



Väylävirasto  
Trafikledsverket

Väyläviraston julkaisu  
16/2023

## Arvio rakentamisen ajankohdan ja rakennusteknologian kehityksen vaikutuksesta väylärakentamisesta aiheutuviin päästöihin





Tarja Häkkinen, Ismo Hämäläinen, Jarmo Linjama

**Arvio rakentamisen ajankohdan ja  
rakennusteknologian kehityksen  
vaikutuksesta väylärakentamisesta  
aiheutuviin päästöihin**

Väyläviraston julkaisuja 16/2023

*Kannen kuva: Väyläviraston kuva-arkisto*

Verkkojulkaisu pdf ([www.vayla.fi](http://www.vayla.fi))

ISSN 2490-0745

ISBN 978-952-405-052-4

Dokumentin sisältö ei ole kaikilta osin saavutettava.

Väylävirasto  
PL 33  
00521 HELSINKI  
puh. 0295 343 000

**Tarja Häkkinen, Ismo Hämäläinen, Jarmo Linjama: Arvio rakentamisen ajan-**  
**kohdan ja rakennusteknologian kehityksen vaikutuksesta väylärakentamisesta**  
**aiheutuviin päästöihin.** Väylävirasto Helsinki 2023. Väyläviraston julkaisuja 16/2023.  
54 sivua. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-405-052-4.

**Avainsanat:** väylärakentaminen, hiilijalanjälki, päästö, päästöjen väheneminen

## Tiivistelmä

Väylärakentamisen hankkeet ovat pitkäkestoisia, ja vaihtoehtojen vertailua ja valintaa joudutaan tekemään useita vuosia ennen hankkeen toteutusta. Väylärakentamisen ja yleensä infrarakentamisen kasvihuonekaasupäästöt tulevat väheneään merkittävästi lähivuosisikymmeninä teollisuuden, kuljetusten ja työkonien päästökehityksen myötä. Väylärakentamisen päästöihin tulevat todennäköisesti vaikuttamaan erityisesti päästöjen väheneminen asfalttien ja betonien ja niiden sideaineiden, stabilointiainien, teräksen ja sähkön tuotannossa ja polttoaineiden käytössä. Myös kiertotalouden tehostuminen ja paraneva energiatehokkuus voivat vähentää merkittävästi väylärakentamisen päästöjä.

Tämän työn tavoitteena on arvioida realistista päästökehitystä lähivuosisikymmeninä ja ehdottaa menettelytapaa ennustetun päästökehityksen huomioonottamiseksi väylärakentamisen vaihtoehtojen varhaisessa vertailussa ja valinnoissa.

Väylärakentamisen suhteen keskeisten materiaalien ja tuotteiden markkinoilla on jo nyt päästöarvoiltaan erilaisia mutta samaan tuoteryhmään kuuluvia vaihtoehtoja. Päästöarvojen erilaistuminen kehittyy aluksi asteittain, mutta erot voivat joskuskin aikaa kasvaa hyvinkin merkittäviksi. Hint erot voivat myös kasvaa samalla huomattavastikin. Kasvavien erojen takia keskiarvot tai ns. tyypilliset tai geneeriset päästöarvot tulevat olemaan lähivuosisikymmeninä vähemmän merkityksellisiä väylärakentamisen ilmastovaikutuksien arvioinnissa ja ne kuvaavat todellisuutta nykyistä selvästi huonommin.

Päästöarvojen todennäköisen erilaistumisen takia ja toisaalta skenaarioarvojen kehittämisen työläyden takia tämä selvitys ei suosittele kattavien skenaarioihin pohjautuvien päästöarvojen kehittämistä infrarakentamisen päästötietokantaan.

Sen sijaan suosituksena on muodostaa vastaavan kaltaisia eri tuoteryhmien päästöluokkia kuin valmisbetonille on tehty. Päästöluokkia olisi mahdollista käyttää myös hankinnan kriteereinä. Tällaisen menettelyn voidaan katsoa soveltuvan erityisen hyvin infra-alalle ja aivan erityisesti väylärakentamiseen, jossa tilaajan rooli on hyvin keskeinen. Samanaikaisesti päästöarvojen luokituksen kanssa olisi suositeltavaa arvioida myös päästöluokkien kustannusmerkitystä.

Useimpien infrarakentamisen keskeisten tuotteiden suhteen voidaan ennustaa asteittaista kehitystä niin, että päästöt potentiaalisesti vähenevät hanke- ja rakennusosatasolla noin 15 ja 30 prosenttia seuraavalla kahdella vuosikymmenellä. Lähiajan suosituksena päästöarvojen käsittelyyn onkin käyttää apuna näitä kertoimia – 0,85 ja 0,70 – rakennusosa- ja hankeosatasoisesti, kun halutaan arvioida 10–20 vuoden kuluttua toteutettavia hankkeita.

Uusiomateriaalien suhteen suosituksena on jatkaa skenaariotyötä tekemällä selvitys eri uusiomateriaalien saatavuudesta ja vaihtoehtoista. Infrarakentamisen uu-

---

siomateriaaleista suuri osa pohjautuu metalli- ja energiateollisuuden tuhkiin ja kuoniin, joiden saatavuudessa tapahtunee lähivuosikymmeninä merkittäviä muutoksia. Tällä on vaikutusta paitsi uusiomateriaalien käyttöön sinänsä myös niiden avulla tavoiteltavien vähähiilisten betonien saatavuuteen.

**Tarja Häkkinen, Ismo Hämäläinen, Jarmo Linjama: Bedömning av byggtidens och byggnadsteknikens inverkan på de utsläpp som orsakas av vägbyggen.** Tra-fikledsverket. Helsingfors 2023. Trafikledsverkets publikationer 16/2023. 54 sidor. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-405-052-4.

**Nyckelord:** konstruktion, trafikleder, växthusgas, CO<sub>2</sub>-utsläpp

## Sammanfattning

Projekt där man bygger trafikleder är långsiktiga, och jämförelser och preliminära val av alternativ måste göras flera år innan projektet genomförs. Växthusgasutsläppen från vägbyggen, och infrastrukturbyggen i allmänhet, kommer att minska markant under de kommande decennierna i takt med att utsläppen från energi, industri, transporter och anläggningsmaskiner utvecklas. Utsläppen från vägbyggande kommer sannolikt att påverkas särskilt av att utsläppen vid produktionen av asfalt och betong, stabilisatorer, stål och el minskar samt att användningen av förnybara bränslen ökar. Att den cirkulära ekonomin blir effektivare och att energieffektiviteten förbättras kan också minska utsläppen avsevärt.

Syftet med detta arbete är att utvärdera den realistiska utsläppsutvecklingen under de närmaste decennierna och att föreslå en procedur för att ta hänsyn till den förutsedda utsläppsutvecklingen vid tidig jämförelse och val av alternativ för trafikledsbyggande.

På marknaden för centrala material och produkter för vägbyggande finns det redan alternativ som har olika emissionsvärden men som tillhör samma produktgrupp. Utsläppsvärdena differentieras till en början gradvis, men skillnaderna kan under en period bli betydande. Samtidigt kan även prisskillnaderna öka avsevärt. På grund av de växande skillnaderna kommer medelvärdena eller så kallade typiska eller generiska utsläppsvärden att vara mindre relevanta under de kommande decennierna i bedömningen av vägbyggets klimateffekter och de kommer att beskriva verkligheten klart sämre än i dag.

På grund av att utsläppsvärdena sannolikt differentieras och på grund av hur mödosamt det är att förutse utsläppsvärdena, rekommenderar denna rapport inte att man utvecklar heltäckande scenariobaserade utsläppsvärden för utsläppsdata-basen för infrastrukturbyggande.

I stället är rekommendationen att man för olika produktgrupper skapar liknande utsläppskategorier som finns för fabriksbetong i Finland. Utsläppsklasserna kunde också användas som upphandlingskriterier. Ett sådant förfarande kan anses vara särskilt väl lämpat för infrastruktursektorn och särskilt för vägbyggande, där byggherrens roll är mycket central. Samtidigt som av utsläppsvärdena kategoriseras skulle det vara lämpligt att även utvärdera kostnadsskillnaderna mellan kategorierna.

För de flesta av nyckelprodukterna inom infrastrukturbyggande kan man förutspå en gradvis utveckling där utsläppen potentiellt kommer att minska i projektskala med cirka 15 och 30 procent under de kommande två decennierna. På kort sikt kan därmed rekommenderas att man vid beräkningen av utsläppsvärden i skalan av byggnadsdelar och projekt använder dessa koefficienter – 0,85 och 0,70 –, när man vill utvärdera projekt som ska genomföras om 10–20 år.

---

Gällande återvunnet material är rekommendationen att fortsätta scenarioarbetet genom att göra en rapport om tillgänglighet och alternativ för olika återvunna material. En stor del av de återvunna materialen för infrastrukturbyggande baserar sig på aska och slagg från metall- och energiindustrin, vars tillgänglighet sannolikt kommer att genomgå betydande förändringar under de kommande decennierna. Detta påverkar inte bara användningen av återvunnet material i sig, utan också tillgången på lågkolhaltig betong som kan tillverkas av de återvunna materialen.



**Tarja Häkkinen, Ismo Hämäläinen, Jarmo Linjama: Assessment of the impact of the time of construction and the development of construction technology on the emissions caused by road construction.** Finnish Transport Infrastructure Agency Hel-sinki 2023. Publications of the FTIA 16/2023. 54 pages. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-405-052-4.

**Keywords:** construction, transport infrastructure, carbon footprint, CO2 emissions, reduction

## Abstract

The construction projects of transport infrastructure are long-term, and the comparison and preliminary selection of alternatives must be done several years before the project is implemented. Greenhouse gas emissions from road construction and infrastructure construction in general will decrease significantly in the coming decades with the development of emissions from energy, industry, transport, and construction machinery. The emissions of fairway construction will probably be affected especially by the reduction of emissions in the production of asphalt and concrete, stabilizers, steel, and electricity, and the use of fuels. Also, the use of the circular economy solutions and improving energy efficiency can significantly reduce emissions.

The aim of this work is to evaluate the realistic emission development in the next few decades and to propose a procedure for taking the predicted emission development into account in the early comparison and selection of alternatives for fairway construction.

There are already alternatives in the market for the materials and products that are key to fairway construction, with different emission values but belonging to the same product group. The differentiation of emission values develops gradually at first, but the differences can become significant for a while. The price differences can also increase considerably at the same time. Due to the growing differences, the averages or so-called typical or generic emission values will be less relevant in the coming decades in the assessment of the climate effects of road construction and they will describe reality clearly worse than at present.

Due to the likely differentiation of the emission values and, on the other hand, due to the laboriousness of developing the emission values, this report does not recommend the development of comprehensive scenario-based emission values for the infrastructure construction emission database.

Instead, the recommendation is to create emission categories for different product groups similar to what has been done for ready-mixed concrete in Finland. It would also be possible to use emission classes as procurement criteria. Such a procedure can be considered particularly well suited to the infrastructure sector and especially to fairway construction, where the client's role is very central. Simultaneously with the classification of emission values, it would be advisable to also evaluate the cost differences.

With regard to most of the key products in infrastructure construction, a gradual development can be predicted so that emissions will potentially decrease at the project scale by approximately 15 and 30 percent in the next two decades. The

---

near-term recommendation for processing emission values is to use these coefficients – 0.85 and 0.70 – at the scale of building parts and projects, when you want to evaluate projects that will be implemented in 10–20 years.

Regarding recycled materials, the recommendation is to continue the scenario work by making a report on the availability and alternatives of different recycled materials. A large part of the recycled materials for infrastructure construction is based on the use of ashes and slags from the metal and energy industry, the availability of which will undergo significant changes in the coming decades. This has an impact not only on the use of recycled materials per se, but also on the availability of low-carbon concrete that can be achieved with them.

## Esipuhe

Väyläviraston tavoitteena on kehittää CO<sub>2</sub>-päästövähennystoimien tarkastelua väylien kunnossapidossa ja rakentamisessa. Tietoa väylien elinkaaren aikaisesta hiilijalanjäljestä tarvitaan päätöksenteon tueksi sekä tukemaan merkittävien päästövähennyskohteiden tunnistamista osana väylänpitoa ja väyläomaisuuden hallintaa. Työ on osa laajempaa infrarakentamisen päästölaskennan kehitystyön kokonaisuutta.

Vuonna 2022 valmistunut infrarakentamisen kansallinen päästötietokantahanke oli Väyläviraston T&K –hanke, jossa kehitettiin avoin elinkaari pohjainen tietokanta väylärakentamisen ja väylänpidon CO<sub>2</sub>-päästöjen laskentaan. Päästötietokanta laadittiin Suomen ympäristökeskuksessa ja hankkeen tilaaja oli Väylävirasto. Päästötietokanta julkaistiin joulukuussa 2022 co2data.fi -palvelussa, ja sen päivittämisestä ja ylläpidosta on sovittu Suomen ympäristökeskuksen kanssa. Tarkoituksena on, että tietokannan avulla voidaan tehdä tyyppisten infrahankkeiden elinkaarilaskentaa olennaisimpien panostietojen pohjalta. Kehitystyötä jatketaan mm. Infrahankkeiden kustannuslaskentajärjestelmä ja -palveluallianssin (IHKU) yhteyteen rakennettavan päästölaskentatoiminnon kehittämällä. Väylävirasto on mukana kehittämisestä vastaavan palveluallianssin tilaajakonsortiossa.

