

Juuso Kokkonen

Kevyen liikenteen siltojen toteutusvaihtoehdot

Elinkaariarvioinnin (LCA) tulosraportti



Julkaisusarja

Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisuja C: Raportteja, 149

Tekijä

Juuso Kokkonen, Karelia-ammattikorkeakoulu

© Tekijä ja Karelia-ammattikorkeakoulu



Tämä julkaisu on lisensoitu Creative Commons Nimeä-EiMuutoksia 2.0 Kansainvälinen -lisenssillä.

ISBN 978-952-275-440-0

ISSN 2323-6914

Karelia-ammattikorkeakoulu 2024

Älykäs ja ilmastoviisas rakentaminen -hanke



POHJOIS-KARJALA
Maakuntaliitto



Euroopan unionin
osarahoittama

Tiivistelmä

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli määrittää elinkaaren ilmastovaikutukset neljälle yleisesti käytetylle kevyen liikenteen sillalle. Tavoitteena oli tunnistaa, millainen vaikutus kantavien rakenteiden materiaalivalinnoilla on hiilijalanjälkeen. Osatavoitteena oli testata laskelmien avulla syksyllä 2023 julkaistua Väyläviraston Infrarakentamisen vähähiilisyyden arviointimenetelmää. Työssä hyödynnettiin myös Suomen ympäristökeskusten ylläpitämää Infrarakentamisen päästötietokantaa, sekä Ihku-allianssin kehittämää Ihku-laskentapalvelua.

Tutkimus on osa Älykäs ja ilmastoviisas rakentaminen -hankkeen toimenpiteitä. Hankkeen tehtävänä on edistää tietoon pohjautuvaa ilmastoviisasta rakentamista ja käynnistää tarvittavia kehitysprosesseja alueen yrityksissä ja organisaatioissa konkreettisten pilottitoteutuksien avulla. Hankkeen toteuttaa Karelia-ammattikorkeakoulu ja rahoittaa Pohjois-Karjalan Maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta (EAKR). Tutkimus on yhteistyön tulos ja sitä on tehty osana tutkimus- ja kehittämishanketta projektityönä, sekä lisäksi opinnäytetyönä. Tutkimuksen lähtötietoina hyödynnetään rakennustekniikan opiskelija Arttu Rynnäsen tekemää opinnäytetyötä määrätietojen osalta.

Tutkimuksessa on mukana neljä toisistaan poikkeavaa kevyen liikenteen siltaa. Kahden sillan kannen kantava rakenne on liimapuuta. Näistä toinen on liimapuinen palkkisilta (Plp) ja toinen poikittain jännitetty puukantinen liimapuupalkkisilta. Kolmas silta on paikallavalettu teräsbetoninen ulokepalkkisilta (Bup) ja neljäs teräksinen liittorakenteinen palkkisilta (Tpbl). Siltojen jännemitat vaihtelevat 20 ja 26 metrin välillä, mikä tekee niistä varsin vertailukelpoisia.

Siltojen hiilijalanjäkilaskelmien tuloksena saatiin kokonaispäästöt eri vaihtoehdoille. Kokonaispäästöjen pohjalta hiilijalanjälki on lisäksi laskettu kansineliötä kohti ($\text{kgCO}_2\text{e/kan-m}^2$), sekä jaoteltu Infra 2015 Rakennusosa- ja hankenimikkeistön mukaisesti. Perusskenaariossa päästöt on laskettu 50 vuoden käyttöiälle. Lisäksi päästöt laskettiin 100 vuoden ajanjaksolle, jolloin puusiltojen osalta rasisiteeksi tulee siltakannen uusiminen kerran elinkaaren aikana. Tuloksien perusteella matalin hiilijalanjälki oli liimapuisella palkkisillalla (Plp) ja korkein teräsbetonisella ulokepalkkisillalla (Bup). Myös 100 vuoden ajanjaksolla tarkasteltuna liimapuisten siltojen päästöt olivat matalimmat, huolimatta kannen uusimisesta. Lisäksi havaittiin, että siltojen perustus- ja tukirakenteet muodostavat merkittävän osan kaikista päästöistä, vaihteluvälin ollessa 39–81 %.

Sisällys

Tiivistelmä	3
Sisällys.....	4
1 Johdanto	5
1.1 Menetelmät ja tietolähteet.....	6
1.2 Tutkimukseen valitut siltaratkaisut.....	7
1.3 Siltaratkaisuiden määrärajoitus ja laskentaratkaus	10
2 Infrarakenteiden elinkaariarviointi	11
2.1 Elinkaariarvioinnin laajuus.....	13
2.2 Materiaalien valmistus (A1-A3).....	13
2.3 Kuljetus tehtaalta työmaalle (A4)	15
2.4 Työmaatoiminnot (A5)	16
2.5 Osien vaihdot (B4)	16
3 Arvioinnin tulokset.....	19
3.1 Hiilijalanjälki jaoteltuna nimikkeistön mukaan	20
3.2 Hiilijalanjälki ilman maatumia ja perustuksia	21
3.3 Hiilijalanjälki ilman siltakansia.....	22
3.4 Hiilijalanjälki 100 vuoden käyttöiälle	23
3.5 Hiilijalanjälki ilman työmaatoimintoja.....	23
4 Analysointi ja yhteenveto	25
Lähteet	26
Liitteet	27

1 Johdanto

Tämän tutkimuksen tavoitteena on määrittää neljän sillan elinkaaren hiilijalanjälki, eli hiilidioksidiekvivalenttipäästöt. Elinkaarianalyysin tulosten perusteella tarkastellaan, miten kokonaispäästöt jakautuvat elinkaaren vaiheiden ja rakenneosien välillä. Lisäksi analysoidaan materiaalivalintojen vaikutusta hiilijalanjälkeen, eli onko sillan kantavan materiaalin ja päästöjen välillä yhteyttä.

Tutkimus pyrkii lisäämään tietoutta infrarakentamisen ja taitorakenteiden ympäristövaikutuksista. Aiheesta on vain rajallisesti julkista suomenkielistä tutkimustietoa saatavilla ja erityisesti Väyläviraston menetelmällä tehtyjä arviointeja ei ole vielä laajasti julkisesti saatavilla. Tieto voi olla hyödyllistä kuntapäätäjille, suunnittelijoille ja muille aiheesta kiinnostuneille.

Arviointi on tehty 50 ja 100 vuoden arviointijaksoille käyttäen Väyläviraston Infrarakentamisen vähähiilisyyden arviointimenetelmää. Lähtötietona arviossa on neljä viime vuosina rakennettua kevyen liikenteen siltaa, joiden pituus vaihtelee 20–26 metrin ja leveys 4–6 metrin välillä. Työn vaiheet pääpiirteittäin on kuvattu kaaviossa 1.

Elinkaariarvioinnin (LCA) sekä tämän tulosraportin on laatinut Karelia-ammattikorkeakoulun projektiasiantuntija Juuso Kokkonen.



Kaavio 1. Prosessikaavio työn vaiheista.

1.1 Menetelmät ja tietolähteet

Taulukossa 1 on kuvattu pääpiirteittäin elinkaariarvioinneissa käytetyt työkalut ja tietolähteet. Arviointi on tehty toukokuussa 2024, käyttäen arviointihetken tietokantojen ja ohjelmistojen uusimpia versiota. Elinkaariarvion moduulikohtainen laskenta on kuvattu tarkemmin raportin toisessa osiossa.

Hiilijalanjälkilaskelman työkalu:	Microsoft Excel ja Ihku-laskentapalvelu
Kuljetuksien päästötiedot:	Ihku-laskentapalvelu ja Rakentamisen päästötietokanta
Käytetty nimikkeistö ja jaottelu:	Infra 2015 Rakennusosa ja hankenimikkeistö
Materiaalien päästötiedot:	Ihku-laskentapalvelu ja Rakentamisen päästötietokanta
Määräluettelo muokaus ja tarkastelu:	Microsoft Excel
PDF-dokumenttien tarkastelu:	Adobe Acrobat
Rakenteiden käyttöikäoletamat:	Väylävirasto 2023. Siltojen toimintalinjat. S. 25, tavoitekäyttöiät.
Kuljetusetäisyyden määrittäminen:	Google Maps

Taulukko 1. Elinkaariarvion työkalut ja tietolähteet.

1.2 Tutkimukseen valitut siltaratkaisut

Tutkimuksessa on mukana neljä rakenteeltaan erilaista siltaa. Siltoja yhdistää se, että kaikki vaihtoehdot ovat kevyen liikenteen kuormille mitoitettuja. Kevyen liikenteen siltojen suunnittelua Suomessa ohjaa *Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat*. Liikennevirasto on julkaissut standardin lisäksi soveltamiseen kansallisen liitteen ja soveltamisohjeen.

