väyläviraston julkaisuja 76/2022. 77 sivua ja 1 liite. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-405-026-5.

Avainsanat: sillanrakennus, LCA, elinkaariarviointi, päästölaskenta, ilmastopäästöt, kasvihuonekaasut, hiilidioksidiekvivalentti, hiilidioksidi, betoni, teräs, puu

Tiivistelmä

Ihmisen aiheuttama ilmastomuutos tulee muuttamaan elinolosuhteita ympäri maapalloa. Nykyään puhutaankin ilmastomuutoksen hillitsemisestä ja toisaalta siihen varautumisesta. Euroopan Unioni on asettanut tavoitteeksi hiilineutraaliuden vuoteen 2050 mennessä. Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Myös muilla Pohjoismailla on vastaavia, EU:ta kunnianhimoisempia tavoitteita. Asetetut tavoitteet aiheuttavat tarpeen vähentää päästöjä kaikilla sektoreilla. Tämä julkaisu perustuu kahteen Väyläviraston 2021-2022 teettämään lopputyöhön siltojen kasvihuonekaasupäästöistä.

Siltojen osuudesta väyläinfrastruktuurin kokonaispäästöistä ei ole Suomessa tehty selvityksiä. Luvussa 2 neljän hankkeen pohjalta voidaan todeta, että tällainen tarkastelu olisi mahdollista tuottaa joko takautuvasti määräluetteloiden pohjalta tai teettämällä elinkaariarvioinnit useammassa hankkeessa. Päästöjen ennakkointia varten esitetään käytettäväksi parametreja siltatiheys ja siltojen pituuden osuus hankeosan kokonaispituudesta.

Pohjoismaissa rakennushankkeiden elinkaaren hiilijalanjäljen laskenta perustuu CEN/TC 350:n eurooppalaiseen standardeihin. Standardit päivittyvät lähivuosina, joten laskenta- ja allokointiperiaatteiden muutoksiin on varauduttava. Elinkaariarvioinnissa yleensä käytettävä panospohjainen laskenta on pääpiirteissään helppoa: panoksia kerrotaan niiden ominaispäästökertoimilla. Epävarmuuksia liittyy kuitenkin esimerkiksi tarkasteltaviin moduuleihin ja käytettäviin ominaispäästökertoimiin.

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

Luvussa 3 analysoidaan sillanrakennuksessa käytettävien materiaalien ilmastovaiikutuksia 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.

Luvussa 4 esitellyn tutkimuksen tavoite oli vertailla neljän päärakennusmateriaalitaan erilaisen yksiaukkoisen sillan kasvihuonekaasupäästöjä koko elinkaaren aikana. Tutkimuksessa pyrittiin myös vertailemaan siltojen rakentamisen kasvihuonekaasupäästöjä ja suhteuttamaan ne koko elinkaaren aikana aiheutuviin päästöi-

hin. Tutkimus toteutettiin kvantitatiivisena tutkimuksena elinkaarianalyysia hyödyntäen. Tutkimusta varten selvitettiin ensin sillanrakennusmateriaalien valmistuksen, kuljetuksen ja työstämisen aiheuttamat päästöt ja tämän jälkeen laskettiin siltojen määräluetteloiden perusteella siltojen kasvihuonekaasupäästöt. Elinkaari-päästöihin arvioitiin kullekin siltatyypille tyypilliset korjaustoimenpiteet ja laskettiin näiden kasvihuonekaasupäästöt.

Vertailtavat siltatyypit olivat liimapuinen palkkisilta, liimapuinen laattasilta, liittorakenteinen teräksinen palkkisilta ja teräsbetoninen laattasilta. Siltojen kasvihuonekaasupäästöt olivat suurimmat, kun käytettiin päästöintensiivisiä rakennusmateriaaleja terästä ja betonia. Rakentamisvaiheessa suuripäästöisimmän betonisen laattasilan ilmastopäästöt olivat 2,4-kertaiset verrattuna vähäpäästöisimpään liimapuiseen palkkisiltaan. Toiseksi eniten päästöjä syntyi liittorakenteisen teräspalkkisillan ja kolmanneksi eniten liimapuisen laattasilan rakentamisesta. Kun tarkasteltiin sillan koko elinkaarta, ero suuripäästöisimmän ja vähäpäästöisimmän sillan välillä pieneni noin 1,6-kertaiseksi, mutta siltojen keskinäinen järjestys pysyi kuitenkin samana.

Kun halutaan saada tarkka käsitys sillan todellisista ilmastopäästöistä kokonaisuudessaan, on syytä tarkastella sillan koko elinkaarta. Elinkaarianalyysin luotettavuutta heikentää esimerkiksi päästöjen kehityksen arvioinnin vaikeus, sillä myös sillanrakentamisen materiaali- ja työpanosten päästöt tulevat tulevaisuudessa oletettavasti pienenemään erilaisten kehityshankkeiden myötä. Myös tarvittavien korjaustoimenpiteiden lukumäärän ja laajuuden ennustaminen heikentää arvioinnin luotettavuutta.

Sillanrakentamisen ilmastopäästöjä on syytä tutkia lisää. Tässä raportoiduissa lopputöissä havaittiin eri materiaaleista tehtyjen siltojen elinkaaren vaiheita, joista ei ole vielä tehty tarkempia selvityksiä. Havaitut elinkaaren vaiheet koskivat pääosin rakentamisvaihetta. Myös monia laajempia tutkimuskohteita löydettiin, esimerkiksi geopolymeerikomposiittien ja puupaalujen käyttö sillanrakentamisessa. Niitä voitaisiin lähteä selvittämään esimerkiksi yhteistyössä muiden pohjoismaisten väyläviranomaisten kanssa.

Katariina Martikkala, Kasper Pirttikoski: Om klimatutsläpp från broar - Bildande av utsläpp från brobyggande och material och case-granskning av en bro med en öppning. Trafikledsverket. Helsingfors 2022. Trafikledsverkets publikationer 76/2022. 77 sidor och 1 bilaga. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-405-026-5.

Sammanfattning

Klimatförändringen som orsakats av människan kommer att förändra levnadsförhållandena runt om i världen. Nuförtiden talar man om att begränsa klimatförändringen och å andra sidan om att förbereda sig för den. Europeiska unionen har ställt som mål att vara koldioxidneutralt före utgången av 2050. Finlands mål är att vara koldioxidneutralt före utgången av 2035. Även de övriga nordiska länderna har motsvarande mål som är mer ambitiösa än EU:s. De uppställda målen medför ett behov av att minska utsläppen inom alla sektorer. Denna publikation grundar sig på två slutarbeten som Trafikledsverket låtit utföra 2021–2022 om växthusgasutsläpp från broar.

I Finland har inga utredningar gjorts om broarnas andel av de totala utsläppen från trafikledsinfrastrukturen. I kapitel 2 kan man utifrån fyra projekt konstatera att en sådan granskning kan genomföras antingen retroaktivt utifrån mängdförteckningar eller genom att låta göra livscykelbedömningar i flera projekt. För prognostiseringen av utsläppen föreslås att man använder parametrar för brotätheten och broarnas andel av projektdelens totala längd.

I Norden grundar sig beräkningen av koldioxidavtrycket under byggprojektens livscykel på de europeiska standarderna i CEN/TC 350. Standarderna uppdateras under de kommande åren, så man måste vara beredd på ändringar i beräknings- och allokeringsprinciperna. Den insatsbaserade beräkning som vanligen används i livscykelbedömningen är i stora drag enkel: insatserna multipliceras med deras specifika utsläppskoefficienter. Det finns dock osäkerhetsfaktorer till exempel i fråga om de moduler som granskas och de specifika utsläppskoefficienter som används.

De nordiska trafikledsmyndigheterna bedriver mycket samarbete för att undersöka beräkningen av koldioxidavtrycket och livscykelbedömningen. De bedömningsmetoder som används eller införs i länderna är också sinsemellan likartade, men de livscykelmoduler som ingår i granskningen varierar från land till land. I Sverige fastställs till exempel en utsläppsgräns för infrastrukturprojekt på över 50 miljoner kronor som inte får överskridas. För underskridning av gränsen betalas en stegvis bonus.

I kapitel 3 analyseras splittrade forskningsdata om klimatkonsekvenserna av material som används i brobyggnad. Denna data har delvis producerats av industrin. På ett allmänt plan granskas dessutom utsläpp från byggande och transporter som det finns skäl att göra en egen utredning om. De bärande materialen i betong, stål och träkonstruktioner behandlas separat mer ingående. Inget material kan sägas ha mindre utsläpp än andra, utan jämförelsen ska göras mellan motsvarande strukturer.

Målet med undersökningen som presenterades i kapitel 4 var att jämföra växthusgasutsläppen under hela livscykeln från fyra broar med en öppning som hade byggts med olika huvudbyggnadsmaterial. I undersökningen strävade man också

efter att jämföra växthusgasutsläppen från brobygget och ställa dem i relation till utsläppen under hela livscykeln. Undersökningen genomfördes som kvantitativ undersökning med hjälp av livscykelanalys. För undersökningen utreddes först utsläppen från tillverkning, transport och bearbetning av bromaterial och därefter beräknades växthusgasutsläppen från broarna utifrån mängdförteckningarna. För livscykelutsläppen uppskattades reparationsåtgärder som är typiska för varje brotyp och växthusgasutsläppen från dessa åtgärder beräknades.

Brotyperna som jämfördes var balkbro av limträ, plattbro av limträ, balkbro av stål med samverkanskonstruktion, och plattbro i armerad betong. Broarnas växthusgasutsläpp var störst när man använde utsläppsintensiva byggnadsmaterial av stål och betong. I byggskedet var klimatutsläppen från den plattbro i betong som hade de högsta utsläppen 2,4 gånger större än utsläppen från den balkbro i limträ som hade de lägsta utsläppen. Näst mest utsläpp uppstod vid byggandet av en balkbro av stål med samverkanskonstruktion och tredje mest vid byggandet av en plattbro i limträ. När man granskade bronns hela livscykel minskade skillnaden mellan broarna med största och minsta utsläpp cirka 1,6 gånger, men den inbördes ordningen mellan broarna förblev ändå oförändrad.

När man vill få en exakt uppfattning om bronns verkliga klimatutsläpp i sin helhet är det skäl att granska bronns hela livscykel. Livscykelanalysens tillförlitlighet försämras till exempel av svårigheten att bedöma utsläppsutvecklingen, eftersom även utsläppen från material- och arbetsinsatserna för brobyggande sannolikt kommer att minska i framtiden i och med olika utvecklingsprojekt. Även prognostiseringen av antalet nödvändiga reparationsåtgärder och deras omfattning försämrar bedömningens tillförlitlighet.

Klimatutsläppen från brobyggande bör undersökas ytterligare. I de här rapporterade slutarbetena observerades olika skeden i livscykeln för broar av olika material, som ännu inte har utretts närmare. De observerade skedena under livscykeln gällde i huvudsak byggnadsskedet. Man hittade också många mer omfattande undersökningsobjekt, till exempel användning av geopolymerkompositer och träpålar vid brobyggande. Dessa kunde man börja utreda till exempel i samarbete med de övriga nordiska trafikledsmyndigheterna.

Katariina Martikkala, Kasper Pirttikoski: Climate emissions from bridges - Emissions generated by bridge construction and the construction materials used and case study of a single-span bridge. Finnish Transport Infrastructure Agency Helsinki 2022. Publications of the FTIA 76/2022. 77 pages and 1 appendix. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-405-026-5.

Abstract

Human-induced climate change will change living conditions around the globe. In fact, we are now talking about mitigating climate change and about preparing for climate change. The European Union has set the goal of becoming carbon neutral by the year 2050. Finland's goal is to be carbon neutral by the year 2035. Other Nordic countries also have similar targets, which are more ambitious than those set by the EU. These targets mean that there is a need to reduce emissions in all sectors of society. This publication is based on two theses on greenhouse gas emissions from bridges commissioned by the Finnish Transport Infrastructure Agency in 2021 and 2022.

No studies have been produced in Finland on how much of the emissions generated by transport infrastructure comes from bridges. Using four projects as a basis, it is concluded in Chapter 2 that such a study could be produced retrospectively on the basis of the bill of quantities or by commissioning life cycle assessments of several projects. Bridge density and the proportion of the bridge lengths in relation to the total length of the project part are proposed as parameters for forecasting emissions.

In the Nordic countries, carbon footprint of the life cycle of construction projects is based on the European standards prepared by CEN/TC 350. As the standards will be updated in the next few years, preparations must be made for changes in the calculation and allocation principles. The input-based calculation normally used in life cycle assessment is fairly straightforward: inputs are multiplied by their specific emission factors. However, there are uncertainties concerning such matters as the modules examined and the specific emission factors used.

Nordic transport infrastructure authorities cooperate extensively in the research on carbon footprint calculation and life cycle assessment. The assessment methods currently used or in the process of being introduced in Nordic countries are also similar but there are differences between the countries in the life cycle modules included in the studies. In Sweden, for example, an emission limit has been set for infrastructure projects with a value of more than SEK 50 million and this limit may not be exceeded. A phased bonus is paid if the project remains within the limit.

Fragmented research data on the climate impacts of materials used in bridge construction is analysed in Chapter 3. The data is partially produced by companies operating in the sector. In addition, emissions from construction and transport are also examined at general level. A separate report on these emissions is needed. Load-bearing materials used in concrete, steel and timber structures are examined in more detail as main materials. It would be incorrect to claim that any specific material generates particularly low emissions, as the comparisons should be made between similar structures.

The purpose of the study presented in Chapter 4 was to compare the life-cycle greenhouse gas emissions from four single-span bridges built of different main materials. The aim was also to compare the greenhouse gas emissions from the construction of the bridges and to relate them to the emissions generated over the entire life cycle. The study was carried out as a quantitative study based on life cycle analysis. The emissions from the manufacture, transport and processing of the bridge construction materials were examined first after which the greenhouse gas emissions from the bridges were calculated on the basis of the bill of quantities of the bridges. The repairs typically required by each bridge type were incorporated in the life cycle emissions after which the greenhouse gas emissions from the repairs were calculated.

The bridge types used in the comparison were as follows: glulam girder bridge, glulam slab bridge, composite steel girder bridge and reinforced concrete slab bridge. The greenhouse gas emissions were highest when emissions-intensive construction materials (steel and concrete) were used. During the construction stage, the climate emissions from the concrete slab bridge (highest-emission bridge) were 2.4 times higher than the emissions from the glulam girder bridge (lowest-emission bridge). The composite steel girder bridge was second highest in terms of emissions, followed by the glulam slab bridge. When the entire life cycle of the bridge was examined, the emissions from the highest-emission bridge were about 1.6 times higher than the emissions from the lowest-emission bridge. However, the order of the bridges remained unchanged.

The entire life cycle of the bridge should be examined if the aim is to obtain an accurate picture of its actual overall climate emissions. The reliability of the life cycle analysis is weakened by such factors as the difficulty of assessing future emissions as the emissions from material and labour inputs in bridge construction are expected to decrease as a result of development projects. Forecasting the frequency and extent of the necessary repairs also makes the assessment less reliable.

More studies on climate emissions from bridge construction are needed. It was concluded in the theses described here that bridges made of different materials have life cycle phases that have not yet been studied in great detail. These life cycle phases mainly concern the construction stage. More extensive research areas were also identified, such as the use of geopolymers and timber piles in bridge construction. They could be studied in cooperation with other Nordic transport infrastructure authorities.

Esipuhe

Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Rakennettu ympäristö on merkittävä päästöjen aiheuttaja. Väyläviraston osalta tavoitteen saavuttaminen koskee liikenteen päästöjen lisäksi väylien rakentamisesta ja ylläpidosta aiheutuvia päästöjä. Maaliikenteen päästöistä noin 5...10 prosenttia aiheutuu infrastruktuurin rakentamisesta ja ylläpidosta. Siltojen ja muiden taitorakenteiden päästöjen vähentämisessä on erityisen tärkeää huomioida pitkän suunnittelukäytöiden edellyttämät säilyvyys- ja kantavuusvaatimukset.

Väylävirasto teetti aiheeseen liittyen kaksi lopputyötä Ramboll Finland Oy:ssä. Kasper Pirttikosken diplomityö käsitteli päästölaskennan tilaa Pohjoismaissa, aihepiiriin liittyviä eurooppalaisia standardeja sekä betonin, teräksen ja puun päästöjen muodostumista ja keinoja niiden vähentämiseksi. Katariina Martikkalan YAMK-opinnäytetyössä tutkittiin eri rakennusmateriaaleista rakennettujen yksiaukkoisten siltojen elinkaaripäästöjä.

Tämän työn kirjoittivat lopputöiden tekijät Katariina Martikkala ja Kasper Pirttikoski. Julkaisun ohjausryhmässä toimivat Markku Äijälä, Timo Tirkkonen, Mika Lemmetyinen ja Karoliina Saarniaho Väylävirastosta sekä Matti Airaksinen Ramboll Finland Oy:stä.

Helsingissä joulukuussa 2022

Väylävirasto
Taitorakenneyksikkö

Sisältö

1	JOHDANTO.....	12
1.1	Taustaa.....	12
1.2	Liittyvät julkaisut.....	13
1.3	Tutkimusten tavoitteet ja sisältö	15
1.4	Sanasto	16
2	PÄÄSTÖLASKENNAN NYKYTILANNE	20
2.1	Standardit ja ohjeet	20
2.1.1	Kestävän rakentamisen EN-standardit	20
2.1.2	Informaatiomoduulit.....	21
2.1.3	Elinkaariarvioinnin käsitteistö	24
2.1.4	Ympäristöselosteet.....	26
2.1.5	Tiedon laatu	27
2.1.6	Ohjeet.....	28
2.2	Päästölaskenta.....	28
2.2.1	Hiilijalanjälki ja -kädenjälki.....	28
2.2.2	Laskentaprosessi.....	30
2.2.3	Päästökerrointen ja -arvioinnin luotettavuus	32
2.2.4	Tulevaisuuden ennustamisen epävarmuudet.....	33
2.3	Nykytilanne Pohjoismaissa	33
2.3.1	Ilmastopäästöt- ja tavoitteet.....	33
2.3.2	Pohjoismainen yhteistyö	35
2.3.3	Väyläviranomaisten työkalut ja tietokannat	36
2.4	Siltojen osuus väylähankkeen päästöistä	37
2.5	Siltojen neliöpäästöt koko elinkaarelle aiemmissa tutkimuksissa	42
3	SILTOJEN ELINKAAREN AIKAISET ILMASTOVAIKUTUKSET	43
3.1	Sillan elinkaari.....	43
3.1.1	Toimenpiteet keskimääräisen elinkaaren aikana	43
3.2	Materiaalien vaikutus päästöihin.....	45
3.2.1	Materiaalien vertailusta.....	45
3.2.2	Betoni	47
3.2.3	Teräs.....	50
3.2.4	Puu	51
3.2.5	Päästövähennykset päästölaskennassa	53
4	CASE: YKSIAUKKOINEN MAANTIESILTA	57
4.1	Tarkastelun reunaehdot.....	57
4.1.1	Tavoitteet.....	57
4.1.2	Tarkasteluperusteet ja rajaukset	57
4.2	Valitut sillat.....	58
4.2.1	Liimapuinen palkkisilta ja laattasilta.....	59
4.2.2	Teräsbetoninen laattasilta	60
4.2.3	Teräksinen palkkisilta, liittorakenteinen.....	61
4.3	Elinkaaripäästöjen vertailu	62
4.4	Materiaalipäästöjen kehityksen vaikutus tuloksiin	64
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	66
5.1	Nykytilanne	66
5.2	Materiaalien vertailusta.....	67

5.3	Siltojen vertailusta	68
5.4	Jatkotutkimustarpeet.....	69

LÄHDELUETTELO.....	71
--------------------	----

LIITTEET

Liite 1	Käytetyt päästökertoimet
---------	--------------------------

1 Johdanto

1.1 Taustaa

Euroopan Unioni on asettanut tavoitteeksi hiilineutraaliuden vuoteen 2050 mennessä /1/. Suomi on valtiona pyrkimässä hiilineutraaliuteen vuoteen 2035 mennessä /2/. Suomen tavoite asettaa haasteita kaikille sektoreille riippumatta siitä, mikä sektori aiheuttaa eniten päästöjä. Siltojen hiilidioksidipäästöjen laskeminen infra- tai sillanrakennushankkeessa ei ole ollut Suomessa pakollista. Laskentoja on tehty pilottiprojekteissa muiden tarkastelujen tueksi, mutta normaaliprosessiin laskenta ei kuulu vuoden 2022 alussa.

Yleisesti puhutaan erityisesti hiilidioksidin vaikutuksista, vaikka myös monet muut yhdisteet vauhdittavat kasvihuoneilmiötä merkittävästi. Usein eri kasvihuonekaasut muunnetaan vastaavaksi hiilidioksidimääräksi, jolloin puhutaan *hiilidioksidiekvivalenteista* päästöistä (CO₂e-kg, CO₂e-tn) tai kasvihuonekaasupäästöistä (khk, ghg) /3/ (Arias et al. 2021). Nykyisin EN-standardeissa käytetään termiä ilmastonlämmityspotentiaali GWP /4/.

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, min-kälaiset 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 suuremaksi keskilämpötila nousee, sitä suurempia vaikutukset ovat. Ilmaston lämpenemisen rajaaminen 1,5 °C on Pariisin ilmastosopimuksen mukaisesti kansainvälinen tavoitetaso /5/. Tavoitteen saavuttaminen edellyttää uusia toimintatapoja kaikilla yhteiskunnan sektoreilla.

Erikoisraportti on osa IPCC:n kuudetta arviointiraporttia. Arviointiraportti koostuu neljästä erikois- ja menetelmäraportista, kolmesta osaraportista ja yhteenvetoreportista, jotka on julkaistu vuosina 2018-2022. Ensimmäinen osaraportti julkaistiin vuonna 2021, ja se käsittelee ilmastonmuutoksen luonnontieteellistä taustaa. Keväällä 2022 julkaistu toinen osaraportti käsittelee ilmastonmuutoksen vaikutuksia ja niihin sopeutumista. Keväällä 2022 julkaistu kolmas osaraportti käsittelee ilmastonmuutoksen hillitsemistä. Yhteenvetona raporteista voidaan todeta, että toimilla ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi on jo kova kiire. Suuria päästövähennyksiä pitää tapahtua jo seuraavan vuosikymmenen aikana /6/.

Kestävässä rakentamisessa otetaan huomioon perinteisten teknisten, toiminnallisten ja taloudellisten vaatimusten lisäksi ympäristö- ja sosiaaliset vaikutukset. Huomioon otettaviin ympäristövaikutuksiin luetaan kasvihuonekaasujen lisäksi esimerkiksi materiaalivarantojen hupeneminen ja ympäristön saastuminen /7/. Tästä seuraa, että esimerkiksi ilmaston kannalta vähäpäästöinen materiaali ei välttämättä pärjää vertailussa muilla indikaattoreilla, esimerkiksi uusiutumattomien luonnonvarojen ehtymisen osalta.

Uuteen rakentamislakiin on tulossa velvoite arvioida rakennusten vähähiilisyttä. Rakennuksen hiilijalanjälki todennetaan jatkossa osana normaalia rakennusluoprosessia. Ympäristöministeriö on laatinut arviointimenetelmän ja suosituksen

vähähiilisen rakennuksen hankintakriteereistä /8/. Vastaavan käytännön soveltamisesta infra-alalle ei ole vielä tehty lopullisia päätöksiä.

Suomessa rakennusalan kasvihuonekaasupäästöt ovat /10/ mukaan noin 35 % koko maan päästöistä ja vastaavaasti 40 % energiankulutuksesta. Rakennusteollisuus ry:n 2020 teettämän selvityksen /14/ mukaan rakennetun ympäristön vuosittainen hiilijalanjälki on 17 092 CO₂e-kt, mikä on noin 30 % Suomen kokonaispäästöistä. Hiilijalanjälki ei sisällä rakentamisen ulkopuolisia liikennesuoritteita. Hiilijalanjäljestä materiaalien ja työmaatoimintojen osuus on 4 085 CO₂e-kt eli 24 % /14/. Selvityksen /14/ materiaalmäärät ovat teollisuuden arvioita.

Liikenneviraston selvityksen /11/ (2012) mukaan liikenneverkon vuosittaisista 11 773 CO₂e-kt päästöistä infrastruktuurin osuus on 803 CO₂e-kt eli 6,8 prosenttia. Liikenneverkkojen rakentamisen materiaalipäästöjen osuudeksi rakennetun ympäristön päästöistä on /14/ arvioitu 434 CO₂e-kt eli 2,5 prosenttia. Päästöistä valtaosa, 356 CO₂e-kt, aiheutuu betonista. Kun huomioon otetaan kuljetus- ja työmaatoimintojen selvityksessä arvioidut päästöt, on liikenneverkkojen osuus rakennetun ympäristön päästöistä 1 035 CO₂e-kt eli 6,1 prosenttia /14/.

Siltojen osuutta liikenneverkkojen päästöistä ei ole erikseen arvioitu. Kivikon eritasoliittymän /12/ ja Pissararadan /13/ päästöselvityksissä rakentamisvaiheen päästöjä arvioitiin suhteessa investointihintaan. Kivikon eritasoliittymään rakennettiin seitsemän siltaa, joista aiheutui rakentamisvaiheessa päästöjä noin 2,9 CO₂e-kt, mikä vastasi noin neljännestä hankkeen investointipäästöistä.