Infrarakentamisen kasvihuonekaasupäästöt tulevat todennäköisesti vähenemään merkittävästi lähivuosikymmeninä teollisuudessa, kuljetusalalla ja työkoneiden käytössä tapahtuvan ilmastovaikutuksia vähentävän kehitystyön ansiosta. Väylärakentamisen päästöihin tulevat erityisesti vaikuttamaan päästökehitys asfalttien ja betonien ja niiden sideaineiden, stabilointiaineiden, teräksen, polttoaineiden ja sähkön tuotannossa. Myös kiertotalouden tehostuminen ja paraneva energiatehokkuus voivat vaikuttaa merkittävästi väylärakentamisen päästöihin.

Toisaalta väylärakentamisen hankkeet ovat pitkäkestoisia, ja koko suunnittelu- ja toteutusprosessin kesto voi olla muutamia vuosikymmeniä. Tämän selvityksen tavoitteena on arvioida päästökehityksen merkitystä infrarakentamisen kannalta lähivuosikymmeninä ja sekä arvioida sen aiheuttamia tarpeita infrarakentamisen päästötietokannan kehitystyössä. Raportti esittelee merkittävän päästökehityksen osa-alueet infra-alan rakentamisessa. Päästökehityspotentiaalia eri osa-alueilla arvioidaan kirjallisuuden, Suomen ilmastoskenaarioiden, erilaisten teollisuuden raporttien sekä asiantuntijahaastatteluiden nojalla. Lopulta raportti esittää ehdotuksia päästökehityksen huomioon ottamisesta kansallisen päästötietokannan jatkokehityksessä.

Raportti on osa Suomen ympäristökeskuksessa tehtyä projektipäällikkö Janne Pesun vetämää hanketta, jonka tavoitteena oli kehittää kansallinen infrarakentamisen päästötietokanta. Raportin ovat kirjoittaneet erikoistutkija, TkT Tarja Häkkinen sekä tutkija Ismo Hämäläinen (kohta 6.8) ja kehitysinsinööri Jarmo Linjama (kohta 6.9).

Työtä on ohjannut Väyläviraston asiantuntijoista koostunut ohjausryhmä, johon kuuluivat:

Karoliina Saarniaho (pp), Väylävirasto  
Laura Yli-Jama, Väylävirasto  
Timo Tirkkonen, Väylävirasto

Laura Valokoski, Väylävirasto  
Mika Lemmetyinen, Väylävirasto  
Ari Huomo, Väylävirasto  
Hanna Sandell, Väylävirasto  
Paula Kajava, Väylävirasto  
Matti Kuittinen, Ympäristöministeriö  
Mikko Suominen, Helsingin kaupunki  
Heidi Huvila, Helsingin kaupunki  
Virpi Nikulainen, Helsingin kaupunki

Helsingissä kesäkuussa 2023

Väylävirasto  
Väylänpito, ympäristöyksikkö

## Sisältö

1	JOHDANTO – RAKENTAMISEN PÄÄSTÖJEN VÄHENEMISEN NÄKYMIÄ .....	12
2	TAVOITE JA MENETELMÄT.....	14
3	MERKITTÄVÄN PÄÄSTÖKEHITYKSEN OSA-ALUEET INFRARAKENTAMISESSA .....	16
4	KIRJALLISUUSTUTKIMUS.....	18
4.1	Energian dekarbonatisoitumisesta.....	18
	4.1.1 Hiilidioksidin talteenoton mahdollisuuksia ja haasteita.....	18
	4.1.2 Vetytaloudesta .....	19
4.2	Terästeollisuuden dekarbonisoitumisen teknologisia vaihtoehtoja.....	20
4.3	Sementin ja betonin päästövähennysten teknologisia mahdollisuuksia ....	21
5	TEOLLISUUDEN, KULJETUSTEN JA TYÖKONEIDEN DEKARBONATISOITUMINEN SUOMEN PITKÄN JA KESKIPITKÄN AIKAVÄLIN SKENAARIOISSA .....	23
5.1	Pitkän aikavälin skenaarit.....	23
5.2	Keskipitkän aikavälin suunnitelma.....	24
6	SUOMEN RAKENNUS- JA MATERIAALITEOLLISUUDEN ARVIOITA PÄÄSTÖKEHITYKSESTÄ .....	26
6.1	Sementti .....	26
6.2	Betoni .....	29
6.3	Asfaltti .....	31
6.4	Teräs .....	32
6.5	Alumiini.....	34
6.6	Uusiomateriaalit ja luonnon kiviainekset .....	35
6.7	Muovit.....	39
6.8	Biopolttoaineet ja kuljetussuoritteet .....	39
6.9	Työkonesuoritteet .....	41
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA EHDOTUS.....	45
	LÄHDELUETTELO.....	48

# 1 Johdanto – rakentamisen päästöjen vähentämisen näkymiä

Lähi vuosikymmeninä infrarakentamisen kasvihuonekaasupäästöt tulevat väheneään merkittävästi. Väylärakentamisen päästöihin tulevat erityisesti vaikuttamaan positiivinen päästökaasun kehitys asfalttien ja betonien ja niiden sideaineiden, stabilointiaineiden, teräksen, polttoaineiden ja sähkön tuotannossa. Myös kiertotalouden tehostuminen ja paraneva energiatehokkuus voivat vähentää merkittävästi väylärakentamisen päästöjä.

Rakennusteollisuuden tiekarttatyössä (RT 2020) painotetaan, että infrarakentamisessa oleellista päästövähennyspotentiaalia löytyy etenkin työmaatoiminnoista, kuljetustarvetta vähentävästä kiviainesten alueellisesta hyödyntämisestä sekä kierätyk- ja uusiomateriaalien käytöstä. Työmaatoimintojen päästöjen vähentämisessä sähköistämällä ja biopolttoaineisiin siirtymisellä on tärkeä rooli.

Materiaalien päästövähennyspotentiaalil osalta keskeisiä materiaaleja ovat erityisesti betoni- ja terästuotteet. Jo käytössä olevia keinoja betonien hiilijalanjäljen parantamiseen ovat erityisesti vaihtoehtoisten sideaineiden – kuten jauhetun granuloidun masuunikuonan tai lentotuhkan – käyttö, sementtitarpeen vähentäminen hienoaineiden avulla ja vähähiilisen energian käyttö sementin valmistuksessa. Tulevaisuudessa pyritään nykyistä merkittävämpiin vähennyskeinoihin. Tutkimus- ja kehitystyön kohteena ovat esimerkiksi sementtiteollisuudessa hiilidioksidin talteenotto ja varastointi, vaihtoehtoiset klinkkerikoostumukset ja erilaiset innovaatiot kuten hiilidioksidin sitominen betoniin. Myös ilman sementtiä valmistetut geopolymeerit vaikuttavat tutkimuksen näkökulmasta lupaavilta keinoilta vähentää betonirakentamisen hiilijalanjälkeä. Terästeollisuus pyrkii kehittämään teknologioita, joiden avulla päästöjä voitaisiin vähentää merkittävästi. Yksi esimerkki pyrkimyksestä on SSAB:n hanke, jossa rautamalmipohjaisessa teräksenvalmistuksessa perinteisesti käytetty kooksi on tarkoitus korvata vedyllä. Tavoitteena on fossiilivapaa teräksenvalmistustekniikka jo ennen vuotta 2035. Kunnianhimoisia tavoitteita on myös monella muulla väylärakentamisen päästöihin vaikuttavalla osa-alueella. Edelläkävijöiden nopea edistymisen päästövähennyksissä voi kuitenkin johtaa tilanteeseen, jossa markkinoilla on tarjolla päästöarvoiltaan hyvin erilaisia saman tuoteryhmän tuotteita. Tällöin toimijoiden oma halukkuus investoida vähäpäästöiseen teknologiaan korostuu.

Radikaaleihin muutoksiin perustuvien isojen edistysaskelien rinnalla rakennustuoteollisuudessa ja rakennusteknologiassa tehdään myös jatkuvaa asteittaista päästövähennystyötä. Tätä tukee sähköenergian jatkuvasti alenevat päästöt. Lisäksi työtä tulee kauttaaltaan vahvistamaan talonrakentamiseen suunniteltu päästöjen säädösohjaus, jossa tuotesidonnaiset päästöt otetaan huomioon rakennusten käyttösidonnaisten päästöjen lisäksi. Tämänhetkisten ehdotuksien mukaan luvanvaraisessa rakentamisessa uudisrakennuksille ja laajamittaisille korjaushankkeille tulisi laatia ilmastaselvitys (VN 2022, YM 2022).

Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyyden tiekartan mukaan rakennetussa ympäristössä ja rakentamisessa ollaan vähentämässä päästöjä 66 prosenttia vuoteen 2035 mennessä. Tunnistettujen teknologiaharppausten avulla voidaan tuolloin päästä jopa 80 prosentin vähennykseen. Vuoteen 2050 on mahdollisuus saavuttaa lähes hiilineutraalius ja vähentää päästöjä 95 prosentilla. Tiekartta tosin painottaa rakennusten käytön aikaisen energiankulutuksen merkitystä

---

ja tähän liittyen mm. energiaremonttien ja lämmitysmuotojen uusimisen isoa päästövähennyspotentiaalia.

Tämän selvityksen tavoitteena oli pohtia rakennusteollisuuden tiekarttatyön (RT 2020) sekä muiden lähteiden ja haastattelujen avulla päästökehityksen merkitystä infrarakentamisen kannalta lähivuosikymmeninä ja sekä arvioida sen aiheuttamia tarpeita infrarakentamisen päästötietokannan kehitystyössä.

## 2 Tavoite ja menetelmät

Väylärakentamisen hankkeet ovat pitkäkestoisia, ja erilaisten vaihtoehtojen vertailua ja valintaa joudutaan tekemään useita vuosia ennen hankkeen toteutusta. Tämän vuoksi tarvitaan skenaariotyötä rakentamisen ajankohdan, energia- ja kuljetuspalvelujen sekä materiaali- ja rakennusteknologian kehityksen vaikutuksesta väylärakentamisesta aiheutuviin päästöihin.

Tämän skenaariotyön tavoitteena on

- arvioida realistista päästökehitystä vuoteen 2030 ja 2040 asti rakennustuoteollisuuden, kiertotalouden sekä energia- ja kuljetuspalvelujen niillä osa-alueilla, jotka ovat merkittäviä väylärakentamisen päästöjen kannalta
- ehdottaa menettelytapaa ennustetun päästökehityksen huomioonottamisessa väylärakentamisen vaihtoehtojen varhaisessa vertailussa ja valinnoissa.

Arviossa käytettiin seuraavia menettelytapoja:

### 1) Merkittävän päästökehityksen osa-alueet

Työn lähtökohdaksi määritettiin väylärakentamisen kannalta keskeisimmät päästölähteet, joissa tapahtuvilla muutoksilla olisi hyvin merkittävä vaikutus arviointituloksiin. Määrittäminen tehtiin olemassa olevien selvitysten pohjalta (esimerkiksi selvitys Väylänpidon hiilijalanjälki ja sen laskeminen (Mannola 2019) sekä vuorovaikutuksessa hankkeen ohjausryhmän kanssa. Määrittäminen pohjalta valittiin skenaariotyön keskeiset osa-alueet (luku 3).

### 2) Kirjallisuusselvitys

Työn lähtökohtana käytettiin rakennusteollisuuden tiekarttatyön väylärakentamisen kannalta olennaisia tuloksia. Tiekarttatyössä Rakennusteollisuus RT laati yhdessä sidosryhmien ja ympäristöministeriön kanssa selvityksen Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 rakennussektorin vastauksena Suomen tavoittelemaan hiili-neutraaliuteen (RT 2020).

Lisäksi tehtiin muuhun viimeaikaiseen kirjallisuuteen ja hankeraportteihin pohjautuva lyhyt selvitys potentiaalisesta päästökehityksestä valituilla osa-alueilla. Energiapalvelujen osalta nojaututtiin pääosin samoihin tuloksiin ja tausta-aineistoihin, joita on käytetty rakentamisen päästötietokannan kehitystyössä ja joista esitetään yhteenveto viitteessä (Häkkinen 2022). Energian, kuljetusten ja työkoneiden osalta keskeinen lähtökohta oli myös keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelma (YM 2022). Tulokset esitetään luvussa 4, 5 ja 6. Luvussa 4 dekarbonatisoitumista taustoitetaan yleisestä näkökulmasta esittäen lyhyt yhteenveto energian ja erilaisten päästöjen talteenottoa koskevien teknologioiden suhteen. Luvussa 5 esitetään yhteenvetoa Suomen pitkän ja keskipitkän aikavälin skenaarioiden näkökulmasta, ja luvussa 6 esitetään yhteenveto väylärakentamisen keskeisten materiaalien näkökulmasta painottaen teollisuuden omaa näkökulmaa esimerkiksi julkaistujen raporttien pohjalta.



### 3) Haastattelut

Edellisten tehtävien tulosten pohjalta valittiin haastateltavat. Haastateltavat olivat pienehkö joukko teollisuuden edustajia sekä muita asiantuntijoita ja tutkijoita. Haastattelujen avulla pyrittiin arvioimaan päästövähennystavoitteiden toteutumisen aikataulua ja realistisuutta.

Haastatteluiden tulokset esitetään haastatteluviitteiden avulla luvun 6 yhteydessä.

### 4) Ehdotus päästökehitysskenaarioiden huomioon ottamisesta päästölaskelmissa

Tehtävässä laadittiin alustava ehdotus siitä, miten oletetut päästövähennykset otetaan huomioon väylärakentamisen päästölaskelmissa. Ehdotus laadittiin SYKEN tutkimusryhmässä vuorovaikutteisesti ohjausryhmän kanssa. Tulos esitetään luvussa 8 (yhteenvedo ja johtopäätökset).