Ensimmäinen tarkasteltavista silloista on Joensuuhun vuonna 2022 valmistunut Karhunmäen ylikulkukäytävä (kuva 1). Tyypiltään se on poikittain jännitetty puukantinen liimapuupalkkisilta. Sillassa on kuumasinkityt teräskaiteet ja kreosoottikyllästetty kulutuslankutus puukannessa. Sillan suunniteltu käyttöikä on kannen osalta 50 vuotta ja tukirakenteiden osalta 100 vuotta. Sillan jännemitta on 24 metriä, hyötyleveys viisi metriä ja kannen pinta-ala 123 m². Talvisin sillalla kulkee hiihtolatu. Sillan alittaa rautatie, jonka johdosta molemmilla puolilla siltaa on muotoiltu huomattava sillalle johtava pengerrys. Jatkossa raportissa viitataan siltaan jännitettyä liimapuupalkkisiltana.



Kuva 1. Jännitetty liimapuupalkkisilta. Kuva: Juuso Kokkonen.

Toinen silloista on Joensuun Karsikossa sijaitseva Kulhontien kevyen liikenteen silta (kuva 2). Kyseinen silta on tutkimuksen silloista vanhin ja valmistunut vuonna 2015. Tyypiltään Kulhontien kevyen liikenteen silta on paikallavalettu teräsbetoninen ulokepalkkisilta (Bup). Sillan suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta. Sillan jännemitta on $3,8 + 19 + 3,8$ metriä, hyötyleveys neljä metriä ja kannen pinta-ala 105 m^2 . Sillassa on asfalttipäällyste ja teräskaiteet. Jatkossa raportissa viitataan siltaan teräsbetonisena ulokepalkkisiltana.



Kuva 2. Teräsbetoninen ulokepalkkisilta. Kuva: Juuso Kokkonen.

Kolmas silta on Joensuun Aavarannalle vuonna 2021 valmistunut Siilaisenpuron kevyen liikenteen silta (kuva 3). Silta on tyypiltään puinen liimattu palkkisilta (Plp). Jännemitta on 20 metriä, hyötyleveys kuusi metriä ja kannen pinta-ala 128 m^2 . Kannen suunniteltu käyttöikä on 50 vuotta ja tukirakenteiden 100 vuotta. Sillassa on puukaiteet, suolakyllästetty puukansi ja perustus teräsbetonipaaluille. Päällysmateriaali on syrjälankutus.

Talvisin sillalla kulkee hiihtolatu. Jatkossa raportissa viitataan siltaan liimapuisena palkkisiltana.



Kuva 3. Liimapuinen palkkisilta. Kuva: Juuso Kokkonen.

Neljäs ja viimeinen silta on Siilinjärvelle syksyllä 2024 valmistunut Siilinjoen kevyen liikenteen silta (kuva 4). Tyypiltään Siilinjoen silta on teräksinen liittorakenteinen palkkisilta teräsbetonikannella (Tpbl). Sillan jännemitta on 22 metriä, hyötyleveys neljä metriä ja kannen pinta-ala 88 m². Silta on perustettu porapaaluille. Suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta. Päälyismateriaali on asfaltti. Jatkossa siltaan viitataan raportissa teräksinä liittopalkkisiltana.



Kuva 4. Teräksinen liittopalkkisilta. Kuva: Juuso Kokkonen.

1.3 Siltaratkaisuiden määrärajoitus ja laskenta- rajaus

Keskeisin lähtötieto tutkimukseen on siltavaihtoehtojen suunnitelmat ja niiden pohjalta laadittu laskelma teoreettisista materiaolimenekeistä, eli määräluettelo. Tutkimuksessa on hyödynnetty Karelia-ammattikorkeakoulun opinnäytetyön tekijän Arttu Ryynäsen tekemää määrälaskelmaa eri vaihtoehtojen materiaolimenekeistä. Määrälaskennassa on huomioitu rakenteet ja materiaalit sillan pituudelta kaivettavaan tai louhittavaan syvyyteen asti. Paalut on kuitenkin huomioitu koko pituudelta. Betonivaluissa käytettävä muottilauditus on myös laskettu mukaan. Maan tiivistymistä tai löyhtymistä ei ole huomioitu, eikä myöskään kiinnikkeitä, mahdollisia tekniikka-asennuksia ja pintakäsittelyjä.

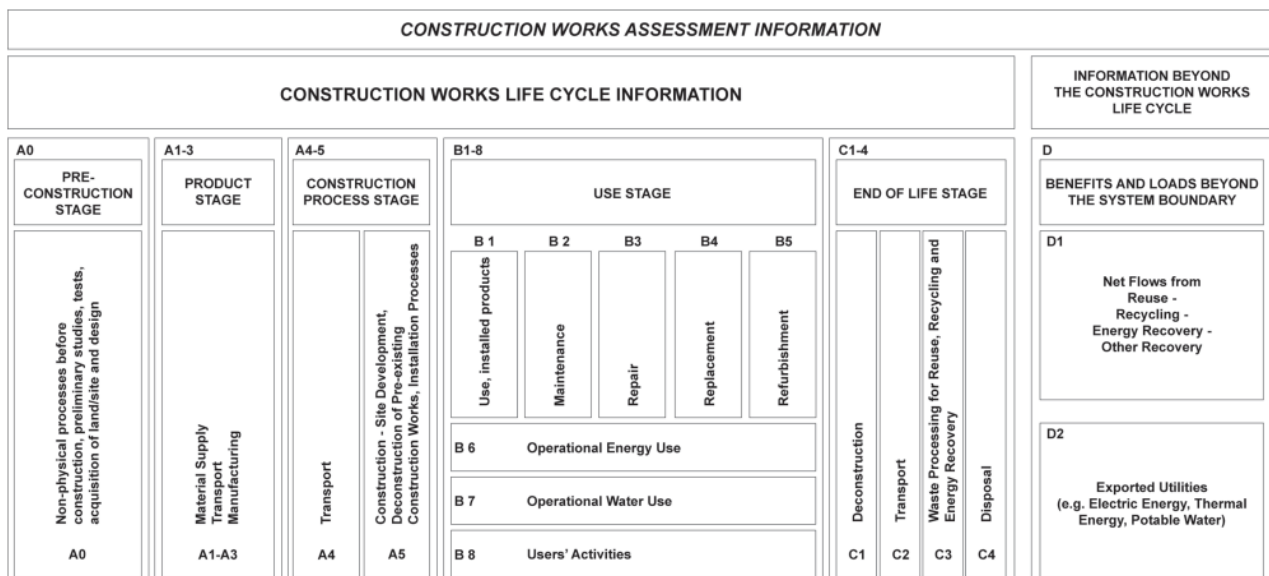
Hiilijalanjälkilaskelmaa varten oli tarpeellista tarkentaa vielä määräluetteloa siten, että kaikki laskentarivit ovat kilogrammoina, koska Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämässä Rakentamisen päästötietokannassa päästötiedot (A1-A3) on ilmoitettu yhtä kilogrammaa kohti (kgCO₂e/kg). Yksinkertaistettu määräluettelo on liitteessä 1. Tilavuudesta kilogrammoiksi tiheyden muunnoskertoimina käytettiin materiaaleille seuraavia arvoja:

- Liimapuu 430 kg/m³
- Sahatavara 474 kg/m³
- Betoni (C30/37, C35/45)..... 2400 kg/m³
- Asfalttibetoni 2400 kg/m³
- Maa-aines: sora, nurmi, louhe 1500 kg/m³
- Teräs..... 7850 kg/m³

2 Infrarakenteiden elinkaariarviointi

Elinkaariarvioinnilla tarkoitetaan jonkin tuotteen tai palvelun ympäristövaikutuksien analysointia koko elinkaaren ajalta, raaka-aineiden hankinnasta tuotantoon, käyttöön ja lopulta jätteenkäsittelyyn tai kierrätykseen. Elinkaariarvioinnin pohjan luovat kansainväliset standardit *ISO 14040 Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework* sekä *ISO 14044 Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines*.

Rakennusten kontekstissa Euroopan standardointikomitea (CEN) on kehittänyt kestävä rakentamisen standardiperheen *CEN/TC 350*. Tämä standardiperhe sisältää lukuisia standardeja, mutta infrarakenteiden elinkaariarvioinnin näkökulmasta keskeinen on puitestandardi *EN 15643 Sustainability of construction works. Framework for assessment of buildings and civil engineering works*. Puitestandardi määrittelee ekologisen, sosiaalisen ja taloudellisen kestävyys arvioinnin periaatteet ja indikaattorit sekä talon- että infrarakentamisen näkökulmasta. Aiemmin EN 15643-sarja koostui viidestä eri osasta, mutta uusimmassa, vuonna 2021, julkaistussa päivityksessä periaatteet koottiin yhden standardin alle. EN 15643 määrittelee myös elinkaaren, eli arvioitavat moduulit rakennuksen tai rakenteen olemassaolon eri vaiheissa. [1, s. 3-5, 28].