Väyläviraston tavoite on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Jotta tavoitteeseen voidaan päästä, on viraston tiedettävä tarkasti mistä sen toiminoista aiheutuu hiilidioksidipäästöjä. Väyläviraston omistuksessa oli vuoden 2021 lopussa 15 117 tiesiltaa ja 2506 rautatieverkon siltaa /9/. Siltojen pääarakennusmateriaaleja ovat betoni, teräs ja puu. Puu on rakennusmateriaalina betonia ja terästä kevyempi, mutta jotta sitä voidaan käyttää sillanrakennusmateriaalina, se on painekyllästettävä, mikä lisää materiaalin päästöjä. Tutkimuksia erilaisen kansirakenteen vaikutuksesta sillan koko elinkaaren päästöihin on tehty vasta vähän, ja silta-tyypin valinta tehdään nykyisen hankintaprosessin mukaan käyttötarkoitus-, ulkonäkö- tai kustannusperusteisesti.

Jotta kasvihuonekaasupäästöjä voidaan pienentää, on tärkeää tietää päästöjen määrä ja tunnistaa merkittävimmät päästölähteet jo varhaisissa suunnitteluvaiheissa. Kestävän rakentamisen yhteiseurooppalaiset standardit laatii eurooppalaisen standardointijärjestö CEN:n tekninen komitea TC 350 Sustainability of construction works /7/. Yhteneväisesti saman standardin mukaisesti tehdyillä LCA-laskelmilla voidaan keskenään vaihtoehtoisia ratkaisuja vertailla teknisten ja taloudellisten mittarien lisäksi myös ilmastonmuutoksen kannalta. Vertailua voidaan standardeja noudattavien menetelmien ja kansallisten valintojen mukaisesti tehtyjen LCA-raporttien pohjalta hyödyntää tasapuolisesti myös julkisissa hankinnoissa.

1.2 Liittyvät julkaisut

Tämä julkaisu perustuu kahteen Väylävirastolle Ramboll Finland Oy:ssä 2021–2022 tehtyyn lopputyöhön.

Katariina Martikkalan opinnäytetyö (YAMK) *Siltojen elinkaaripäästöjen vertailu siltatyypeittäin. Tarkastelujaksona 100 vuoden käyttöikä* /15/ on tehty Tampereen

ammattikorkeakoulussa. Tutkimuksessa tuotettiin tietoa siitä, millaisia hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä yksiaukkoisen sillan rakentamisesta aiheutuu sillan koko elinkaaren aikana. Tutkimuksessa pyrittiin myös vertailemaan keskenään siltojen rakentamispäästöjä ja suhteuttamaan ne koko elinkaaren aikana aiheutuviin päästöihin.

Opinnäytetyö on saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202202252885>.

Kasper Pirttikosken diplomityö *Rakennusmateriaalien vaikutukset sillan ilmasto- ja päästöjen laskennassa* /16/ on tehty Tampereen yliopistossa. Diplomityössä koottiin tilannekuvaa Pohjoismaisista käytännöistä siltojen päästölaskennassa sekä rakennusmateriaalien tyypillisistä päästöistä ja niiden vähennyspotentiaalista.

Diplomityö on saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202203222663>.

Siltojen ja siltoihin liittyvien infrarakenteiden päästöjä on käsitelty mm. seuraavissa viime vuosina ilmestyneissä Väyläviraston julkaisuissa:

- 37/2019: *Ympäristönäkökulmat väylänpidon hankinnoissa – Esiselvitys*
- 47/2019: *Infran ja väylänpidon vaikutus liikenteen kasvihuonekaasupäästöihin – Tilannekatsaus*
- 49/2019: *Ilmastonmuutos ja kestävä kehitys Väyläviraston toiminnassa*
- 50/2019: *Väylänpidon hiilijalanjälki ja sen laskeminen*
- 1/2020: *Energiankulutusta ja kasvihuonepäästöjä vähentävien vaatimusten kehittäminen päällystehankinnoissa*
- 13/2020: *CO₂-päästömuuttujat ja mikromuovit tiemerkinnoissa*
- 39/2020: *Rataverkon toimenpiteiden liikennejärjestelmä- ja ilmastovaikutukset*
- 55/2020: *Helsinki–Turku nopean junayhteyden hankekokonaisuuden YVA*
- 64/2020: *Tie- ja raitinfrakonstruktuurin elinkaariarvioinnin opas* /17/
- 13/2021: *Vähäpäästöiset päällystehankinnat ja ympäristötuoteselosteet*
- 63/2021: *Väylärakentamisen kaluston ympäristövaatimukset – Tiekartta työkone- ja kuljetuskaluston vaatimukseen vuosille 2022–2030*
- 80/2021: *Ympäristötuoteselosteet vähäpäästöisten päällystehankintojen työkaluna*
- 28/2022: *Kiertotalous väylänpidossa – Nykytilaselvitys*

Liikenneviraston aihepiiriä käsitteleviä selvityksiä ja tutkimusraportteja:

- LTS 18/2014: *Panos pohjaisen CO₂-laskennan pilotointi väylähankkeessa: Kehä I liittymän parantaminen Kivikontien eritasoliittymän kohdalla* /12/
- LTS 47/2015: *CO₂-päästö- ja kustannusohjaus mallipohjaisesti: case Pissararata* /13/
- LTS 20/2017: *Infrahankkeiden EN-standardeja noudattava hiilijalanjälki- ja elinkaariarviointi*
- SP Rapport 2017:25: *Durable Timber Bridges – Final Report and Guidelines*

Tällä hetkellä käynnissä olevia Väyläviraston hankkeita:

- Infrarakentamisen päästötietokanta
- Infrarakentamisen päästölaskentamenetelmä
- NordLCA+

1.3 Tutkimusten tavoitteet ja sisältö

Tämän työn tarkoitus on koota tietoa sillanrakennuksen ilmastopäästöjen huomiointin nykytilasta sekä käsitellä siltojen ja rakennusmateriaalien elinkaaren aikaisia ilmastovaikutuksia. Julkaisun pohjana olevat tutkimukset käsittelevät seuraavia tutkimuskysymyksiä, joihin myös tämä julkaisu keskittyy:

1. Kuinka suuri osuus väylähankkeen päästöistä aiheutuu sillanrakentamisesta? /16/
2. Miten Pohjoismaissa arvioidaan sillanrakentamisen ilmastovaikutuksia tällä hetkellä? /16/
3. Millä periaatteilla materiaalien ilmastovaikutuksia tulisi arvioida, kuinka suuria niiden ilmastovaikutukset ovat ja miten ne kehittyvät tulevaisuudessa? /16/
4. Millainen vaikutus yksiaukkoisen sillan kansimateriaalin valinnalla on sillan elinkaaripäästöihin? /15/
5. Miten luotettavasti yksiaukkoisen sillan rakentamisvaiheessa syntyvät päästöt ennustavat sillan elinkaaripäästöjä? /15/

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 sillan elinkaarta päästöarvioinnin näkökulmasta. Sen jälkeen käsitellään 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.

Luvussa 4 tutkitaan, millainen vaikutus sillan kansimateriaalin valinnalla on yksiaukkoisen sillan elinkaaripäästöihin, sekä miten luotettavasti sillan rakentamisvaiheessa syntyvät päästöt ennustavat sillan koko elinkaarenaikaisia päästöjä silloilla. Tavoite oli selvittää kolmesta eri päärakennusmateriaalista rakennetun sillan päästöt 100 vuoden elinkaaren aikana, kun huomioidaan myös erityyppisten siltojen tyypilliset korjaustoimenpiteet. Lisäksi tavoitteena oli tutkia, miten suuri osa sillan päästöistä aiheutuu ennen sillan käyttöönottoa eli rakennusvaiheessa, ja kuinka hyvin käyttöönottoon mennessä syntyneet päästöt ennustavat sillan elinkaaripäästöjä erityyppisillä silloilla.

1.4 Sanasto

A1...A3 -moduulit

tuotteen valmistamiseen "tehtaan portille" asti kuuluvat informaatiomoduulit

A4...A5 -moduulit

rakenteen rakentamiseen ja siihen liittyviin kuljetuksiin liittyvät informaatiomoduulit

B-moduulit

rakenteen käyttövaiheen käsittävät informaatiomoduulit, esimerkiksi ylläpito-, huolto- ja korjaustoimenpiteet

C-moduulit

rakenteen käyttöön loppupään käsittävät informaatiomoduulit, esimerkiksi rakenteen purkaminen ja puretun materiaalin kuljetukset ja prosessointi

CCSU (Carbon Capture, Storage and Utilisation)

hiilidioksidin talteenotto, käyttö ja varastointi

CEN/TC 350

eurooppalainen kestävän rakentamisen standardeista vastaava tekninen komitea

D-moduulit

rakenteen järjestelmärajojen ulkopuolisiin hyötyvaikutuksiin liittyvää lisätietoa

elinkaariarviointi (LCA)

standardoitu menetelmä tuotteen tai palvelun koko elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten analysointiin ja arviointiin. Täydellinen elinkaari käsittää materiaalien hankinnan luonnosta, niiden prosessoinnin ja kuljetuksen sekä tuotteen valmistuksen, jakelun, käytön, uudelleenikäytön, huollon, kierrätyksen ja loppusijoituksen.

EoL (End of Life)

tuotteen elinkaaren loppuvaihe

EoW (end-of-waste), EEJ (ei enää jätettä)

tila, jossa rakenteesta poistettu materiaali lakkaa olemasta jätettä. Esimerkiksi materiaali on valmis uudelleenikäytettäväksi alkuperäisessä tai muussa tarkoituksessa.

EPD (Environmental Product Declaration)

(rakennus)tuotteen tai palvelun ympäristöseloste

GWP (Global Warming Potential)

tuotteen ilmastopäästöjen määrä hiilidioksidiekvivalenteina. Päästöistä aiheutuva vaikutus ilmastonlämpenemiseen arvioidaan ja ilmoitetaan yleensä sadan vuoden tarkastelujaksolle, jolloin käytetään termiä GWP100.

hiilidioksidiekvivalentti

kasvihuonekaasuja ovat hiilidioksidin lisäksi muun muassa metaani ja alailmakehän otsoni. Usein eri kasvihuonekaasut muunnetaan vastaavaksi hiilidioksidimääräksi, jolloin puhutaan hiilidioksidiekvivalenteista päästöistä (CO₂e, CO₂-ekv, CO₂eq), kasvihuonekaasupäästöistä (khk, ghg) tai ilmastopäästöistä.

hiilijalanjälki

kuvaava ihmisten toiminnan aiheuttamia ilmastopäästöjä määritettynä ajanjaksona. Hiilijalanjälki voidaan määrittää esimerkiksi yritykselle, organisaatiolle, toiminnalle tai tuotteelle. Korostaa negatiivisia ilmastovaikutuksia.

hiilikädenjälki

kuvaava ihmisten toiminnan aiheuttamia ilmastohyötyjä tai päästövähennyspotentiaalia sen käyttäjälle. Korostaa myönteisiä ilmastovaikutuksia.

hiilinielu

hiilinielu sitoo enemmän hiilidioksidia kuin päästää ilmakehään. Tärkeimmät luonnon omat hiilinielut ovat maaperä, metsät ja valtameret.

hiilivarasto

hiilen muoto, jossa se on sitoutuneena esimerkiksi puussa tai muussa biomassassa, eikä siis ole vapaana ilmakehässä. Esimerkiksi rakennuspuutavara, kun se on paikallaan rakenteessa.

ilmastoneutraali, hiilineutraali

hiilijalanjälki on pienempi tai yhtä suuri kuin hiilikädenjälki. Käsite ei ole täysin objektiivinen, eroja on esimerkiksi siinä, otetaanko huomioon muussa toiminnassa tehtävät päästökompensaatiot kädenjälkenä.

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 ilmastomuutospaneeli
(Intergovernmental Panel on Climate Change)

kestävä kehitys

paikallisesti ja globaalisti jatkuvaa muutosta, jonka tavoitteena on turvata nykyisille ja tuleville sukupolville hyvän elämän mahdollisuudet. Käsittää ekologisen, sosiaalisen ja taloudellisen kestävyuden.

kiertotalous

talous, jossa tuotteet ja materiaalit pysyvät talouden kiertokulussa arvonsa säilyttäen mahdollisimman pitkään. Käyttöään jälkeen ne voidaan palauttaa joko teknologisiin tai biologisiin kiertokulkuihin.

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, NAC

luonnonkiviaines (Natural Aggregate) ja luonnonkiviaineksesta valmistettu betoni (Natural Aggregate Concrete)

nettopäästö

päästöjen ja poistumien summa. Jos nettopäästö on nolla, on tarkasteltava kohde ilmastoneutraali.

panospohjainen laskenta

arvioitavaa kohdetta käsitellään laskennassa panoksiin jaettuna. Panos voi olla esimerkiksi rakennusmateriaalin määrä.

Pohjoismaat

tässä työssä Suomi, Norja, Ruotsi ja Tanska. Maantieteellisenä alueena Pohjoismaihin luetaan myös Islanti sekä Tanskan ja Norjan itsehallintoalueet.

poistuma

ilmakehästä (esim. metsään) sidotun kasvihuonekaasun määrä. Toisin sanoen negatiivinen päästö

päästö

ilmakehään päästetyn kasvihuonekaasun määrä

päästöintensiivinen

tuote tai rakenne, jonka valmistamisesta ja/tai käytöstä aiheutuu merkittävästi ilmastopäästöjä yksikköä kohti. Käsite ei ole tarkoin määritelty.

päästölaskenta

ihmisen toiminnasta aiheutuvien ilmastopäästöjen arviointi, joka toteutetaan määrälaskennan ja päästötietojen avulla.

päästösuunnittelu

suunnittelu, jossa pyritään saavuttamaan kokonaisedullinen ratkaisu mahdollisimman alhaisin ilmastopäästöin.

päästötietokanta

sisältää dataa esimerkiksi erilaisten rakennustuotteiden tai työkoneiden päästöistä yksikköä kohti. Esimerkiksiecoinvent tai [Suomen ympäristökeskuksen rakentamisen päästötietokanta](#).

RA, RAC

uusiokiviaines (Recycled Aggregate), 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

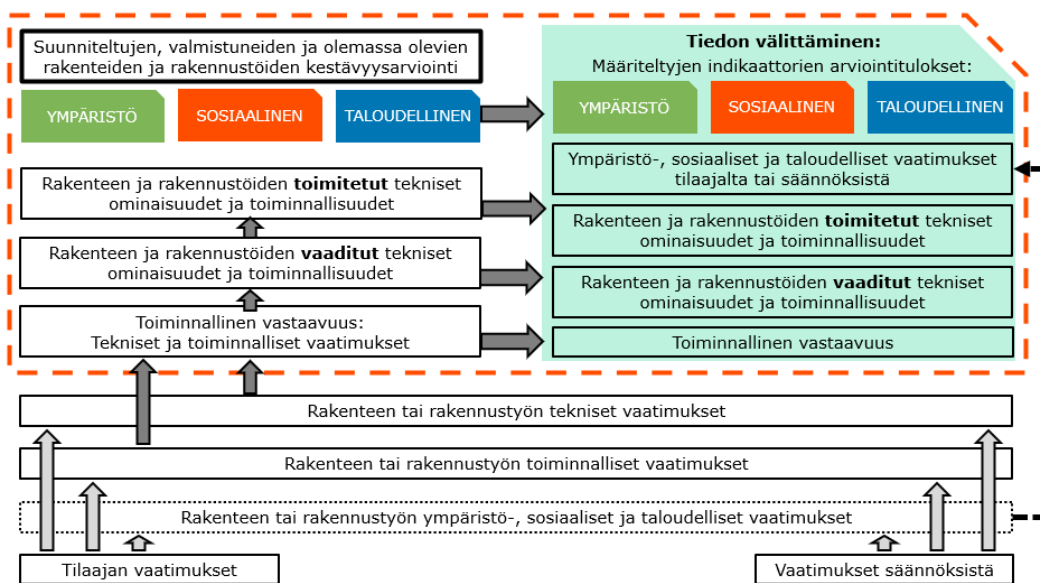
päästöt, jotka syntyvät rakenteen ylläpidosta ja korjauksista. Käytännössä siis moduulin B päästöt lukuun ottamatta rakenteen käytöstä aiheutuvia päästöjä

2 Päästölaskennan nykytilanne

2.1 Standardit ja ohjeet

2.1.1 Kestävän rakentamisen EN-standardit

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. /7/ 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 /7/ (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.

	Kestävyyssarvointi	Tekniset ominaisuudet	Toiminnallisuus
Puitetaso	EN 15643 (standardien EN 15643-1...5 revisio) Sustainability of Construction Works – Framework for Assessment of Buildings and Civil Engineering Works	Service Life Planning - Principles ISO 15686-1	
Hanketaso	prEN 15978-1 (EN 15978 rev.) Assessment of Environmental Performance of Buildings	EN ISO 52000 Rakennusten energiatehokkuus	
	prEN 15978-2 (EN 16309 rev.) Assessment of Social Performance of Buildings		
	prEN 15978-3 (EN 16627 rev.) Assessment of Economic Performance of Buildings		
	prEN 17680 Evaluation of the Potential for Sustainable Refurbishment of Buildings		
	EN 17472 Sustainability Assessment of Civil Engineering Works		
Tuotetaso	EN 15804 + A2 Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt	Service Life Prediction Procedures ISO 15686-2, Feedback from Practice ISO 15686-7, Reference Service Life & Service Life Estimation ISO 15686-8	
	prEN 15942rev Communication format B-to-B (EN 15942 vahvistettu 26.11.2021)		
	prEN 15941rev Data Quality		
	prEN 17672 Rules for B-to-C communication		
	prEN ISO 22057 Data templates for the use of EPDs in BIM		
	CEN/TR 16790 Guidance for EN 15804		
	CEN/TR 17005 Additional Indicators		

Kuva 2-2. CEN/TC 350:n työohjelma /7/ (suomennettu ja luotu englanninkielisestä kuvasta standardissa SFS-EN 15643 2021).

Puite- ja hanketasolla on standardit komitean vastuulle kuuluvien kolmen kestävän kehityksen ulottuvuuden huomioon ottamiseen. Tällä hetkellä vain ympäristönäkökulmille on saatavilla tuotetason standardi. Infrarakentamisen puitestandardi ja talonrakentamisen eri ulottuvuuksien puitestandardit yhdistettiin yhdeksi standardiksi SFS-EN 15643 vuonna 2021. Myös infrarakentamisen hanketason standardi SFS-EN 17472 julkaistiin 2022 /7/.

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 /7/.

2.1.2 Informaatiomodulit

Kestävän rakentamisen standardeissa elinkaari on jaettu eri vaiheisiin, jotka jakautuvat edelleen informaatiomoduleihin. Kaikelle rakentamiselle yhteinen puitestandardi on SFS-EN 15643 /7/, jota sovelletaan myös taitorakenteisiin.

Taitorakenteiden elinkaariarviointiin yhteydessä käytetyt informaatiomodulit on eritelty kuvassa 2-3. Taitorakenteet käsitetään tässä julkaisussa suppeassa merkityksessään, jossa niihin luetaan kuuluviksi Väyläviraston Taitorakenneyksikön työala, kuten sillat.

RAKENTEIDEN JA RAKENNUSTÖIDEN ARVIOINTITIIETO												
RAKENTEIDEN JA RAKENNUSTÖIDEN ELINKAARITIIETO					ELINKAAREN ULKOPUOLINEN TIIETO							
A0 Suunnittelu- vaihe	A1...A3 Tuotevaihe	A4...A5 Rakentamis- vaihe	B1...B8 Käyttövaihe			C1...C4 Elinkaaren loppuvaihe	D Järjestelmärajojen ulkopuoliset hyöty- ja haittavaikutukset					
Ennen rakentamista tapahtuvat aineettomat prosessit, hankeselvitykset, kokeet, maakaupat sekä suunnittelu	Materiaalituotanto Kuljetukset Valmistaminen	Kuljetukset	B1 Rakenteen käyttö	B2 Ylläpito	B3 Huollot	B4 Uusimiset	B5 Korjaukset	C1 Purkutyöt	C2 Kuljetukset	C3 Jätteen prosessointi	C4 Käytöstä poistaminen	D1 Uudelleenkäytön, kierrätyksen, energiakäytön ja muun hyötykäytön nettovirrat
A0	A1...A3	A4 A5	B6 Käytönaikainen energiansyöttö			B7 Käytönaikainen vedenkulutus			B8 Käyttäjien toiminta			D2 Tuotetut hyödykkeet (esim. sähköenergia, lämpöenergia ja juomavesi)

Kuva 2-3. Taitorakenteiden ja muiden infrarakenteiden elinkaaren informaatiomodulit /7/ (suomennettu ja luotu englanninkielisestä kuvasta standardissa SFS-EN 15643 2021).

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 käsittelevät rakennusvaiheen alkaen materiaalien kuljetuksesta tehtaan portilta työmaalle ja päättyen valmiin rakenteen luovutukseen /7/.

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 /7/.

C-moduulit käsittelevät rakenteen käyttönsä loppupäätä. Moduuliin C1 sisällytetään rakenteen purkamisesta tai käytöstä poistamisesta aiheutuvat vaikutukset. Moduuleihin C2...C4 sisältyy puren materiaalin prosessointi ja kuljetukset purkutyömaalta loppusijoitukseen asti /7/.

Moduuliin D voidaan liittää lisätietoja järjestelmärajojen ulkopuolisista hyötyvaikutuksista ja potentiaalista /7/. Moduuliin D liittyy läheisesti hiilikädenjäljen käsite, jota käsitellään tarkemmin kohdassa 2.2.1.

On syytä ottaa huomioon, että standardin SFS-EN 15804 mukainen informaatiomodulit A, B ja C sisältävä *kehdoista hautaan* -ajattelu ei ole suoraan sovellettavissa infrarakentamiseen: Esimerkiksi tie tai rautatie rakennetaan usein investointitiheksessä tarkasteltuna ylläpidettäväksi. Kaikki (rauta)tiehen liittyvät rakenteet siis oletetaan lähtökohtaisesti tarvittavan määrittelemättömän ajan, jolloin esimerkiksi yksittäisen sillan uusimiset voitaisiin huomioida tien kannalta B-moduulissa. Ajatusta pohditaan Väyläviraston laskentamenetelmän kehityksessä.

Rakennustuotteiden ja -palveluiden elinkaariarvioinnin yhteydessä käytetyt informaatiomodulit sekä erityyppisissä ympäristöselosteissa vaaditut moduulit on

eritelty kuvassa 2-4. Rakennustuotteiden informaatiomodulit käsittävät taitorakenteiden moduuleja vastaavat sisällöt tuotetasolla. Tästä eteenpäin rakennustuotteella viitataan rakennustuotteeseen tai -palveluun.

RAKENTEIDEN JA RAKENNUSTÖIDEN ARVIOINTITIETO																
RAKENTEIDEN JA RAKENNUSTÖIDEN ELINKAARITTIETO														ELINKAAREN ULKOPUOLINEN TIETO		
A1...A3 Tuotevaihe			A4...A5 Rakentamisvaihe		B1...B7 Käyttövaihe							C1...C4 Elinkaaren loppuvaihe				D
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Materiaalin hankinta	Kuljetukset	Valmistaminen	Kuljetukset	Rakentaminen – asentaminen	Rakenteen käyttö	Ylläpito	Huollot	Uusimiset	Korjaukset	Käytönaikainen energiankulutus	Käytönaikainen vedenkulutus	Purkutyöt	Kuljetukset	Jätteen prosessointi	Käytöstä poistaminen	Järjestelmärajojen ulkopuoliset hyöty- ja haittavaikutukset
skenaario			skenaario		skenaario							skenaario				D
1.	P	P	P									P	P	P	P	P
2.	P	P	P	V	V	V	V	V	V	V	V	P	P	P	P	P
3.	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
4.	P	P	P													
5.	P	P	P	V	V											

1. Kehdosta tehdään portille, sis. moduulit C1...C4 ja D
 2. Kehdosta tehdään portille optioin, sis. moduulit C1...C4 ja D
 3. Kehdosta haetaan ja moduuli D
 4. Kehdosta tehdään portille (mahdollinen vain tietyin ehdoin)
 5. Kehdosta tehdään portille optioin

P = pakollinen moduuli
 V = valinnainen moduuli

Kuva 2-4. Rakennustuotteiden ja -palveluiden elinkaaren informaatiomodulit /18/ (suomennettu ja luotu englanninkielisestä kuvasta standardissa SFS-EN 15804 2019).

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 /18/.

A-moduulit käsittelevät tuotanto- ja rakennusvaihetta. Moduulit A1...A3 käsittelevät rakennustuotteen tai -palvelun valmistusvaihetta, sisältäen materiaalien hankinnan ja valmistuksen sekä niihin liittyvät kuljetukset kehdestä 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 /18/.

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 energiamuodot 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 /18/.

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 /18/.

Moduuliin D voidaan liittää lisätietoja järjestelmärajoiden ulkopuolisista hyötyvaikutuksista ja potentiaalista. Näitä voivat olla esimerkiksi rakennustuotteen uudelleen käyttäminen sellaisenaan tai luonnonvaroja korvaavana osa-aineena uuden tuotteen valmistuksessa.