### 3 Merkittävän päästökehityksen osa-alueet infrarakentamisessa

Infrarakentamisen kansallista päästötietokantahanketta taustoittavan esiselvityksen (Häkkinen ym. 2022) mukaan maa-, pohja- ja kalliorakenteiden vaikutus infrarakentamisen hiilijalanjälkeen korostuu erityisesti uudisrakentamiskohteissa. Myös päälly- ja pintarakenteiden vaikutus hiilijalanjälkeen on erityisen merkittävä korostuen etenkin perusparannushankkeissa ja kunnossapidossa. Keskeisimmät materiaalit hiilijalanjäljen kannalta ovat asfaltti, betoni ja teräs. Asfalttia ja betonia käytetään tyypillisesti tienpäällysteissä. Betonipäällysteisten teiden GWP-vaikutukset ovat asfalttia suuremmat sekä päästöintensivisyyden että materiaalien tarpeen osalta. Tienpäällysteiden lisäksi betonia käytetään runsaasti myös tunneli- ja siltarakenteissa. Tällöin betonin tuottamisesta aiheutuvat päästöt ovat usein suuret hankkeissa, jotka sisältävät näitä rakenteita. Terästä hyödynnetään tyypillisesti tunneli- ja siltarakenteiden betonin vahvistamiseen ja ratahankkeiden kiskoihin. Teräksen energiaintensiivisen valmistusprosessin vuoksi sen vaikutus hiilijalanjälkeen on merkittävä etenkin ratahankkeissa, joissa terästä käytetään paljon. Infra-hankkeissa keskeisessä roolissa on myös massojen kuljetus, jonka osuus hankkeiden hiilijalanjälkeen on tutkimusten ja selvitysten mukaan suuri. Työmaatoimintojen osuus hankkeiden päästöistä jää tutkimusten mukaan vähäiseksi.

Esimerkiksi Kehä I:stä koskevan pilottihankkeen tulosten (Aulakoski ym. 2014) mukaan liittymän parantamisen arvioitu kokonaispäästö oli noin 11 ktCO<sub>2</sub>. Noin 95 prosenttia CO<sub>2</sub>-päästöistä muodostui hankkeen rakentamisessa käytettävistä päämateriaaleista eli betonista (noin 4 ktCO<sub>2</sub>), teräksestä (noin 2 ktCO<sub>2</sub>) ja asfaltista (noin 1 ktCO<sub>2</sub>) sekä kuorma-autokuljetuksista (noin 2 ktCO<sub>2</sub>) ja työkoneista (noin 1 ktCO<sub>2</sub>). Toisaalta esimerkiksi valtatie 5 Nuutilanmäki–Vehmaan rakentamisen päästöistä (noin 32 ktCO<sub>2</sub>) merkittävimpiä olivat kuljetusten, asfaltin, betonin ja koneiden tuottamat päästöt (Rapal 2019). Hki–Turku nopean junayhteyden hankkokonaisuuden rakentamisesta aiheutuvat päästöt ovat hankkeen YVA-raportin mukaan noin 1 000 kt CO<sub>2</sub>ekv kummankin toteutusvaihtoehdon osalta. Ratalinja muodostaa molemmissa vaihtoehdoissa suurimman osan – lähes 60 prosenttia kokonaispäästöistä. Arviossa otettiin huomioon myös toteutumisen myötä suunnittelualueelta poistuva hiilivarasto, mikä oli kummassakin vaihtoehdossa suuruusluokkaa 400 ktCO<sub>2</sub>-ekv. (Uski ym. 2021).

Vähähiilisen rakentamisen nykytilaraportin (Laine ym. 2020) mukaan väylien rakentamisen materiaalien ja kunnossapidon vuosittainen hiilijalanjälki on noin 446 ktCO<sub>2</sub>. Suurimmat päästöt aiheutuvat materiaalikäytöstä (434 ktCO<sub>2</sub>) ja erityisesti betonista (338 ktCO<sub>2</sub>), asfaltista (73 ktCO<sub>2</sub>) ja teräksestä (17 ktCO<sub>2</sub>). Kunnossapidon energiankulutuksen päästö on noin 12 ktCO<sub>2</sub>/vuosi.

Vähähiilisen rakentamisen nykytilaraportin (Laine ym. 2020) mukaan yhdyskuntatekniikan suurimmat päästöt aiheutuvat sähköverkon rakentamisesta (164 ktCO<sub>2</sub>e). Vesijohtoverkon päästöt ovat noin 39 ktCO<sub>2</sub>e ja kaukolämpöverkon noin 11 ktCO<sub>2</sub>e. Sähköverkoissa suurimmat materiaalipäästöt aiheutuvat alumiinin ja muovin käytöstä. Vesijohtoverkoilla suurimmat materiaalipäästöt aiheutuvat betonista ja metallista. Kaukolämpöverkoissa suurin materiaalipäästö aiheutuu muovista.

Infrarakentamisen kokonaispäätöihin kuuluu myös muiden osa-alueiden kuten katu- ja puistojen rakentamisen ja kunnossapidon aiheuttamat päästöt.

Kattavien ja riittävän tarkkojen ja luetettavien kokonaisarvioiden tekeminen infrarakentamisen päästöistä on kuitenkin vielä kesken, ja lisäselvityksille on vielä ilmeinen tarve.

Koska kasvihuonekaasupäästöt ovat pääosin peräisin fossiilisten polttoaineiden poltosta energian tuotannossa, teollisuudessa, kuljetusvälineissä ja työkoneissa, dekarbonisoinnin eteneminen on ennen muuta energiaan liittyvä kysymys. Rakentamisen kannalta toinen merkittävä päästövähennyksiin liittyvä asia on betonien ja stabilointiaineiden sideaineiden raaka-aineena käytettävä kalkkikivi, jonka poltossa vapautuu hiilidioksidia.

Kehitteillä olevan väylärakentamisen päästötietokannan kannalta dekarbonisointiarvioiden suhteen keskeisimpiä panoksia ovat seuraavat:

- betoni ja sideaineet
- asfaltti
- teräs
- kuljetuspalvelut ja
- työkonepalvelut.

Lisäksi uusiomateriaalit ovat tärkeitä rakennus- ja hankeosien tasolla, vaikka panostasoinen dekarbonisointi onkin vähäistä. Yhdyskuntatekniikan näkökulmasta keskeisiä panoksia ovat jossain määrin lisäksi

- muovit
- alumiini.

Merkittävää muutosta väylien rakentamisen materiaalipohjassa on jo tapahtunut ja tapahtunee jatkossakin, kun luonnon maa- ja kiviaineksa korvataan uusiomateriaaleilla. Uusiomateriaalien käyttö voi muuttaa kuljetustarpeita, ja jos muutokset vähentävät kuljetuksia, niin kuljetusten päästöt vähenevät vastaavasti. Materiaalipanoksien päästöt ovat myös jonkin verran erilaisia, mutta useimmissa tapauksissa massapohjainen päästöarvo on pienempi sekä uusiomateriaalien että luonnon maa- ja kiviaineiden suhteen. Uusiomateriaalien prosessoinnin hiilijalanjäljestä on toistaiseksi saatavilla hyvin vähän tietoja, ja luotettavan tiedon saamiseksi uusiomateriaalien hiilijalanjäljestä tarvittaisiin lisätutkimusta (Teittinen ym. 2020). Toisaalta tarvitaan luotettavaa uutta tietoa myös perinteisten materiaalien hiilijalanjäljestä. Vaikka lisätiedot ovat tarpeen, uusiomateriaalit ja perinteiset maa- ja kiviainekset eivät ole dekarbonisoinnin näkökulmasta yhtä keskeisiä kuin edellä mainitut betoni, metallit, asfaltti ja polttoaineet.

## 4 Kirjallisuustutkimus

Tässä luvussa esitetään lyhyt teoreettinen taustoitus rakennusalan keskeisten teollisuusalojen mahdollisista päästövähennyskeinoista. Katsaus perustuu lähinnä muutamiiin aihepiiriin keskeisiin tieteellisiin artikkeleihin ja kansainvälisten organisaatioiden yhteenvetoihin. Luvuissa 5 ja 6 samaa aihepiiriä käsitellään konkreettisesti Suomen näkökulmasta ottaen huomioon kuljetukset ja työkoneet sekä keskeisimmät infrarakentamisen materiaalit.

### 4.1 Energian dekarbonatisoitumisesta

Uusiutuva energia on ilmeisin tapa vähentää hiilidioksidipäästöjä. Monissa maissa uusiutuvan energian jatkuvasti kasvava osuus energian loppukäytöstä perustuu sähkön tuottamiseen tuuli-, aurinko- tai vesivoimalla.

Rockström ym. (2017) arvioivat dekarbonatisoitumista globaalisti kuvaten tiekartana, että vuoteen 2040 mennessä öljy on poistumassa maailmanlaajuisesta energiavalikoimasta, ja että useat eturintamassa olevat maat kuten Norja, Tanska ja Ruotsi ovat sähköistäneet kaikki sektorit ja ovat päästöttömiä tai lähellä sitä. Vuoden 2030 jälkeen kaikki talonrakentaminen on hiilineutraalia tai hiilinegatiivista. Rakennusteollisuus käyttää päästötöntä betonia ja terästä tai korvaa ne muilla päästöttömillä tai hiilinegatiivisilla aineilla. Rockströmin ym. (2017) kuvaaman skenaarion mukaan BECCS-järjestelmät (bioenergia hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla) ottavat talteen yhteensä 1–2 GtCO<sub>2</sub>/vuosi, ja tutkimus ja kehitys keskittyy hiilidioksidin vuosittaisen poistoasteen kaksinkertaistamiseen. Kaikista Euroopan suurimmista maista tulee lähes nollahiilivaltioita 2040-luvun alussa. Ydinenergiaa käytetään paikoin osana energiajärjestelmää. Vuoteen 2050 mennessä maailman hiilidioksidipäästöt ovat nolla, ja maailmantalous perustuu hiilivapaalle energialle ja ruokatalous perustuu hiiltä sitovaan maatalouteen. Siihen mennessä BECCS-järjestelmiä on laajennettu ja talteenotto ylittää viiteen GtCO<sub>2</sub>/vuosi. Kehitystä tukee energiatehokkuuden jatkuva paraneminen ja DACCS (Direct Air Capture with Carbon Storage) (Rockström ym. 2017). Hiilidioksidin talteenotto ilmakehästä (DAC I. Direct Air Capture) on kehittyvä teknologia, jonka kustannustehokkuuden kehittymisessä on kuitenkin vielä hyvin suuria epävarmuuksia. Tulevaisuudessa sillä saattaa kuitenkin olla suuri merkitys joko negatiivisia päästöjä tuottavana teknologiana tai hiilineutraalien polttoaineiden tuotannossa (Lehtilä, 2019).

#### 4.1.1 Hiilidioksidin talteenoton mahdollisuuksia ja haasteita

Energia-alan hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen liittyy kuitenkin useita haasteita. Viitteen (Papadis & Tsatsaronis, 2020) mukaan CCS eivätkä myöskään CCU (Carbon Capture and Usage) ja CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) realistisia vaihtoehtoja hiilidioksidin vähentämiselle. CCS:n teknisestä toteutettavuudesta huolimatta vain harvat sähköntuotannon CCS-laitokset on otettu käyttöön. CCS ei välttämättä johda kokonaisympäristövaikutusten vähenemiseen, koska talteenotto vaatii lisäenergiaa. Alhainen taloudellinen kannattavuus ja ongelmat CO<sub>2</sub>-kuljetuksen ja varastoinnin suhteen ovat myös johtaneet siihen, että CCS-teknologia ei ole kaupallistunut. CCU:lla voidaan saavuttaa päästövähennys ja samalla tuottaa tuotteita, mutta jos talteen otetulla CO<sub>2</sub>:lla syntyviä kemikaaleja käytetään, niin CO<sub>2</sub> vapautuu jälleen ilmakehään (Papadis & Tsatsaronis, 2020). Jotta CCU:n avulla voitaisiin saavuttaa päästövähennyksiä, talteen otetun hiilidioksidin

pitäisi sitoutua pitkäikäisiin tuotteisiin tai CO<sub>2</sub> tulisi syntetisoida esimerkiksi polttoaineeksi korvaamaan fossiilisia energialähteitä (Lehtilä, 2019).

Talteenottotekniikoiden avulla prosesseissa syntyvä hiilidioksidi otetaan talteen ennen sen vapautumista poistokaasujen mukana. Hiilidioksidin varastoiminen edellyttää noin 95-prosenttista CO<sub>2</sub>-pitoisuutta, mutta poistokaasun CO<sub>2</sub>-pitoisuus tyypillisessä fossiilisia polttoaineita käyttävissä energialaitoksissa on vain noin 10–15 prosenttia. Tämän vuoksi poistokaasu on jälkikäsiteltävä ja väkevoitävä ennen varastointia. Talteenottoa pidetäänkin yleisesti mahdollisena vain suurille energiantuotantolaitoksille ja teolliselle prosesseille (SYKE, ei pvm).

Hiilidioksidin varastointiin on eri tekniikoita, joissa hiilidioksidi johdetaan maaperään, meren pohjaan, sitoutetaan biomassaan tai sidotaan kemiallisin reaktioin kiinteiksi mineraaleiksi. Hiilidioksidikaasun pumppaaminen nestemäiseksi paineistettuna öljyesiintymiin on yksi lupaavimmista varastointitekniikoista, (SYKE, ei pvm).

#### 4.1.2 Vetytaloudesta

Viitteen (Papadis & Tsatsaronis, 2020) mukaan vety voisi pitkällä aikavälillä korvata fossiilisia polttoaineita sähkön- ja lämmöntuotannossa, mutta myös esimerkiksi metalliteollisuudessa ja kuljetusalalla. Jotta vedyllä voidaan minimoida hiilidioksidipäästöt, se on tuotettava uusiutuvista lähteistä tuotetulla sähköllä.