Kuva 5. Elinkaari standardin EN 15643 mukaisesti. Kuvan lähde: SFS-EN 15643:2021:en [1, s. 28].

Varsinainen laskentamenetelmä infrarakenteiden elinkaariarviointiin on esitetty standardissa *EN 17472 Sustainability of construction works. Sustainability assessment of civil engineering works. Calculation methods*. Standardissa on kuvattu tarkemmin

elinkaaren moduulien laskentasäännöt, termistö, laskentarajaukset, toiminnalliset yksiköt, skenaariot ja indikaattorit. Laskentaohjeessa huomioidaan kestävyys kaikkien kolme ulottuvuutta, eli ekologinen, ekonominen ja sosiaalinen kestävyys. Näin ollen laskentamenetelmää voi hyödyntää esimerkiksi elinkaarikustannuslaskennassa (LCC) tai elinkaaren hiilijalanjälkiarvion tekemisessä (LCA). [2, s. 5–21].

Viimeinen käsiteltävä ja keskeisesti aiheeseen liittyvä standardi on *EN 15804 Sustainability of construction works – Environmental product declarations*. Kyseinen standardi määrittelee ohjeet rakennustuotteiden ympäristövaikutusten laskentaan ja ilmoittamiseen. Toisin sanoen, kun standardissa EN 17472 elinkaariarvion kohteena on kokonainen rakennus, EN 15804 soveltamisalassa on kyse yksittäisen tuotteen ympäristövaikutusten elinkaariarvioinnista (LCA). [3, s. 4].

Huomioitavaa on, että rakennustuotteiden ympäristöselosteiden julkaisijoilla on lisäksi omat täydentävät menetelmäohjeensa ympäristöselosteiden laadintaan (engl. product category rules, PCR). Suomessa ympäristöselosteiden julkaisija on Rakennustieto. Ympäristöselosteiden periaatteet määrittelevä standardi EN 15804 päivittyi joulukuussa 2019 versiosta A1 versioon A2. Keskeisin muutos versioiden välillä on se, että elinkaaren lopun (C1–C4) tietojen ilmoittamisesta tuli pakollista. A1-standardin mukaisia ympäristöselosteita on vielä voimassa jonkin verran, eikä niiden päästöarvoja voi verrata täysin luotettavasti hiilijalanjäljen osalta A2-standardin mukaiseen EPD:hen. Eron voi havaita esimerkiksi vertaamalla GWP-indikaattorien tulokategorioita A1 ja A2-standardien mukaisissa EPD:ssä (kuvat 6 ja 7).

CORE ENVIRONMENTAL IMPACT INDICATORS – EN 15804+A2, PEF

Impact category	Unit	A1	A2	A3	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
GWP – total	kg CO ₂ e	2,42E0	1,11E-1	7,68E-2	2,6E0	9,43E-3	1,59E-2	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	3,3E-3	4,36E-3	5,45E-2	2,64E-4	-7,52E-1
GWP – fossil	kg CO ₂ e	2,42E0	1,11E-1	8,96E-2	2,62E0	9,52E-3	7,58E-4	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	3,3E-3	4,35E-3	5,45E-2	2,63E-4	-7,71E-1
GWP – biogenic	kg CO ₂ e	-3,31E-3	8,39E-5	-1,34E-2	-1,67E-2	7,22E-6	1,51E-2	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	9,17E-7	3,3E-6	1,51E-5	5,22E-7	1,88E-2
GWP – LULUC	kg CO ₂ e	1,07E-3	3,48E-5	6,44E-4	1,75E-3	2,99E-6	4,42E-7	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	2,79E-7	1,37E-6	4,6E-6	7,82E-8	3,15E-5

Kuva 6. EN 15804+A2 mukaiset GWP-indikaattorit. Kuvan lähde: Peikko Group Corporation, Connecting Parts, Environmental Product Declaration [4, s. 9].

Ympäristövaikutusluokka	Yksikkö	A1-A3	A4	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D
Ilmaston lämpeneminen	kg CO ₂ ekv	1,74E+2	1,98E+0	7,14E-3	5,00E+0	1,34E+0	0E0	3,07E-1	1,43E+0	3,48E-1	-9,08E+1

Kuva 7. EN 15804+A1 mukaiset GWP-indikaattorit. Kuvan lähde: Pihla Pro, Puualumiini-ikkuna, ympäristöseloste [5, s. 5].

Standardeja tulkitsemaan on luotu lukuisia laskentamenetelmiä ja -ohjeita. Rakennuksen kontekstissa tällaisia on esimerkiksi *Ympäristöministeriön vähähiilisyyden arviointimenetelmä* ja Euroopan komission *Level(s)* -menetelmä. Vaikka esimerkiksi ympäristöministeriön arviointimenetelmää voisikin soveltaa siltojen hiilijalanjäljen

laskentaohjeistuksena, ei menetelmä ole ideaali, sillä talo- ja infrakohteen välillä on omat huomioitavat erikoispiirteet. Tilanne on parantunut marraskuussa 2023, kun Väylävirasto julkaisi *Infrarakentamisen vähähiilisyyden arviointimenetelmän* (myöhemmin Väyläviraston menetelmä).

Väyläviraston menetelmä mukailee eurooppalaisia kestävän rakentamisen standardeja, mutta ei sisällä standardien kaikkia elinkaaren vaiheita ja vaikutusindikaattoreita. Menetelmä sopii esimerkiksi väylien, katujen, puistojen ja muiden infrarakenteiden arviointiin. Väyläviraston menetelmästä tulee huomata, että se ei ole kaiken kattava menetelmä ympäristövaikutusten arviointiin, vaan arvioinnin kohteena on pelkästään fossiiliset kasvihuonekaasupäästöt. Tämä eroaa ympäristöministeriön vähähiilisyyden arviointimenetelmästä siten, että se huomioi myös eloperäiset päästöt (GWP biogenic). Väyläviraston menetelmän mukaisessa arvioinnissa on mukana seuraavat elinkaaren moduulit: materiaalien valmistus (A1–A3), kuljetukset työmaalle (A4), työmaatoiminnot (A5) ja osien vaihdot elinkaaren aikana (B4). Arvioitavissa moduuleissa on näin eroja rakennuksien arviointiin, joissa huomioidaan edellä mainittujen ohella elinkaaren loppu (C1–C4) ja hiilikädenjälki (D1–D6). Näin ollen Väyläviraston menetelmän mukaisesti huomioidaan vain negatiiviset ilmastovaikutukset, eli tarkastelussa on vain hiilijalanjälki. [6, s. 11]. Väyläviraston menetelmän mukaisesti arvioitavat infrarakenteiden osat on kuvattu liitteessä 2.

2.1 Elinkaariarvioinnin laajuus

Arviossa huomioidut vaiheet ovat yhtenäiset Väyläviraston menetelmän kanssa. Pääpiirteittäin moduulien laskentarajaus on seuraava:

- A1–A3 Materiaalien valmistus: määräarvion mukaisessa laajuudessa, laskentaperiaate on kuvattu luvussa 2.2.
- A4 Kuljetus työmaalle: määräarvion mukaisessa laajuudessa, käytetyt kuljetusmatkat ja päästötiedot on kuvattu luvussa 2.3.
- A5 Työmaatoiminnot: niille työmaaprosesseille, joille Ihku-laskentapalvelussa on suoritettiedot. Arvioidut prosessit on kuvattu luvussa 2.4.
- B4 Osien vaihdot: niille osille, joiden käyttöikä on matalampi kuin elinkaariarvion tarkastelujakso (50/100 vuotta). Laskentatapa on kuvattu luvussa 2.5.

2.2 Materiaalien valmistus (A1–A3)

Arvioinnissa käytetyt päästötiedot ovat peräisin Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämistä rakentamisen ja infrarakentamisen päästötietokannoista (co2data.fi). Tietoja valittaessa pyrittiin valitsemaan mahdollisimman hyvin silloissa käytettyjä materiaaleja vastaavat materiaalit. Esimerkiksi sinkitty teräs lasketaan sinkityn teräksen päästötiedolla, eikä harjateräksen. Useimpien tietojen osalta vastaava materiaali löytyi. Joitakin

oletuksia jouduttiin tekemään täydellisen vastineen puuttuessa, esimerkiksi siltojen epoksitiivistys laskettiin epoksimaalin päästötiedolla.

Materiaalien valmistuksen (A1-A3) päästöt laskettiin Ihku-laskentapalvelulla. Tätä ennen määräluettelo oli tarkennettu tarvittavilta osin sekä jaoteltu Infra 2015 Rakennusosa ja hankenimikkeistön mukaisiin nimikkeisiin. Huomioitavaa on, että Ihku-laskentapalvelu on myös kustannuslaskentatyökalu, mutta kustannuslaskenta on tämän tutkimuksen ja raportin ulkopuolella. Materiaalien haku Ihku-laskentapalvelulla tehdään hakemalla tietokannasta nimikkeistön litteroilla tai hakusanalla (kuva 8).