2.1.3 Elinkaariarvioinnin käsitteistö

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

Elinkaariarvioinnin lähtökohtana on, että *tekniset ja toiminnalliset vaatimukset* luokitetaan joko tilaajan toimesta tai projektia määriteltäessä. Näiden vaatimusten pohjalta määritellään valmiin rakenteen tai sen osan toiminnallinen vastaavuus, joka keskenään vertailukelpoisten vaihtoehtojen tulee täyttää /7/. Toiminnallinen vastaavuus voi olla esimerkiksi yksi kappale kaksiajorataista siltaa tietylle liikennekuormalle ja ajanjaksolle.

“End-of-waste”-tilalla (EoW, EEJ) 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 /18/:

- 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 määrättyssä 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 raja-arvoihin /18/.

Rakennustuotteiden 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 /18/. 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 ympäristösuoritusasteeseen vaikuttavat prosessit kohdistetaan siihen informaatiomoduliin, jossa ne tapahtuvat. *Saastuttaja maksaa -periaatteen* mukaan jätteenkäsittelyprosessit kohdistetaan siihen tuotejärjestelmään, joka tuottaa jätteen kunnes "end-of-waste"-tila saavutetaan /18/. Modulaarisuusperiaatteen mukaisesti esimerkiksi tuotteen asennusprosessin aikana syntyvä materiaalihävikki kohdistetaan moduliin A5. Saastuttaja maksaa -periaatteen mukaisesti kyseisen hävikin saattaminen "end-of-waste"-tilaan sisältyy myös moduliin A5.

Taitorakenteissa arvioinnin kohteena on taitorakenteen lisäksi sen vaikutusalue, siihen liittyvät rakenteet ja tilapäiset rakenteet. Vaikutusalueen määrittely voi vaihdella sen mukaan, mitä kestävä kehityksen ulottuvuutta arvioidaan. Taitorakenteiden järjestelmärajat tulee asettaa niin, että järjestelmä kattaa koko rakenteen elinkaaren ja vaikutusalueen /7/.

Toiminnallinen yksikkö on tuotejärjestelmän määrällinen suoritusaste, jota käytetään viiteyksikkönä /19/. Rakennustuotteen toiminnallisen yksikön on määriteltävä /18/

- toiminnalliseen yksikköön kuuluvan tuotteen tai tuoteryhmien sovellus tai käyttö
- rakennuskohteeseen asennetun toiminnallisen yksikön viitemäärä
- rakenteeseen asennetun rakennustuotteen toiminnallinen käyttötarkoitus, suoritusaste tai vähimmäissuoritusaste, ottaen huomioon tarkasteltavan rakenteen toiminnallinen vastaavuus¹
- määritellyissä olosuhteissa vähimmäissuoritusaste, joka on täyttyttävä toiminnallisen yksikön määrittelyn ajanjakson ajan
- referenssikäyttöään mukaisesti määritelty ajanjakso referenssikäyttöolosuhteissa. Jos toiminnallisessa yksikössä käytetään erilaista ajanjaksoa kuin referenssikäyttöissä, referenssikäyttöikä on esitettävä ympäristöselosteen teknisissä tiedoissa.

¹ Suomenoksen lause ei ollut oikein, joten tähän käännetty suoraan englanninkielisestä standardista.

Taitorakenteen toiminnallinen yksikkö voi olla esimerkiksi yksi kansineliometri tai kappale kaksiajorataista siltaa tietylle liikennekuormalle ja ajanjaksolle. Rakennustuotteen toiminnallinen yksikkö voisi olla vastaavasti kansineliometri vedeneristystä tietylle ajanjaksolle tietyissä olosuhteissa, jolloin toiminnallisen yksikön viitemäärä on kansineliometri /18/.

Ilmoitettu yksikkö on yhden tai useamman informaatiomodulin sisältävän rakennustuotteen ympäristöselosteen viiteyksikkö. Ilmoitettua yksikköä käytetään viiteyksikkönä, jos toiminnallista yksikköä ei voi määrittellä. 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 tyyppisiin sovelluksiin tai tavanomaiseen käyttöön ja niiden referenssikäyttöikään. Ilmoitettuksi 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 /18/. Ilmoitettu yksikkö voisi olla esimerkiksi kuutiometri tietyn olosuhdeluokan valmisbetonia.

2.1.4 Ympäristöselosteet

Ympäristöseloste (EPD) on rakennustuotteen tai -palvelun elinkaariarvioinnin tiivistelmä /17/. Standardilla SFS-EN ISO 14025 /20/ 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 /19/ ja SFS-EN ISO 14044 /21/ sekä luvussa 2.1.1 esitetyn CEN/TC 350 alaisen standardiperheen mukaisesti.

Ympäristöselosteessa, jossa ilmoitetaan vähintään yksi käyttövaiheen C-moduuli, on ilmoitettava vertailukäyttökätieto. *Vertailukäyttöiällä (RSL)* tarkoitetaan rakennustuotteen tai rakenteen käyttöikää, jonka sen oletetaan saavuttavan vertailukäyttöolosuhteissa täyttäen ilmoitetun teknisen ja toiminnallisen suoritustason. Vertailukäyttöiän on oltava perusteltavissa ja varmennettavissa /18/. Vertailukäyttöikä on riippuvainen tuotteen tai rakenteen ominaisuuksista ja vertailukäyttöolosuhteista. Tyyppillinen vertailukäyttöiän varmentava tieto sisältää kuvauksen tuotteesta, johon vertailukäyttöikää sovelletaan; kuvauksen vertailukäyttöolosuhteista, joihin vertailukäyttökätieto pätee; sekä kuvauksen tiedon laadusta. Rakennustuotteen käyttöikään liittyvät vaatimukset ja ohjeistus on esitetty standardin SFS-EN 15804 velvoittavassa liitteessä A /18/.

Standardin SFS-EN ISO 14025 /20/ mukainen tyyppin 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 määritettyjä sääntöjä, vaatimuksia ja suuntaviivoja tyyppin III ympäristöselosteiden kehittämiseksi yhtä tai useampaa tuoteryhmää varten /20/.

Standardia SFS-EN 15804 /18/ (2019) täydentäviä rakentamiseen liittyviä tuoteryhmäsääntöjä on määritetty osalle tuoteryhmistä standardeina. Standardissa SFS-EN 16485 /22/ (2014) on esitetty tuoteryhmäsäännöt puu- ja puupohjaisille rakennustuotteille. Standardissa SFS-EN 16757 /23/ (2017) vastaavat säännöt on esitetty betonille ja betonielementeille ja standardissa SFS-EN 16908 /24/ (2017) mm. sementille. Standardissa EN 17662 /25/ tullaan esittämään tuoteryhmäsäännöt rakentamisessa käytetyille teräs-, rauta- ja alumiinituotteille (prEN 17662 2021). Tuoteryhmäsääntöjä voidaan laatia myös kansallisesti tai toimialakohtaisesti.

Standardissa SFS-EN 15942 /26/ (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 /27/ (2021), joka oli lausuntokierroksella kesällä 2021.

Rakennustuotteiden ympäristöselosteessa on ilmoitettava kaikki standardissa 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 ilmastomuutokseen liittyvien indikaattorien yksikkö on CO₂e-kg ilmoitettua tai toiminnallista yksikköä kohden. Lisäksi standardissa määritetään kuusi lisäindikaattoria, joita ei ole pakko ilmoittaa selosteessa, mutta ne on mainittava /18/.

Tässä julkaisussa rakennustuotteiden ympäristöselosteita tarkastellaan pääasiassa ilmaston lämpenemisen näkökulmasta.

2.1.5 Tiedon laatu

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 /17/.

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 /18/. Käytännössä tuotevalmistajan tulee siis käyttää yleistä tietoa tarkempaa tietoa vähintään informaatiomoduleissa 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 vaiheessa elinkaarta arviointi tehdään. Rakentamishankkeiden elinkaariarviointia käsittelevässä standardissa SFS-EN 15978 /4/ esitetään, minkälaista tietoa tulisi käyttää rakennuksen eri elinkaarivaiheissa.

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) /28/.

2.1.6 Ohjeet

Standardeja täydentämään on luotu erilaisia ohjeita, joissa tarkennetaan ja ohjataan standardien esittämiä elinkaariarviointimenetelmiä tarkemmin. Ohjeiden avulla pyritään välttämään standardeihin jääneitä tulkinnanvaraisuuksia, jotta elinkaarilaskennat olisivat vertailukelpoisia keskenään.

Talonrakentamisessa elinkaariarviointi tehdään Ympäristöministeriön julkaiseman ohjeen *Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmät* (2019) mukaan. Ympäristöministeriön tavoitteena on saada 2020-luvun puoliväliin mennessä voimaan laki, joka velvoittaa jokaista rakennushankkeen ryhtyvää selvittämään rakennuksen elinkaaren aikaisen hiilijalanjäljen. Esimerkiksi hiilikädenjäljen laskennasta uusimmassa luonnosversiossa linjattiin, että tuote toimii hiilivarastona vasta, kun se on paikallaan rakennuksessa yli 100 vuotta /2/. Linjaukset, joita uuteen rakentamislakiin tehdään, voivat tulla osin noudatettavaksi myös infrarakentamisessa.

Infrarakenteiden arviointia varten laaditussa Väyläviraston julkaisussa vuodelta 2020 määritetään elinkaariarvioinnissa ainoaksi pakolliseksi ympäristövaikutusluokaksi ilmastonlämpenemispotentiaali (GWP_{100}). Ilmastonlämpenemispotentiaali sisältää julkaisussa ainoastaan GWP_{FOSSIL} -arvon standardin SFS-EN 15804 mukaisesti /17/. Väylävirasto on käynnistänyt infrarakentamisen vähähiilisyyden arviointimenetelmän laatimistyön vuonna 2022.

2.2 Päästölaskenta

2.2.1 Hiilijalanjälki ja -kädenjälki

Ihmisen aiheuttaman ilmastomuutoksen 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 /3/.

Kasvihuonekaasuja ovat hiilidioksidin lisäksi muun muassa metaani ja alailmakehän otsoni. Kasvihuonekaasut on tapana ilmoittaa muunnoskerrointen avulla hiilidioksidiekvivalenteiksi muunnettuna. Päästöistä aiheutuva vaikutus ilmaston lämpenemiseen tarkastellaan ja ilmoitetaan yleensä sadan vuoden tarkastelujaksolle, jolloin käytetään termiä GWP_{100} /3/.

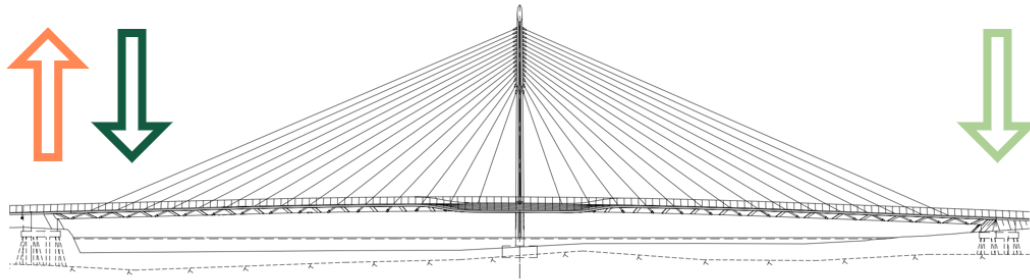
Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan tuotteen tai palvelun elinkaarensa aikana synnyttämiä ilmastopäästöjä. Hiilikädenjäljellä taas tarkoitetaan sellaisia ilmastohyötyjä, jotka voidaan saavuttaa rakennuksen elinkaaren aikana ja jotka eivät syntyisi ilman hanketta /29/ /2/. Kuvassa 2-5 on esitetty sillan elinkaaren aikaisia hiilijalanjälkiä ja -kädenjälkiä.

HIILIJALANJÄLKI

- ❖ elinkaaren aikana syntyvät vaikutukset
- ❖ sekä päästöt että sidonta

HIILIKÄDENJÄLKI

- ❖ elinkaaren aikana saavutettavissa olevat hyödyt
- ❖ ei saavutettaisi ilman hanketta

**RAKENTEIDEN JA RAKENNUSTÖIDEN ELINKAARITIEDO** | **ELINKAAREN ULKOPUOLINEN TIETO**

A0	A1...A5	B1...B8	C1...C4	D
Suunnittelu- vaihe	Tuote- ja rakentamis- vaihe	Käyttövaihe	Elinkaaren loppuvaihe	Järjestelmärajojen ulkopuoliset hyöty- ja haittavaikutukset
tutkimuksista aiheutuvat päästöt	materiaalien valmistuspäästöt työmaan päästöt	kiertotiet ylläpito liikenne	karbonatisoituva betoni (hiilinielu)	kierrätysteräs? tilaa aurinkopaneeleille? CCSU? päästökompensaatiot?

Kuva 2-5. Hiilijalanjälki ja -kädenjälki.

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. /29/ YM:n arviointimenetelmässä hiilikädenjälkeä ei vähennetä hiilijalanjäljestä, vaan ne esitetään rinnakkain /2/.

Hiilivarastolla tarkoitetaan materiaalin sisältämää hiiltä. YM:n menetelmässä käsitettä voidaan hyödyntää vain eloperäisille materiaaleille, ei kuitenkaan fossiilille 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 /2/.

Hiilinielulla tarkoitetaan ilmakehän hiilidioksidia sitovaa toimintaa. Hiilinieluja ovat esimerkiksi karbonatisoituva betoni, kasvava metsä sekä erilaiset hiilidioksidin talteenottojärjestelmät /2/.

Tutkimuksessaan Häkkinen et al. /29/ tarkastelivat hiilijalanjäljen käsitettä talonrakennuksessa. Tutkimuksessa tunnistettiin ja tarkasteltiin useita mahdollisia kädenjälkiä. Kypsyysarvioinnin perusteella materiaaleihin liittyvissä ratkaisuihin kehitettävää on erityisesti järjestelmärajoihin liittyvissä näkökulmissa, ei itse kädenjäljen laskennassa. Rakenneosien kiertotaloudessa taas merkittävimmiä 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 /29/. 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 /2/. YM:n arviointimenetelmässä laskenta tehdään vain rakenteen ensimmäiselle 50 vuodelle. On syytä ottaa huomioon, että arviointijakso ei ole sama kuin rakenteen suunniteltu tai todellinen käyttöikä.

Betonituotteiden osalta kädenjälkenä voidaan ajatella betoniin karbonatisoitumisessa sitoutuvaa hiiltä /30/. Toisaalta standardin CEN/TR 17310 (2019) mukaan karbonisoituminen kuuluisi jaotella sen tapahtumisajankohdan mukaisesti elinkaari- ja käyttömoduuleihin /30/. Ilmiön laajempi hyödyntäminen vaatii vielä kehitystyötä karbonisoitumista nopeuttavien teknologioiden osalta /29/. Betonirakentamisessa karbonisoituminen on perinteisesti otettu huomioon haitallisena tekijänä, sillä sen edessä suojabetonin läpi raudoite alkaa korrodoitua jo matalillakin kloridikon-sentraatioilla.

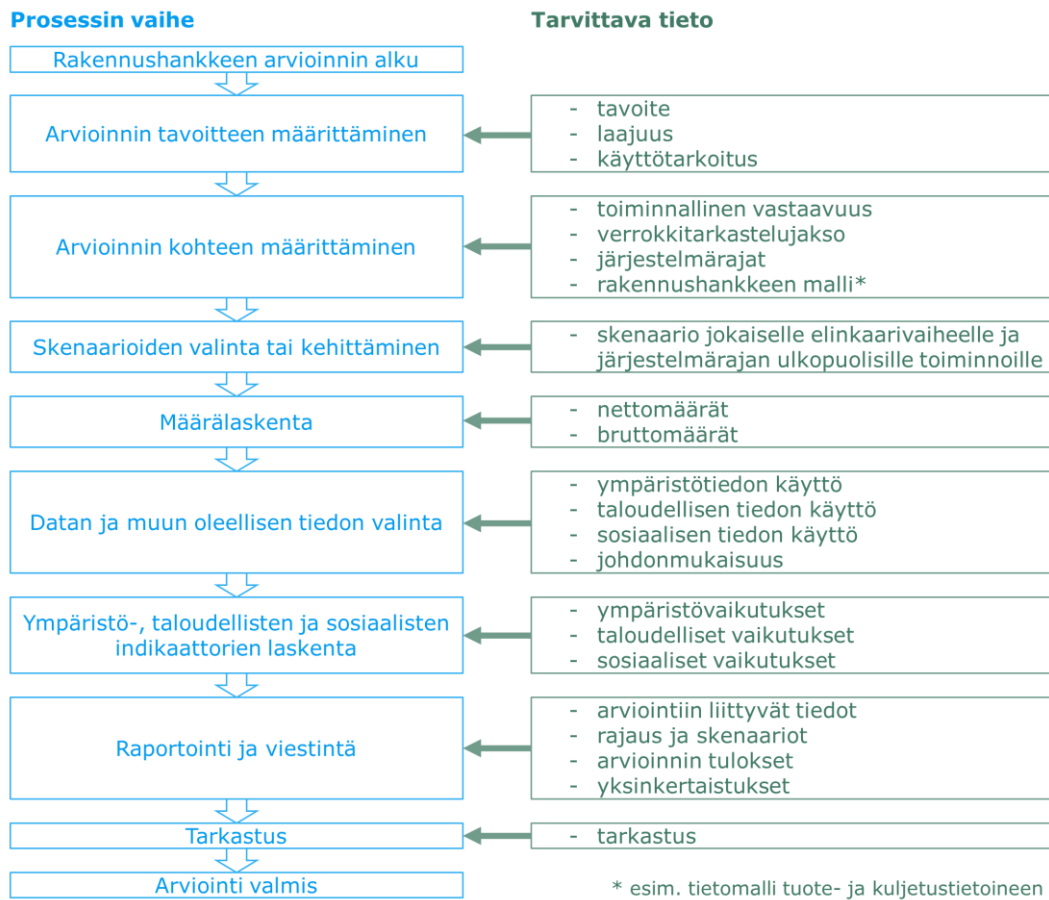
Muiksi mahdollisiksi kädenjäljiksi Häkkinen et al. (2021) tunnistivat esimerkiksi päästökompensaatiot, hiilidioksidin teknisen talteenoton ja tilan tarjoamisen vähäpäästöisen energian tuottamiseen. Näissä kaikissa arvioitiin olevan vielä ongelmia teknologiaan, skenaarioihin tai allokaatioihin liittyen /29/.

2.2.2 Laskentaprosessi

Arvioinnin peruseriaatteita ovat läpinäkyvyys ja jäljitettävyys /31/. Väyläviraston julkaisussa 64/2020 /17/ elinkaariarviointi on jaettu neljään vaiheeseen:

- tavoitteiden määrittely
- laajuuden määrittely
- tiedonkeruu
- vaikutusten arviointi.

Eri vaiheet linkitetään yhteen tulosten tulkinnalla. Elinkaariarvioinnin laskentamenetelmiä käsittelevän standardin SFS-EN 17472:2022 /31/ arviointiprosessi on esitetty kuvassa 2-6.



Kuva 2-6. Elinkaariarviointiprosessi standardin SFS-EN 17472:2022 /31/ mukaan. Käännetty standardin englanninkielisestä kuvasta.

Ensimmäiseksi määritetään arvioinnin tavoite ja kohde. Tavoite voi olla esimerkiksi vaihtoehtojen vertailu. Arvioinnin kohteen määrittämisessä olennaista on toiminnallisen vastaavuuden valinta (esim. kaksikaistainen ajoneuvoliikenteen silta 20 metriä leveään joen yli) sekä ajallisten ja järjestelmärajojen valinta /31/.

Skenaarioiden tulee perustua teknillisiin ja toiminnallisiin vaatimuksiin sekä olla säädösten mukaisia, realistisia ja edustavia. Johdonmukaisuuden saavuttamiseksi niin ympäristö-, taloudellisten kuin sosiaalisten vaikutusten arvioinnissa tulee käyttää samoja skenaarioita /31/.

Määrälaskennassa nettomäärät saadaan joko suunnitelma-aineistosta tai valmiin rakenteen tapauksessa toteumatiedoista. Arvioinnin perusteena olevien bruttomäärien laskennassa huomioidaan myös esimerkiksi kuljetuksista ja työmaatoimintoista aiheutuva hukka, suunnitelmien ja toteuman väliset dimensioerot sekä vähimmäistilauksmäärät. Arvioinnissa käytettävä tieto, esimerkiksi päästökertoimet, voi olla yleistä, keskiarvo- tai tuotekohtaista tietoa. Käytettävän tiedon valinnassa tulee huomioida esimerkiksi arvioinnin tavoite ja kohde, suunnitteluvaihe, tiedon saatavuus sekä kyseisen tiedon merkitys arvioinnin kokonaisuuden kannalta /31/.

Kun käytettävä määrä- ja muu tieto on valittu, ympäristöindikaattorit lasketaan kertomalla määrätieto yksikkökertoimilla. Päästölaskennan tapauksessa kaava on

$$GWP_i = M(GWP)_i \times a_i, \text{ missä } /31/$$

- GWP_i on ilmastolämmityspotentiaali kyseisessä moduulissa,
- $M(GWP)_i$ sisältää kaikki kyseisen moduulin päästökertoimet ja
- a_i sisältää kyseisen elinkaaren moduulin määrätiedon.

Arviointiraportti on järjestelmällinen ja kattava koonti arvioinnin tuloksista. Siinä esitetään lisäksi prosessin eri vaiheissa tehdyt valinnat ja käytetyt lähteet. Arviointiraportti on tarkoitettu viestinnän tueksi. EN-standardien mukaisesti viestinnäksi lasketaan mikä tahansa arvioinnin tiedon esittäminen kolmannelle osapuolelle. Raportin ja viestinnän tulee olla totuudenmukaista, varmennettavissa olevaa ja olennaista eivätkä ne saa johtaa harhaan. Jos käytetään olemassa olevia työkaluja, raportissa on selvitettävä niiden standardinmukaisuus sekä poikkeamat standardeista /31/. Väylävirastossa on tekeillä siltojen päästölaskennan raportointiin liittyvä lopputyö.

Tarkastusprosessissa arvioidaan esimerkiksi arvioinnin johdonmukaisuutta sekä käytetyn tiedon laatua. Tarkastajan pätevyys tulee todeta tarkastusprosessissa /31/. Taitorakenteiden elinkaariarvioinnin tarkastusprosessi oletettavasti muovautuu vielä Väyläviraston menetelmän käyttöönoton jälkeenkin.

2.2.3 Päästökerrointen ja -arvioinnin luotettavuus

Käytettävien päästöarvojen olisi tärkeää olla avoimia ja todennettavissa. Esimerkiksi pohjoismaisissa väylärakentamisen laskentatyökaluissa yleisten päästöarvojen taustoja ei ole kattavasti avattu.

Esimerkiksi Tanskan InfraLCA-työkalussa /32/ 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 tyyppilliseen päästöarvoon on päädytty usein yhden päästöarvon perusteella, vaikka arvoja esitettäisiin useammastakin eri lähteestä.

Myös arvioinnissa käytettävien taustatietojen tulisi olla avoimia. Maksullisten päästölaskentapalvelun tietokannassa saattaa olla sekä julkisesti saatavilla olevia päästö- ja ympäristötietoja että yritysten itse kehittämiä ympäristötietoja tai esimerkiksi EPD-generaattoreita. Myös suljetut tiedot voidaan verifioida ulkoisen tahon toimesta, millä yritys voi saavuttaa kilpailuedun /16/.

Ympäristöselosteet ovat voimassa viisi vuotta /18/, 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, mikäli ympäristöselosteita hyödynnetään laajemmin valtion kilpailuttamisessa infrastruktuurihankkeissa.

2.2.4 Tulevaisuuden ennustamisen epävarmuudet

Moduulien A1...A5 päästölaskenta on mahdollista tehdä luotettavasti suunnittelun ja rakentamisen aikana. Siltojen suunnittelukäyttöikä on kuitenkin 50...200 vuotta. Suunnittelukäyttöikä ei välttämättä vastaa sillan todellista tai päästölaskennassa huomioitavaa elinkaarta. Eri puolilla maailmaa on päätetty pyrkiä hiilineutraaliuuteen noin vuosiin 2050...2060 mennessä. Teollisuuden ja liikenteen päästöjen väheneminen vaikuttaa sillan elinkaaren aikaisesta ylläpidosta ja muista toimenpiteistä aiheuttaviin päästöihin. Vaikutus lienee päästöjä vähentävä. Miten tällaiset asiat tulisi ottaa huomioon? Väyläviraston kehitteillä olevassa päästölaskentamenetelmässä tullaan ottamaan kantaa tarkastelujakson pituuteen, joka voisi olla esimerkiksi 30...50 vuotta.

Kuvaan 2-7 on koottu miellekartan omaisesti sillan elinkaaripäästöjen laskentaan liittyviä epävarmuuksia.



Kuva 2-7. Sillan päästötarkasteluun liittyviä rajapintoja ja epävarmuuksia.