Voidaan puhua fossiilisesta vedystä, jossa vety (H<sub>2</sub>) tuotetaan fossiilisista polttoaineista, kun taas uusiutuva vety on vesielektrolyysillä tuotettua vetyä käyttäen uusiutuvia tai hiilidioksidipäästöttömiä sähkönlähteitä kuten aurinko- ja tuulivoimaa. Uusiutuvaa vetyä voidaan kutsua myös "vihreäksi" vedyksi. EU:n CertifHy-aloite on määritellyt uusiutuvan vedyn hiilijalanjäljen ylärajaksi 36,4 g CO<sub>2</sub>e/MJ, mikä edustaa 60 prosentin CO<sub>2</sub>e-vähennystä verrattuna höyrymetaanista valmistettuun vetyyn (91 g CO<sub>2</sub>e/MJ). Vähähiilistä vetyä kutsutaan myös "siniseksi" vedyksi, kun se on valmistettu fossiilisista polttoaineista CCUS:n avulla. Vähähiilisestä vedystä käytetään nimitystä "keltainen" tai "violetti" vety, kun se tuotetaan vesielektrolyysistä ydinvoimalla (Griffiths ym. 2021).

Viitteen (Papadis & Tsatsaronis, 2020) mukaan H<sub>2</sub>-elektrolyysin suurin haaste on vedyn korkeat tuotantokustannukset. Termodynaamisesta näkökulmasta ei periaatteessa ole tehokasta muuntaa sähköä vedyksi. Toinen haaste on vedyn varastointi. Vedyn nesteyttäminen on erittäin energiaintensiivistä. Vetytalous on ollut tutkimusaiheena jo yli 40 vuotta. Hyötyjen arvioinnissa on pohdittava myös järjestelmän rajoja: esimerkiksi paikallisesti mielekkäältä hiilidioksidinpoistoratkaisulta vaikuttava vedyn tuotanto voi kokonaisuuden kannalta ollakin epätydyttävä, jos vedyn tuotantoon käytetty uusiutuviin perustuva sähkö olisikin voitu kuljettaa toisaalle ja käyttää siellä vähentämään fossiilisten polttoaineiden määrää sähköntuotantoon. Kirjoittajat päättelevät, että hyvin kunnianhimoiset ja laajat hiilenpoiston tavoitteet vetytaloudella todennäköisesti vaatisivat ydinenergian tuottaman sähkönsä merkittävää lisäystä. Teollisuussektorilla on monia erittäin energiaintensiivisiä prosesseja, joista on vaikea poistaa hiiltä. Suuria päästömääriä syntyy esimerkiksi raudan, teräksen, alumiinin, kuparin, muovien, sementin, kalkin ja lasin valmistuksessa. Näissä polttoaineen vaihtaminen, "vihreän" vedyn käyttö ja prosessien sähköistäminen ovat tärkeitä keinoja vähentää CO<sub>2</sub>-päästöjä.

Griffiths ym. (2021) arvioivat, että kestävä kehityksen skenaarioiden toteutuessa fossiilisten polttoaineiden, CCUS:n ja vesielektrolyysin avulla tuotettu vähähiilinen vety voi vastata yli 20 prosentista kemikaalien tuotannon loppuenergiatarpeesta ja noin 15 prosentista raudan ja teräksen loppuenergian tarpeesta. Suurin mahdollisuus olisi kuitenkin vedyn ja/tai sen johdannaisten käyttö merenkulussa.

## 4.2 Terästeollisuuden dekarbonatisoitumisen teknologisia vaihtoehtoja

Teollisuuden CO<sub>2</sub>-päästöt muodostavat 31 prosenttia maailman kokonaispäästöistä, ja teollisuuden päästöistä teräs- ja sementtiteollisuus ovat suurimmat aiheuttajat. Nykyään vallitseva raudan tuotanto masuunissa (BF/BOF) perustuu koksiviiliin käyttöön ja sen mekaanisiin ominaisuuksiin, ja vaihto muihin pelkistysaineisiin masuunissa on hankalaa. Maailman terästuotannon ennustetaan kuitenkin kaksinkertaistuvan vuosina 2012–2050 kysynnän kasvaessa pääasiassa kehitysmaissa, ja tämän vuoksi teräksenvalmistusprosesseihin tarvitaan välttämättä perustavanlaatuisia muutoksia. Voglin ym. (2018) analyysin mukaan vähäpäästöisen teräksen valmistukseen on olemassa kaksi päävaihtoehtoa. Ensimmäinen on fossiilisten polttoaineiden käytön jatkaminen siten, että hiilidioksidi otetaan talteen ja varastoidaan (CCS). Toinen vaihtoehto on uusiutuvan sähkön käyttö vedyn tuotannossa pelkistysaineena tai suoraan elektrolyysiprosesseissa. Useat eurooppalaiset teräksenvalmistajat aloittivat vuosina 2016–2017 suuria hankkeita, joissa selvitetään vedyn käyttöä teräksen valmistuksessa. Näitä ovat elektrolyysilaitteiden kehittämiseen keskittyvät GrInHy (Salzgitter) ja H2FUTURE (Voestalpine) sekä HYBRIT (SSAB, LKAB ja Vattenfall), jonka tavoitteena on kehittää kokonaan fossiilivapaa arvoketju primääriteräkselle (SSAB HYBRIT 2022). Jälkimmäisessä perusajatuksena on käyttää vetyyn perustuvaa suorapelkistysprosessia (H-DR), jossa suorapelkistetty rauta (DRI) muunnetaan teräkseksi valokaariuunissa (EAF).

Tieteellisessä kirjallisuudessa on toistaiseksi hyvin vähän tietoa vedyn suorapelkistysprosessista (H-DR). Muitakin vaihtoehtoja BF/BOF-päästöjen vähentämiseksi on raportoitu, kuten esimerkiksi vedyn ruiskutuksen tai huippukaasun kierrätyksen avulla, mutta arvioidut CO<sub>2</sub>-päästöjen enimmäismäärät ovat olleet vain noin 20 prosenttia. Suuri osa BF/BOF-teräksen valmistuksen CO<sub>2</sub>-päästöistä voidaan välttää H-DR-reitillä, jos uusiutuvaa sähköä on saatavilla. Pelkkä päästötön sähkö ei kuitenkaan riitä päästöttömän teräksen valmistukseen. CO<sub>2</sub>-päästöjä syntyy myös esimerkiksi rautamalmin ja kalkkikiven louhinnasta, kalkin kalsinoinnista sekä hiilen lisäämisestä teräksen olennaisena komponenttina. Kalkin kalsinoinnin prosessipäästöjen välttäminen edellyttäisi talteenottoa ja varastointia kalkin tuotannossa. Toinen vaihtoehto on kalkin korvaaminen muilla materiaaleilla sähkökaariuunissa. Lisäksi H-DR-prosessissa uuniin (EAF) on lisättävä pieniä määriä hiiltä teräksen valmistamiseksi raudasta. Kaupallisessa suorapelkistyksessä hiiltä lisätään maa-kaasuvirran kautta. Kun pelkistimenä käytetään puhdasta vetyä, tarvitaan toinen hiilenlähde. Prosessissa voidaan käyttää ruiskutettua jauhattua hiiltä tai vaihtoehtoisesti biometaania tai muita biogeenisen hiilen lähteitä. Vaikka otettaisiin huomioon hiilen ja kalkin CO<sub>2</sub>-päästöt, suorapelkistys johtaisi merkittäviin päästövähennyksiin. Hiilen ja kalkin käytöstä ja grafiittielektrodien kulutuksesta aiheutuvat päästöt vastaisivat vain noin 3 prosenttia BF/BOF-reitin päästöistä (Vogl ym. 2018).

Vetysuorapelkistysteräksen kokonaisenergian tarve on samanlainen kuin perinteisellä teräksenvalmistusreitillä (masuuni - perushappiuni), mutta hiilen ja koksen

sijaan prosessi toimii sähköllä. H-DR-reitin (Hydrogen Direct Reduction) tuotantokustannukset ovat yleensä korkeammat kuin integroidun BF/BOF-reitin, mutta ne ovat lähellä kilpailukykyisiä erittäin alhaisilla sähkökustannuksilla (20 euroa/MWh). H-DR-laitoksesta tulee kilpailukykyinen BF/BOF-investoinnin myötä 62 euron hinnalla hiilidioksiditonnilta. Vetyperustaisen prosessin taloudellinen kannattavuus riippuu siis suuresti edullisen puhtaan sähkön saatavuudesta tai korkeammista hiilidioksidipäästöjen hinnoista. Vedyn varastointiin ja elektrolyysin liittyvä teknologinen kehitys on ratkaisevan tärkeää prosessin kilpailukykyyn kannalta. H-DR on tärkeä teknologinen mahdollisuus EU:n päästötavoitteiden saavuttamisessa vuodelle 2050, koska prosessin CO<sub>2</sub>-päästöt ovat minimaaliset nykyiseen tuotantoon verrattuna (Vogl ym. 2018).

### 4.3 Sementin ja betonin päästövähennysten teknologisia mahdollisuuksia

Betonilla on erittäin olennainen merkitys rakennusalan päästövähennyksien suhteen. Betonia käyttömäärät ovat valtavat ja globaalisti koko ajan kasvussa, ja lisäksi betonin keskeisenä osa-aineena käytettävän sementin massakohtaiset päästöt ovat suuret. Habertin ym. (2020) mukaan sementin laajamittainen korvaaminen muilla materiaaleilla ei ole mahdollista seuraavan vuosikymmenen aikana, mutta CO<sub>2</sub>-päästöjen merkittävä vähentäminen on mahdollista ottamalla käyttöön parannuksia koko sementin ja betonin arvoketjussa. Heidän arvionsa mukaan koko arvoketjua hyödyntäen voitaisiin saavuttaa noin 50 prosentin vähennys kasvihuonekaasujen päästöissä ilman suuria investointeja uuteen teollisuusinfrastruktuuriin tai olemassa olevien standardien muuttamista.

Parhaillaan tutkitaan myös uudenlaisia sementti- ja sideainelaatujia, joiden valmistuksen päästöt ovat pienempiä. Näitä ovat muun muassa kalsiumsulfoaluminaattisementit, kalsinoidusta savesta valmistetut sideaineet ja saksalainen Karlsruhen yliopistossa kehitetty Celiment-sideaine, joka on metastabiilia kalsiumsilikaattiyhdyntä. Tämä on vielä reagoiva muoto kovettuneesta sementtiliimasta (Heikkilä, 2017)

Norjassa on aloitettu hanke, jonka päämääränä on rakentaa sementin tuotantoon liittyvä hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kokonaisuus. Menetelmässä hiilidioksidi erotetaan sementin valmistuksen savukaasusta sitomalla se ensin monoetanoliamiiniin (MEA) ja vapauttamalla uudelleen vastakkaisella reaktiolla, minkä avulla aikaan hyvin puhdasta hiilidioksidia. Talteenottoa ja varastointia varten Norjan Brevikin sementtitehtaan viereen rakennetaan laitos, jonka kapasiteetti on enimmillään 400 000 tonnia vuodessa. Kapasiteetti vastaa puolta tehtaan päästöistä. Kuljetuksen ja välivarastoinnin jälkeen nestemäinen hiilidioksidi loppusijoitetaan geologiseen varastoon yli kilometrin syvyyteen merenpohjan alle. IPCC:n arvion mukaan geologisen varastoinnin päästövähennyspotentiaali on hyvä ja se ylittää 99 prosentin CO<sub>2</sub>-pidätyskyvyn tuhannen vuoden aikajaksolla (Leveelahti, 2021)

CEMBUREAU (European Cement Association) julkaisi vuonna 2020 tiekartan Euroopan sementtiteollisuuden hiilipäästöjen vähentämiseen vuoteen 2050 mennessä. Sen mukaan sementin ja betonin arvoketjun hiilineutraalius voidaan saavuttaa vuoteen 2050 mennessä ja huomattava päästövähennys jo 2030 mennessä. Nollapäästöjen saavuttamiseksi vuonna 2050 päästöjä pitää vähentää arvoketjun

jokaisessa vaiheessa – klinkkerissä, sementissä, betonissa, rakentamisessa ja karbonatisoitumisen avulla. Tämä edellyttää sekä jo olemassa olevien että uusien teknologioiden käyttöönottoa. Näitä ovat esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden korvaaminen kierrätys- ja biomassajätteellä, energiatehokkaammat uunit, alhaisemman klinkkeripitoisuuden sementin kehittäminen, hiilidioksidin talteenoton, käytön ja varastoinnin eli CCUS-tekniikan läpimurto sekä optimoidut betoniseokset ja rakennustekniikat. Vuonna 2030 tavoitteena on vähentää sementin hiilidioksidipäästöjä 30 prosenttia ja koko arvoketjun päästöjä 40 prosenttia (Leveelahti 2020a).