Koodi	Nimi	Määrä	Yksikkö	Yksikköhinta ja päästö	Yhteensä
4000	Rakennustekniset rakennusosat				
4100	Erittelemättömät rakennustekniset rakennusosat				
4130	Puurakenteet				
	Liimapuupalkin pinnoitus, sillan korjaus, helpot olosuhteet, laaja korjaustyö, yksikkö hinnalla	m2		[- kgCO2e]	51,43 €
	Liimapuupalkin pinnoitus, sillan korjaus, vaikeat olosuhteet, pieni korjaustyö, yksikkö hinnalla	m2		[- kgCO2e]	77,14 €

Kuva 8. Tietojen haku Ihku-laskentapalvelussa.

Kaikille materiaaleille ei löytynyt oikean nimikkeen ja materiaalin mukaista päästötietoa Ihku-laskentapalvelun tietokannasta. Tällöin oli mahdollista lisätä omia tietoja ja päästökertoimia. Oman rakennusosan lisäämiseksi tuli hakea co2data.fi -päästötietokannasta A1-A3 vaiheen päästökerroin. Rakentamisen päästötietokannan (co2data.fi/rakentaminen/) tietojen kohdalla oikea tieto on "GWP (A1-A3 FOSSIL), TYYPILLINEN ARVO" ja infrarakentamisen päästötietokannan (co2data.fi/infra/) tietojen osalta "TYYPILLINEN ARVO, GWP kgCO2e/kg A1-A3". Tämä päästökerroin syötetään nimikkeen, vapaamuotoisen kuvauksen ja menekin ohella työkaluun oman laskentarivin luomiseksi (kuva 9).

Koodi	Nimi	Määrä	Yksikkö	Yksikköhinta ja päästö	Yhteensä
4223	Päällysrakenteet, kansi	6 404	kg	2,5 kgCO2e	€
	Primaärpalkki I-palkki 370x610				kgCO2e

Kuva 9. Oman laskentarivin luominen Ihku-laskentapalveluun.

Työmaa-aikainen hukka on huomioitu osana A1-A3 vaihetta. Ihku-laskentapalvelun valmiilla suoritiedoilla lasketut osat ja materiaalit sisälsivät yleensä valmiiksi

hukkaprosentin, joka vaihteli välillä 0–10 % nettomääristä. Manuaalisesti luotujen Ihku-laskentapalvelun laskentarivien osalta materiaalmäärät kerrottiin rakentamisen päästötietokannan hukkakertoimilla, jotka vaihtelevat välillä 0–10 %.

2.3 Kuljetus tehtaalta työmaalle (A4)

Kuljetusmatkojen määrittämiseksi tehtaalta työmaalle oletettiin, että kohdetyömaa sijaitisi Joensuussa. Kuljetusmatkat tehtaalta työmaalle laskettiin Google Maps -palvelun avulla pyöristäen ylöspäin seuraavaan kymmeneen kilometriin. Näin ollen välietäpeja tai varastointipaikkoja ei ole huomioitu erikseen. Koska osa rakennusmateriaaleista on saatavilla useammilta valmistajilta, pyrittiin valitsemaan valmistaja, jolta materiaali on saatavilla lyhyimmän kuljetusetäisyyden päässä. Matkat eivät välttämättä vastaa todellisia silloissa käytettyjä valmistajia tai etäisyyksiä. Poikkeuksena kuljetusetäisyyksien määrittämisessä on sahatavara ja sora, joita on saatavilla lukuisista lähteistä. Sahatavaran osalta kuljetusetäisyytenä käytettiin 84 kilometrin matkaa, joka on peräisin Väyläviraston menetelmän ohjeellisista kuljetusmatkoista. Työmaalle tuotavalle maa-aineksille käytettiin 10 km kuljetusetäisyyttä. Karhunmäen ylikulkukäytävässä hyödynnettiin maa-ainesta siltapaikalta, tällöin laskettiin 1 km kuljetusetäisyys siirtoihin. Käytetyt kuljetusetäisyydet on kuvattu taulukossa 2.

Materiaali	Kuljetusmatka (km)	Valmistuspaikka	Valmistaja esim.
Bitumikermi	470	Lohja	Kerabit
Liimapuukansi	320	Vierumäki	Versowood
Maa, betoni ja asfaltti	10	-	-
Sahatavara, muut	84	-	-
Raudoitusteräs	410	Pälkäne	Celsa Steel Service
Routaeristys	510	Salo	Finnfoam
Teräsbetonipaalut	310	Haapajärvi	Lujabetoni
Teräsosat	400	Raahe	SSAB
Vaneri	10	Joensuu	UPM

Taulukko 2. Käytetyt kuljetusetäisyydet.

Muiden kuin maa-aineksen osalta kuljetusten päästötiedot tuli täydentää itse Ihku-laskentapalveluun, jolloin haettiin kuhunkin tilanteeseen sopiva A4 vaiheen päästökerroin nimikkeeseen 5550 *Työmaakuljetukset* alta. Kuljetukset lasketaan tonnikilometreinä (tkm), joka on etäisyyden (km) ja painon (t) tulo. Ihku-laskentapalvelussa kuljetuksien päästöjä laskiessa tulee määritellä, onko kyse kevyestä vai painavasta materiaalista, sillä se vaikuttaa kuljetuskaluston täyttöasteeseen. Kevyiden materiaalien kerrointa käytettiin puulle, routaeristeille ja suodatinkankaille. Painavien materiaalien kerrointa käytettiin teräkselle, betonille, bitumikermeille ja asfaltille. Lisäksi määriteltiin, millaisesta kuljetuksesta on kyse ajoneuvon näkökulmasta (kuva 10).

Q 5500	Q Syötä hakusanat	Tyhjennä hakutermit	Luo oma rakennusosa	Ohje X
YKSIKÖT	tkm			
5000	Hanketehtävät			
5500	Työmaan kalusto			
	Materiaalirahtien päästöt, junakuljetus	tkm	0,023 kgCO ₂ e	0,00 €
	Materiaalirahtien päästöt, katuajo, kevyet materiaalit	tkm	0,285 kgCO ₂ e	0,00 €
	Materiaalirahtien päästöt, katuajo, painavat materiaalit	tkm	0,160 kgCO ₂ e	0,00 €
	Materiaalirahtien päästöt, maantieajo, kevyet materiaalit	tkm	0,180 kgCO ₂ e	0,00 €
	Materiaalirahtien päästöt, maantieajo, painavat materiaalit	tkm	0,098 kgCO ₂ e	0,00 €
	Materiaalirahtien päästöt, merikuljetus, irtolasti	tkm	0,013 kgCO ₂ e	0,00 €
	Materiaalirahtien päästöt, merikuljetus, kappaletavara	tkm	0,045 kgCO ₂ e	0,00 €

Kuva 10. Kuljetuksien hiilijalanjäljen laskenta Ihku-laskentapalvelussa.

2.4 Työmaatoiminnot (A5)

Rakennustyömaavaiheen päästöt ovat mukana vain niiden nimikkeiden osalta, joiden päästöt on laskettu sellaisilla Ihku-laskentapalvelun suoritiedoilla, jotka sisältävät konetöitä. Näitä ovat betonoinnin, massanvaihtojen, asfaltinlevityksen, paalutuksen, suodatinkankaiden asentamisen ja routaeristämisen konetyöt. Työmaatoimintojen päästöjä ei näin ollen ole laskettu kaikille työmaaprosesseille, eikä arvioijalla ollut esimerkiksi tietoa työmaille hankitun sähkön, polttoaineiden ja muun energian määrästä, jotta työmaatoimintoja olisi voinut laskea toteuman perusteella.

Puurakenteisten siltojen osalta elinkaariarvion laskennassa on hyödynnetty vähemmän valmiita suoritietoja, jotka sisältävät konetöiden päästöt. Voidaankin todeta, että betoni- ja terässiltojen osalta työmaavaiheen päästöistä aiheutuu enemmän rasiitetta, koska työmaavaiheen kattavuus on parempi. Tämän johdosta luvussa 3.5 on esitetty lisäksi hiilijalanjäljen laskentatuloks, jossa työmaatoimintoja ei ole ollenkaan mukana. Huomioitava on kuitenkin, että työmaavaiheen osuus koko elinkaaren päästöistä ei ole merkittävä.