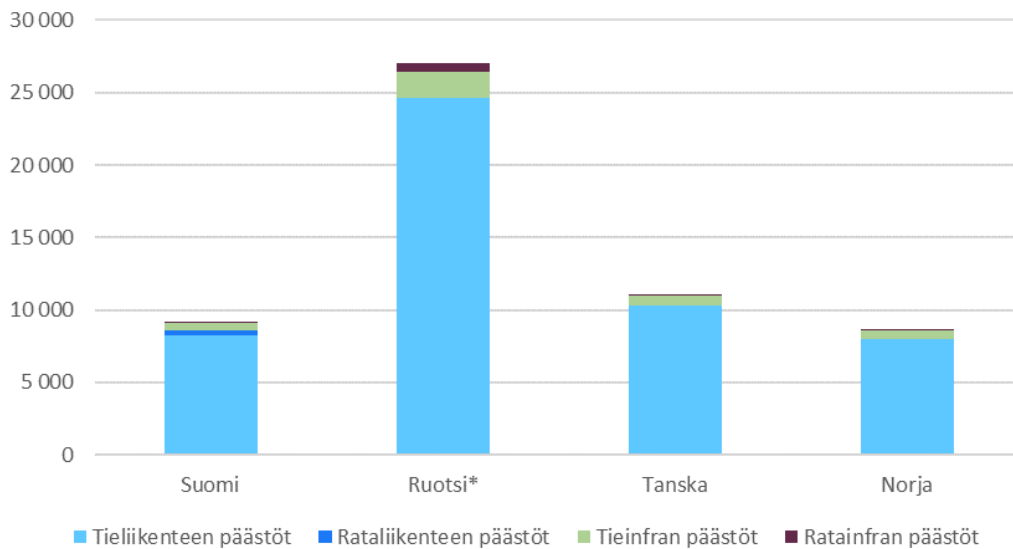
Kuvassa 2-7 esitetyistä pääkohdista energian ja materiaalien päästökertoimien kehittymistä käsitellään luvussa 3.2 ja suunnittelukäyttöiän saavuttamista luvussa 3.1. On myös syytä huomioida, että jos tarkastelujakso on lyhyempi kuin suunnittelukäyttöikä, tulevat rakentamisajan päästöt A1...A5 huomioida standardin SFS-EN 17472:2022 /31/ mukaisesti täysimääräisinä. Tästä voi aiheutua virheellinen johtopäätös, että olisi mielekästä suunnitella ja rakentaa siltoja, joiden elinkaari on optimoitu tarkastelujaksoon. Kuitenkin päästöt ja kustannukset siltapaikalla olevan esteen ylittämiseksi 100 vuoden ajan voivat nousta korkeammaksi, kuin jos silta olisi suoraan suunniteltu sataa vuotta varten. Tämä ei kuitenkaan ollut tutkimus- kysymyksenä kummassakaan loppu-työssä.

2.3 Nykytilanne Pohjoismaissa

2.3.1 Ilmastopäästöt- ja tavoitteet

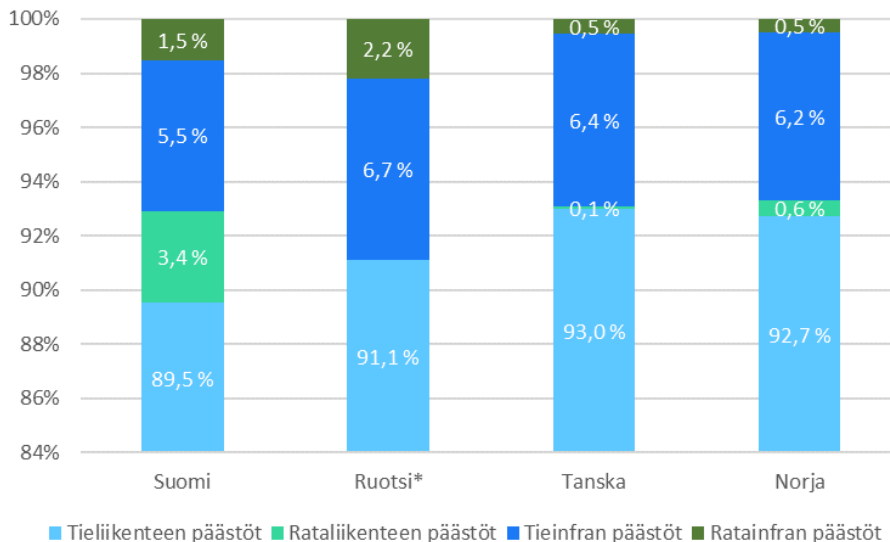
Pohjoismaista Ruotsi /33/, Norja /34/ ja Tanska /35/ ilmoittavat vuosittaiset liikenneinfrastruktuurin rakentamisen ja ylläpidon päästöt. Suomessa infrastruktuurin

osuutta liikenteen päästöistä on viimeksi arvioitu vuonna 2012 /11/. Maaliikenteen päästöjen muodostuminen eri maissa on esitetty kuvassa 2-8.



Kuva 2-8. Liikenteen päästöjen muodostuminen Suomessa, Ruotsissa, Tanskassa ja Norjassa /11/ /33/ /34/ /35/.

Kuvassa 2-8 rataliikenteen ja infrastruktuurin päästöjä on vaikea erottaa, sillä tieliikenteen osuus päästöistä on merkittävä, noin 90 prosenttia. Kuvassa 2-9 absoluuttinen asteikko on vaihdettu suhteelliseen, ja suurentamalla kuvaajaa päästään kiinni muun kuin tieliikenteen päästöjen suuruuteen.



Kuva 2-9. Infrastruktuurin suhteelliset osuudet tie- ja rataliikenteen päästöistä Suomessa, Ruotsissa, Tanskassa ja Norjassa /11/ /33/ /34/ /35/.

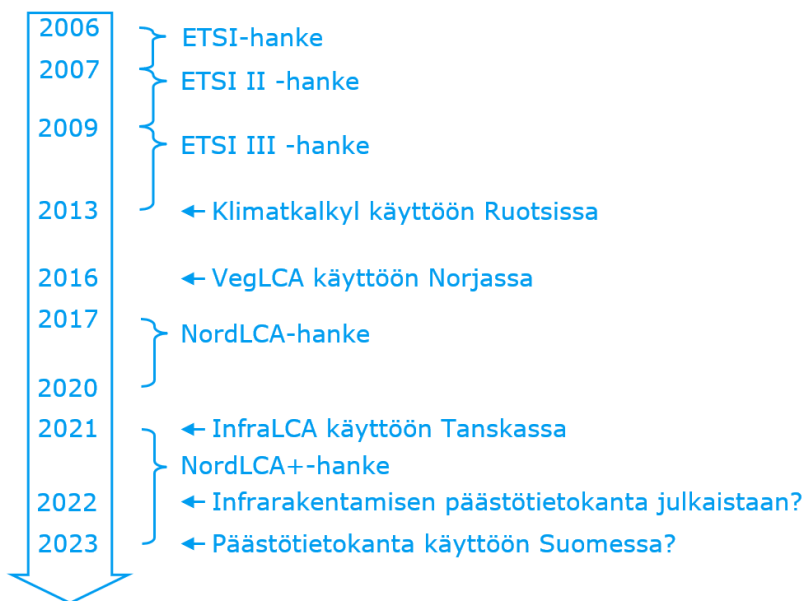
Päästöjen muodostuminen on kaikissa maissa melko samanlaista, lukuun ottamatta rataliikenteen päästöjä: Norjassa ja etenkin Suomessa käytetään maantieteellisten syiden vuoksi enemmän diesel-kalustoa kuin Tanskassa. Ruotsissa* rataliikenteen ja -infrastruktuurin päästöt on ilmoitettu yhdistettynä lukuna.

Suomen valtion tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Ruotsin tavoitteena taas on hiilineutraalius vuonna 2045, Norjan ja Tanskan 2050. Joillakin isoilla kaupungeilla, esimerkiksi Helsingillä ja Oslolla, on tavoitteena olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä. EU:n tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä /36/.

EU:n uusi taksonomia-asetus pyrkii sitomaan rahoituksen investointikohteen ympäristöystävällisyyteen. Kiinteistö- ja rakennussektorilla luokittelujärjestelmän kriteereistä korostuvat energiatehokkuus ja vähähiilisyys. Muut alalle merkittävät kriteerit liittyvät kiertotalouteen, pitkäaikaiskestävyyteen ja elinkaaren pidentämiseen /37/. Kriteereissä on paljon yhtäläisyyksiä muihin ilmastomuutoksen hidastamiseen ja luonnonvarojen järkevään käyttöön liittyviin toimenpiteisiin. Taksonomiauudistus ei siis niinkään luo tyhjää uusia vaatimuksia esimerkiksi rakennusalalle, vaan selkeyttää ilmasto- ja ympäristötavoitteiden huomioimista yritys- ja sijoitustoiminnassa.

2.3.2 Pohjoismainen yhteistyö

Väylävirasto edeltäjäineen on tehnyt 2000-luvulla yhteistyötä muiden Pohjoismaiden kanssa muutamissa päästölaskentaan liittyvissä hankkeissa. Hankkeiden ajallinen sijoittuminen on esitetty kuvassa 2-10.



Kuva 2-10. Siltojen päästölaskentaan liittyvän pohjoismaisen yhteistyön aikajana.

Suomen, Norjan ja Ruotsin tieviranomaisten ETSI-yhteistutkimushankkeessa tutkittiin siltoja niiden koko elinkaaren kannalta. Nimi ETSI tulee käsitteestä Elinkaareltaan Tarkoituksen mukainen SIIta. 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 /38/. ETSI II -projektissa tarkasteltiin kustannusten lisäksi myös ympäristöasioita ja siltaestetiikkaa. Kaikkiin kolmeen tarkasteluun kehitettiin laskennalliset mallit /39/.

ETSI III -projektissa /40/ 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 /41/.

Vuonna 2017 alkaneessa NordLCA-hankkeessa suomalainen, ruotsalainen ja norjalainen väyläviranomaiset 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* /17/.

NordLCA-hanketta jatkettiin vuonna 2021 NordLCA+-hankkeessa, jossa alkanutta yhteistyötä pyritään kehittämään eteenpäin. Hankkeen on tarkoitus päättyä vuonna 2023 /42/. Hankkeessa muun muassa päivitetään aiempi tilannekatsaus sekä kehitetään ja yhtenäistetään päästölaskennan käytäntöjä Pohjoismaissa.

Muista pohjoismaisista yhteisistä tutkimushankkeista mainittakoon DuraTB, jossa tutkittiin puusiltojen kestävyyttä olosuhterakenteita vastaan ja niiden käyttöiän pidentämistä. Projektissa oli mukana suomalaisia, ruotsalaisia, norjalaisia sekä yhdysvaltalaisia väyläviranomaisia, yliopistoja, tutkimuslaitoksia, yrityksiä ja teollisuuden etujärjestöjä /43/.

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. Toimintakaudella 2020-2024 tämän työn kannalta mainitsemisen arvoisia työryhmiä ovat siltoja ja ilmastovaatimuksia julkisissa hankinnoissa käsittelevät työryhmät /44/.

2.3.3 Väyläviranomaisten työkalut ja tietokannat

Suomessa, Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa päästöjen huomioon ottamiseen infrastruktuurihankkeissa 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. Alaluvun lopussa on esitelty pohjoismaisten väyläviranomaisten laskentatyökaluja.

Tanskalainen EPD Danmark on julkaissut ympäristöselosteet 33 rakennustuotteelle, kun norjalainen EPD Norge on julkaissut noin tuhat EPD:tä eri tuotteille /45/. Monesti esimerkiksi muidenkin Pohjoismaiden kansallisissa tietokannoissa viitataan norjalaisiin EPD:hin, jos paikallista tietoa ei ole saatavilla. Norjassa väyläinfrastruktuuriin on panostettu viime vuosina valtavasti, ja parin vuoden päästä on tarkoitus saavuttaa noin 9,5 miljardin euron vuosittainen rahoitustaso /46/. Saman lähteen mukaan rahoitustaso on vuonna 2005 ollut 2,5 miljardia ja vuonna 2019 noin 7 miljardia euroa.

Klimatkalkyl (Trafikverket, Ruotsi)

- selainpohjainen työkalu
- julkaistu alun perin 2013, selainversio julkaistiin 2016
- käsittää ilmastopäästöjen ja energiankulutuksen arvioinnin
- käytössä kaikissa uudis- ja korjausprojekteissa vähintään rakennusmateriaalien ja rakentamisen aikaisen polttoaineenkulutuksen arvioinnissa
- saatavilla: <https://klimatkalkyl-pub.ea.trafikverket.se/Klimatkalkyl/>

VegLCA (Statens vegvesen, Norja)

- laskentataulukko työkalu
- julkaistu 2015
- käsittää ilmastopäästöjen arvioinnin
- käytössä kaikissa uudistehankkeissa
- saatavilla: <https://www.vegvesen.no/fag/fokusomrader/miljo-og-omgivelser/klima/klimagassreduksjoner-i-anlegg-og-drift/>

InfraLCA (Vejdirektoratet ja Banedenmark, Tanska)

- laskentataulukko työkalu
- julkaistu 2021
- käsittää myös muita ympäristöindikaattoreita ilmastopäästöjen lisäksi
- käyttö ei vielä velvoittavaa
- saatavilla: <https://www.vejdirektoratet.dk/infralca>

Infrarakentamisen päästötietokanta (InfraCO2) (Väylävirasto, Suomi)

- tietokanta
- tietokannan ensimmäinen versio julkaistaan 2022
- keskittyy ainakin alkuvaiheessa ainoastaan ilmastopäästöihin

2.4 Siltojen osuus väylähankkeen päästöistä

Väylävirasto on teettänyt 2010-luvulla LCA-laskelmia muutamissa pilottiprojekteissa. Seuraavassa arvioidaan neljän päästöarvioitun 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. Tarkastelussa jätetään 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 /47/. 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.

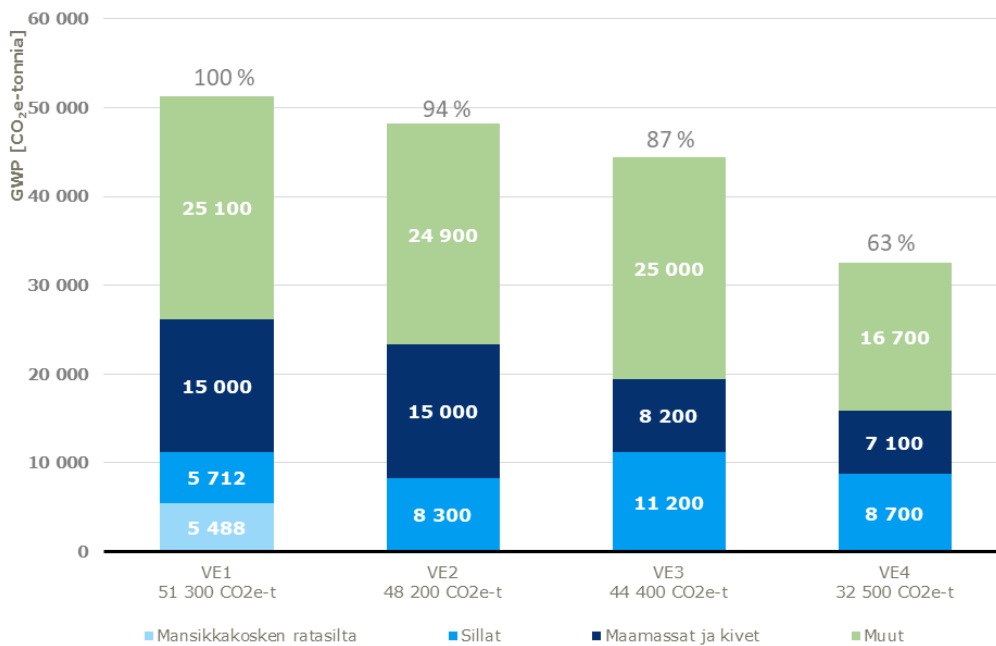
Suomessa on valtion maanteitä noin 78 000 kilometriä ja rautatietä noin 6 000 kilometriä /9/. Vastaavasti valtion omistamia tieliikenteen siltoja oli vuonna 2021 noin 15 000 kappaletta ja rautatiesiltoja noin 2 500 /9/. Näin ollen voidaan karkeasti arvioida tieverkon "siltatiheydeksi" noin 0,2 siltaa tiekilometriä kohden. Rataverkon "siltatiheydeksi" taas saadaan noin 0,4 siltaa ratakilometriä kohden.

Tarkastellut hankkeet ovat:

Luumäki–Imatra-rataosuudelle tehty lisäraide (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 /48/.

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:ssä hyödynnettiin Rapal Oy:ssä tehdyn Päästö-laskennan kehityshankkeen tuloksia. /48/ Koko hankkeen päästöt eri tarkasteluvaihtoehdoilla on esitetty kuvassa 2-11.

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 valtatieä sekä 2,5 kilometriä valtatieä, johon rakennettiin lisäkaisat. 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 melusuojuuksia, maanteitä, katuja ja kevyenliikenteenväyliä /49/.



Kuva 2-11. LUIMA-hankkeessa tehdyt vaihtoehtoiset päästölaskelmat /48/.

Kivikonttien eritasoliittymä, josta Rapal ja VTT laativat päästöselvityksen (2014). Hankkeessa parannettiin Kehä I:n ajorataa 1,5 kilometriä ja rakennettiin uusia rampeja 1,2 km, katuja 2,1 km ja kevyenliikenteenväyliä 3,5 km. Siltoja rakennettiin yhteensä seitsemän, kolme risteys-, yksi kevyenliikenteen ja kolme alikulkukäytäväsiltää. 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 /12/.

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 CO₂e-tonnia, josta siltojen osuus oli noin 27 % /12/.

Vt5 Nuutilanmäki–Vehmaa -hanke, jossa Väylävirasto pilotoi panospohjaisia 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 kehäsilloja, neljä teräsbetonisia ulokelaattasiltoja ja kaksi jännebetonisia palkkisilloja. 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 /50/.

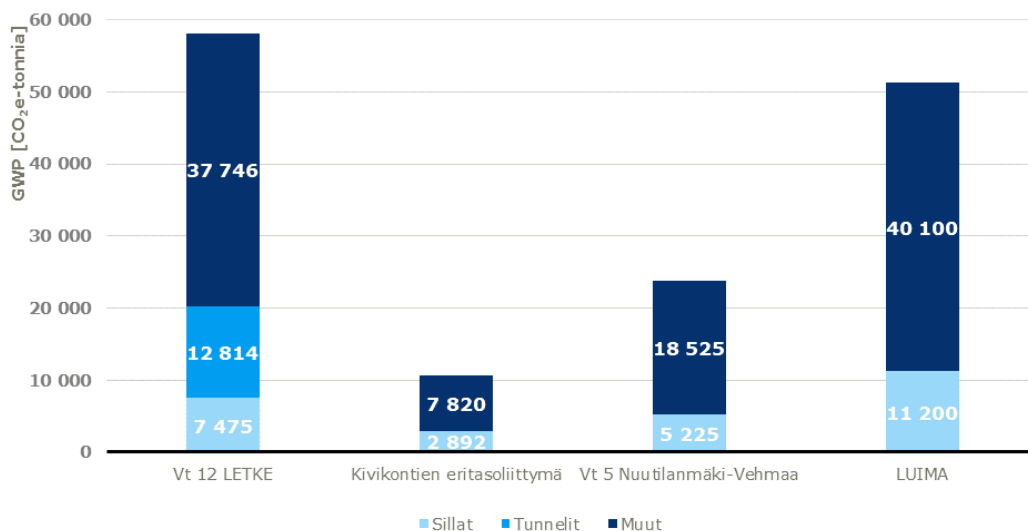
Laskennassa on huomioitu vain materiaalien ”kehdosta portille” -päästöt A1...A3 ja rakentamisvaiheen päästöt A4...A5. Moduulissa A4 laskettiin vain maa- ja kiviainesmateriaalien, asfaltin sekä valmisbetonin kuljetuksesta aiheutuvat päästöt. Hankkeen investointipäästöt olivat noin 23 750 CO₂e-tonnia, josta siltojen osuus oli noin 22 prosenttia /50/. Päästöjen jakautuminen on esitetty kuvassa 2-12.

Taulukko 1. Siltojen osuudet tarkastelluissa hankkeissa.

	LUIMA /48/	LETKE 1b /49/	Vt5 /50/	Kivikon et /12/
Väylää [km]	21,0	6,7	15,0	8,3
Siltapaikkoja [kpl]	12	11	12	1
Siltoja [kpl]	17	15	12	7
Siltatiheys [km ⁻¹]	0,81	2,24	0,80	0,84
Kansien pituus [m]	581	650	249	-
Kansien osuus pituudesta	2,8 %	9,7 %	1,7 %	-
Kokonaispituus [m]	688	740	325	-
Siltojen osuus pituudesta	3,3 %	11,0 %	2,2 %	-
Päästöt [CO ₂ ekv-t]	51 300	58 305	23 750	10 712
Siltojen osuus päästöistä	24 %	15 %	22 %	27 %

LUIMA- ja Kivikontien eritasoliittymä -hankkeissa noin neljännes hankkeen päästöistä aiheutui sillanrakennuksesta. Vt 5 Nuutilanmäki-Vehmaa -hankkeessa vastaava osuus oli noin viidesosa. Näissä hankkeissa siltatiheys oli luokkaa silta per kilometri. LUIMA-hankkeessa huomioitiin investointipäästöjen lisäksi elinkaari-päästöjä.

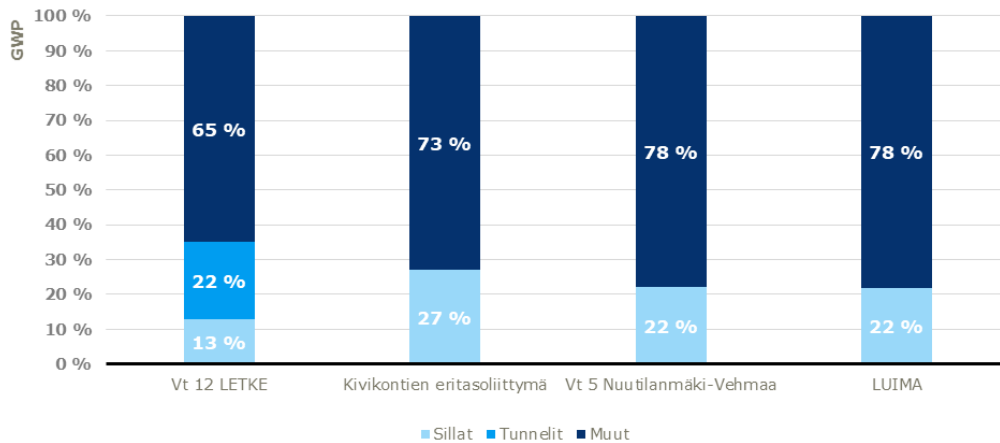
Vt 12 LETKE 1B -hankeosassa siltojen osuus arvioituista päästöistä oli noin 15 ja yhdessä tunnelien kanssa noin 40 prosenttia. Siltatiheys oli noin 1,6 siltaa per kilometri, missä ei ole otettu huomioon tunnelien osuutta. Voidaan kuitenkin olettaa, että kahden pitkän tunnelin korvaamiseen olisi tarvittu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



Kuva 2-12. Tarkasteltujen hankkeiden päästöjen muodostuminen.

Tarkasteltujen hankkeiden perusteella voidaan todeta, että teoreettisesta suoraviivaisuudestaan huolimatta eri hankkeiden päästölaskelmia ei voida suoraan verrata keskenään. Elinkaariarvioinnin aikana tehdään useita valintoja, jotka vaikuttavat jopa merkittävästi laskennan tuloksiin. Esimerkiksi arviointiin sisällytettävät elin-

kaarimoduulit vaihtelivat hankkeiden välillä. CEEQUAL-sertifioidun VALTARI-allianssin ja Vt5 Nuutilanmäki–Vehmaa -hankkeen laskelmissa arvioitiin ainoastaan moduulit A1...A5. Vanhemmassa Kivikontien laskelmassa ei suoraan kerrottu laskeittuja moduuleja, mutta tarkastelun laajuus vastasi kuitenkin moduuleja A1...A5. Se oli myös viisi vuotta muita tarkasteltuja tiehankkeita vanhempi.



Kuva 2-13. Siltojen osuus tarkasteltujen hankkeiden päästöistä.

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 vaihtoehtoja.

Kivikon eritasoliittymän /12/ ja Pissararadan investointivaiheen /13/ kokonaispäästöt ilmoitettiin myös suhteessa investointihintaan. Kivikon eritasoliittymässä rakentamisen päästöt olivat 0,37 CO₂e-kg/€ sisältäen työmaatehtävät ja 0,44 CO₂e-kg/€ ilman työmaatehtäviä. Pissararadalla vastaava panos oli 0,28 CO₂e-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 puukantainen teräsristikkosilta ja Mansikkakosken silta oli betoni-teräslittorakenteinen. On oletettavaa, että eri materiaaleista valmistettujen siltojen päästöt ja niiden muodostumisen ajankohta vaihtelevat. Eri materiaalien päästöjen muodostumista tarkastellaan tarkemmin luvussa 3.

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.