Eurooppalainen sementtiteollisuus selvittää myös esimerkiksi sementtiklinkkerin koostumuksen muuttamista niin, että sen valmistaminen onnistuisi nykyistä matalammassa lämpötilassa ja vähemmällä lämpöenergialla. Kyseeseen saattaa myös tulla saven käyttäminen klinkkerin rinnalla tai esimerkiksi aurinkoenergian käyttö valmistusprosessissa (Finnsementti, 2020). Klinkkerin tuottamiseen on kehitetty vaihtoehtoisia reseptejä, jotka voivat vähentää päästöjä noin 20–30 prosenttia tavanomaiseen sementtiin verrattuna. Esimerkkejä näistä ovat sulfoaluminaattiklinkkeri (SAC), ferroaluminaattiklinkkeri (FAC), Belite-Ye'imimite-ferriittiklinkkeri, kalsiumaluminaattiklinkkeri ja amorfinen klinkkeri (X-klinkkeri). Mineralisaattorien käyttö voi myös vähentää hiilidioksidipäästöjä. Vaihtoehtoisia klinkkerityyppejä ei kuitenkaan voi käyttää kaikkiin sementin käyttötarkoituksiin ja toistaiseksi näitä ei voi käyttää rakennussementeissä (Raivio ym. 2020).

Cementir Groupin Tanskassa on kehittänyt ns. Futurecem-tekniikkaa, jossa osa klinkkeristä korvataan sementin valmistuksessa kalsinoidun saven ja kalkkikivitäyteaineen avulla. Tekniikka mahdollistaa 30 prosentin CO<sub>2</sub>-päästövähennyksen verrattuna tavalliseen portlandsementtiin heikentämättä muita ominaisuuksia. Futurecem-tekniikkaan perustuvia sementtejä sekä betonireseptejä on testattu sekä täysimittaisissa rakennuksissa että infrarakentamisessa kahdessa sillassa (Cementir, 2022).



## 5 Teollisuuden, kuljetusten ja työkoneiden dekarbonatisoituminen Suomen pitkän ja keskipitkän aikavälin skenaarioissa

### 5.1 Pitkän aikavälin skenaariot

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n ja Suomen ympäristökeskus SYKE:n Pitkän aikavälin kokonaispäästökäytös (PITKO) -selvityksen keskeinen tavoite oli arvioida, mikä on Suomelle sopiva kasvihuonekaasujen päästövähennystavoite vuodelle 2050 ja mitkä ovat keskeiset toimialakohtaiset etenemisehdot tavoitteen saavuttamiseksi. Raportti esittää eri skenaarioiden pohjalta lasketut tulokset päästöjen kehityksestä. PITKO-raportti ei kuitenkaan ota kantaa eri skenaarioiden toteutumistodennäköisyyksiin. Tässä raportissa tuloksia kuitenkin käsitellään sillä oletuksella, että erilaisin politiikkatoimin Suomessa pyritään varmistamaan juuri niiden skenaarioiden toteutuminen, joiden avulla sovitut päästötavoitteet voidaan saavuttaa.

Tulosten mukaan Suomi voi saavuttaa 85–90 prosentin päästövähennystavoitteen vuonna 2050 erilaisia polkuja pitkin. PITKO-hankkeen neljä vähäpäästöskenaariota ovat (Koljonen ym. 2019a):

- Jatkuva kasvu: Vähäpäästötavoitteet saavutetaan uuden teknologian kiihdytetyllä käyttöönotolla
- Muutos: Ihmisten arvot ja ympäristötietoisuus mahdollistavat radikaalit muutokset.
- Säästö: Kiertotalous, jakamistalous ja merkittävä energian käytön tehottomien toimivien keskeisinä elementteinä vähäpäästötavoitteen saavuttamisessa.
- Pysähdys: Epävakaa globaali kehitys hankaloittaa ja hidastaa kehitystä.

Hahmotelluista vähäpäästöpoluista Jatkuva kasvu ja Säästö edustavat hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin osalta skenaariotarinoita ääripäitä. Jatkuvan kasvun skenaariossa CCS:n (Carbon Capture and Storage) oletetaan osoittautuvan joko teknis-taloudellisesti tai hyväksyttävyyteen liittyvien esteiden takia toteuttamiskelvottomaksi Suomessa, kun taas Säästö-skenaariossa oletetaan CCS:n ja erityisesti myös bio-CCS:n (bioenergian konversioon sovellettu CCS) olevan käytettävissä, mutta talteen otettu hiilidioksidi joudutaan kuljettamaan esimerkiksi Pohjanmerellä tai Baltiassa sijaitseviin loppusijoituskohteisiin. CCS:n puuttuminen johtaa Jatkuvan kasvun skenaariossa tiukkoihin päästövähennystoimiin myös teollisuusprosesseissa, joissa päästöjen voimakas vähentäminen on teknistaloudellisten arvioiden mukaan vaikeaa (Koljonen ym. 2019a).

Vähäpäästöpolkujen vaikutukset sähkötaseeseen alkavat näkyä selvemmin vasta vuoden 2030 jälkeen, jolloin sähköistyminen voimistuu kaikilla sektoreilla ja sähköä aletaan käyttää laajemmalla mitalla myös energian jalostukseen (ns. power-to-X-teknologia). Suurimmaksi sähkön kulutus nousee Jatkuvan kasvun skenaariossa, jossa talouskasvu pysyy hyvänä ja sähköllä korvataan laajimmin polttoaineiden käyttöä, kun hiilidioksidin talteenotto ja varastointi eivät tule käyttöön. Mallilaskelmien tuloksissa oletukset johtavat aurinkovoiman läpimurtoon Suomenkin olosuhteissa vuoden 2030 jälkeen. Tuulivoiman tuotanto nousee paljon jo vuoteen 2030

ja hyvin huomattavasti erityisesti Muutos- ja Säästö-skenaarioissa vuoteen 2050 mennessä. Joustoa lisätään varastointikapasiteetin ja kysyntäjouaston lisäämisen avulla. Vaihtelevaa tuotantoa hyödynnetään mallin tulosten mukaan runsaasti muun muassa ns. power-to-X sovelluksissa, joissa tuotettua vetyä tai hiilivetyä voidaan varastoida huomattavasti sähköä helpommin (Lehtilä, 2019).

Edellä mainituista skenaarioista kolmeen sisältyy oletettu masuuniteräksen valmistuksen täydellinen syrjäytyminen vetytelkistykseen perustuvalla teräksen valmistusprosessilla aikavälillä 2030–2050. Pitkän aikavälin skenaarioissa teollisuuden kokonaispäästössä ei arvioida tapahtuvan suurta muutosta vuoteen 2030 mennessä, mutta muutos on osin radikaali vuoteen 2050 mennessä (taulukko 1), ja se aiheutuu merkittävältä osalta metalliteollisuuden päästömuutoksista (Lehtilä, 2019).

Teollisuudessa mineraaliteollisuuden raaka-aineperäisten prosessipäästöjen tuntuva vähentäminen on Jatkuvan kasvun skenaariossa pulmallista, sillä terästeollisuuden siirtyessä vetytelkistykseen masuunikuonaa ei enää ole saatavissa sementin seosmateriaaliksi kalkkikivestä poltetun klinkkerin korvaajaksi, eikä myöskään CCS ole käytettävissä. Skenaarioissa, joissa CCS on käytettävissä, se otetaan käyttöön sementin valmistuksen ja polttoaineiden jalostuksen tuotantoprosesseissa (Lehtilä, 2019).

*Taulukko 1. Kasvihuonekaasupäästöjen tase eri skenaarioiden mukaan (Lehtilä, 2019).*

		Metalliteollisuus	Mineraaliteollisuus
2015		2142	964
2030	Jatkuva kasvu	2937	1101
2030	Säästö	2724	1099
2030	Muutos	2708	1198
2030	Pysähdys	2724	1099
2050	Jatkuva kasvu	0	922
2050	Säästö	0	960
2050	Muutos	0	1178
2050	Pysähdys	1043	816

PITKO-hankkeen mallilaskelmissa on otettu huomioon suunnitellut investoinnit uuteen biopolttonesteiden tuotantokapasiteettiin, josta suuri osa perustuu HVO-pohjaiseen (HVO = Hydrotreated Vegetable Oil, suom. vetykäsitelty kasviöljy) tuotantoon. Vähäpäästöskenaarioissa tuotanto kasvaa jo 2020-luvulla kohtalaisesti. Vuoden 2030 jälkeen kotimainen tuotanto kattaa pääosin hyvin kotimaisen kysynnän, Suomi on biopolttonesteiden osalta vähäpäästöskenaariossa HVO-tuotannon tuontiraaka-aineita lukuun ottamatta pääosin omavarainen koko tarkasteluajavälin. Ainoan selvän poikkeuksen muodostaa Pysähdys-skenaario, jossa liikenteen päästövähennystarpeen saavuttaminen edellyttää melko huomattavaa biopolttonesteiden tuontia vuonna 2050 (Lehtilä, 2019).

## 5.2 Keskipitkän aikavälin suunnitelma

Keskipitkän aikavälin ilmastosuunnitelma (KAISU) koskee ns. taakanjakosektoria eli päästökaupan ulkopuolisia sektoreita maankäyttösektoria lukuun ottamatta (YM, 2021). Taakanjakosektorille kuuluvat liikenteen, maatalouden, rakennusten

erillislämmityksen, työkoneiden, jätehuollon ja F-kaasujen päästöt sekä päästökaupan ulkopuolisen teollisuuden ja muun energiankäytön päästöjä. Infra-alaa KAISU koskettaa erityisesti biopolttoaineiden ja työkoneiden käytön osalta.

RED II -direktiivissä määritellään sitovat EU-tason kestävyyskriteerit liikenteen biopolttoaineille, bionesteille sekä sähkön- ja lämmöntuotantoon käytettäville kiinteille ja kaasumaisille biomassapolttoaineille. Kestävyyskriteereiden tavoitteena on varmistaa, että bioenergian lisääntyvä käyttö tuottaa merkittäviä kasvihuonekaasupäästövähennyksiä verrattuna fossiilisten polttoaineiden käyttöön. KAISU-raportissa työkoneiden kasvihuonekaasupäästöjen kehityksestä sanotaan seuraavaa (YM, 2021):

Työkoneiden kasvihuonekaasupäästöt olivat vuonna 2019 2,4 Mt CO<sub>2</sub>-ekv., mikä on noin 4,5 prosenttia Suomen kokonaispäästöistä ja 8 prosenttia taakanjakosektorin päästöistä (Tilastokeskus 2021a). Työkoneiden päästöt ovat pysyneet viime vuosina suurin piirtein samalla tasolla. Työkoneiden kasvihuonekaasupäästöjen jakautumatietojen mukaan vuonna 2020 kaivinkoneiden osuus oli 19 prosenttia, pyöräkuormaajien 17 prosenttia ja dieseltrukkien 17 prosenttia. Työkoneiden voimanlähteenä on edelleen lähes yksinomaan polttomoottori. Päästöistä dieselin tai kevyen polttoöljyn osuus työkonepolttoaineissa on lähes 90 prosenttia. Vuonna 2035 työkonesektorin kasvihuonekaasupäästöt ovat perusennusteen mukaan noin 20 prosenttia nykyistä pienemmät. Työkoneiden hiilidioksidipäästöjä pyritään vähentämään useilla eri keinoilla. Vuonna 2019 voimaan astuneen lain (418/2019) mukaisesti kevyen polttoöljyn bio-osuuden jakeluelvoite on 3 prosenttia vuonna 2021 ja nousee 10 prosenttiin vuoteen 2028 mennessä, jolloin vaikutus vuosipäästöihin on noin 0,2 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. Polttoöljyn veronkorotukset vaikuttavat työkoneiden polttoaineen hintaan ja sitä kautta kysyntään.

Työkoneiden kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää esimerkiksi biopolttoaineiden jakeluelvoitetta nostamalla ja edistämällä konekannan sähköistymistä. Myös informaatio-ohjauksella voi olla merkittävä vaikutus työkoneiden käytöstä aiheutuviin päästöihin. Työkoneiden päästövähennysten tietopohjaan tulee niin ikään kiinnittää huomiota. Työkonepuolella öljyn korvaaminen muilla energialähteillä on huomattavasti vaikeampaa kuin rakennuksissa ja esimerkiksi sähkökäyttöisiä työkoneita on toistaiseksi hyvin rajallisesti saatavilla. Biopolttoöljyn kohdentamisessa työkonekäyttöön voidaan nähdä enemmän hyötyjä kuin sen kohdentamisessa lämmityskäyttöön, koska lämmitykseen on tarjolla runsaasti muita kuin öljyyn perustuvia lämmitysjärjestelmiä. Työkoneiden osalta myös biokaasun mahdollisuuksia selvitetään.

## 6 Suomen rakennus- ja materiaaliteollisuuden arvioita päästökehityksestä

### 6.1 Sementti

Suomessa Finnsementti valmistaa sementtiä Paraisilla ja Lappeenrannassa. Klinkkerin ominaispäästöt ovat Suomen molemmissa sementtitehtaissa tällä hetkellä 751 kg hiilidioksidia per tonni klinkkeriä. Euroopan keskiarvo on 813 kg/tonni. Ero on merkittävä, koska 70 prosenttia päästöistä tulee raaka-aineesta. Keinoja sementin päästöjen vähentämiseksi tutkitaan jatkuvasti (Ahlberg, 2020). Finnsementin mukaan asteittaisen kehityksen avulla päästöjä on saatu vähennettyä 22 prosenttia vuoden 1990 tasosta. Viitteen (Tähkänen & Tähtinen, 2021) mukaan Finnsementti on sitoutunut vähentämään tuotantonsa päästöjä edelleen parantamalla energiatehokkuutta, lisäämällä kierrätyspolttoaineen määrää ja lisäämällä kierrätettyjen seosaineiden osuutta. Tällä hetkellä sementin valmistuksen päästöistä enää noin kolmannes aiheutuu polttoaineesta ja kaksi kolmannesta aiheutuu kalkkikiven kalsinoitumisreaktiosta (Leveelahti 2020b). Leveelahden mukaan sementintuotannon päästöjä voidaan vähentää esimerkiksi korvaamalla kalkkikiveä vaihtoehtoisilla raaka-aineilla, siirtymällä fossiilisista kierrätyspolttoaineisiin, parantamalla polttouunien energiatehokkuutta sekä seostamalla sementtejä. Finnsementillä nämä keinot ovat jo käytössä, mutta myös jatkuvan kehitystyön kohteena. Päästöistä kuitenkin yli puolet on peräisin raaka-aineista ja kemiallisista reaktioista, joille ei löydy korvaajaa. Tämän vuoksi hiilidioksidin talteenotto tulee olemaan tarpeellista tulevaisuudessa (Leveelahti 2021a).