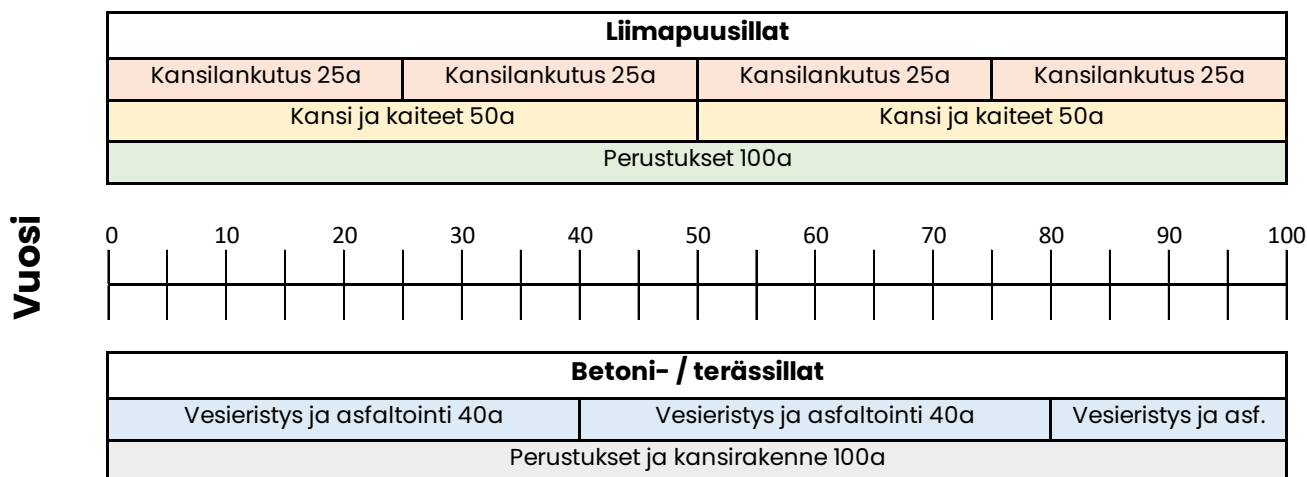
2.5 Osien vaihdot (B4)

Elinkaariarvio tehtiin 50 ja 100 vuoden käyttöiälle, joten siltojen rakenteisiin tulee käytön aikana uusimis- ja huoltotarpeita. Laskelmissa onkin huomioitu osat, joiden käyttöikä on lyhyempi kuin 50 / 100 vuotta. Erityisesti puurakenteisissa ja -kantisissa silloissa huoltoväli on tiheämpi. Lähteenä osien käyttöikien määrittämiseen käytettiin Väyläviraston vuonna 2023 julkaisemaa ”Siltojen toimintalinjat” -ohjetta.

Siltojen toimintalinjat -ohjeen mukaisesti rakenneosien tavoitekäyttöiät ovat seuraavat [7, s. 25]:

- Reunapalkit 50 vuotta
- Teräsrakenteen pintakäsittely 35 vuotta
- Puurakenteet, säältä suojatut 50 vuotta
- Puurakenteet, helposti uusittavat 25 vuotta
- Vedeneristys 40 vuotta
- Liikuntasaumalaitteet 30 vuotta
- Laakerit 50 vuotta

Käyttöikien pohjalta on tehty oletukset, että helposti uusittavat puurakenteet tarkoittavat puusiltojen osalta kansi- ja kulutuslankutusta, jolloin ne uusittaisiin 50 vuoden skenaariossa kerran ja 100 vuoden skenaariossa kolmesti. Betoni- ja teräsiltojen osalta vedeneristys ja asfaltointi on laskettu uusittavaksi 40 vuoden välein, eli 50 vuoden skenaariossa kerran ja 100 vuoden skenaariossa kahdesti. Lisäksi 100 vuoden skenaariossa puusiltojen osalta oletetaan koko siltakannen ja kaiteet uusittavan ensimmäisen 50 vuoden käytön jälkeen. Betonisten siltakansien osalta reunapalkkien uusimista ei ole huomioitu, sillä niitä ei oltu erikseen eroteltu siltakansista määräluetteloissa. Betoni- ja teräsiltojen osalta mahdollisia kaiteiden uusimisia ei myöskään huomioitu. Laskelmissa käytetyt käyttöikäolettamukset on esitetty kaaviossa kaksi.



Kaavio 2. Laskelmien käyttöikäolettamukset.

Ihku-laskentapalvelu ei tukenut arviointihetkellä toukokuussa 2024 elinkaaren moduulin B4 eli osien vaihdon laskentaa. Näin ollen, osien vaihtojen laskenta tehtiin Microsoft Excelillä, seuraavalla laskukaavalla:

$$\text{Hiilijalanjälki B4} = \sum \text{Valmistus}_{\text{uudet}} + \text{Kuljetus}_{\text{uudet}} + \text{Työmaatoiminnot}_{\text{uudet}} + \text{Kuljetus}_{\text{vanhat}} + \text{Jätteenkäsittely}_{\text{vanhat}} + \text{Loppusijoitus}_{\text{vanhat}}$$

Jossa:

- *Valmistus_{uudet}* tarkoittaa osien vaihdosta ja materiaalien valmistamisesta aiheutuvia päästöjä. Vaikka osien vaihdot tapahtuvat tulevaisuudessa jopa kymmenien vuosien päästä, päästöt on laskettu nykyhetken päästötiedoilla, sillä tulevaisuudessa tapahtuvaa päästöjen mahdollista laskemista on hankala arvioida. Laskentaperiaate on sama kuin elinkaaren alussa, joka on kuvattu kohdassa 2.2 *Materiaalien valmistus (A1-A3)*.
- *Kuljetus_{uudet}* tarkoittaa osien vaihdosta ja materiaalien kuljetuksista aiheutuvia päästöjä. Laskentaperiaate on sama kuin elinkaaren alussa ja on kuvattu kohdassa 2.3 *Kuljetus tehtaalta työmaalle (A4)*.
- *Työmaatoiminnot_{uudet}* tarkoittaa osien vaihdosta ja työmaatoiminnoista aiheutuvia päästöjä. Laskentaperiaate on sama kuin elinkaaren alussa ja on kuvattu kohdassa 2.4 *Työmaatoiminnot (A5)*.
- *Kuljetus_{vanhat}* tarkoittaa osien vaihdosta ja purettavien materiaalien kuljetuksesta jätteenkäsittelyyn aiheutuvia päästöjä. Kuljetusmatkana jätteenkäsittelyyn on käytetty 10 km ja päästökertoimena Rakentamisen päästötietokannan kerrointa *Jakelukuorma-auto 15t, 40 %, katuajo*.
- *Jätteenkäsittely_{vanhat}* tarkoittaa osien vaihdosta ja purettavien materiaalien jätteenkäsittelystä aiheutuvia päästöjä. Jätteenkäsittelyn päästö on Rakentamisen päästötietokannan materiaalikohtaisen *GWP C3 -kertoimen*, elinkaaren jälkeisen skenaarion ja vaihdettavan materiaalin määrän tulo. Elinkaaren jälkeinen skenaario on Rakentamisen päästötietokannan *reuse, recycled as secondary rawmaterial ja energy recovery* prosenttiosuuksien summa.
- *Loppusijoitus_{vanhat}* tarkoittaa osien vaihdosta ja purettavien materiaalien loppusijoittamisesta aiheutuvia päästöjä. Loppusijoittamisen päästö on Rakentamisen päästötietokannan *CWP C4 -kertoimen*, elinkaaren jälkeisen skenaarion ja vaihdettavan materiaalin määrän tulo. Elinkaaren jälkeisellä skenaariolla viitataan tässä Rakentamisen päästötietokannan *final disposal* prosenttiosuuteen.

Tulee huomata, että elinkaaren lopun (C2-C4) vaiheet on huomioitu vain elinkaaren aikana vaihdettavien materiaalien osalta, eli siltojen elinkaariarviossa ei muuten ole huomioitu elinkaaren loppua, eli purkutyömaata ja jätteiden käsittelyä. Myös Väyläviraston menetelmä ohjeistaa rajaamaan elinkaaren lopun arvioinnin ulkopuolelle, koska lähtökohtaisesti infrarakenteet suunnitellaan ylläpidettäväksi, ei niinkään purettaviksi.