2.5 Siltojen neliöpäästöt koko elinkaarelle aiemmissa tutkimuksissa

Koska sillat harvoin ovat täysin identtisiä toistensa kanssa, siltojen päästöjä voidaan hahmottaa laskemalla hiilidioksidipäästöt erityyppisten siltojen kansineliometriä kohden. Siltojen päästöt kansineliötä kohden selvitettiin laskemalla ne kahdesta aiemmasta tutkimuksesta, joissa oli tutkittu siltojen elinkaari- ja päästöjä /51/ /52/, ja joista se oli tutkimuksessa annettujen tietojen kautta mahdollista tehdä. Silloille saatiin seuraavanlaisia päästöarvoja:

- Liittorakenteinen teräspalkkisilta:
 - 995 CO₂e-kg/m² (/51/ siltavaihtoehto 1)
 - 979 CO₂e-kg /m² (/51/ siltavaihtoehto 2)
 - 805 CO₂e-kg /m² (/52/)
- Jännitetty elementtisilta:
 - 1085 CO₂e-kg /m² (/51/ siltavaihtoehto 3)
 - 1033 CO₂e-kg /m² (/51/ siltavaihtoehto 4)
 - 1064 CO₂e-kg /m² (/52/)
- Betonirakenteinen silta:
 - 1107 CO₂e-kg /m² (/51/ siltavaihtoehto 5)
 - 733 CO₂e-kg /m² (/52/)

Sillan purkuvaiheessa /51/ otti huomioon sillan purkamiseen tarvittavan energian, puretun materiaalin lajittelun sekä jätteen loppukäsittelyn. Purkujäte voidaan joko uudelleen käyttää, kierrättää, polttaa tai sijoittaa kaatopaikalle. Materiaalien uudelleenkäytöstä säästetyt päästöt otettiin huomioon jo materiaalien valmistusvaiheessa, mikäli kierrätettyä materiaalia oli mahdollista käyttää. Elinkaaren lopun materiaalin uudelleenkäyttöä ei siis laskettu materiaalien eduksi, jotta hyötyä ei lasketa kahteen kertaan.

/51/ tutkimuksessa sillat olivat pidempiä kuin /52/ tutkimuksessa, jolloin myös sillan rakennekorkeus oli suurempi. On myös huomattava, että aiemmin laadituissa tutkimuksissa laskentamenetelmät materiaalipäästöille on laadittu edellisen päästölaskentastandardin voimassaoloaikana, joten vaatimukset huomioon otettavista päästöistä saattoivat olla erilaiset.

3 Siltojen elinkaaren aikaiset ilmastovaikutukset

3.1 Sillan elinkaari

Siltojen elinkaari koostuu suunnittelu-, rakentamis-, käyttö- ja ylläpito- sekä purkuvaiheesta. Suurin osa sillan elinkaaripäästöihin vaikuttavista ratkaisuksista tehdään sillan elinkaaren alkupäässä. Oikeanlainen käyttö ja ylläpito on kuitenkin edellytys sille, että silta saavuttaa määritetyn elinkaarensa, tai jopa ylittää sen.

Elinkaaririskit ovat riskejä ja muita tekijöitä, jotka saattavat estää sillan elinkaaren toteutumisen sen ennakoidussa pituudessa. Riskit saattavat liittyä esimerkiksi jonkin siltatyyppin käyttöön. Tyypillinen esimerkki siltatyyppikohtaisista elinkaaririskeistä on lahottajasieni, joka saattaa lyhentää puusillan käyttöikää merkittävästi. Lahosieniä on tavattu melko uusissakin silloissa ja puukansissa 2000-luvulla, kun siirryttiin aiempaa ympäristöystävällisempiin puun kyllästysaineisiin /53/.

Lisäksi ilmastonmuutos muuttaa ympäristöolosuhteita kuluvalle vuosisadalle. Saateiden ja tulvien määrän ennustetaan lisääntyvän koko Suomessa /3/. Lisääntyvä kosteusrasitus lisää myös siltojen rasitustasoa, ja esimerkiksi vedeneristeiden vuodosta aiheutuvat vauriot sillan rakenteille voivat tapahtua nopeammin, mikäli kosteusrasitus on voimakkaampaa. Betonia rapauttavien jäätymis-sulamissykliä määrän ennustetaan kasvavan pohjoisessa Suomessa, mutta vähentyvän eteläisessä Suomessa /54/. Väylävirasto on teettänyt tutkimuksen muuttuvien tulvien siltoihin aiheuttamista kuormista /55/.

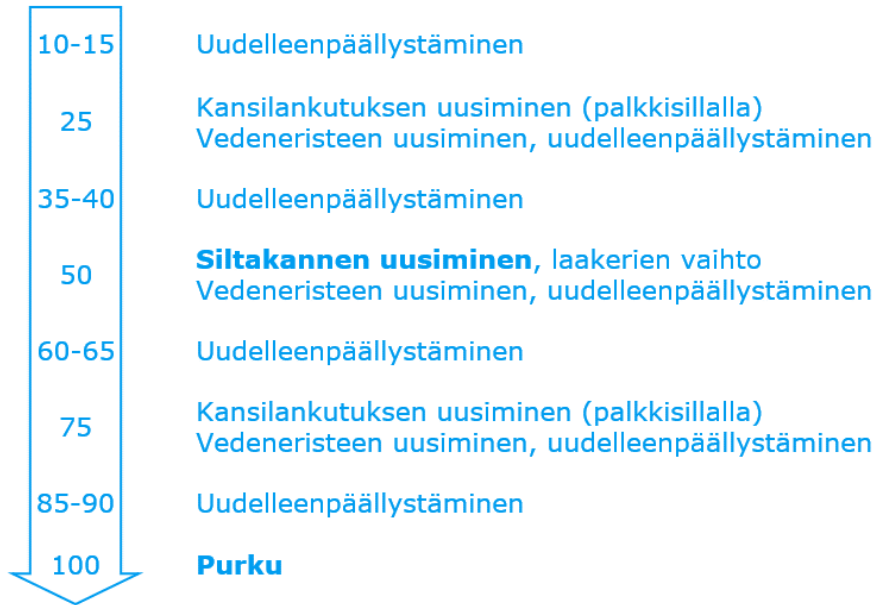
Riskiksi voidaan laskea myös toiminnallisten vaatimusten muuttuminen, kun väyläverkon välityskykyä kasvatetaan. Näin tapahtui esimerkiksi vuonna 2013, kun Suomen tieverkolla yhdistelmäajoneuvojen enimmäismassa nousi 60 tonnista 76 tonniin /56/. Vaatimusten muuttuessa sillan kantavuus tai leveys saattaa jäädä riittämättömäksi, ja siltapaikalle tarvitaan uusi silta, vaikka vanhalla olisi käyttöikää muuten vielä jäljellä /57/.

3.1.1 Toimenpiteet keskimääräisen elinkaaren aikana

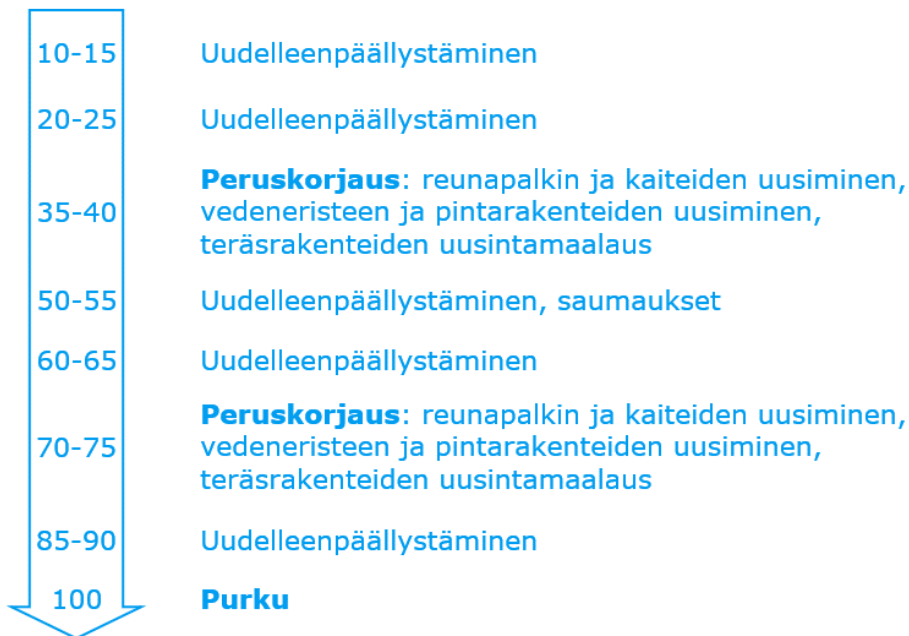
Siltojen suunnittelukäyttöään saavuttaminen vaatii sillan kunnossapitoa ja korjaamista säännöllisin väliajoin. Siltojen rakenneosille on määritelty kokemusperäiset uusimisvälit, jotka on määritetty Väyläviraston taustaselvityksessä 26/2015 /58/. Uusi selvitys rakenneosista on käynnissä ja se julkaistaan vuoden 2022 aikana.

Sillan elinkaarelle määritettiin keskimääräisen elinkaaren aikana tehtävät korjaustoimenpiteet, joiden perusteella laskettiin sillan elinkaaren aikana niistä aiheutuvat päästöt. Siltojen elinkaari eroaa hieman siltatyypeittäin ja päärakennusmateriaaleittain.

Kuvassa 3-1 on esitetty liimapuiselle sillalle 100 vuoden aikana tehtävät toimenpiteet ja kuvassa 3-2 vastaavat toimenpiteet betonikantisille silloille.



Kuva 3-1. Liimapuurakenteisen sillan keskimääräinen elinkaari kokemusperäisten uusintavälien perusteella. Korjaustoimenpiteen ajankohta esitetty vuosina sillan valmistumisesta.

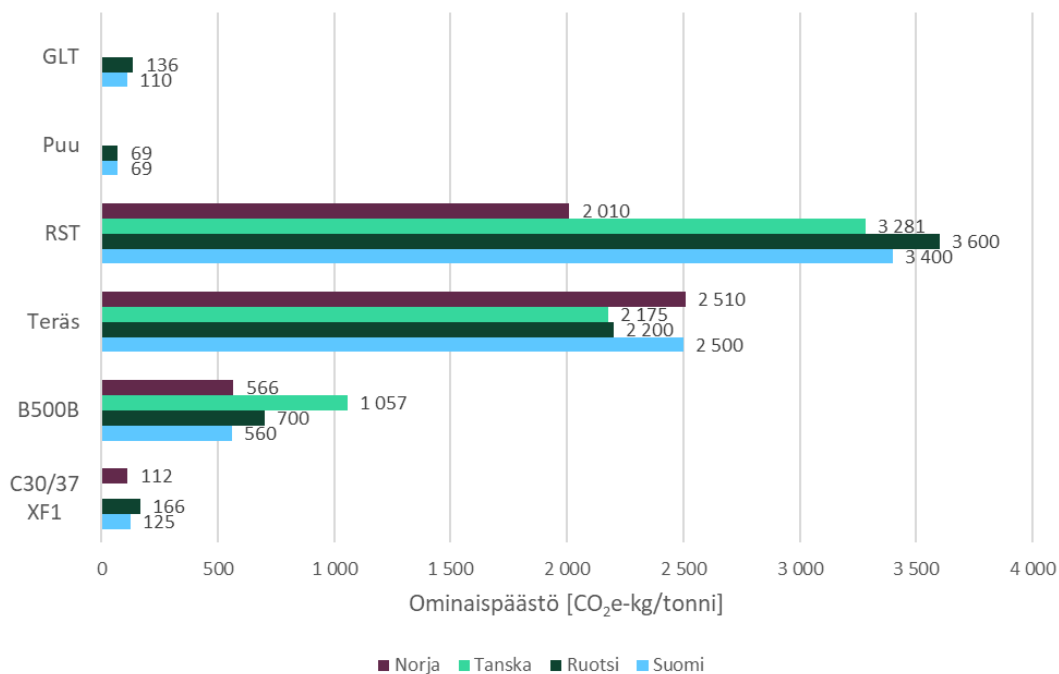


Kuva 3-2. Teräsbetonikantisen ja liittorakenteisen teräspalkkisillan keskimääräinen elinkaari kokemusperäisten uusintavälien perusteella. Korjaustoimenpiteen ajankohta esitetty vuosina sillan valmistumisesta.

3.2 Materiaalien vaikutus päästöihin

3.2.1 Materiaalien vertailusta

Kuvassa 3-3 on esitetty liimapuun (GLT), sahatavaran (Puu), ruostumattoman teräksen (RST), rakenneteräksen, raudotteiden (B500B) sekä betonin C30/37 XF1 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 CO₂e-kg/tonni.



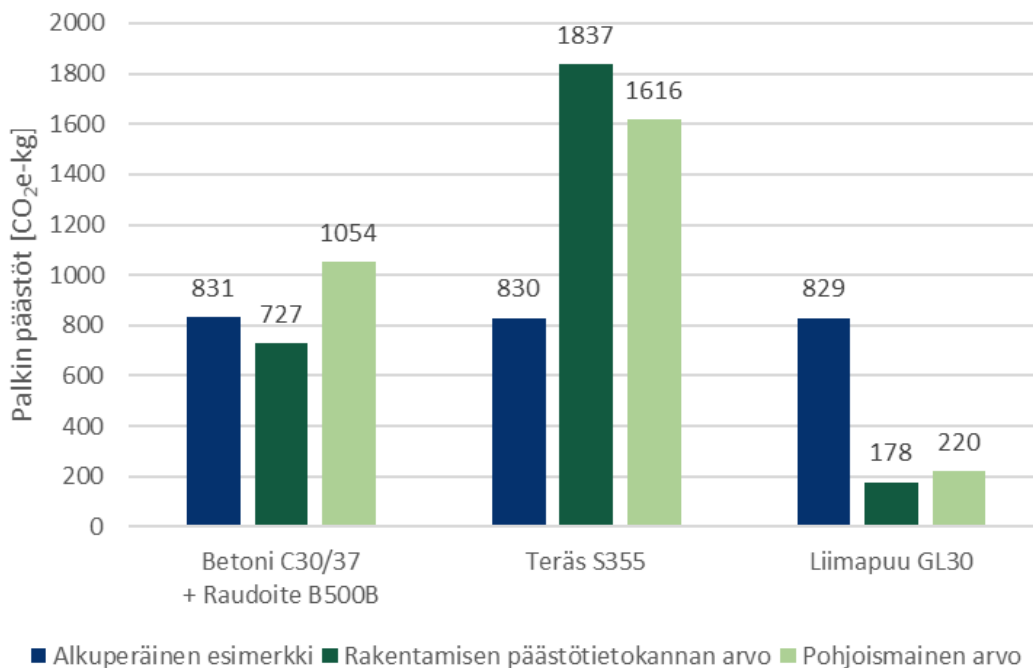
Kuva 3-3. Materiaalien ominaispäästöjen vaihtelu eri maiden tietokannoissa.

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 /17/. 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 /59/. Valmisbetonin osalta Suomen Betoniyhdistys ry:n vähähiilisyden luokitteluohe /104/ 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 luokitteluoheen tapaan. Hiilikädenjäljen esittäminen ei ole hyödyllistä, jos sitä ei voida vähentää hiilijalanjäljestä. Esimerkiksi YM:n arviointimenetelmän luonnosversiossa hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki on esiteltävä erikseen.

Artikkelissa /60/ esitetään, että materiaaleja ei itsessään voida vertailla ympäristöystävällisyyden mukaan. Koska materiaali on aina osa rakennetta, voidaan vertailu /60/ mukaan tehdä vain vastaavien rakenteiden välillä.



Kuva 3-4. Käytettävien päästökertoimien merkitys rakenteen valmistuspäästöihin A1...A3.

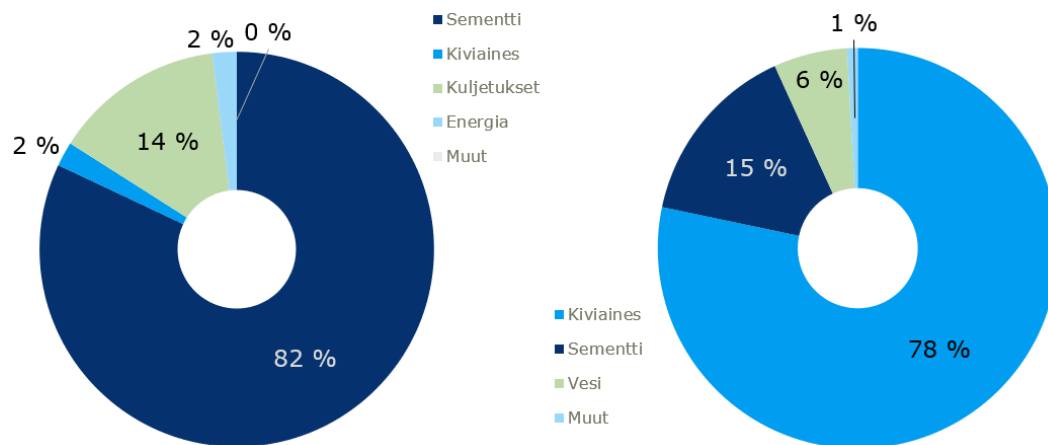
/60/ artikkeliin oli tehty myös laskuharjoitus sisätiloissa sijaitsevan palkin valmistuspäästöistä sisältäen moduulit A1...A3. Tarkastellun palkin jänneväli oli 9 metriä. Mitoitetut palkit olivat materiaaliltaan joko teräsbetonia, terästä tai liimapuuta. Kuvassa 3-4 on esitetty kunkin palkin esimerkissä 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 ja teräsbetonille Norjan VegLCA:n kertomia ja liimapuulle Ruotsin Klimatkalkylin tietoja.

Kuten voidaan huomata, eri materiaaleista valmistettujen rakenteiden päästöt on tietyillä mitoilla, tietyssä tilanteessa ja tietyillä arvoilla mahdollista saada vastamaan toisiaan. /60/ 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.

3.2.2 Betoni

Betoni on erittäin käytetty sillanrakennusmateriaali Suomessa. Pienimmät betonisillat ovat yleensä teräsbetonisia laattakehäsiltoja. Tätä suuremmat betonisillat ovat yleensä laatta- tai palkkisilloja. 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 /47/.

Betonin valmistuspäästöt A1...A3 muodostuvat betonin osa-aineiden valmistamisen sekä betonin sekoittamisen päästöistä. Betonin valmistuspäästöissä korostuvat sementin valmistuksesta aiheutuvat päästöt /61/. Esimerkiksi valmisbetonilla C30/37 moduulien A1...A3 päästö on Ympäristöministeriön päästötietokannassa 113 CO₂e-kg/tonni ja säänkestävän C30/37 XF1 vastaava päästö 125 CO₂e-kg/tonni.



Kuva 3-5. Betonin päästö- ja massajakauma osa-aineittain.

Suurin osa betonimassasta on kiviainesta. Jo nykystandardeilla osa karkeasta kiviaineksesta voidaan korvata uusiomateriaaleilla myös sillanrakennuksessa /62/. Kiviaineksen osuus betonin päästöistä on nykyisin noin 2 % /61/. Tätä päästöä voidaan pienentää käyttämällä uusiokiviainesta yhdessä klinkkerisementtiä korvaavien sideaineiden kanssa. Tavallista sementtiä käytettäessä uusiokiviaineksen aiheuttama lujuuden alenema ei mahdollista päästövähennyksiä lisääntyneen sideainetarpeen takia /63/. Seuraavan sukupolven Eurokoodin luonnoksessa prEN 1992-1 /64/ on esitetty kaavat uusiokiviaineksen käytön huomioon ottamiseksi suunnitteluarvoissa. Lisäksi uusiokiviaineksen tehostetulla karbonatisoitumisella on mahdollista saavuttaa hiilivarastovaikutusta /65/. Uusiokiviaineksen käyttö olisi tärkeää myös uusiutumattomien luonnonvarojen käytön ja luonnon monimuotoisuuden näkökulmista /66/.

Valtaosa, noin 70...80 %, betonin päästöistä aiheutuu nykyisin sementistä /61/. Tämän päästön vähentämiseksi edistetään nykyään kahta erilaista uudistusta. Sementinvalmistajat pyrkivät vähentämään päästöjään uusiutuvan energian ja CCUS-tekniikan avulla /67/. Lisäksi betonin päästöjä pyritään vähentämään korvaamalla sementtiä pääasiassa masuunikuonalla. CCUS-tekniikkaa ollaan vasta tuomassa teolliseen mittakaavaan, mutta sideaineiden korvausosuutta voidaan kasvattaa jo nykyisellään käytännössä 80 prosenttiin.

Hiilenpolton vähentyessä Suomessa lentotuhkan tuotantomäärät pienenevät /68/. 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 tiiviyyttä /69/. Kalkkikiveä voidaan infrabetoneissa käyttää fillerinä korkeintaan 20 %, eikä sen korvausosuutta voida lisätä huonontamatta betonin ominaisuuksia /70/. Lentotuhkaa on tulevaisuudessa mahdollista korvata puuta polttavissa voimalaitoksissa synnyvällä lentotuhkalla (mm. /71/ /68/).

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 /72/. Niiden päästöt voivat valmistustavasta riippuen olla noin viidenneksen tavallisen sementin päästöistä /72/. Puhtaasti hiilenpoltosta peräisin olevia lentotuhkia voidaan mahdollisesti korvata muista prosesseista peräisin olevilla lentotuhkilla (esim. turpeenpoltosta /73/). 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 /74/. Lisäaineiden avulla on mahdollista tehostaa myös korvaavien sideaineiden tai uusiokiviaineksen käyttöä betonissa (esim. /75/ /76/). Toisaalta ne eivät välttämättä toimi oletetulla tavalla vahvasti seostetuissa betoneissa /72/.

Teräsbetonisillassa raudoitteet kasvattavat betonin päästöjä noin 80 CO₂e-kg/m³ ja jännebetonisillassa noin 90 CO₂e-kg/m³. Ruostumattoman teräksen päästöt ovat noin kaksinkertaiset hiiliteräkseen nähden /77/. Ruostumattoman teräksen käytöllä on mahdollista saavuttaa merivesirasitetuissa olosuhteissa säästöjä niin elinkaarikustannuksissa kuin -päästöissäkin /78/. Raudoitteet voidaan korvata myös kuitutankoja ja -betonia käyttämällä /79/. Tämän vaikutuksesta sillan investointi- tai elinkaari-päästöihin 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 /80/ käyttämällä 35-metrinen sillan sahatavarasta valmistettujen muottien materiaalipäästö on puun osalta alle 100 CO₂e-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 karbonatoituu. Käytössä olevan teräsbetonirakenteen karbonatoitumisessa tasapainoillaan rakenteen säilyvyyden ja siihen varastoituvan hiilen välillä. Moduuli B ei siis ole paras elinkaaren vaihe betonin hiilinieluna toimimiselle.

Käyttöään lopussa betonirakenne puretaan, C1, ja puretut osat kuljetetaan, C2, jatkokäsiteltäväksi, C3, tai hävitettäväksi, C4. Purkamisen tehdään pääasiassa polttonestekäyttöisillä työkoneilla /47/. Purkamisen päästöt muodostuvat siis käytettävän energianlähteen mukaan. Betonisillojen betoni yleensä murskataan ja hyödynnetään maatäyttönä tai tienpohjana. Mursketta voidaan käyttää myös uusiokiviaineksena betonin valmistuksessa. Talteensaavat raudotteet päätyvät pääosin kiertoon käytettäväksi uusien terästuotteiden valmistuksessa /81/. Betonisillojen uudelleen käyttäminen toisessa paikassa ei todennäköisesti ole mahdollista.

Betoni karbonatoituu, kun se on riittävän kosteana kosketuksissa hiilidioksidin kanssa /82/. Kun betoni karbonatoituu tai siinä käytetään karbonatoitunutta kiviainesta, sen lujuus kasvaa ja se haurastuu /83/. Murskatun betonin karbonatoitumisen voidaan katsoa sitovan ilmakehän hiilidioksidia itseensä, jolloin betonimurske voi toimia hiilivarastona käytettäessä esimerkiksi väylänpohjana tai betonin valmistuksessa uusiokiviaineksena. Betonin karbonatoitumista voidaan kiihdyttää sijoittamalla se tilaan, jonka hiilidioksidikonsentraatio on tavallista ilmaa suurempi /84/. Betonimurskeen kiihdytetty karbonatointi onnistuu myös klinkkeriuunin noin 15 % hiilidioksidipitoisella kaasulla /84/.

CCUS-teknologia ja siihen läheisesti liittyvä vetytalous ovat vielä kehitysvaiheessa /67/. Joitakin teollisuustason CCUS-pilotteja on tehty tai ollaan tekemässä lähivuosina /85/. Teknologian käyttökelpoiseksi saaminen on kalsinoitumisen takia käytännössä pakollista, jos sementtiteollisuus haluaa jatkaa sementin valmistamista /67/.

Kesäkuussa 2022 julkaistun Betoniyhdistyksen betonien vähähiilisyyden luokitteluhjeen /104/ käyttöönotto on suositeltavaa. Siinä esitetään betoneille myös päästövaatimusluokkia, joita ei toistaiseksi ole laajasti saatavilla. Tästä aiheutuva kustannusvaikutus tulisikin ottaa huomioon myös Ihkun kustannuslaskennassa, jottei tulisi kiusausta käyttää suunnitelmissa tiukinta päästöluokkaa ja todeta rakennettaessa, ettei sitä olekaan saatavilla.