Pozzolaaninen lentotuhka ja latentisti hydraulinen granuloitu ja jauhettu masuunikuona ovat pitkään tunnettuja ja käytettyjä teollisuuden sivutuotteita, joita voidaan käyttää sekä betonin sideaineena että sementin valmistuksen raaka-aineena. Kalkkikiven osuus sementin raaka-aineista on 84 prosenttia, kun kuonien ja lentotuhkan yhteenlaskettu osuus on 11 prosenttia (Finnsementti 2020a). Suomessa masuunikuona hyödynnetään kokonaan (Raivio ym. 2020). Käyttökohteita masuunikuonalle on sementin ja betonin seosainekäytön lisäksi maan- ja tienrakennuksessa sekä lannoituksessa. Koska sementin valmistus on kansallisesti merkittävä päästölähde, päästöjen vähentämisen näkökulmasta masuunikuonan käyttö kannattaisi siirtää kokonaan sementin/betonin valmistukseen.

Masuunikuonan saatavuuden arvioidaan kuitenkin vähentyvän merkittävästi SSAB:n uuden vetyperustaisen teknologian käyttöönoton myötä 2036 alkaen, koska uusi teknologia edellyttää masuunien sulkemista (Raivio ym. 2020). Masuunikuonaa on todennäköisesti saatavilla huomattavasti pitempään joissakin muissa maissa, mutta sen saatavuuteen tuontituotteena voi liittyä ongelmia. Masuunikuonaa on jo nyt tuotu Venäjältä sekä suoraan että sementin osa-aineena Baltian maiden kautta. Myös lentotuhkan saanti loppuu kivihiilikiellon myötä Suomessa 2029. Sitäkin olisi jatkossa todennäköisesti saatavissa esimerkiksi Puolasta, mutta Suomessa on betonin valmistuksessa paljolti jo luovuttu lentotuhkan käytöstä ennakkoon sen loppumista (Punkki, 2022).

Sementin pääpolttoaineena toimii hiili ja sen lisänä petrokoksi. Suomessa niiden osuus on tällä hetkellä 60 prosenttia ja kierrätyspolttoaineiden osuus on 40 prosenttia. Finnsementin ympäristöraportin (Finnsementti 2020b) mukaan fossiilisia polttoaineita korvaavina kierrätyspolttoaineina hyödynnetään nykyään öljynjalostuksen sivutuotteena syntyvää asfalteenia, kierrätysöljyä, nestekartonkien valmistuksesta kertyvää PPAF-reunanauhaa, rengasmurskettä sekä teollisuuden ja kaupan pakkausmateriaalijätteistä valmistettavaa SRF-kierrätyspolttoainetta. Kierrätyspolttoaineet vähentävät tarvetta hankkia ja kuluttaa fossiilisia polttoaineita, mutta niiden palamisessa syntyy kuitenkin CO<sub>2</sub>-päästöjä. Vain biopolttoaineiden polttaminen voidaan laskennallisesti katsoa CO<sub>2</sub>-päästöttömäksi. Teoriassa kaikki polttoaine voitaisiin vaihtaa uusiutuvaksi, jolloin sementin päästö vähenisi n. 280 kg CO<sub>2</sub> / sementtitonni eli n. 40 prosenttia (Raivio ym. 2020).

Sementin tuotannon sähköistäminen on yksi tulevaisuuden vaihtoehto, mutta vielä teknisesti hyvin alkuvaiheen idea. Nykynäkemyksen mukaan sähköistäminen on mahdollista Suomessa aikaisintaan 2030-luvulla, ehkä vasta 2040-luvulla. Mikäli teknologia kehittyy arvioitua nopeammin ja sähköistämistä on mahdollista pilotoida Suomessa jo ennen 2035, sillä voisi olla sementin tuotannon kokonaispäästöihin noin 40 prosentin päästövähennysvaikutus. Finnsementin uunit käyttivät vuonna 2018 polttoainemuodossa 4,2 miljoonaa GJ energiaa. Mikäli Suomessa siirryttäisiin sementin valmistuksessa sähköllä kalsinoimiseen, käytetty kokonaisenergiamäärä oletettavasti pienisi arviolta 10 prosenttia (n. 3,8 miljoonaa gigajouleen), koska polttoaineista ei muodostu savukaasuja ja lämmitettävä massa pienenesi (Raivio ym. 2020). Sementin valmistuksen päästöjä voidaan vähentää myös hybridiuuneilla, joissa noin puolet polttoaineesta on mahdollista korvata sähköllä (Koljonen ym. 2019b).

Edellä sanotun mukaisesti sementin valmistuksen päästöistä kuitenkin yli puolet on peräisin raaka-aineista ja kemiallisista reaktioista, joille ei ole vastaavaa korvaajaa. Tämän vuoksi Norjan mallin mukainen hiilidioksidin talteenotto on tarpeen tulevaisuudessa (Leveelahti 2021a). Kalkkikiven polton ja kalsinoitumisen säilyessä osana prosessia, ei hiilidioksidipäästöjä syntyy edelleen, ja vapautuva hiilidioksidi on pyrittävä hyötykäyttämään (CCU) tai varastoimaan (CCS). Finnsementin ympäristöpäällikön Ulla Leveelahden mukaan parhaillaan tutkitaan erilaisia hiilidioksidin talteenotto-, hyötykäyttö- ja varastointimenetelmiä. Näiden teknologioiden toteuttaminen voisi mahdollistaa jopa 80 prosentin päästövähennyksen nykyisestä vuoteen 2050 mennessä. Uudet teknologiat vaativat kuitenkin hyvin suuria investointeja. Esimerkiksi investointi uuteen hiilidioksidin talteenottotekniikkaan tulee arvion mukaan olemaan yli 100 miljoonaa euroa tehdasta kohden. Sementin valmistuksen olosuhteet kuten korkea lämpötila ja muut vaatimukset kuten jatkuvatoimisuuden edellytys aiheuttavat myös suuria vaatimuksia hankkeille. Talteenoton kehittäminen on joka tapauksessa ensimmäinen askel, ja tällä hetkellä selvitetään erilaisia vaihtoehtoja. Polttoprosessin jälkeen tulevien menetelmien etuna on, että niitä voidaan paremmin soveltaa myös olemassa oleviin tehtaisiin. Näiden suhteen eniten on tutkittuja ovat absorptio kemiallisilla liuottimilla (MEA, monoetanoliamiini) ja kiinteillä sorbenteilla (CaO, kalsiumoksidi). Molemmista menetelmistä hiilidioksidi erotetaan savukaasusta ensimmäisessä vaiheessa liuottamalla tai sitomalla toiseen aineeseen ja toisessa vaiheessa tehdään vastakkainen reaktio vapauttamalla hiilidioksidi uudestaan. Talteenoton lisäksi on vielä kehitettävä hiilidioksidin hyötykäyttöä tai järjestettävä pysyvä varastointi. Suomen näkökulmasta mahdollinen vaihtoehto voisi olla hyötykäyttö (Leveelahti, 2020). Ulla Leveelahden mukaan (Leveelahti 2021b) CCU:ta eli hiilidioksidin hyötykäyttöä pidetään Suomessa varastointia

lupaavampana ratkaisuna. Yksi mahdollinen kohde hyötykäytölle on liikennepolttoaine. Siinä hiilidioksidin sidonta-aika on lyhyt, mutta päästövähennyspotentiaali on kuitenkin merkittävä. Lappeenrannan teknisessä yliopistossa on menossa hanke, jossa arvioidaan, olisiko mahdollista tuottaa sementtitehtaalla syntyvästä hiilidioksidista hiilineutraalia liikennepolttoainetta. Prosessissa tarvitaan uusiutuvalla sähköllä tuotettua vetyä. LUT-yliopiston ja yritysten hankkeen aiheena on saada aikaan pilottilaitos, jonka pääraaka-aineita olisivat Finnsementin Lappeenrannan sementtitehtaan päästöistä talteen otettava hiilidioksidi ja Kemiran tehtaan tuotannon ylijäämävety. Hiilidioksidia voidaan sitoa pysyvästi myös erilaisiin mineraaleihin ja betoniin. Hiilidioksidilla kovettamisessa hyödynnetään betonin hiilinieluoimaisuutta heti valmistusvaiheessa. Menetelmä soveltuu erityisesti raudoitamattomille betonituotteille.

Hiilidioksidin varastoinnin ja hyötykäytön vaihtoehdot ovat kuitenkin vasta kehitysvaiheessa, eikä niiden mahdollisesta käyttöön otosta ole tarkempaa aika- tai kustannusarviota (Tähkänen & Tähtinen, 2021). Menetelmän teknologinen haastavuus voi tehdä Suomesta yhden potentiaalisen pioneeripaikan, mutta ulkomainen omistus osana muita tekijöitä vaikeuttaa skenaarion todennäköisyyden arviointia (Punkki, 2022).

Sementtiteollisuus on mukana EU:n päästökaupassa, ja sitä kautta päästöt alenevat vuodesta 2021 alkaen keskimäärin 2,2 prosenttia vuodessa. Tämä tarkoittaisi vuoteen 2035 mennessä n. 28 prosentin päästövähennystä ja vuoteen 2050 mennessä 49 prosentin päästövähennystä päästökaupan kautta, mikäli sama 2,2 prosentin päästökaton vuosittainen tiukennus olisi voimassa vuoteen 2050 saakka (Raivio ym. 2020). Tämä voitaisiin toteuttaa esimerkiksi korvaamalla suurin osa fossiilisesta energiasta tuotannossa uusiutuvalla. Raaka-aineiden korvaamisilla ja vähäpäästöisemmällä klinkkerityypeillä voitaisiin saavuttaa n. 20–30 prosentin päästövähennys. Osa tästä aiheutuu alhaisemmasta polttolämpötilasta ja menee osin päällekkäin maksimipolttoainekorvauksen vaikutuksen kanssa. Kokonaisuudessaan päästöt voisivat näillä toimilla vähentyä enintään 50 prosenttia vuoteen 2035 mennessä. Mikäli CCS-teknologia voidaan ottaa käyttöön, voidaan sementin tuotannon päästöt saada lähes nolleen. Tämä ei kuitenkaan ole Suomessa realistista ennen vuotta 2035, mutta vuoteen 2050 mennessä CCS-teknologian käyttöönotto voisi arvion mukaan olla mahdollista (Raivio ym. 2020).

Suomessa tuotettujen eri sementtien päästöarvoissa on tällä hetkellä eroja, jotka perustuvat sementtien koostumukseen (taulukko 2).

*Taulukko 2. Finnsementin sementtien hiilijalanjäljet sementtien ilmoitettujen ympäristöselosteiden pohjalta (Finnsementti 2021). Tulos perustuu Paraisten ja Lappeenrannan tehtaissa valmistettujen sementtilaatujen keskiarvotulokseen.*

	CO <sub>2</sub> e (kg/kg)	Kierrätysmateriaalien osuus
Oiva, CEM II B-M (S-LL) 42,5N	0,597	17 %
Pika, CEM I 52,5 R	0,739	12 %
Rapid, CEM II/A-LL 52,5 N	0,659	16 %
Rapid CEM II/A-LL 42,5 R	0,745	7 %
SR, CEM I 42,5 N SR3	0,710	17 %

Finnsementti markkinoi myös uutta ns. Kolmossementtiä vähähiilisenä vaihtoehtona. Siinä masuunikuonan osuus on 40–45 prosenttia, ja sen hiilijalanjäljen ilmoitetaan olevan 25–40 prosenttia pienempi kuin muiden sementtien (Miettunen,

2021). Masuunikuonaan perustuvien seossementtien ongelmana on edellä sanotun mukaisesti masuunikuonan mahdolliset saatavuusongelmat ensi vuosikymmenellä. Suomessa käytetään jonkin verran myös tuontisementtejä, joiden hiilijalanjälki on arvion mukaan jonkin verran korkeampi kuin Finnsementin. Toisaalta tulevaisuudessa saattaa markkinoilla olla esimerkiksi norjalaisia sementtejä, joille lähes nolopäästö on saavutettu aikaisemmin kuin suomalaisille sementeille.

Koska näköpiirissä joka tapauksessa on vaihtoehtoisia keinoja sekä asteittaisiin että radikaaleihin muutoksiin, tässä arvioidaan, että nykyisestä keskimääräisestä päästöarvosta voidaan päästä kymmenen vuoden kuluessa noin 25 prosenttia pienempään arvoon ja kahdenkymmenen vuoden kuluessa noin 40 prosenttia pienempään arvoon. Tämä merkitsisi, että kymmenen vuoden päästä markkinoilla olisi saatavilla eri tarkoituksiin tarkoitettuja sementtejä, joiden hiilijalanjälki on välillä 0,3 ja 0,6 kg CO<sub>2</sub>e/kg sekä tuontisementtien joukossa laatuja, joiden hiilijalanjälki voi vaihdella paljon kumpaankin suuntaan.