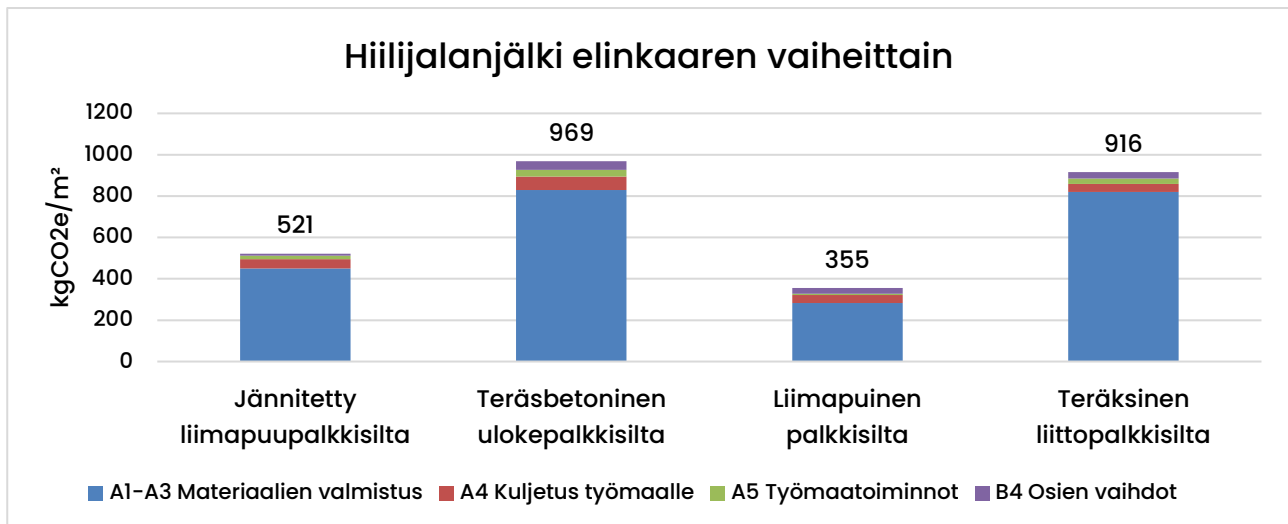
3 Arvioinnin tulokset

Taulukossa 3 on kuvattu arvioitujen siltavaihtoehtojen hiilijalanjälki. Tulokset kuvaavat hiilijalanjälkivaikutusta 50 vuoden arviointijaksolle sisältäen materiaalien valmistamisen, kuljettamisen työmaalle, työmaatoiminnot ja osien vaihdot. 100 vuoden arviointijakson tulokset ovat ilmoitettu osiossa 4.3. Indikaattori tuloksissa on hiilidioksidiekvivalentti, joka kuvaa kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävää summavaikutusta suhteessa hiilidioksidiin 100 vuoden aikana.

	Jännitetty liimapuupalkkisilta	Teräsbetoninen ulokepalkkisilta	Liimapuinen palkkisilta	Teräksinen liittopalkkisilta
A1–A3 Materiaalien valmistus	450	829	282	821
A4 Kuljetus työmaalle	45	65	39	38
A5 Työmaatoiminnot	17	33	7	26
B4 Osien vaihdot	9	41	27	32
Elinkaaren hiilijalanjälki	521	969	355	916
Hiilijalanjälki yht. (kgCO ₂ e)	64045	101922	45584	80647

Taulukko 3. Siltojen hiilijalanjälki. Yksikkö kgCO₂e/kan-m² yleensä, viimeinen rivi kgCO₂e.

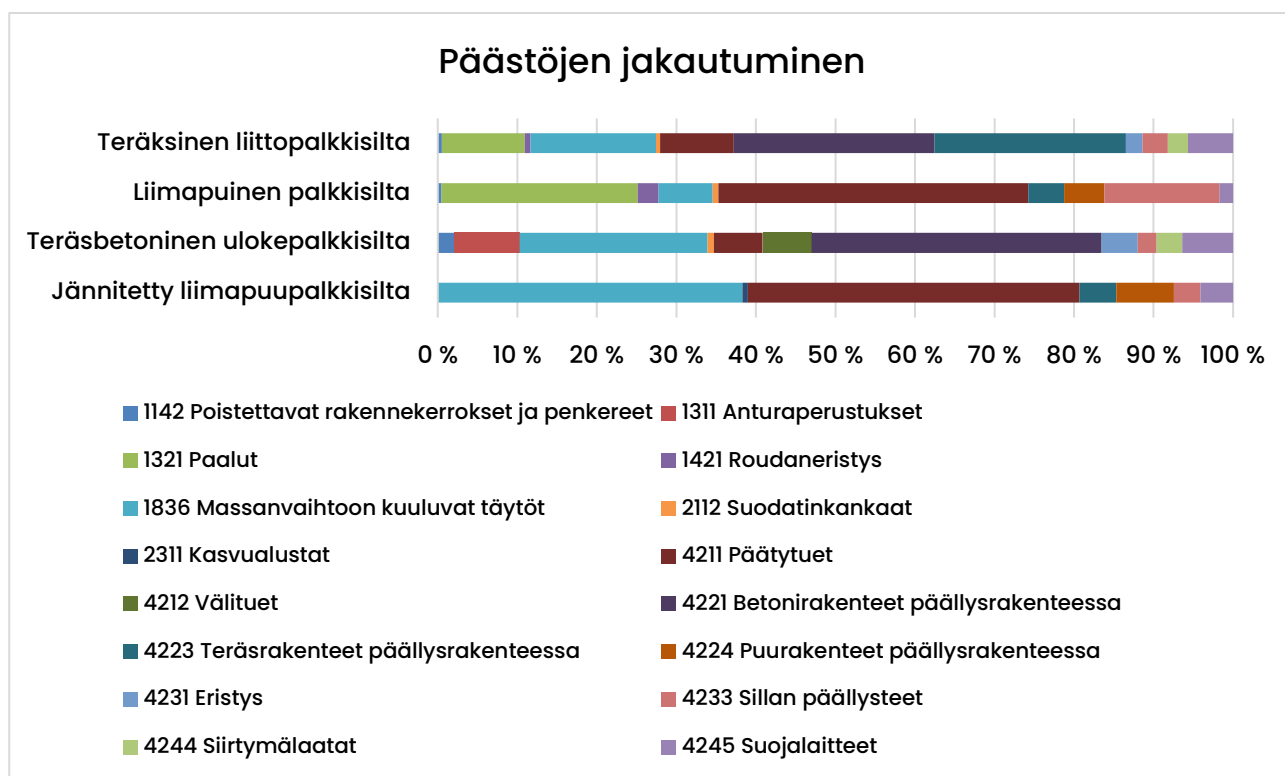
Pienin kokonaishiilijalanjälki on liimapuisella palkkisillalla ja korkein teräsbetonisella ulokepalkkisillalla. Tulos on sama sekä kansineliölle jaettuna, että kokonaislukuna. Materiaalien valmistuksesta (A1–A3) aiheutuvat päästöt ovat niin ikään pienemmät puusilloilla (282–450kgCO₂e/kan-m²) kuin betoni- ja teräsvaihtoehtoilla (821–829 kgCO₂e/kan-m²). Kaikkien vaihtoehtojen osalta suurin osa elinkaaren päästöistä muodostuu materiaalien valmistuksesta (79–90 %). Kuljetuksien osalta (A4) päästöt vaihtelevat välillä 38–65 kgCO₂e/kan-m². Kuljetuksien osalta päästöjä nostaa, mikäli siltapaikalle on tuotu laajoja määriä maa-aineksia, kuten jännitetyn liimapuupalkkisillan kohdalla. Työmaatoimintojen (A5) osalta suurimmat päästöt ovat odotetusti teräsbetonisella ulokepalkkisillalla, koska sen laskentatiedoissa on paras kattavuus työmaatoimintojen osalta, kuten osiossa 2.4 on kuvattu. Tulokset ilman työmaatoimintoja on kuvattu osiossa 3.5. Osien vaihdon (B4) hiilijalanjäljen osalta matalin tulos on jännitetyllä liimapuupalkkisillalla ja korkein liimapuisella palkkisillalla. Tätä tulosta selittää puusiltojen erilainen kansirakenne: jännitetyssä liimapuupalkkisillalla on 38 mm paksuinen kulutuslankutus, kun liimapuisessa palkkisillalla on 150 mm syrjälankutus.



Kaavio 3. Siltojen hiilijalanjälki. Yksikkö kgCO₂e/kan-m².

3.1 Hiilijalanjälki jaoteltuna nimikkeistön mukaan

Elinkaariarvioinnin tulokset kohdistettiin myös Infra 2015 Rakennusosa ja hankenimikkeistön mukaiseen jakoon, jotta pystyttäisiin muodostamaan parempi käsitys siitä, mitkä sillan rakenteista muodostavat korkeimmat päästöt (kaavio 4). Kaavioista havaitaan, että siltojen mahdollinen paaluperustus muodostaa yksin noin 10–20 % päästöistä. Lisäksi havaitaan, että jännitettyssä liimapuupalkkisillassa, jossa on huomattavia täyttöjä, massanvaihdot yksin muodostavat noin 40 % päästöistä. Betonikantisten siltojen osalta kannen teräsbetonirakenne muodostaa noin 25–35 % päästöistä. Teräksessä liittopalkkisillassa teräsrakenteet muodostavat noin neljänneksen päästöistä. Puurakenteisissa silloissa betoniset päätytuet muodostavat jopa 39–42 % kaikista päästöistä, eikä tämä sisällä paaluja. Puurakenteisissa silloissa kantavien puurakenteiden osuus päästöistä onkin vain noin 5–7 %. Muilta osin päästöt muodostuvat muista jäljelle jäävistä nimikkeistä, joiden merkitys kokonaispäästöistä ei ole huomattava. Näitä on esimerkiksi suodatinkankaat, routaeristykset, poistettava maa-aines ja välituet teräsbetonisessa ulokepalkkisillassa.