Suomessa käytetään lähinnä normaalilujuusbetoneita. Päästöjen kannalta etenkin suuremmissa silloissa voisi olla mielekästä käyttää korkealujuusbetoneita, jolloin poikkileikkausmittoja olisi mahdollista pienentää /86/. Korkealujuusbetonien valmistamisen ja käytön rajoitteita sekä kustannusvaikutuksia voisikin olla mielekästä selvittää.

Geopolymeerikomposiitit eivät ole betoneita, sillä ne eivät sisällä portlandklinkkeeriä. 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. /87/ /88/ /89/). Geopolymeerikomposiitit voivat etenkin aggressiivisissa ympäristöissä olla betonia kestävämpiä (esim. /87/). Geopolymeerikomposiittien käyttöä sillanrakentamisessa olisikin syytä selvittää esimerkiksi pohjoismaisella yhteistyöhankkeella.

3.2.3 Teräs

Teräksestä voidaan valmistaa käytännössä minkä tahansa pituisia siltoja. Lyhyimmät terässillat ovat yleensä putki- tai teräspalkkisilloja. 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 ristikkosilloja voidaan valmistaa teräksestä /47/.

Suurin osa rakenneteräksen päästöistä A1...A3 syntyy malmin hankinnasta ja erityisesti raakauraudan valmistamisesta malmista. Päästöjä aiheutuu myös raakauraudan ja kierrätysteräksen teräkseksi valmistamisesta /90/. Esimerkiksi Rakentamisen päästötietokannan mukaan teräsrakenteen päästöt A1...A3 ovat 2 500 CO₂e-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 CO₂e-kg/tonni.

Teräksen valmistuksessa ei vielä käytetä Suomessa tai Ruotsissa valokaariuunia, jossa valtaosa päästöistä on käytettävän sähkön päästöä /90/. SSAB:n on kuitenkin tarkoitus aloittaa teollisuusmittakaavan vähäpäästöisen teräksen valmistus Ruotsissa vuonna 2026 ja koko tuotannon on tarkoitus olla päästötöntä vuonna 2045 /91/.

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. Teräskoonpanon 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-maalauksjärjestelmien päästöistä ei kuitenkaan ollut vielä saatavilla.

Käyttöään lopussa rakenne puretaan, C1, ja puretut osat kuljetetaan, C2, jatkokäsiteltäväksi, C3, tai hävitettäväksi, C4. Purkaminen tehdään kaasu- tai sähkökäyttöisin työkaluin käyttäen apuna siirrettäviä työkoneita /47/. Purkamisen päästöt muodostuvat siis käytettävän energianlähteen mukaan. Terässiltojen tapauksessa yleinen loppuskenaario on käyttö kierrätysteräksenä uusien terästuotteiden valmistuksessa (mm. /81/). Toisaalta, jos sillan purkaminen ei johdu teknisen käyttöönsä saavuttamisesta, voidaan silta tai sen osia käyttää sellaisenaan uudella silta-
paikalla.

Tavallisen teräksen lisäksi sillanrakennuksessa voidaan käyttää säänkestävää tai ruostumatonta terästä. Myös alumiinisilloja on rakennettu muissa maissa. Säänkestävän teräksen päästöt ovat samaa luokkaa tavallisen teräksen päästöjen

kanssa /81/. Alumiinista valmistetuilla silloilla rakennusvaiheen päästöt ovat pääsääntöisesti suuremmat kuin tavallisesta teräksestä rakennetulla /92/. Kuitenkin pitkän elinkaaren aikana niillä on mahdollista saavuttaa vähennyksiä kustannuksiin ja päästöihin niiden vähäisen ylläpitotarpeen takia /92/ /93/.

3.2.4 Puu

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 syrjälantukukansia voidaan käyttää niin puu- kuin terässilloissakin keventämään kannen omaa painoa /47/. Puusilloissa on tasapainoiltava säilyvyyden ja käytettävien kyllästysaineiden ympäristöhaittojen välillä.

Kestävästi hoidetusta metsästä hankitun puun tuotantopäästöjen A1 voidaan nykystandareilla 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.

Esimerkiksi Rakentamisen päästötietokannassa sahatavaran tyypillinen päästö A1...A3 on 69 CO₂e-kg/tonni. Valmistusmateriaaleista 100 % ajatellaan olevan peräisin uusiutuvista lähteistä ja loppukäyttönä 100 % puusta päätyy energiakäyttöön. Kädenjäljeksi, moduuli D, on ajateltu -1 550 CO₂e-kg/tonni.

Kyllästmättömän liimapuun tyypilliseksi päästökse A1...A3 arvioidaan 110 CO₂e-kg/tonni. Valmistusmateriaaleista 99 % ajatellaan olevan peräisin uusiutuvista lähteistä ja loppukäyttönä 100 % puusta päätyy energiakäyttöön. Kädenjäljeksi, moduuli D, oletetaan -1 600 CO₂e-kg/tonni. Kädenjälki perustuu kummassakin tapauksessa siihen, että fossiilista energiaa voidaan jättää käyttämättä puusta saatavaa energiaa vastaava määrä.

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 päästökse arvioitiin noin 130 CO₂e-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 /94/.

Käyttöään lopussa rakenne puretaan, C1, puretut osat kuljetetaan, C2, jatkokäsiteltäväksi, C3, tai hävitettäväksi, C4. Purkamisen tehdään käsityökaluin tai siirrettävin työkonein /47/. Purkamisen päästöt muodostuvat siis käytettävän energianlähteen mukaan. Puusiltojen tapauksessa yleinen loppuskenaario on käyttö energiantuotannon polttoaineena (mm. /95/). Toisaalta, jos sillan purkamisen ei johdu

teknisen käyttöiän saavuttamisesta, voidaan kevyt puupäällysrakenne tai sen osat mahdollisesti käyttää sellaisenaan toisella siltapaikalla /47/.

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.

Suomen ympäristökeskuksessa vuonna 2021 tehdyn Tapio Oy:n, Puutuoteteollisuus ry:n ja Sahateollisuus ry:n tilaaman selvityksen (2021) /96/ mukaan puutuotteiden hiilivarastosta rakennuksissa on 62, infrastruktuurissa 15 ja pienrakenteissa 23 prosenttia. Puutuotteiden hiilivarastoa voidaan kasvattaa suurentamalla pitkäikäisten puutuotteiden osuutta. Rakennusmateriaalit ovat pitkäikäisimpiä puutuotteita. Toisaalta rakenteet voidaan purkaa ennen niiden suunnittelu- tai teknisen käyttöiän päättymistä Tällöin puu usein päättyy poltettavaksi, jolloin hiili vapautuu ilmakehään. Olennaista onkin käyttöiän varmistaminen esimerkiksi käyttöikäsuunnittelulla ja oikealla ylläpidolla /96/. Onkin mielenkiintoista, miten pitkäikäinen hiilivarasto on mahdollista saavuttaa puunkäytöllä sillanrakentamisessa.

Rakentamisen ympäristövaikutusten arvioinnissa puun tulee olla peräisin kestävästi hoidetusta talousmetsästä. Kestävästi hoidetun metsän runkopuun poistuma ei saa ylittää sen kasvua. Suurin osa kotimaisesta sahatavarasta on 2000-luvulla mennyt vientiin /96/.

Suomen ilmastopaneelin raportissa /97/ vastattiin kolmeen usein esitettyyn hakkuisiin ja puurakentamiseen liittyvään väittämään. Tutkimuskysymykset olivat:

1. Lisäävätkö hakkuut metsien hiilinielua?
2. Saavutetaanko metsien hyödyntämisellä ilmastohyötyjä?
3. Seuraako puurakentamisen lisäämisestä ilmastohyötyjä?

Raportin /97/ mukaan hakkuiden kasvattaminen nykytasosta vähentäisi hiilinielua vuosittain vähintään vuosisadan loppuun asti. Hakkuumäärien vähentäminen kasvattaisi hiilinielua vastaavasti. Jos hakkuutasoja nostettaisiin pysyvästi nykyisen kaltaisella puutuotteiden ja -polttoaineiden tuotantojakaumalla, eivät ne pystyisi kompensoimaan hiilinielumenetyksiä ainakaan 150 vuoden aikajänteellä. Puurakentamisen lisääminen ei ole Suomen hiilinielujen kannalta järkevää, jos hakkuita joudutaan sen takia lisäämään. Jos puurakentamista taas kasvatetaan vähentämällä vientiä tai kasvattamalla tuontia, vähenisivät Suomen päästöt, vaikka globaalisti ilmastovaikutukset voivatkin olla samanlaiset kuin kotimaisten hakkuiden kasvattamisella /97/.

Raportissa esitetään parhaiksi keinoiksi puurakentamisen laajentamiseksi hakkuita lisäämättä tuotteiden valmistuksen materiaalitehokkuuden parantamista sekä suuripäästöisiä tuotteita korvaavien puutuotteiden osuuden kasvattamista. Toisaalta saha- ja vaneriteollisuuden sivutuotteita kerrotaan jo nykyisin käytettävän tehokkaasti, eikä materiaalitehokkuuden parantamisella ole siis saavutettavissa merkittäviä parannuksia puurakentamisen ilmastovaikutuksiin /97/.

Ennen kaikkea pitkäikäisten puutuotteiden osuuden kasvattaminen hakkuita lisäämättä tarkoittaisi muiden puupohjaisten tuotteiden käytön vähentämistä, jos tavoitteena on olla aiheuttamatta lisähakkuita Suomen rajojen ulkopuolellakaan.² Toisaalta myös rakentamisessa puun suunnittelu- ja todelliset käyttöiät eroavat eri sovelluskohteissa: rakennusten rungoissa suojatuissa sisäolosuhteissa puu voi säilyä hyvinkin 100...150 vuotta, kun taas siltojen kansirakenteiden suunnittelukäyttöikä on nykyisin 50 vuotta. Puusiltojen käyttöikä voidaan kuitenkin parantaa rakenteellisella suojauksella.

/98/ 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 hyödyntää rakenteissa myös yhdessä muiden materiaalien kanssa. Keveytensä ansiosta sen käytöllä on mahdollista vähentää esimerkiksi omista painoista aiheutuvia rasituksia. Esimerkiksi jo pitkään on ollut mahdollista rakentaa puu-betoni-liittosiltoja, joissa puupalkiston päälle valetaan liittovaikutteinen betoni-laatta.

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.

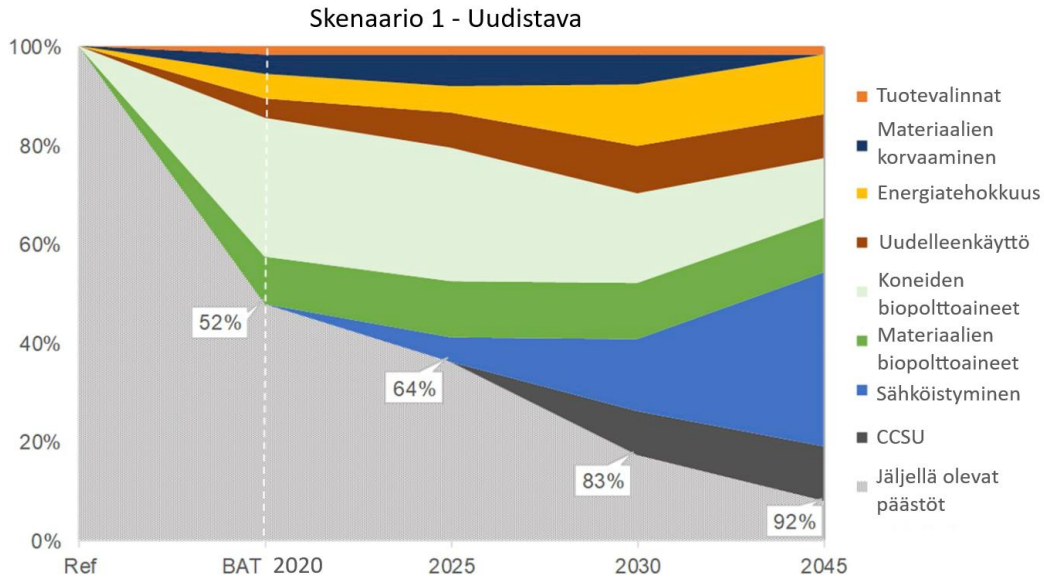
3.2.5 Päästövähennykset päästölaskennassa

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 käännettyksi 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 3-6 on esitetty tutkimuksessa /99/ arvioitu tiehankkeen päästöjen A1...A5 vähentyminen Ruotsissa. Nykyään noin 52 % päästöjen vähentämisen suhteessa referenssitason uskotaan olevan teknologisesti mahdollista (BAT, Best Available Technology). Vuonna 2030 päästöistä arvioidaan voitavan vähentää noin 83 % ja vuonna 2045 noin 92 % referenssitason verrattuna. Referenssitasona on käytetty materiaalien perustasoa ilman mitään päästöjä

² On syytä huomata, että puurakentamisen tuotteisiin käytetään pääsääntöisesti runko-puuta, kun taas moniin muihin puutuotteisiin käytetään kuitupuuta. Hakkuiden erilaisella kohdentumisella voi olla vaikutuksia metsien hiilinieluihin.

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 /99/.



Kuva 3-6. Karlsson et al. /99/ arvioimat rakentamisen päästövähentämismahdollisuudet Ruotsissa.

Kuvassa 3-6 esitetyssä uudistavassa skenaariossa kaikkien osa-alueiden oletettiin edistyvän tasaisesti. Tutkijat kehittivät myös neljä muuta skenaariota (suluissa skenaarion 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-tekniologiaa (52, 63, 66 ja 70 %)

/99/ mukaan (kuva 3-6) vuoteen 2025 infrahankkeen päästöjä vähennetään pääosin jo nykyisin käytössä olevalla teknologialla: materiaalien korvaamisella vähäpäästöisemmällä, 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-tekniologian hyödyntäminen alkaa 2020-luvun loppupuolella, ja niiden arvioidaan johtavan kokonaisuudessaan noin 40 prosentin päästövähennykseen referenssitilasta vuoteen 2045 mennessä. Loput noin 50 % päästövähennyksistä ovat mahdollisia 2020-luvun teknologialla /99/.

/99/ arvioivat betonin ja teräksen päästöjen vähentämisen nettonollatasolle olevan mahdollista skenaariosta riippuen vuoteen 2030–2045 mennessä. Teräksen osalta

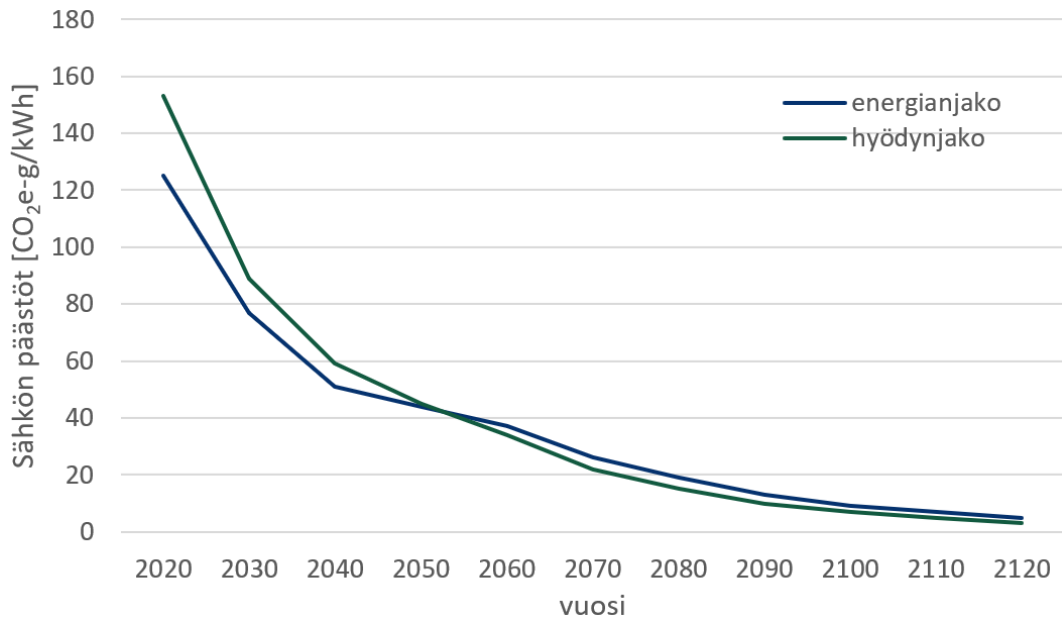
päästövähennysten arvioidaan 2030-luvulle asti olevan mahdollista biopolttoaineiden ja CCSU-tekniikan avulla. Vetytelkistämisen arvioidaan vähentävän teräksen valmistuspäästöjä merkittävästi vasta vuoteen 2045 mennessä. Betonin osalta 2030-luvulle asti valtaosa päästövähennyksestä arvioidaan saavutettavan vaihtoehtoisten sideaineiden ja biopolttoaineiden käytöllä. Myös CCSU:n arvioidaan vähentävän klinkkerin valmistuksen päästöjä 2030-luvulla. Vuoteen 2045 mennessä myös sähköistyminen vähentää betonin päästöjä /99/. Diplomityössä /16/ (aluvussa 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. Tällaisia tulevaisuuden ennustamiseen liittyviä näkökulmia onkin syytä tarkastella, kun Väylävirasto luo omaa päästöarviointimenetelmäänsä.

Työmaatoimintojen osalta merkittävimmät päästölähteet palautuvat koneiden ja kuljetuskaluston käyttämän energian päästöihin. Työmaatoiminnoista aiheutuviin päästöihin voidaan vaikuttaa joko käyttämällä biopolttoaineita, käyttämällä energiatehokkaampaa kalustoa tai vaihtamalla sähkökäyttöiseen kalustoon.

Kestävien ja innovatiivisten julkisten hankintojen verkostomainen osaamiskeskus KEINO on laatinut Päästöttömät työmaat green deal -työmaakonseptin. Konsepti tukee green deal -sopimusten toimeenpanoa, mutta sitä voidaan käyttää myös ilman varsinaista sopimusta. Konsepti kuvaa yleisesti periaatteita ja toimintatapoja työmaiden päästöjen vähentämiseksi. Konseptia voidaan käyttää talon- ja infrarakentamisessa sekä kunnossapidossa. Konseptissa esitellään keinoja muun muassa markkinavuoropuheluun sekä työmaakaluston päästövaatimusten asettamiseen /105/.



Kuva 3-7. Sähkön päästökertoimen oletettu kehittyminen Suomessa /102/.

Suomessa käytetyn sähkön päästösekoituksen ominaispäästönä on esimerkiksi Betoniteollisuuden ympäristöselosteissa (esim. /100/) käytetty Bionovan vuoden 2018 arvoa 0,24 CO₂e-kWh. Samoissa selosteissa kevyen polttoöljyn ominaispäästönä on käytetty Ecoinventin arvoa 0,34 CO₂e-kWh. Tilastokeskuksen Polttoaineluokitus 2021 mukaan vastaava päästö olisi 0,256 CO₂e-kWh, missä on otettu huomioon 3,0 % bio-osuus /101/. Kuvassa 3-7 on esitetty Suomen Ympäristökeskuksen tietokannan ominaispäästökertoimet rakennuksissa käytettävälle sähköenergialle eri vuosille /102/.

4 CASE: Yksiaukkoinen maantiesilta

4.1 Tarkastelun reunaehdot

4.1.1 Tavoitteet

Tarkastelussa perehdyttiin siihen, millainen vaikutus sillan kansimateriaalin valinnalla on sillan elinkaaripäästöihin. Työn tavoite oli selvittää kolmesta eri pääraakennusmateriaalista rakennetun sillan päästöt sen 100 vuoden elinkaaren aikana, kun huomioidaan myös siltojen tyypilliset korjaustoimenpiteet. Lisäksi tavoitteena oli tutkia, miten suuri osa sillan päästöistä aiheutuu ennen sillan käyttöönottoa eli rakennusvaiheessa, ja kuinka hyvin käyttöönottoon mennessä syntyneet päästöt ennustavat sillan elinkaaripäästöjä erityyppisillä silloilla.

4.1.2 Tarkasteluperusteet ja rajaukset

Standardin SFS-EN ISO 14040 mukaan merkittävä vaihe elinkaarianalyysissä on työn rajauksen ja toiminnallisen yksikön määrittäminen /19/. Toiminnalliseksi yksiköksi on määritetty ajoneuvoliikenteen silta, jolla on vähintään 20-metrinen jänneväli, kaksi kaistaa ja joka on toiminnassa 100 vuotta.

Sillat valittiin tutkimukseen Taitorakennerekisteristä haarukoimalla hyötyleveyden ja sillan jännemitan mukaan. Lisäksi yhtenä hakukriteerinä oli siltojen suunnittelu-kuorma, sillä valittujen siltojen tuli olla sellaisia, joita voitaisiin rakentaa myös 2020-luvulla. Valittujen siltojen tavoitepäämitat olivat seuraavat:

- HL = 8,5...9,0 m
- Jännemitta = 20...25 m.

Suomen yleisin sillan käyttötarkoitus on vesistösilta sekä siltojen lukumäärää että pinta-alaa tarkasteltaessa /103/.

Tässä tutkimuksessa siltojen perusratkaisu oli paaluperustus siten, että alusrakenteiden koko on pieni verrattuna siltakannen kokoon. Valitulla perustustavalla sillan päämateriaalivalinta vaikuttaa vain vähän alusrakenteiden lopullisiin mittoihin ja materiaaliarpeisiin. Siltakannen omapaino vaikuttaa alusrakenteissa esimerkiksi tarvittavaan paalujen määrään tai peruslaatan kokoon, joka on tässä tutkimuksessa otettu huomioon käyttämällä puusilloilla yhtä pykälää pienempää paalukokoa kuin teräspalkkisillalla ja teräsbetonisella laattasillalla. Vertailun yhtenäistämiseksi paalujen määrä ja pituus on kuitenkin vakioitu.

Infrarakentamisen informaatiomoduuleista huomioitiin elinkaaren vaiheet alkaen maanrakennustöistä ja päättyen rakenteen purkamiseen. Näistä toimenpiteistä päästölaskelmaan sisällytetään sillan rakentaminen, sillan käyttö- ja ylläpitovaihe sekä sillan purkaminen. Moduulit on esitelty tarkemmin kappaleessa 3.1.1.

Tässä tarkastelussa käytetyt päästökertoimet on esitetty liitteessä 1. Päästökertoimet ovat peräisin joko SYKE:n ylläpitämästä Rakentamisen päästötietokannasta, ajan tasaisista EPD:stä tai VTT:n ja Rapalin *Panos pohjaisen CO2 laskennan pilotoinnin* (2014) tietokannasta. Tuotteille, joille löytyi useampi eri päästökertoimen, on

valittu mahdollisimman edustava päästökerroin. Infrabetonien osalta on hyödynnetty BY:n julkaisemaa vähähiilisten betonien luokittelua /104/, jonka arvoista on valittu GWP.REF-luokan arvot. On syytä ottaa huomioon, että myös tämä luokka on vaatimus, sillä se perustuu vuoden 2021 kotimaiseen keskiarvotietoon.

Kuljetus työmaalle arvioidaan tuotekohtaisesti massojen perusteella. Kuljetusmatkat arvioitiin tässä tutkimuksessa laskemalla etäisyys todellisilta siltapaikoilta lähimpään tuotetoimittajaan karttapalvelusovelluksen avulla joka sillalle erikseen, ja näistä arvoista laskettiin keskiarvo. Kuljetusmatkat on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Eri tuotteiden kuljetusmatkat.

	Keskiarvo [km]	Pyörästetty [km]
Betoni	44	50
Betoniteräs	387	390
Terästuotteet	430	430
Puutuotteet	30	30
Liimapuutuotteet	380	380
Muu rakennustuote	21	20
Laakerit	1000	1000

Tässä tutkimuksessa keskityttiin ainoastaan ilmaston lämpenemistä kiihdyttävien CO₂e-päästöjen laskentaan ja niiden välisten korrelaatioiden etsintään, eikä muita ympäristölle haitallisia vaikutusmekanismeja huomioitu vertailussa. Rajaus pohjautuu valtion pyrkimykseen erityisesti hiilineutraaliuden edistämiseen.

4.2 Valitut sillat

Tarkasteluun valittujen siltojen päämitat, siltatunnukset ja siltatyypit on esitetty kootusti taulukossa ja sillat ja niiden kohdalla tehdyt valinnat on esitelty tarkemmin omien alaotsikkojensa alla.

Taulukko 3. Tarkasteluun valittujen siltojen perustiedot.

<i>Tunnus</i>	<i>Sillan nimi</i>	<i>JM [m]</i>	<i>HL [m]</i>	<i>Sillan tyyppi</i>
KaS-1286	Haapajoen silta	17,50	7,50	Liimapuinen palkkisilta
T-48	Kylä-Peron silta	24,00	6,00	Liimapuinen laattasilta
L-2276	Äijäjoen silta	21,00	8,50	Teräspalkkisilta, liittorakenteinen
KeS-317	Pistesalmen silta	20,00	9,25	Teräsbetoninen laattasilta



Kuva 4-1. Kuvat tutkituista silloista Taitorakennerekisteristä (kuvaaja). Yläriivi: Haapajoen silta (Tarja Särkiniemi), Kylä-Peron silta (Milla Malka). Alarivi: Äijäjoen silta (Jukka Leskelä), Pistesalmen silta (Veijo Wallin).