## 6.2 Betoni

Sementtimäärä on tärkein betonin hiilijalanjälkeen vaikuttava asia. Jo pitkään käytössä olleita keinoja sementin säästöön ovat sementin osittainen korvaaminen latentteilla hydraulisilla tai pozzolaanisilla sideaineilla kuten jauhetulla granuloidulla masuunikuonalla ja lentotuhkalla. Näiden seosainebetonien ominaisuuksia ja muidenkin hienoaineiden käyttömahdollisuuksia on tutkittu jo monia vuosikymmeniä ja Suomessa aktiivisesti 1990-luvulla (esim. (Häkkinen, 1993), (Kronlöf, 1997)), mutta nyt ne ovat nousseet uudelleen esille hiilidioksidinäkökulmasta. Esimerkiksi Lujabetoni markkinoi masuunikuonalla seostettua betonia vähähiilisenä betonina (Lujabetoni, 2021). Lentotuhkan ja masuunikuonan saatavuus kuitenkin pienenee tai loppuu kivihiilen käytön loppumisen myötä. Kun kotimainen saatavuus on loppunut, saatavuus tuontitavarana jatkunee vielä jonkin aikaa.

Teollisuuden sivutuotteiden päästövaikutus riippuu kuitenkin siitä, miten valmistuksen päästöt kohdennetaan. Esimerkiksi granuloidun masuunikuonan jauhatuksen ja kuljetuksen aiheuttamat päästöt ovat noin 0,050 kg CO<sub>2</sub>e./kg, mutta parhaillaan masuunikuonan päästöarvoa tarkastellaan Eurooppa-tasolla ja todennäköisesti masuunikuonan päästöarvoon otetaan jatkossa mukaan myös osa teräksen valmistuksen päästöistä taloudellista allokaatiota käyttäen. Arvioidaan että masuunikuonan päästötaso nousisi tällöin tasolle 0,100–0,150 kg CO<sub>2</sub>e./kg (Punkki, 2022).

Betonin hiilidioksidipäästöjä voidaan pienentää tulevaisuudessa ns. geopolymeeritekniikoiden avulla. Geopolymeereillä tarkoitetaan erilaisia joko maaperästä otettavia tai teollisuuden sivuvirtoina syntyviä mineraalisia materiaaleja, joilla kytetään sitomaan kiviainesta betoninkaltaiseksi materiaaliksi sementin tapaan. Geopolymeerejä voi saada aikaan muun muassa kaoliinipitoisista savesta tai esimerkiksi teräs- ja kaivannaisteollisuuden pii- ja alumiinipitoisista jäteaineista. Geopolymeerit ovat aktiivisen tutkimustoiminnan kohteena sekä Suomessa - esimerkiksi Oulun yliopistossa - että muualla (Härkönen, 2021). Betonin sementtimäärää voidaan vähentää kalsinoitujen savien avulla, joiden saatavuus on sivuvirtoja parempi, mutta toisaalta niiden tuottamiseen tarvitaan energiaa (ks. edellä Futurecem-teknologia).

Suomessa kehitetään ja yritetään saada markkinoille myös CO<sub>2</sub>-kovetettujen betonuotteiden teknologiaa (Vehmas, 2022). Teknologiassa hiilidioksidia saadaan talteen noin puolet sementin painosta, minkä ansiosta päästöarvo vähenee huomattavasti, vaikka talteen otetun hiilidioksidin kuljetukseen yms. liittyvät päästöt otetaan huomioon. Lisäksi teknologiassa hyödynnetään sementin korvaamiseen erilaisia kalsiumoksidipitoisia sivuvirtoja, joiden avulla päästöarvoa saadaan edelleen vähennettyä. CaO-pitoisia sivuvirtoja syntyy paljon mm. terästeollisuudessa, biopoltossa ja paperiteollisuudessa. (Vehmas, 2022) Infrarakentamisessa tällä teknologialla valmistettavia tuotteita voisivat olla erilaiset elementit, kuten esimerkiksi betonikaiteet, putket ja betonikivet.

Markkinoilla tulee lähivuosina tai ainakin lähivuosikymmeninä olemaan hiilijalanjäljeltään erilaisia, mutta vaaditut toimivuusominaisuudet - esimerkiksi saman lujuusvaatimuksen - täyttäviä tuotteita. Tilanne voi tulla olemaan sama myös joidenkin muiden infra-alan tärkeiden materiaalien suhteen, mutta erityisesti betonin suhteen voi olla, että tyypillisen tai geneerisen hiilijalanjäljen sijasta tulisikin lähitulevaisuudessa puhua tarjolla olevista päästöloukista.

Betoniyhdistys kehittää hiilijalanjäljen luokitusta, joka on otettu ensimmäisenä käyttöön valmisbetonien suhteen (Betoniyhdistys 2022). Luokituksen lähtökohtana on vuoden 2021 betonivalmistajien keskimääräinen päästötaso, joka on selvitetty kyselytutkimuksella betonin valmistajilta. Arvot perustuvat betonin notkeusluokkaan S3 ja kiviaineksen maksimiraekokoon 16 mm. Huokostettujen betonien osalta arvot perustuvat rasisluokan XF1 betoneihin 50 vuoden käyttöiällä. Luokituksessa on yhteensä 16 betonilaatua välillä C20/25 – C45/55 mukaan lukien huokostamattomia, huokostettuja ja P-lukubetoneja. Kullekin betonilaadulle on esitetty hiilijalanjäljen referenssitaso (GWP.REF) sekä neljä sitä alemmaa vähähiilisyysluokkaa eli GWP-luokkaa 15 prosentin portain, jolloin vähähiilisimmän luokan päästö on 40 prosenttia referenssitasosta. Referenssiarvo lasketaan standardin EN 15804 (EN 15804, 2019) mukaisesti moduulien A1-A3 (ns. kehdosta tehtaan portille) suhteen. Ajatuksena on, että betonin valmistaja hakee hyväksytyltä sertifiointielimeltä vähähiilisen betonin valmistuksen sertifiointia. Tilaaja voi halutessaan valita vähähiilisyysluokan joko yksittäiselle rakenteelle tai koko kohteelle. Tilaajan on kuitenkin huomioitava eri vähähiilisyysluokkien saatavuus. Tällä hetkellä GWP40-luokkia ja osaa GWP55-luokistakin on saatavissa vain hankekohtaisina erityistuotteina. (Betoniyhdistys 2022)

Suomessa on tarjottu myös päästökompensointia avuksi betonin päästöjen hallintaan. Lujabetoni kertoo verkkosivuillaan (Lujabetoni, 2021) päätöksestä tarjota asiakkaille mahdollisuutta ostaa päästökompensoitua valmisbetonia. Päästökompensoitua betonia halutessaan, asiakas maksaa tuotteen hinnassa kuutiokohtaisen kompensatiomaksun, joka perustuu Lujabetonin Nordic Offset Oy:lta ostamiin Gold Standard (GS) sertifioituihin päästövähennyksiin. Päästövähennykset syntyvät sertifioiduista ja valvotuista projekteista, jotka joko vähentävät vastaavan määrän päästöjä tai vaihtoehtoisesti lisäävät hiilinielujä. Päästövähennysprojektit ovat tyypillisesti esimerkiksi metsitykseen liittyviä hankkeita. Kompensointi perustuu siihen, että päästöt hyvitetään vapaaehtoisen päästökaupan avulla. Vapaaehtoisen päästökaupan kompensointimekanismissa sovelletaan YK:n alaisen päästökaupan standardoitua markkinapohjaista mekanismia ja metodologioita. Lujabetonin mukaan yritys toimii päästökompensaatiossa yhteistyössä Nordic Offset Oy:n kanssa. Päästökompensoitua betonia halutessaan asiakas maksaa tuotteen hinnassa kuutiokohtaisen kompensatiomaksun, joka perustuu Lujabetonin Nordic Offset Oy:lta



ostamiin Gold Standard (GS) sertifioituihin päästövähennyksiin. Päästökompensaatiot on asetettu jonkin verran korkeammaksi kuin laskennalliset päästöt. Kompensoitavan hiilidioksidin määräksi on valittu 0,50 tn CO<sub>2</sub> toimitettua valmisbetonikuu-tiota kohti. Laskennallinen ylikompensaatio on Lujabetonin mukaan noin 1,4...2,5-kertainen.

Yhteenvedona tässä todetaan, että edellä kuvatun kaltaisen betonin päästöluokituksen käyttö saattaisi soveltua keskimääräisiä geneerisiä skenaarioarvoja paremmin infra-alalle, jossa tilaajan rooli on keskeinen. Luokituksen hyvänä puolena on myös se, että siinä päästöarvo sidotaan betonin muuhun luokitukseen (Betoniyhdistys 2022). Tällöin ei ole vaarana, että alhaisen päästöluokan toive syrjäyttäisi säilyvyyden kannalta olennaisia asioita. Säilyvyyshän vaikuttaa epäsuorasti mutta olennaisesti rakenteen elinkaariseen päästöön. Kun alhaisimpia GWP40- ja GWP55-luokkia on tällä hetkellä mahdollista saada vain erityistuotteina, niin tässä esitetään skenaariona, että näitä on haluttaessa saatavissa 10 ja 20 vuoden kuluttua. Tyypillisiä arvoja edustaa ehkä luokka GWP85 10 vuoden päästä ja GWP70 20 vuoden päästä.

## 6.3 Asfaltti

Asfaltti koostuu kiviaineksesta ja sideaineena käytettävästä bitumista. Sideaineen osuus on noin 5 prosenttia. Bitumi tislataan raakaöljystä öljynjalostamoissa. Asfaltin valmistuksessa käytetyn bitumin valmistus Suomessa loppuu, kun Neste sulkee Naantalın jalostamon. Tuotanto keskittyy jatkossa muihin Pohjoismaihin. Asfaltin valmistuksessa käytettävä kiviaines on pääasiassa kalliomursketta. Jonkun verran käytetään myös luonnonsoraa tai hiekkaa. Joihinkin asfalttilaatuihin lisätään täyteaineeksi kalkkikiveä tai kivituhkaa, polymeerejä, kuituja tai asfaltin kiinnittymistä edistäviä ainesosia (PTL, 2012). Vanhasta asfaltista tehtyä kierrätysrouhetta kutsutaan asfalttirouheeksi.

Asfaltin hiilijalanjälki aiheutuu suurimmalta osalta bitumin valmistuksesta sekä asfaltin valmistuksessa kuumennuksessa käytetystä fossiilisesta polttoaineesta. Lisäksi vaikuttavat esimerkiksi kiviaineen murskaus ja kuljetukset. Hiilijalanjälkeä voidaan pienentää kierrätysasfaltin käytön avulla, energiatehokkuutta parantamalla, energiatehokkaampia prosesseja kehittämällä sekä biopolttoaineiden avulla.

Muita kuin raskasta polttoöljyä käyttäviä asemia on vielä verrattain vähän, ja ne ovat sijoittuneet maakaasuverkon varrelle. Korvaamalla raskas polttoöljy biopolttoaineella asfaltointiprosessin laskennalliset hiilidioksidipäästöt pienenevät noin puoleen (Niittyniemi, 2018). Biopolttoaineiden saatavuus ja hinta rajoittavat niiden käyttöönottoa (Vares, 2022), (Raivio ym. 2020).

Norjassa ja Ruotsissa on kiinnitetty paljon huomiota matalalämpöasfaltin lisäämiseen; Ruotsissa Trafikverket on edistänyt päällysteiden CO<sub>2</sub>-päästöjen vähentämistä hankinnoissaan edistämällä matalalämpöasfaltin ja kierrätysasfaltin käyttöä (Merenheimo ym. 2018). Laurilan (Laurila, 2022) mukaan Norjassa käytetään matalalämpöasfalttia paljon, ja käytön lisäämiselle Suomessa ei ole teknisiä esteitä. Suomessa käyttö on toistaiseksi ollut vielä vähäistä, mutta PANK:in Ympäristövaliokunnan ja Asfalttinormitoimikunnan yhteistyönä laaditaan säännöstöä matalalämpöasfaltin käytölle.

Asfalttirouhe on asfalttimassan raaka-aineeksi sopivaa murskattua tai jyrsettä asfalttia. Kierrätetyn asfaltin käyttö eri asfalttilaaduissa on tällä hetkellä keskimäärin vajaa 30 prosenttia (Vares, 2022). Suomessa rouheen enimmäismäärät ovat 50 prosenttia kulutuskerroksissa ja 70 prosenttia muissa sidotuissa kerroksissa (Niittyniemi, 2018). Kierrätysasfaltin huomattavaa käytön lisäämistä rajoittaa kasvukeskusten ulkopuolella saatavuus (Laurila, 2022). Rouhetta käytettäessä uuden bitumin ja kiviaineksen tarve pienenee. Kierrättämällä säästetään uusiutumattomia luonnonvaroja ja pienennetään hiilidioksidipäästöjen määrää. Samalla pienennetään asfaltointiprosessin energiakulutusta. Tutkimusten mukaan 30 prosentin rouheen lisäys voi vähentää hiilidioksidipäästöjä noin viidenneksen (Niittyniemi, 2018).

Raivion ym. (2020) arviot asfaltin päästökehityksestä ovat ns. perusuralla 15 prosenttia vuoteen 2035 ja 30 prosenttia vuoteen 2050 mennessä. Vähähiilisyyskenaariossa vastaavat luvut ovat 30 prosenttia vuonna 2035 ja 75 prosenttia vuonna 2050. Jälkimmäisessä skenaariossa asfalttiasemat muutetaan nopeasti toimimaan päästöttömällä energialla, kierrätysmateriaalin käyttöä lisätään nopeasti, matalalämpöasfalttia käyttöä nopeutetaan ja kuljetuksissa hyödynnetään enemmän biopolttoaineita.