Kaavio 4. Siltojen hiilijalanjälki nimikkeistön mukaisesti jaettuna.

3.2 Hiilijalanjälki ilman maatukia ja perustuksia

Siltojen perustamistapa ja tukirakenteet eroavat toisistaan, jokaisen siltapaikan ollessa erilainen. Jotta pystyttäisiin havainnoimaan pelkkien siltakansien vaikutuksia, tehtiin elinkaarilaskelmasta versio, jossa on huomioitu pelkkä siltakansi. Tarkastelujakso skenaariossa on 50 vuotta. Huomattavaa on, että teräksisen liittopalkkisillan ja teräsbetonisen ulokepalkkisillan osalta muottipuutavara on mukana tässäkin skenaariossa, vaikkakin se osin palvelee myös siltakannen valua. Tämä johtuu siitä, että määräluettelossa ei oltu erikseen eritelty, mitä muottisahatavaraa käytetään perustusrakenteiden valuun, ja mitä kannen valuun.

Pelkkää kantta tarkastellessa matalapäästöisin on edelleen liimapuinen palkkisilta ja korkeapäästöisin teräksinen liittopalkkisilta. Tuloksista havaitaan, että puisten siltakansien päästöt ovat hyvin lähellä toisiaan (91–101 kgCO₂e/kan-m²), samoin kuin teräksisen liittopalkkisillan ja teräsbetonisen ulokepalkkisillan kannen (482–561 kgCO₂e/kan-m²). Näin ollen, puisten siltakansien päästöt ovat vain noin viidenneksen verrattuna teräksiseen liittorakenteeseen ja teräsbetoniseen kanteen.

	Jännitetty liimapuupalkkisilta	Teräsbetoninen ulokepalkkisilta	Liimapuinen palkkisilta	Teräksinen liittopalkkisilta
A1-A3 Materiaalien valmistus	77	424	46	513
A4 Kuljetus työmaalle	15	14	19	14
A5 Työmaatoiminnot	0	3	0	2
B4 Osien vaihdot	9	41	27	32
Elinkaaren hiilijalanjälki	101	482	91	561
Hiilijalanjälki yht. (kgCO ₂ e)	12374	50735	11746	49336

Taulukko 4. Siltakansien hiilijalanjälki. Yksikkö kgCO₂e/kan-m².

Mikäli tarkastellaan siltakannen päästöjen osuutta koko sillan hiilijalanjäljestä, jännitetyn liimapuupalkkisillan osalta kansi muodostaa vain noin 19 % kaikista päästöistä. Vastaava luku betonisella ulokepalkkisillalla on 50 %, liimapuisella palkkisillalla 26 % ja teräksisellä liittopalkkisillalla 61 %. Kaikissa tapauksissa voidaan todeta perustusten, tukirakenteiden ja maatyttöjen tuottavan merkittävän osan sillan päästöistä. Erityisesti näin on puusiltojen kohdalla, joiden elinkaari päästöistä jopa 81 % muodostuu muusta kuin siltakannesta.

3.3 Hiilijalanjälki ilman siltakansia

Jotta voitaisiin tarkastella pelkkien perustus- ja maarakenteiden päästöjä, kokonaishiilijalanjäljestä vähennettiin siltakannen osuus. Kokonaishiilijalanjäljen ja siltakannen päästöjen erotus on jännitetyllä liimapuupalkkisillalla 51671 kgCO₂e, teräsbetonisella ulokepalkkisillalla 51187 kgCO₂e, liimapuisella palkkisillalla 33838 kgCO₂e ja teräksisellä liittopalkkisillalla 31311 kgCO₂e. Tämä luku pitää sisällään siis kaikki muut päästöt, kuin siltakannen, eli käytännössä perustusrakenteet ja täytöt. Luku on kokonaisluku, eikä sitä ole jaettu kansineliöitä kohti, koska perustusrakenteiden osalta tuloksien yhteismitallistaminen ei ole perustelua samalla tavalla kuin kansissa, joissa pituus ja hyötyleveys vaihtelevat.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että muiden kuin siltakansista aiheutuvien päästöjen välillä vaihteluväli on huomattavasti matalampi kuin siltakansien osalta. Tätä selittää se, että perustukset ovat siltakannesta huolimatta kaikissa ratkaisuisa betonia. Hieman yllättäen paaluperustettujen siltojen, eli liimapuuisen palkkisillan ja teräksisen liittopalkkisillan päästöt muun kuin siltakannen osalta ovat jopa matalammat kuin muilla vaihtoehdoilla. Tätä selittää muun muassa se, että arvioiduissa tapauksissa ei paaluperustetuissa silloissa oli huomattavasti isommat maatyöt, joista aiheutui jopa isommat päästöt kuin paaluista.

3.4 Hiilijalanjälki 100 vuoden käyttöiälle

Hiilijalanjälki laskettiin siltavaihtoehdoille myös 100 vuoden tarkastelujaksolla, jolloin arvioon sisältyy useampia huolto- ja korjaustoimia, kuten kappaleessa 2.5 on kuvattu. Käytännössä puusiltojen osalta tällöin laskelmaan sisältyy koko kansirakenteen uusiminen elinkaaren puolivälissä ja muiden siltojen osalta toinen vedeneristyksen sekä asfalttipäällysteen uusinta. A1–A3, A4 ja A5-vaiheiden tulokset ovat samat kuin 50 vuoden tarkastelujaksolla, mutta B4-vaiheen päästö kasvaa. Erityisesti tämä vaikuttaa puusiltojen tuloksiin. Jännitetyn liimapuupalkkisillan osalta B4-vaiheen päästöt nousevat $9 \rightarrow 201 \text{ kgCO}_2\text{e/kan-m}^2$. Vastaava luku liimapuisella palkkisillalla on $27 \rightarrow 123 \text{ kgCO}_2\text{e/kan-m}^2$. Tulee huomata, että luku pitää siltakannen ja kaiteiden uusimisen lisäksi kolme kannen pintarakenteen uusimista (25, 50 ja 75 vuoden jälkeen). Myös betoni- ja teräsiltojen osalta B4-vaiheen päästöt kasvavat vedeneristyksen ja asfaltin toisen uusimisen johdosta (40 ja 80 vuoden jälkeen). Teräsbetonisella ulokepalkkisillalla B4-vaiheen tulos kasvaa $41 \rightarrow 83 \text{ kgCO}_2\text{e/kan-m}^2$ ja teräksisen liittopalkkisillan kohdalla $32 \rightarrow 64 \text{ kgCO}_2\text{e/kan-m}^2$. Myös 100 vuoden tarkastelujaksolla vähäpäästöisin on liimapuinen palkkisilta ja korkeapäästöisin teräsbetoninen ulokepalkkisilta, vaikka ero teräs- ja betonisiltoihin on kaventunut hieman.

	Jännitetty liimapuupalkkisilta	Teräsbetoninen ulokepalkkisilta	Liimapuinen palkkisilta	Teräksinen liittopalkkisilta
A1–A3 Materiaalien valmistus	450	829	282	821
A4 Kuljetus työmaalle	45	65	39	38
A5 Työmaatoiminnot	17	33	7	26
B4 Osien vaihdot	201	83	123	64
Elinkaaren hiilijalanjälki	712	1010	451	948
Hiilijalanjälki yht. (kgCO_2e)	87624	106266	57907	83458

Taulukko 5. Siltakansien hiilijalanjälki, 100 vuoden käyttöikä. Yksikkö $\text{kgCO}_2\text{e/kan-m}^2$.

3.5 Hiilijalanjälki ilman työmaatoimintoja

Arviointi ei ole täysin tasapuolinen kaikille vaihtoehdoille, sillä A5-vaiheen (työmaatoiminnot) kattavuus on paras teräsbetonisella ulokepalkkisillalla ja heikoin puusilloilla, kuten kappaleessa 2.4 on kuvattu. Tämä on seurausta siitä, että elinkaariarviossa käytetyssä luku-laskentapalvelussa suoritettietojen kattavuus betonirakenteilla on korkein. Toisin sanoen ne on arvioitu suoritettiedoilla, jotka sisältävät työmaatoimintojen päästöt, kun puurakenteiden osalta päästöt laskettiin itse luoduilla panostiedoilla, joissa vain A1–A3 ja A4-vaiheiden päästöt ovat huomioitu.