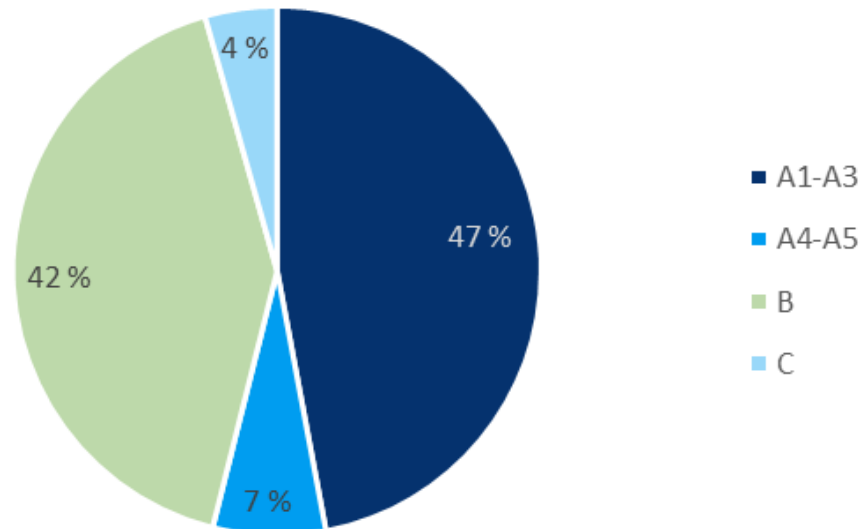
4.2.1 Liimapuinen palkkisilta ja laattasilta

Puusillan rakenneosien kokemusperäiset uusimisvälit ovat seuraavat:

- Säältä suojatut rakenteet 50 vuotta. Näihin kuuluvat tässä tutkimuksessa sillan kantava rakenne, eli palkisto tai kantava massiivinen laatta
- Helposti uusittavat rakenteet 25 vuotta. Tähän ryhmään kuuluvia rakenteita ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu
- Kannet 20 vuotta. Tähän ryhmään kuuluu tässä tutkimuksessa sillan kansirakenteen se osa, joka on suoraan vedeneristeen alla
- Kumilevy- tai kumipesälaakerit 50 vuotta. Tähän ryhmään kuuluu tässä tutkimuksessa sillan kumilevylaakerit
- Vedeneristys, mastiksieristys 30 vuotta.

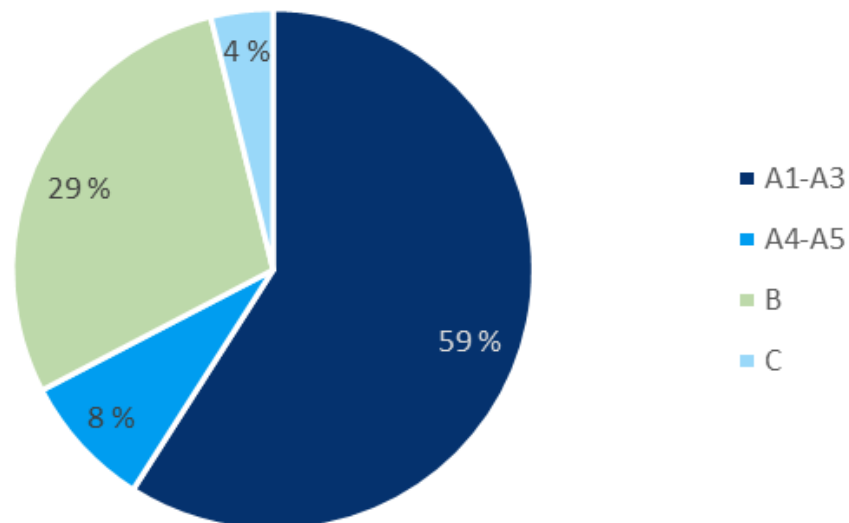
Edellä mainittujen toimenpiteiden lisäksi siltojen asfalttipäällystekerrokset kuluvat ja ne uusitaan yleensä 10...15 vuoden välein. Samalla uusitaan päällysteen saumaukset.

Liimapuisen palkkisillan rakennusvaiheen päästöiksi laskettiin 55 932 CO₂e-kg ja elinkaaripäästöiksi 110 253 CO₂e-kg. Elinkaaripäästöjen jakautuminen moduuleittain on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 4-2. Liimapuisen palkkisillan elinkaaripäästöjen jakautuminen moduuleittain.

Liimapuisen laattasillan rakennusvaiheen päästöiksi laskettiin 68 529 CO₂e-kg ja elinkaaripäästöiksi 112 982 CO₂e-kg. Elinkaaripäästöjen jakautuminen moduuleittain on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 4-3. Liimapuisen laattasillan elinkaaripäästöjen jakautuminen moduuleittain.

4.2.2 Teräsbetoninen laattasilta

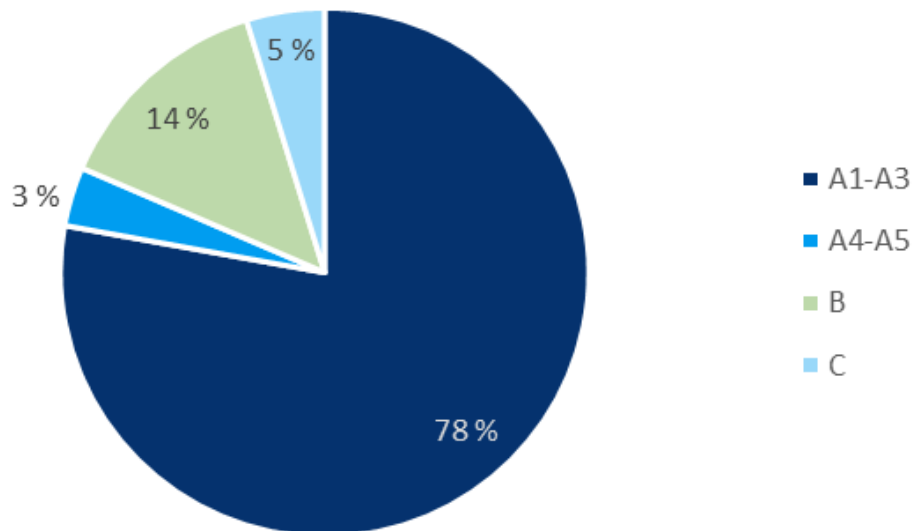
Teräsbetonisen sillan rakenneosien kokemusperäiset uusimisvälit ovat seuraavat:

- Reunapalkit, suolarasitus 40 vuotta, ei suolarasitusta, 50 vuotta. *Tähän ryhmään kuuluvat tässä tutkimuksessa sillan teräsbetonisen kansilaatan reunapalkit.*
- Kalottilaakerit 70 vuotta. *Tähän ryhmään kuuluu tässä tutkimuksessa sillan laakerit.*
- Vedeneristys, kumibitumikermi 40 vuotta. *Tähän ryhmään kuuluu tässä tutkimuksessa sillan vedeneriste.*

Edellä mainittujen toimenpiteiden lisäksi siltojen asfalttipäällystekerrokset kuluvat ja ne uusitaan yleensä 10...15 vuoden välein. Samalla uusitaan päällysteen saumaukset.

Teräsbetonista siltaa saatetaan joutua myös paikkaamaan tai pinnoittamaan käyttökänsä aikana, mikäli betonissa havaitaan vaurioita. Tällaisten vaurioiden määrän ennustaminen on haasteellista, sillä vauriot aiheutuvat usein työvirheistä sillan rakennusaikana tai käyttö- ja kunnossapitovirheistä sillan elinkaaren aikana. Esimerkki työvirheestä voi olla betonivalun aikana tapahtuva virhe betonin tiivistyksessä, joka aiheuttaa rakenteeseen valuvian. Käyttövirhe voi olla esimerkiksi törmäysvaurio, joka on aiheuttanut betonirakenteeseen lohkeaman. Tässä tutkimuksessa paikallisille korjauksille ei ole vaurioiden epävarman luonteen vuoksi arvioitu korjausten lukumäärää tai betonitilavuutta.

Teräsbetonisen laattasilan rakennusvaiheen päästöiksi laskettiin 173 252 CO₂e-kg ja elinkaaripäästöiksi 222 229 CO₂e-kg. Elinkaaripäästöjen jakautuminen moduuleittain on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 4-4. Teräsbetonisen laattasilan elinkaaripäästöjen jakautuminen moduuleittain.

4.2.3 Teräksinen palkkisilta, liittorakenteinen

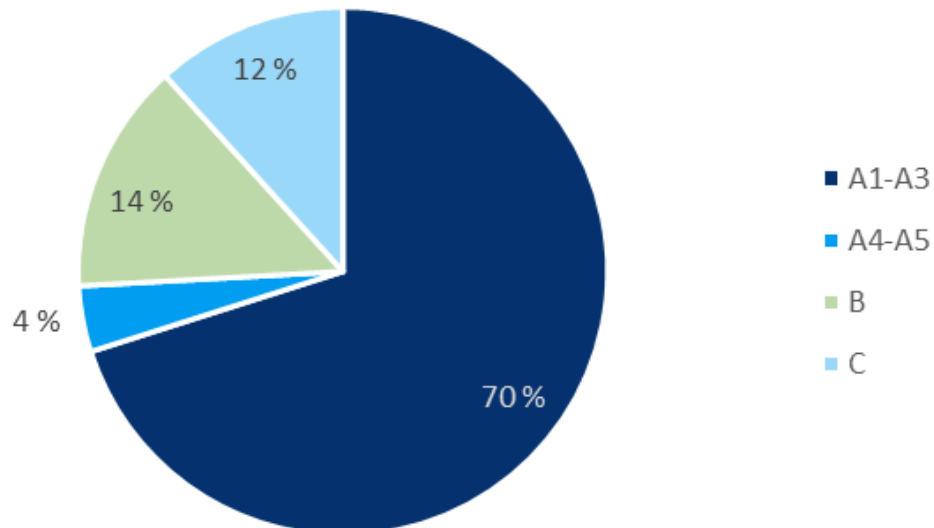
Teräksisen palkkisillan rakenneosien kokemusperäiset uusimisvälit ovat seuraavat:

- Reunapalkit, suolarasitus 40 vuotta, ei suolarasitusta, 50 vuotta. *Tähän ryhmään kuuluvat tässä tutkimuksessa sillan teräsbetonisen kansilaatan reunapalkit.*
- Kalottilaakerit 70 vuotta. *Tähän ryhmään kuuluvat tässä tutkimuksessa sillan laakerit.*
- Vedeneristys, kumibitumikermi 40 vuotta. *Tähän ryhmään kuuluu tässä tutkimuksessa sillan vedeneriste.*

Edellä mainittujen toimenpiteiden lisäksi siltojen asfalttipäällystekerrokset kuluvat ja uusitaan yleensä 10...15 vuoden välein. Samalla uusitaan päällysteen saumaukset.

Tutkimukseen valittu liittorakenteinen terässilta on säänkestävää (tuotenimi COR-TEN) terästä, joka ei tarvitse säännöllistä pintakäsittelyä. Teräs muodostaa lisäaineidensa avulla materiaalin pinnalle suojaavan kerroksen, kun teräs altistuu sääolosuhteille.

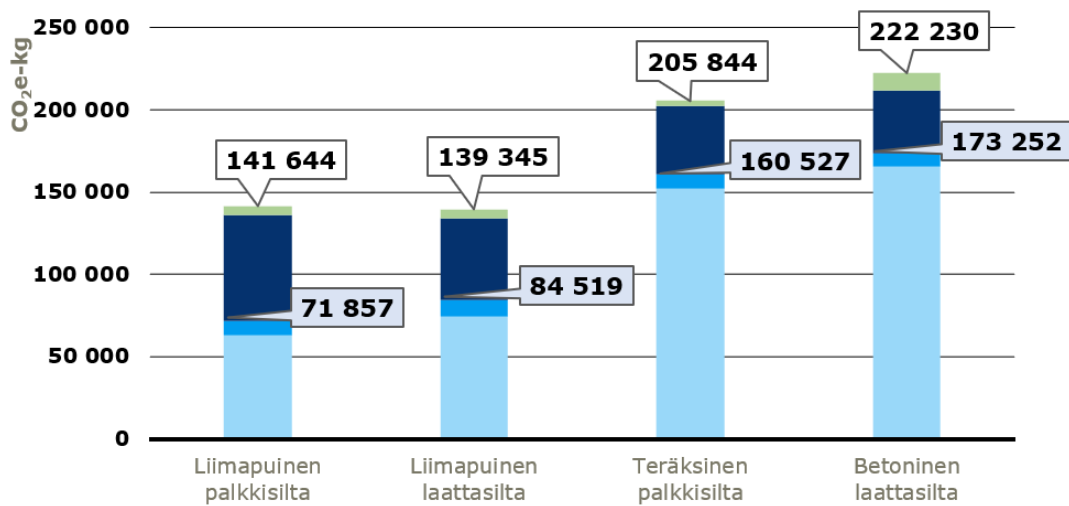
Teräksisen palkkisillan rakennusvaiheen päästöiksi laskettiin 154 915 CO₂e-kg ja elinkaari päästöiksi 198 613 CO₂e-kg. Elinkaari päästöjen jakautuminen moduuleittain on esitetty seuraavassa kuvassa.



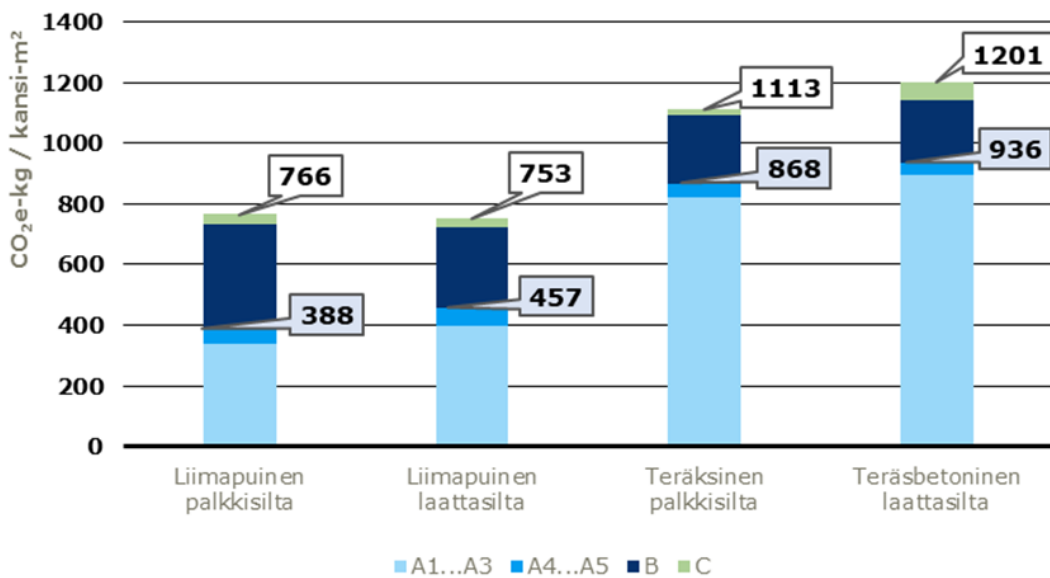
Kuva 4-5. Teräksisen palkkisillan elinkaari päästöjen muodostuminen moduuleittain.

4.3 Elinkaari päästöjen vertailu

Kuvassa 4-6 on esitetty eri siltatyypin rakennusvaiheen päästöt. Siltatyypeistä eniten päästöjä syntyi teräsbetonisen laattasillan rakentamisesta ja elinkaaresta. Liittorakenteisen teräspalkkisillan päästöt olivat noin 15 % pienemmät. Puusiltojen ilmastopäästöt olivat vain noin kolmasosa kahden muun päärakennusmateriaalin silloista. Kun huomioon otettiin 100 vuoden elinkaari, ero puusillan hyväksi kapeni, mutta oli silti noin kaksinkertainen (kuva 4-7). Liimapuisen palkkisillan päästöistä vain reilu puolet aiheutui rakennusaikana, mikä johtuu varmasti osittain siitä, että puusillan kantavan rakenteen suunnittelukäyttöikä on vain puolet (50 vuotta) siitä mitä betonisella tai teräspalkkisillalla suunnittelukäyttöikä on (100 vuotta).



Kuva 4-6. Tutkittujen siltojen rakentamis- (alempi luku) ja elinkaari päästöt (ylempi luku) moduuleittain. Skaalattu betonisen laattasilan kansipinta-alalle (185 m²).

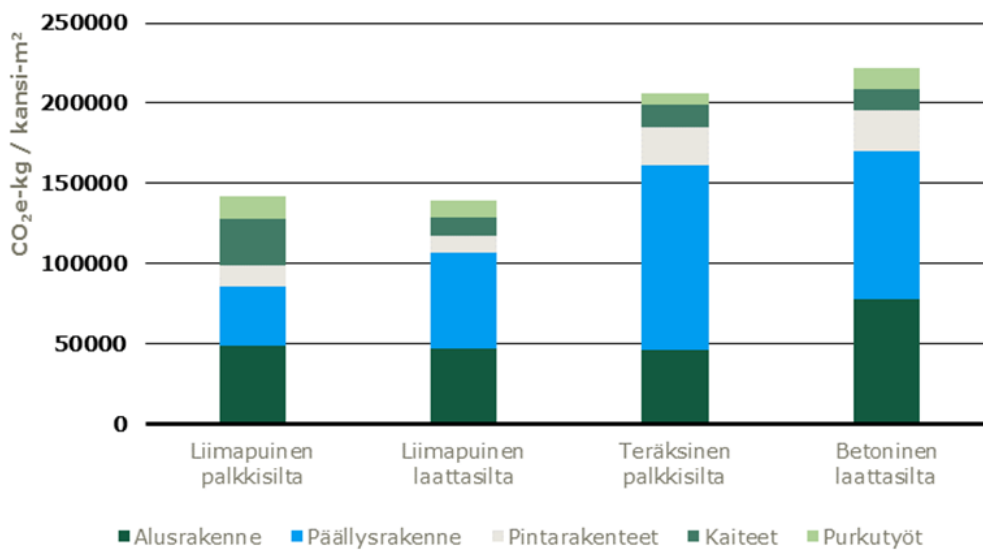


Kuva 4-7. Tutkittujen siltojen rakentamis- (alempi luku) ja elinkaari päästöt (ylempi luku) kansim² kohden.

Taulukko 4. Tutkittujen siltojen lasketut, skaalaamattomat ilmastopäästöt.

Siltatyyppi	Rakentamisen	Korjaukset ja	Elinkaari-
	päästöt	purkaminen	päästöt
	[CO ₂ e-kg]	[CO ₂ e-kg]	[CO ₂ e-kg]
Liimapuinen palkkisilta	55 932	54 321	110 253
Liimapuinen laattasilta	68 529	44 810	112 982
Teräspalkkisilta	154 915	43 698	198 613
Teräsbetoninen laattasilta	173 252	48 995	222 229

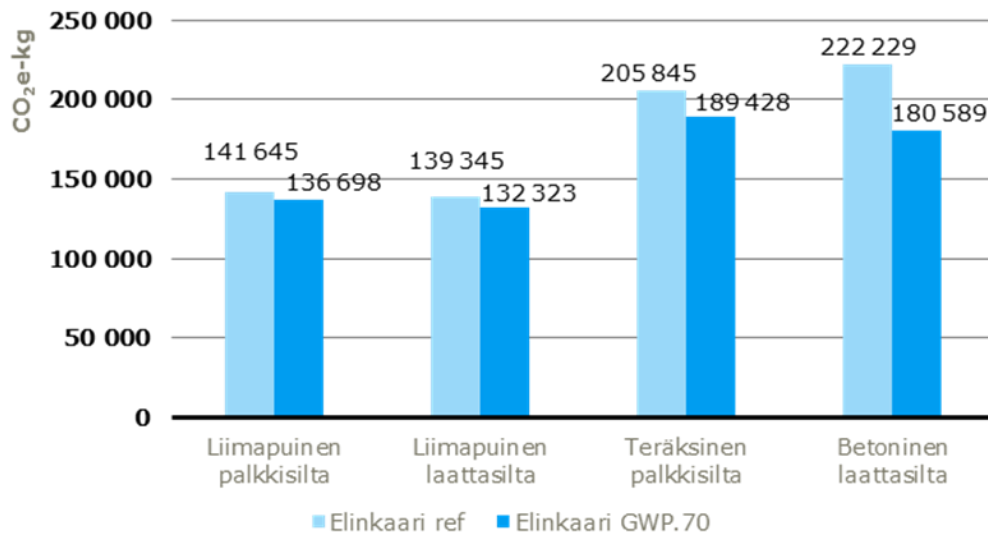
Kun tarkasteltiin, mistä päästöt muodostuivat päärakennesoitain (kuva 4-8), havaittiin, että teräspalkkisillalla ja teräsbetonisella sillalla alusrakenteen päästöt ovat suuremmat kuin puisilla silloilla. Tässä merkittävä ero tulee paalukoosta: Puusilloilla käytettiin halkaisijaltaan 600 mm teräspaalua, joka raudoitettiin ja valettiin täyteen betonia. Teräsbetonisella ja teräspalkkisillalla paalun halkaisija oli 700 mm päällysrakenteen suuremman massan vuoksi. Suurempi paalu vaatii myös enemmän betonitäyttöä.



Kuva 4-8. Tutkittujen siltojen elinkaari- ja rakentamispäästöjen muodostuminen rakenneosittain. Skaalattu betonisen laattasilan kansi-pinta-alalle (185 m²).

4.4 Materiaalipäästöjen kehityksen vaikutus tuloksiin

BY-Vähähiilisyysluokittelun avulla voidaan vaikuttaa sillassa käytettävien betonien päästötasoon. Vertailulaskennan avulla selvitettiin, miten merkittäviä hiilidioksidipäästöjä on mahdollista saavuttaa käyttämällä luokittelun mukaista GWP.70 betonia. Vertailulaskennan tulokset on esitetty kuvassa 4-9.



Kuva 4-9. Vähähiilisemmän betonin valitsemisen vaikutus tutkittujen siltojen elinkaaripestöihin. Skaalattu betonisen laattasilan kansipinta-alalle (185 m²).

Merkittävimmät päästövähennykset on mahdollista saavuttaa betonisella laattasilalla, jossa päästöt laskivat kokonaisuudessaan noin -19 %, kun kaikki betonit täyttivät luokan GWP.70 vaatimukset. Teräspalkkisillalla ero oli noin -8 %, liimapuisella laattasilalla noin -5 % ja liimapuisella palkkisillalla noin -3,5 %.

Sillan päästöihin voidaan vaikuttaa asettamalla betonille vähähiilisyysvaatimus. On kuitenkin hyvä muistaa, että betonimateriaalin lisäksi päästöjä aiheuttavat myös rakennus- ja purkuvaiheen kuljetukset ja työmaapanokset sekä raudotteet.

5 Johtopäätökset

5.1 Nykytilanne

Eurooppalaisen kestäväen rakentamisen standardit kattavat tällä hetkellä kestäväen rakentamisen kaikki kolme ulottuvuutta (ympäristö-, sosiaaliset ja taloudelliset vaikutukset) puite- ja hanketasolla. Tuotetasolla standardit on kirjoitettu vasta ympäristövaikutusten arviointiin. Standardit ovat päivittyneet viime aikoina nopeaan tahtiin, ja vuonna 2022 on tullut ja odotettavissa päivityksiä moniin keskeisiin standardeihin. Niiden ilmestyminen onkin otettava huomioon kansallista infrarakentamisen päästöarviointimenetelmää tehtäessä.

Väylävirasto on ollut paljon mukana päästöarviointiin liittyvissä pohjoismaisissa tutkimushankkeissa tällä vuosituhanella. Tällä hetkellä käynnissä on neljän Pohjoismaan yhteinen NordLCA+-projekti, jossa jatketaan NordLCA-projektin työtä yhteisten 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.

Tutkimuksessa /16/ tarkasteltiin siltojen osuutta neljän investointihankkeen päästöistä. Tarkasteltujen hankkeiden perusteella siltojen osuus väylähankkeen päästöistä voi olla esimerkiksi 20...30 prosenttia. 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.

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

Suomessa infrarakentamisen ilmastopäästöjen laskentamenetelmät ja säädösohjaus ovat vasta kehitteillä. Laskenta tullaan suorittamaan vastaavilla menetelmillä kuin Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa. Menetelmässä 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. Esimerkiksi Ruotsin Trafikverketin tavoitetaso-palkkio-järjestelmän voi nähdä teollisuudelle reiluna päästövähennystapana.

5.2 Materiaalien vertailusta

Siltojen ilmastoarvioinnissa tulisi käyttää tuotekohtaisia EPD-tietoja niissä projektin vaiheissa, joissa käytettävät tuotteet tiedetään. Yleisten arvojen käyttämisen rinnalla myös aiemmissa suunnitteluvaiheissa tulisi olla mahdollista käyttää projektija tuotekohtaisia päästökertoimia eri vaihtoehtojen vertailussa, jotta esimerkiksi innovaatioiden avulla saavutettavat päästövähennykset voidaan ottaa huomioon kilpailutuksissa. Näiden yleisiä arvoja pienempien tuotekohtaisten päästökertoimien tulisi kuitenkin olla velvoittavia, minkä vuoksi niiden toteutumista tulisi valvoa hankkeen loppuun asti. Velvoittavuus tulisi siis ottaa huomioon hankinnassa muiden asetettujen kriteerien tavoin. 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 alemman tieverkon 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 diplomityön /16/ luvussa 4. Myös kuljetusten ja työmaatoimintojen päästöjä tarkasteltiin karkeasti. 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 vaihtoehtojen sideaineiden ja uusiokiviaineksen käytöllä. Vuoteen 2030 mennessä myös esimerkiksi sähköistymisen ja CCSU-tekniikan avulla on luultavasti mahdollista vähentää betonin valmistuspäästöjä. Eräs mahdollinen kehityssuunta on geopolymeerikomposiittien käyttö.