Taulukossa 6 on esitetty siltojen hiilijalanjäkilaskennan tulokset ilman työmaatoimintoja. Hiilijalanjäljet ovat sillasta riippuen 1,9–3,4 % matalammat. Työmaatoimintojen rajaaminen laskennasta pois ei muuta merkittävästi tulosta ja liimapuinen palkkisilta on edelleen vähäpäästöisin. Ilman työmaatoimintoja teräsbetonisen ulokepalkkisillan päästöt ovat hieman lähempänä muita vaihtoehtoja, koska sen työmaavaiheen päästö oli korkein.

	Jännitetty liimapuupalkkisilta	Teräsbetoninen ulokepalkkisilta	Liimapuinen palkkisilta	Teräksinen liittopalkkisilta
A1–A3 Materiaalien valmistus	450	829	282	821
A4 Kuljetus työmaalle	45	65	39	38
B4 Osien vaihdot	9	41	27	32
Elinkaaren hiilijalanjälki	504	936	348	891
Hiilijalanjälki yht. (kgCO ₂ e)	61985	98433	44716	78371

Taulukko 6. Siltojen hiilijalanjälki, ilman työmaatoimintoja. Yksikkö kgCO₂e/kan-m².

4 Analysointi ja yhteenveto

Tutkimuksen tuloksena saatiin määritettyä neljän eri kevyen liikenteen siltavaihtoehtoon elinkaaripäästöt. Tutkimuksen tulos vastasi arvioijan hypoteesia lopputuloksesta. Puurakenteiset kevyen liikenteen sillat vaikuttavat suorituskkyisiltä ratkaisuilta ainakin arvioidulla jänneväleillä ja ratkaisuilla. Betonin yksikköpäästöt ($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$) eivät ole itsessään sen korkeammat kuin puutuotteillakaan, mutta betonin korkean tiheyden ja laajan käytön vuoksi siltakansien päästöt nousevat puurakenteita korkeammaksi.

Hieman yllättäen kaikkien siltaratkaisuiden elinkaaripäästöt olivat suhteellisen pienet, vertailtaessa niitä arvioijan aiempiin kokemuksiin talonrakennushankkeista. Tutkimuksen korkeimmat elinkaaripäästöt olivat noin 102 tonnia CO_2e teräsbetonisella ulokepalkkisillalla. Esimerkiksi asuinkerrostalon elinkaaripäästöt voivat olla luokkaa 2000–3000 tonnia CO_2e , kun ne arvioidaan Ympäristöministeriön vähähiilisuuden arviointimenetelmän mukaan. Tässä arviossa mukana ei ollut siltojen käytöstä aiheutuvia päästöjä tai silloille johtavia kulkuväyliä. Nämä voivat tosin aiheuttaa merkittäviä ilmastovaikutuksia.

Siltojen elinkaariarviointi oli itsessään suoraviivaisempaa verrattuna talonrakennushankkeiden arviointiin, sillä sillat ovat elinkaariarvioinnin ja määrälaskennan näkökulmasta rakenteina yksinkertaisempia. Työmäärää lisäsi manuaalisten työvaiheiden määrä, kuten päästökertoimien luominen Ihku-laskentapalveluun ja B4-vaiheen laskenta Excelissä. Oletettavasti tulevaisuudessa laskentatyökalut kehittyvät kattavuuden osalta, jolloin työmäärä vähenee. Toistaiseksi arviointi vaatii paneutumista laskenta-standardeihin, työkaluihin ja päästökertoimiin.

Arvioinnissa ei tehty skenaariotarkastelua esimerkiksi siitä, miten eri materiaalivalinnat tai päästökertoimet vaikuttaisivat tuloksiin. Elinkaarianalyysissä käytettiin vain Rakentamisen päästötietokannan kertoimia vertailukelpoisuuden vuoksi. Hiilijalanjälkeen voisi vaikuttaa esimerkiksi käyttämällä vähähiilistä betonia tai terästä. Materiaalien ohella kuljetusetaisyyksiin on syytä kiinnittää huomiota erityisesti Itä-Suomen kaltaisilla alueilla, jossa kaikkia materiaaleja ei ole saatavilla paikallisesti.

Lähteet

- [1] Suomen Standardoimisliitto. (2021). SFS-EN 15643:2021:en. Sustainability of construction works. Framework for assessment of buildings and civil engineering works. <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1011195>. 10.7.2024.
- [2] Suomen Standardoimisliitto. (2022). Sustainability of construction works. Sustainability assessment of civil engineering works. Calculation methods. <https://sales.sfs.fi/en/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1100066>. 10.7.2024.
- [3] Suomen Standardoimisliitto. (2019). Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products. <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/937146>. 10.7.2024.
- [4] Peikko Finland Oy. (2022). Environmental Product Declaration. Connecting Parts. https://media.peikko.com/file/dl/i/uvOVIA/l49xp4tQMznByfZAssLy0g/EPD_Connecting_Parts_April2022.pdf?fv=18f9. 15.10.2024.
- [5] Pihla PRO. (2019). RTS EPD. Puualumiini-ikkuna MSE1-A, Pihla Pro. <https://images.tuotetieto.fi/RTS%20EPD-ymp%C3%A4rist%C3%B6seloste-puualumiini-ikkuna-MSE1-A.pdf>. 15.10.2024.
- [6] Väylävirasto. (2023). Infrarakentamisen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2023-43_vahahiilisyyden_arviointimenetelma_web.pdf. 5.8.2024.
- [7] Väylävirasto. (2023). Väyläviraston ohjeita 9/2023 Siltojen toimintalinjat. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2023-9_siltojen_toimintalinjat_web.pdf. 15.7.2024.

Liitteet

Liite 1. Yksinkertaistettu määräluettelo. Muokattu Karelia-ammattikorkeakoulun rakennustekniikan opiskelija Arttu Ryynäsen tekemästä määrälaskelmasta. Siltojen elinkaariarviointi on tehty tarkennetulla luettelolla.

1. Jännitetty liimapuupalkkisilta:

- Betoni.....165400 kg
- Maa-aines.....2349600 kg
- Puu.....34700 kg
- Teräs.....8900 kg

2. Teräsbetoninen ulokepalkkisilta:

- Asfaltti.....13000 kg
- Betoni.....350600 kg
- Epoksi.....200 kg
- Kermi.....1400 kg
- Maa-aines.....2040000 kg
- Puu.....11800 kg
- Suodatinkangas.....200 kg
- Teräs.....27600 kg

3. Liimapuinen palkkisilta:

- Betoni.....158900 kg
- Maa-aines.....267000 kg
- Puu.....26700 kg
- Routaeriste.....500 kg
- Suodatinkangas.....100 kg
- Teräs.....8000 kg

4. Liittorakenteinen terässilta:

- Asfaltti.....14112 kg
- Betoni.....168100 kg
- Kermi.....800 kg
- Maa-aines.....1101000 kg
- Puu.....8500 kg
- Routaeriste.....200 kg
- Suodatinkangas.....100 kg
- Teräs.....24100 kg

Liite 2. Arviointiin sisältyvät osat. Tietojen lähde: Väyläviraston infrarakentamisen vähähiilisyysarvointimenetelmä, taulukko 1 [6, s. 13–14].

Pääluokka (infra RYL)	Sisältyy arviointiin	Ei sisälly arviointiin
Maa-, pohja- ja kalliorakenteet	11000 Olevat rakenteet ja rakennusosat	
	12000 Pilaantuneen maa-alueen puhdistustarve ja -tavoitteet	
	13000 Perustusrakenteet	
	14000 Pohjarakenteet	
	15000 Kallion tiivistys- ja lujitusrakenteet	
	16000 Maaleikkaukset ja -kaivannot	
	17000 Kallioleikkaukset, -kaivannot ja -tunnelit	
	18000 Penkereet, maapadot ja täytöt	
Päällys- ja pintarakenteet	21000 Päällysrakenteen osat ja radan alusrakennekerrokset	
	22000 Reunatuet, kourut, askelmat ja eroosiosuojaukset	
	23000 Kasvillisuusrakenteet	
	24000 Ratojen päällysrakenteet	
Järjestelmät	31000 Vesihuollon järjestelmät	32000 Turvallisuusrakenteet ja ohjausjärjestelmät
		33000 Sähkö-, tele- ja konetekniset järjestelmät
		34000 Lämmön- ja kaasunsiirtojärjestelmät
		35000 Ilmanvaihtojärjestelmät
		36000 Automaatiojärjestelmät
Rakennustekniset rakennusosat	41000 Erittelemättömät rakennustekniset rakennusosat	46000 Rakennelmat ja kalusteet
	42000 Sillat	49000 Muut rakennusosat
	43000 Laiturit	
	44000 Perustus- ja tukirakenteet	
	45000 Ympäristörakenteet	
	47000 Vesiliikenteen rakenteet ja padot	
	48000 Maanalaisten tilojen betonirakenteet	