Lisäksi tutkimuksessa käsiteltiin raudoite- ja jänneteräksen vaikutusta betonirakenteen investointipäästöihin. Teräs- ja jännebetonisilloissa päällysrakenteissa raudoitteista voi aiheutua päästöjä noin 30...50 prosenttia betonin päästöistä. 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.

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-maalauksjärjestelmien ympäristöselosteet olivat tutkimuksen /16/ aikana vasta työn alla. Seuraavan kymmenen vuoden aikana markkinoille on odotettavissa vähäpäästöisiä teräslaatuja. Etenkin sitä ennen tehtäviksi mahdollisiksi päästövähennyksiksi tässä tutkimuksessa nostettiin taajamissa ja niiden lähetyksillä sijaitsevien

siltojen suunnittelu uudelleenkäytettäväksi sekä siltojen rakentaminen säänkestävästä teräksestä tai alumiinista. Jälkimmäiset vaikuttaisivat sillan ylläpidon päästöihin, vaikkakin etenkin alumiinin käytöstä aiheutuu oletettavasti suurempi hiilipiikki investointivaiheessa.

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 uudelleenkäytettäväksi sekä puupaalujen käyttöönottamista. Sillanrakennuksessa puun ei voida käytännössä olettaa toimivan hiilivarastona.

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.

On syytä huomata, että tässä tutkimuksessa materiaaleja tarkasteltiin kestävän kehityksen kolmesta ulottuvuudesta vain ympäristövaikutusten näkökulmasta. Ympäristövaikutuksia taas tarkasteltiin vain yhden mittarin, ilmastonlämmityspotentiaalain 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.

5.3 Siltojen vertailusta

Usein rakentamissuunnitteluvaiheessa keskitytään laskemaan ainoastaan rakennushankkeen hiilijalanjälkeä, eikä huomioon oteta sillan koko elinkaarta. Siltojen keskimääräinen elinkaari kuitenkin tunnetaan kohtuullisen hyvin, joten myös elinkaaripäästöt olisivat kohtuullisen helposti arvioitavissa. Tämän tutkimuksen perusteella erityyppisillä silloilla elinkaaren (informaatiomodulit A-C) päästöjen suhde pelkän rakentamisajan (modulit A1–A5) päästöihin vaihtelee merkittävästi siltatyyppistä riippuen. Ero korostuu varsinkin kevyempiä ja sitä kautta vähemmän päästöjä aiheuttavia materiaaleja, eli sillanrakennusmaailmassa käytännössä liima-puuta käytettäessä. Terässillalla ja teräsbetonisella laattasillalla koko elinkaaren päästöistä suurin osa syntyi jo rakennusaikana.

Eriytyyppisillä silloilla päästöjen suuruusluokka vaihtelee suuresti. Vaikka teräsbetonisen laattasillan tai teräspalkkisillan korjaustoimenpiteistä syntyy vain pieni osa koko sillan elinkaaren päästöistä, voidaan huomata, että varsinkin teräsbetonisen

laattasillan rakentamisen jälkeen aiheutuville päästöillä (49 522 CO₂e-kg) voisi lähestulkoon rakentaa liimapuisen palkkisillan, jonka rakentamispäästö oli 51 895 CO₂e-kg.

Suurimmat epävarmuustekijät ovat yleensä työn rajojen määrittäminen. Rakennusvaiheessa merkittävimmät epävarmuudet ovat lähtötietojen luotettavuus ja vertailtavuus keskenään, eri materiaalien ominaisuudet (mm. valmistustapa, resepti ja muut tuoteominaisuudet vaihtelevat valmistajasta riippuen).

Kuljetusten osalta kuljetusmatkat sekä kuljetustavasta aiheutuvat päästöt ovat epävarmoja, sillä kun päätös sillan rakentamisesta tehdään, on mahdotonta tietää, tuleeko rakennustuote lähimmästä mahdollisesta toimituspaikasta, vai tuodaanko se esimerkiksi lentorahdilla Kiinasta. Urakoitsija tilaa tuotteet, ja tulee samalla määrittäneeksi kuljetusmatkat.

Elinkaaren aikaisia epävarmuustekijöitä, joita ei usein voida ennakoita, ovat ylläpitotoimenpiteiden epäsäännöllisyys ja materiaalien ennakoitua nopeampi kuluminen käyttöympäristössään ympäristötekijöiden tai muiden tekijöiden vaikutuksesta. Lisäksi ennakoimattomat vauriot ja ilmaston nopea muuttuminen voivat muuttaa rakenteiden korjaustarvetta.

5.4 Jatkotutkimustarpeet

Tässä tutkimuksessa tutkittiin materiaaleja pelkästään niiden ilmastolämmityspotentiaalin GWP kannalta. Lähitulevaisuudessa olisi suotavaa tutkia vastaavalla laajuudella ainakin uusiutumattomien luonnonvarojen ehtymistä ADP. Kestävän rakentamisen periaatteiden mukaisesti olisi hyvä ottaa numeerisesti huomioon kaikki ympäristöindikaattorit samalla kun tarkastellaan päästöjä. Ympäristö- ja kustannusvaikutusten lisäksi myös sillan- ja väylärakentamisen sosiaaliset vaikutukset tulisi ottaa huomioon. Nykyisellään mainittuja asioita arvioidaan Ympäristövaikutusten arviointimenettelyssä (YVA). Esimerkiksi ETSI-projektissa /40/ sillan ympäristövaikutuksia arvioitiin numeerisesti kuuden ympäristöindikaattorin kautta.

Lopputöissä 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 väyläviranomaisien kanssa. Tällaisia tutkimuskohteita ovat esimerkiksi

- kuiturautoitteiden käytön päästövähennyspotentialiaali ("teräsetön 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.

Työmaan päästöjen vaikutukset jätettiin standardin SFS-EN 15643 mukaisesti pois tarkastelusta. Niitä olisi kuitenkin syytä tutkia vielä enemmän, jotta niiden suuruusluokasta saataisiin käsitys. Työmaan päästöjä ovat esimerkiksi työmaan perustamisesta aiheutuvat päästöt, työnaikaisten kulkureittien ja apusiltojen rakentamisesta aiheutuvat päästöt, nostotöiden edellyttämät mahdolliset pohjanvahvistustoimenpiteet sekä työkoneiden paikalle toimittaminen ja posvienti. Myös nostotöissä käytettävien koneiden saatavuus ja liikuteltavuus työmaan aikana vaikuttaa päästöihin. Lisäksi todellisiin toteutuviin päästöihin kuuluvat muun muassa työmaatoimiston ylläpidosta aiheutuvat päästöt ja muut työmaan toiminnasta aiheutuvat ympäristövaikutukset. Myös työntekijöiden liikkuminen työmaalle ja sieltä pois päivittäin tapahtuu sillanrakentamisessa jopa pitkienkin matkojen päähän. Kokonaisuuteen vaikuttavia työmaan yhteiskäyttöpäästöjä on suunnittelu- tai rakennuttamispäätöstä tehdessä haastavaa, ellei mahdotonta arvioida ilman tarkempia lisätutkimuksia. Yhtäkään siltaa ei kuitenkaan voida rakentaa ainoastaan sillanrakennusmateriaaleista ilman työmaatoimintoja.

Suomessa on käynnissä päästötön työmaa -sopimus, joka on eräänlainen rakennustyömaiden green deal. Sen tavoitteena on vähentää työkoneiden aiheuttamia päästöjä ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. Vaikka työkoneiden päästöjen vaikutus osoitettiin tässä tutkimuksessa vähäiseksi verrattuna rakennusmateriaalien aiheuttamiin päästöihin, työmaatoimintojen päästöistä aiheutuva epävarmuus tutkimustuloksiin vähenee entisestään, kun työkoneiden päästöt pienenevät.

Säästetyn hiilidioksidikilogramman hintaa ei ole selvitetty, vaikka julkisissa hankinnoissa hinta on tärkeä kilpailuskriteeri. Voidaan kuitenkin olettaa, että mitä useammin rakenneosia tulee vaihtaa, sen kalliimmaksi säästetty hiilidioksidikilogramma tulee. Voidaan siis päätellä, että vaikka liimapuinen palkkisilta on laskennan perusteella vähäpäästöisin, se ei välttämättä ole kokonaisedullisin ratkaisu. Erilaisten päästövähennystoimenpiteiden merkittävyyttä ja kannattavuutta voisi arvioida kustannusten kautta, ja kohdentaa julkiset varat sellaisiin päästövähennystoimenpiteisiin, jotka ovat rakennusalalla tehokkaimpia.

Lähdeluettelo

- /1/ Euroopan parlamentti (9.3.2021). Hiilidioksidipäästöjä vähentämässä: EU:n tavoitteet ja toimet. Euroopan parlamentti. Saatavilla: <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20180305STO99003/hiilidioksidipaastoja-vahentamassa-eu-n-tavoitteet-ja-toimet> (viitattu 22.06.2021).
- /2/ Ympäristöministeriö (2019). Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2021. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän ohjeen luonnos lausuntokierrosta varten 6/2021. Ympäristöministeriön julkaisuja.
- /3/ 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.
- /4/ SFS-EN 15978 (2012). Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method. SFS-EN 15978. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- /5/ Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K., Engelbrecht, F., Guiot, J., Hijjoka, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S., Thomas, A., Warren, R. ja Zhou, G. (2018). Impacts of 1.5 °C Global Warming on Natural and Human Systems. Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C 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.

- /6/ IPCC (2021). Sixth Assessment Report. Fact sheet. Saatavilla: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/06/Fact_sheet_AR6.pdf (viitattu 22.01.2022).
- /7/ SFS-EN 15643 (2021). Sustainability of construction works. Framework for assessment of buildings and civil engineering works. SFS-EN 15643. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- /8/ Ympäristöministeriö. Kysymyksiä ja vastauksia vähähiilisestä rakentamisesta. Verkkosivu. Luettu 12.12.2021. <https://ym.fi/kysymyksiä-ja-vastauksia-vähähiilisestä-rakentamisesta>
- /9/ Väylävirasto (2022). Väyläviraston tilinpäätös 2021. Väyläviraston julkaisuja 16/2022.
- /10/ 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.
- /11/ Illman, J., Kumpulainen, A., Pesola, A. ja Vanhanen, J. (2012). Merenkulun ja liikenteen hiilijalanjälki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2012. Liikennevirasto.
- /12/ 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.
- /13/ Herva, M., Jauhainen, J. ja Lilja, K. (2015). CO2-päästö- ja kustannusohjaus mallipohjaisesti. Case Pissararata. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 47/2015. Liikennevirasto.
- /14/ 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.
- /15/ Martikkala, K. (2022). Siltojen elinkaari päästöjen vertailu siltatyypeittäin. Tarkastelujaksona 100 vuoden käyttöikä. Opinnäytetyö, YAMK. Tampereen ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202202252885>
- /16/ Pirttikoski, K. (2022). Rakennusmateriaalien vaikutukset sillan ilmastopäästöjen laskennassa. Diplomityö. Tampereen yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202203222663>
- /17/ Väylävirasto (2020). Tie- ja ratainfrastruktuurin elinkaariarvioinnin opas. Väyläviraston julkaisuja 64/2020.
- /18/ SFS-EN 15804 (2019). Kestävä rakentaminen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt. SFS-EN 15804:2012 + A2:2019. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- /19/ SFS-EN ISO 14040 (2020). Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. SFS-EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- /20/ SFS-EN ISO 14025 (2010). Ympäristömerkit ja -selosteet. Tyypin III ympäristöselosteet. Periaatteet ja menettelyt. SFS-EN ISO 14025. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- /21/ SFS-EN ISO 14044 (2018). Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja. SFS-EN ISO 14044:2012 + A1:2018. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

- /22/ SFS-EN 16485 (2014). Round and sawn timber. Environmental product declarations. Product category rules for wood and wood-based products for use in construction. SFS-EN 16485. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- /23/ 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.
- /24/ 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.
- /25/ 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.
- /26/ 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.
- /27/ prEN 17672 (2022). Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Horizontal rules for business-to-consumer communication. CEN/TC 350.
- /28/ prEN 15941 (2021). Sustainability of construction works - Data quality for environmental assessment of products and construction work - Selection and use of data. CEN/TC 350.
- /29/ Häkkinen, T., Nibel, S. ja Birgisdottir, H. (2021). Definition and methods for the carbon handprint of buildings. Ympäristöministeriö.
- /30/ CEN/TR 17310 (2019). Carbonation and CO₂ uptake in concrete. CEN/TR 17310. CEN/TC 350 Sustainability of construction works.
- /31/ SFS-EN 17472:2022
- /32/ Vejdirektoratet ja Banedanmark (13. elokuuta 2021). InfraLCA v1.51.
- /33/ Trafikverket (2021). Miljörapport 2020. Trafikverket.
- /34/ Statens vegvesen (2021). Årsrapport 2020. Statens vegvesen.
- /35/ Vejdirektoratet (2020). Statsvejnettet 2020.
- /36/ 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).
- /37/ Vuorinen, P. (2021). KIRA-sektori osana EU:n kestävä rahoituksen luokitusjärjestelmää. Rakennustekniikka 77.2, s. 44–45.
- /38/ Jutila, A. ja Sundquist, H. (2007). ETSI project (Stage 1): Bridge Life Cycle Optimisation. Tekninen raportti.
- /39/ Salokangas, L. (2009). ETSI project (Stage 2): Bridge Life Cycle Optimisation. en. Tekninen raportti.
- /40/ Salokangas, L. (2013). ETSI project: Bridge Life Cycle Optimisation : stage 3. URL: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-5052-2>

- /41/ COWI (2012). Demonstration of ETSI LCC and LCA tools. en. Tekninen raportti. URL: http://etsi.aalto.fi/Etsi3/PDF/TG1/Verification_Report.pdf
- /42/ Saarniaho, K. (2021). Väyläviraston ympäristöpäivä. Webinaari 12.10.2021. Esitysmateriaali. Väylävirasto.
- /43/ Pousette, A., Malo, K., Thelandersson, S., Fortino, S., Salokangas, L. ja Wacker, J. (2017). Durable Timber Bridges. Final Report and Guidelines.
- /44/ NVF (2021). Nordisk Vejforum. URL: <https://nvfnorden.org/> (viitattu 21.10.2021).
- /45/ InfraLCA (2021). InfraLCA. Publicering webinar 24.6.2021. Esitysmateriaali. Vejdirektoratet ja Banedanmark.
- /46/ Solem, B. (2021). Brukonstruksjoner i tre - klimagassberegninger. NVF Bridges webinar 19.5.2021. Esitysmateriaali. Nordisk Vejforum.
- /47/ 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.
- /48/ 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.
- /49/ Multanen, E. (2019). VALTARI-allianssi. Vt12 VALTARI. LCA-raportti. Pöyry.
- /50/ Väylävirasto (2019). Sisäinen lähde. CO₂ -päästölaskennan pilotointi, Vt 5 Nuutilanmäki-Vehmaa -hankkeessa. Väylävirasto.
- /51/ Du, G., Safi, M., Pettersson, L. ja Karoumi, R. 2014. Life cycle assessment as a decision support tool for bridge procurement: environmental impact comparison among five bridge designs. The international journal of life cycle assessment, Vol.19 (12), 1948-1964.
- /52/ Rantala, T. 2010. Life Cycle Analysis of three Finnish Standard Bridges. Verkkojulkaisu. Luettu 13.9.2021. <https://www.doria.fi/handle/10024/121151>
- /53/ Väylävirasto (12. toukokuuta 2021). Lahottajasienten aiheuttamat vauriot puusilloissa on kartoitettu. Väylävirasto. URL: <https://vayla.fi/-/lahottajasienten-aiheuttamat-vauriot-puusilloissa-on-kartoitettu> (viitattu 10. 10. 2021).
- /54/ Pakkala, T. 2020. Assessment of the Climate Change Effects on Finnish Concrete Facades and Balconies. Civil Engineering. Tampereen yliopisto. Tampere University Dissertations 204. Väitöskirja. ISBN 978-952-03-1423-1.
- /55/ Määttä, R. 2022. Muuttuvien tulvien vaikutus siltoihin ja niiden suunnitteluun. Diplomityö. Tampereen yliopisto.
- /56/ Yle. 2013. Yrittäjä 76-tonnisen tukkirekan ratissa: Tämä on tulevaisuutta. Verkkouutinen. Luettu 16.2.2022. <https://yle.fi/uutiset/3-6877384>
- /57/ Airaksinen Matti, yksikönpäällikkö, siltojen omaisuudenhallinta. Haastattelu 8.11.2021.

- /58/ Väylävirasto (2021). Taitorakenteiden ylläpidon toimintalinjat, taustaselvitys. 2015. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-090-2>. Luettu 8.9.2021.
- /59/ Häkkinen, T. ja Pesu, J. (2021). Infrarakentamisen CO₂-päästötietokantatyön tilannekatsaus. Sidosryhmäseminaari 1.12.2021. Esitysmateriaali. Väylävirasto.
- /60/ 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.
- /61/ Salminen, E., Anttonen, R. ja Marttila, L. (2021). Ympäristöseloste. Valmisbetonit. EPD. Vahanen Environment Oy.
- /62/ SFS-EN 206 (2021). Concrete. Specification, performance, production and conformity. SFS-EN 206:2014 + A2:2021. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- /63/ 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.
- /64/ 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.
- /65/ He, Z., Wang, S., Mahoutian, M. ja Yixin S. (2020). Flue gas carbonation of cement-based building products. *Journal of CO₂ Utilization* 37.
- /66/ 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.
- /67/ Finnsementti (2021). Ympäristöraportti 2021.
- /68/ 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.
- /69/ 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.
- /70/ Väylävirasto (2020). Infrabetonien valmistus. Väyläviraston ohjeita 41/2020. Väylävirasto.
- /71/ 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.
- /72/ 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. Vol. 25. RILEM State-of-the-Art Reports. Springer.
- /73/ 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.
- /74/ Salminen, E., Anttonen, R. ja Marttila, L. (2021). Ympäristöseloste. Valmisbetonit. EPD. Vahanen Environment Oy.
- /75/ 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.
- /76/ 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 Research* 42.4, s. 607–612.
- /77/ Häkkinen, T. (2020). Generic data for metals - stainless steel. Suomen ympäristökeskus
- /78/ 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.
- /79/ 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.
- /80/ Tiehallinto (2001). Tiesiltojen ainemenekki- ja kustannusmallit.
- /81/ Häkkinen, T. (2020). Generic data for metal products / steel products (excluding stainless). Suomen ympäristökeskus.
- /82/ by 201 (2018). *Betonitekniikan oppikirja 2018*. Kuudes päivitetty painos. Oppikirjat, 201. Helsinki: BY-Koulutus Oy.
- /83/ 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. *Journal of cleaner production* 233, s. 421–428.
- /84/ 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.
- /85/ Tsupari, E., Berg, C.-G., Katajisto, O., Leveelahti, U. ja Juutilainen, T. (2021). Decarbonate. Tutkimuslaitteiston virtuaaliavajaiset 12.10.2021. Esitysmateriaali. VTT.
- /86/ 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.
- /87/ 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.
- /88/ Meesala, C., Verma, N. ja Kumar, S. (2019). Critical review on fly-ash based geopolymer concrete. *Structural Concrete* 21, s. 1013–1028.

- /89/ 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.
- /90/ SSAB (2021). Annual Report 2020. SSAB.
- /91/ Leppänen, H. (2021). Fossil free steel value chain. Green and Digital Steel Technologies webinar 27.5.2021. Esitysmateriaali. SSAB.
- /92/ Mosaker, G. (2021). Advantages by use of aluminium in bridges. NVF Bridges webinar 19.5.2021. Esitysmateriaali. Nordisk Vejforum.
- /93/ Siwowski, T. (2015). Bridge Engineering: Selected Issues. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- /94/ Pousette, A., Malo, K., Thelandersson, S., Fortino, S., Salokangas, L. ja Wacker, J. (2017). Durable Timber Bridges. Final Report and Guidelines. English. SP Rapport.
- /95/ Häkkinen, T. (2020). Generic data for wood products / LVL. Suomen ympäristökeskus.
- /96/ Soimakallio, S., Häkkinen, T., Seppälä, J. (2021). Puutuotteet hiilivarastona ja uusiutumattomien materiaalien korvaajina. Puurakentamisen lisäämisen vaikutukset kasvihuonekaasutaseisiin Suomessa vuoteen 2035 mennessä. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 45/2021.
- /97/ Seppälä, J., Heinonen, T., Kilpeläinen, A., Peltola, H., Pukkala, T., Sihvonen, M., Soimakallio, S., Weaver, S., Vesala, T., Ollikainen, M. (2022). Metsät ja ilmasto: Hakkuut, hiilinielut ja puun käytön korvaushyödyt. Suomen ilmastopaneelin raportti 3/2022.
- /98/ Niu, Y., Fink, G. (2019) Life Cycle Assessment on modern timber bridges. <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1501421>
- /99/ 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.
- /100/ Salminen, E., Anttonen, R. ja Marttila, L. (2021). Ympäristöseloste. Valmisbetonit. EPD. Vahanen Environment Oy.
- /101/ Tilastokeskus (2021). Polttoaineluokitus 2021.
- /102/ Soimakallio, S. (2020). Specific emissions for district heat, district cooling and electricity used in buildings. Suomen ympäristökeskus.
- /103/ Taitorakennerekisteri. Verkkopalvelu. Siltatietojen hakuja tehty 13.9.2021-1.2.2022. Vaatii käyttöoikeuden. <https://extranet.vayla.fi/trex/>
- /104/ BY (2022). BY-Vähähiilisyysluokitus. Osa 1. Taustaraportti 2022. Suomen Betoniyhdistys ry.
- /105/ KEINO (2021). Päästöttömät työmaat green deal -työmaakonsepti. <https://www.hankintakeino.fi/sites/default/files/media/file/P%C3%A4%C3%A4st%C3%B6tt%C3%B6m%C3%A4t%20ty%C3%B6maat%20green%20deal%20-%20ty%C3%B6maakonsepti%201.0.pdf>

Käytetyt päästökertoimet

Tuote	Yksikkö	Panospohjaisen CO2-laskennan pilotointi väylähankkeissa (2014)	Rakentamisen päästötietokanta	EPD/Muu	Huomaus
Betoni C25/30	kg/m3	213,51	235,3	243	Yleinen EPD, betoniteollisuus (2021)
Betoni C30/37 P30	kg/m3			300	BY:n vähähiilisyiden luokitteluoheje, GWP.REF
Betoni C35/45 P30	kg/m3			330	BY:n vähähiilisyiden luokitteluoheje, GWP.REF
Betoni C35/45 P50	kg/m3			340	BY:n vähähiilisyiden luokitteluoheje, GWP.REF
Betoni C50/60, huokostettu	kg/m3			395	BY:n vähähiilisyiden luokitteluoheje, GWP.REF
Raudoite B500B/A500HW	kg/kg	0,91	0,56	0,42	Celsa EPD
Harva kaide, korkea	kg/m	25,75	51,73		
Korkea suojaverkko	kg/m	4,44	17,09		
Teräsrakenne, kuumasinkitty	kg/kg	1,11			
Teräsrakenne, kantava, pinnoitettu tai säänkestävä teräs	kg/kg		2,5		
Teräspaalu d600/12,5	kg/m			468	EPD, SSAB Steel Piles, 2021
Teräspaalu d600/14,2	kg/m			530	EPD, SSAB Steel Piles, 2021
Teräspaalu d700/12,5	kg/m			547	EPD, SSAB Steel Piles, 2021
Teräspaalu d700/14,2	kg/m			620	EPD, SSAB Steel Piles, 2021
Muottilaudat	kg/m2	0,85			
Muottipuutavara	kg/m	0,28			
Painekyllästetty puutavara	kg/kg		0,14		
Liimapuu (GLT)	kg/kg		0,11		
Painekyllästetty liimapuu*	kg/kg		0,167		Synteesi liimapuun ja painekyllästetyn puutavaran arvoista
Kumibitumipohjainen saumamassa	kg/m	0,7			
Kumibitumikermi, 2-kertainen	kg/m2	7,28	8,24	2,03	
Asfaltti AB 16	kg/t	36		40	RTS EPD nr 6, AB16 RC 50%. Asfalttikallio. (7.4.2017)
Kumibitumimastiksi	kg/kg	0,04			
Hiekkapuhallushiekka	kg/m2	1,57			
Murske	kg/kg		0,007		
Kalliomurske	kg/m3	2,85	10,5		
Rakenteen purkutyö ja jälkikäsitteily: Betonirakenne	kg/kg		0,006		
Rakenteen purkutyö ja jälkikäsitteily: Puurakenne	kg/kg		0,02		
Rakenteen purkutyö ja jälkikäsitteily: Teräsrakenne	kg/kg		0,002		



Väylävirasto
Trafikledsverket

ISSN 2490-0745
ISBN 978-952-405-026-5
www.vayla.fi