Asfaltin päästöjen merkittävän pienentämisen keinoja on jo olemassa ja käytössä eikä mikään niistä vaadi hyvin isoja investointeja. Kalleinta on siirtyminen biopolttoaineisiin asfaltin valmistuksessa. Se tapahtunee yleisen energiakehityksen myötä, ja vaatii myös valtiovallan toimenpiteitä liittyen esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden hintaan (Laurila, 2022). Kohtalaisen nopea kehitys 10 ja 20 vuoden aikajänteellä on hyvin mahdollista, mutta keskeinen merkitys on tilaajan vaatimuksilla. Päästötietokantaan ehdotetut päästöarvot eri asfalteille ovat välillä 0,045–0,053 kg CO<sub>2</sub>e/kg (Vares, 2022). 20 ja 40 prosentin päästövähennykset 10 ja 20 vuoden aikajaksolla merkitsisivät noin 0,04 ja 0,03 kg CO<sub>2</sub>e/kg päästöarvoja.

Koska markkinoilla tulee todennäköisesti olemaan lähivuosikymmenien aikana hiilijalanjäljeltään toisistaan poikkeavia samoihin käyttötarkoituksiin tuotteita, niin tyyppisten arvojen käyttöarvo vähenee. Asfalttiteollisuus onkin kehittämässä päästölaskuria, jonka avulla voidaan laskea suhteutuksen, valmistusprosessin ja kuljetuksien vaikutus päästöihin (Laurila, 2022). Tästä huolimatta tilaamisessa ja suunnittelussa myös päästöluokittelu voi olla tarpeen.

## 6.4 Teräs

SSAB:n Raahen tehtaalla valmistetaan ns. standardi-, premium- ja erikoisteräksiä. Päätuotteita ovat kuumavalssatut levyt ja kelatuotteet. Kahdessa masuunissa valmistetaan raakarautaa, joka jalostetaan teräkseksi terässulatolla. Sulasta teräksestä tehdään teräsaihoita, jotka valssataan tuotteiksi kuumavalssaamalla. Tehtaan merkittävä ympäristöä kuormittava tekijä on hiilidioksidipäästöt. Niistä merkittävin osa aiheutuu masuuniprosessista, sillä Raahen tehtaalla käytetystä energiasta pääosa muodostuu rautatuotannon pelkistysaineena käytetystä hiilestä. Kansainvälisten vertailujen mukaan Raahen tehtaan masuunit ovat hiilidioksiditehokkaita, ja hiiliraaka-aineen käyttö ja energiankulutus ovat lähellä prosessitekniikan minimiä (SSAB, 2020).

Kun rautaa ja terästä valmistetaan malmista koksen avulla pelkistämällä, rautalmi muuttuu masuunissa teräkseksi hiilen ja lämmön avulla. Prosessissa syntyy

hiilidioksidiä; pelkistysreaktiot tuottavat valtaosan hiilidioksidin kokonaismäärästä malmipohjaisessa valmistuksessa.

Masuunipohjaisen teräksen osuus tuotannosta oli 71 prosenttia vuonna 2019 (IEA 2021a). SSAB arvioi ympäristöselosteessaan (SSAB, 2016) rakenteellisten teräsosien, putkien ja paalujen koko valmistusprosessin kasvihuonekaasupäästöksi 2,5 tonnia tuotetonna kohden. SSAB:n arvion mukaan pohjoismaisen teräksen tuotannon hiilipäästöt ovat 7 prosenttia EU-keskiarvoa, 16 prosenttia venäläistä ja jopa 40 prosenttia intialaista tuotantoa matalammat (CO2data, 2021).

Romupohjaisessa valmistuksessa teräsromu sulatetaan valokaariuunissa sähköllä. Romupohjaisen valmistuksen energiakulutus, on noin viidesosa verrattuna malmipohjaiseen terästuotantoon tuotetun teräksen massaa kohden laskettuna (Jernkontoret, ei pvm), ja hiilijalanjälki riippuu valokaariuunissa (EAF) käytetyn sähkön tuotantotavasta. Romua voidaan jossain määrin käyttää myös masuunissa raaka-aineena. Esimerkiksi Raahessa romun osuus masuunipohjaisen raakaraudan valmistuksessa on noin 20 prosenttia.

Terästä voidaan kierrättää jatkuvasti. Jos uudelleenkäytettävyys otettaisiin huomioon terästuotteiden hiilijalanjäljen laskennassa, ero päästökertoimessa ei olisi kovin suuri. Näin ei kuitenkaan tällä hetkellä menetellä ympäristöselosteiden tuloksia laskettaessa. Kaikesta maailman teräksestä noin neljännes tehdään kierrätyspohjaisesti valokaariuunilla tällä hetkellä. Euroopassa kierrätysteräksen osuus on 48 prosenttia. Teräksen kierrätysaste on korkea ja romuteräksen määrä ei vastaa tarpeita, joten vain sen avulla ei voida saavuttaa terästuotannon ilmastotavoitteita (IEA 2021a).

Vetytelkistyksessä rautamalmi muutetaan raudaksi vedyn avulla ja sulattamalla edelleen teräkseksi. Vedyn valmistukseen ja sulatukseen tarvitaan kuitenkin merkittävä määrä sähköä (Raivio ym. 2020).

SSAB pyrkii tuomaan markkinoille urauurtavan fossiilivapaan ns. premium-teräksensä vuoteen 2026 mennessä. HYBRIT-prosessissa SSAB pyrkii korvaamaan hiilen ja koksen vetykaasulla. HYBRIT-prosessissa tuotetaan kiinteää rautaa (rautasientä), joka sulatetaan valokaariuunissa. Yhtiön tavoitteena on saada aikaan (SSAB, 2021)

- 2025–2045 kaupallisen mittakaavan tuotantolaitoskokeet ja teknologia-muutokset
- 2025 Oxelösundin masuunin tilalle valokaariuuni ja HYBRIT-demonstraatiolaitos
- 2026 SSAB:n fossiilivapaa teräs markkinoille
- 2030–2040 Raahen ja Luulajan masuunien tilalle valokaariuunit
- 2045 SSAB yriytyksenä fossiilivapaa.

Raahen-tehtaalla valokaariuunit korvaavat ensimmäisen masuunin vuonna 2030, toisen 2040. Aluksi valokaariuunissa sulatetaan enimmäkseen kierrätysterästä. Vetytelkistetyn rautasiemenen valmistus suunnitellaan aloitettavaksi demonstraatiolaitoksessa vuonna 2026, eikä tuotantolaitosten sijaintia vielä tiedetä (Jarmo Lilja, SSAB (Oulun yliopisto, 2022)).

Vetytelkistykseen käyttöönotto sisältää paljon riskejä, kuten uusiutuvan sähkön saatavuus, vedyn varastointi ja lopputuotteen hinnannousu (Raivio ym. 2020).

Samoin kuin sementeissä ja betoneissa, markkinoilla tulee todennäköisesti olemaan hiilijalanjäljeltään erilaisia teräksiä lähivuosikymmeninä. Euroopan terästeollisuus pyrkii fossiilittomaan tuotantoon 2050 mennessä. SSAB:lla on tavoitteena selvästi nopeampi siirtyminen, joskin muuallakin tapahtunee nopeaakin kehitystä. Lisäksi markkinoilla on koko ajan romupohjaisia terästuotteita. 20 vuoden kuluttua markkinoilla tuskin on enää ollenkaan päästöarvoiltaan nykyisenkaltaisia (noin 2,5 kg CO<sub>2</sub> ekv./kg) terästuotteita, vaan tarjolla on ehkä tuotteita, joiden päästöarvot vaihtelevat lähes nollassa karkeasti arvioiden noin puoleen tai vähän sen alle nykyisestä. Teräksen suhteen kehitys ei tapahdu tasaisesti asteittain vaan suurehkoin askelin, kun uusi teknologia saadaan käyttöön. (Leppänen, 2022)

## 6.5 Alumiini

Tässä hetkellä alumiinin valmistuksen olennaisin energiankulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöihin vaikuttava tekijä on romupitoisuus. Primäärialumiinin valmistusprosessiin kuuluu bauksiitin louhinta, alumiinioksidin jalostus bauksiitista, elektrolyysi ja primääriharkkojen valu. Sekundäärialumiinin valmistukseen puolestaan kuuluu romun keruu, lajittelu ja puhdistus, sulatus ja valu. Primäärialumiinin valmistus on hyvin energiaintensiivistä. EEA:n mukaan romupohjaisen alumiinin valmistus vaatii vain noin 5 prosenttia primäärialumiinin energian kulutuksesta (EEA, 2022). Kaikki alumiini voidaan kierrättää käytön jälkeen ja hukka sekundäärialumiinin valmistuksessa on pieni, vain noin 3 prosenttia (Teknologiateollisuus, 2021), (DACH, ei pvm). Nykyinen alumiinin kierrätysaste rakennussektorilla on hyvin korkea, ja merkittävä osa sekundäärialumiinista käytetään rakennusteollisuuden tuotteiden valmistukseen.

Kiina on tällä hetkellä alumiinin suurin valmistaja. IEA:n (2021b) mukaan suuri kapasiteetti on mahdollistanut myös kohtalaisen hyvän energiatehokkuuden ja Kiinan alumiinin tuotantoteknologia edustaakin tällä hetkellä BAT-tasoa (best available technology). Sen jälkeen, kun Kiinan alumiinin tuotannon energiatehokkuuden nykypotentiaaleja on viime vuosina hyödynnetty, energiatehokkuuden maailmanlaajuinen keskimääräinen parantuminen on hidastunut.

IEA:n mukaan vuonna 2019 alumiinin tuotannossa käytettiin romua 34 prosenttia, josta 58 prosenttia oli käytöstä poistetuista tuotteista kierrätettyä ja loput tuotannossa syntyvää romua (ottamatta huomioon alumiinitehtaiden sisäistä kierrätystä). Sekundäärituotannon osuus on pysynyt 31–33 prosentin tasolla vuodesta 2000 alkaen. Romupohjainen tuotanto on yleensä bauksiittipohjaista tuotantoa halvempaa, mutta romun saatavuus on rajoittava tekijä. Kierrätysasteet ovat jo hyvin korkeita (tuotantoromu 95 prosenttia ja käytöstä poistuneista tuotteista aiheutuva romu vähän yli 70 prosenttia). Romua voidaan kerätä vielä jonkin verran tehokkaammin, mutta saatavuus ei silti tule vastaamaan tarpeita.

IEA:n (2021b) kestäväen kehityksen skenaarion mukaan alumiinin päästöintensiteetti pienenee vuosittain 3 prosenttia vuoteen 2030 mennessä ja saavuttaa nettonollatason vuoteen 2050 mennessä. Skenaarion toteutuminen vaatii nykyistä parempaa ja tehokkaampaa alumiinromun keräämistä ja hyödyntämistä ja uusien teknologioiden edelleen kehittämistä päästöjen vähentämiseksi primäärituotannosta. Alumiiniteollisuus käyttää runsaasti sähköä, ja siksi sähkön dekarbonisointuminen on olennaista alumiinin päästöjen vähentämisen kannalta. Alumiiniteolli-

suuden käyttämän sähkön päästökerroin eroaa keskimääräisestä, koska alumiiniteollisuudessa vesivoimaa käytetään kohtalaisen paljon erityisesti Euroopassa sekä Pohjois- ja Etelä-Amerikassa.

IEA:n vuoden 2050 nettonollaskenaarion näkökulmasta energiatehokkuuden parantaminen ja romun käytön tehokkuuden parantaminen sekä sähkön dekarbonatisoituminen ovat olennaisia tekijöitä, mutta nekin eivät yksin riitä. Muutos on tarpeen erityisesti alkutuotannon prosessipäästöjen alentamiseksi, ja läpimurtoteknologioiden pohja on luotava ennen vuotta 2030. Alalla on kuitenkin edistytty jonkin verran viime vuosina. Tällä hetkellä primaarialumiinin sulatus perustuu hiilinodeihin, jotka tuottavat hiilidioksidia hajotessaan. Parhaillaan kehitetään vaihtoehtoisista materiaaleista inerttejä anodeja, jotka eivät hajoa ja tuottavat puhdasta happea hiilidioksidin sijaan. IEA:n mukaan viime vuosina on edistytty huomattavasti kahdessa keskeisessä aloitteessa, joista toinen Venäjällä ja toinen Kanadassa. Myös CCS:n soveltaminen voi olla vaihtoehto vähäpäästöisen alumiinin valmistamiselle, mutta se on toistaiseksi vasta konseptivaiheessa. Toinen innovaatioalue on alumiinin tuotannon mukauttaminen sähköverkon joustavuuden lisäämiseksi, koska alumiinisulatot ovat merkittäviä sähkökuluttajia. Tämä näkökohta tulee yhä tärkeämmäksi uusiutuvan energian osuuden kasvaessa. Samoin on tärkeää kehittää vaihtoehtoisia tapoja lämmön tuotantoon alumiinioksidin jalostusta varten. Vaihtoehtoisina lähteinä on kokeiltu biopolttoaineiden käyttöä ja aurinkoenergiaa (IEA 2021b).

Tällä hetkellä eurooppalaisten alumiinituotteiden valmistajien ympäristöselosteiden pohjalta lopputuotteiden päästöarvot vaihtelevat suunnilleen välillä 2–12 kg CO<sub>2</sub>e/kg (CO<sub>2</sub>data 2021). Vaihtelun suurin aiheuttaja on romupitoisuus. Lisäksi merkittävää vaikutusta on sähkön päästöarvolla. Esimerkiksi Purso Oy on julkaissut ympäristöselosteet sekä romu- että primääripohjaiselle tuotteelle. Arvot ovat edellä mainittujen mukaiset (Purso, 2021). Kumpikin näistä arvoista alenee todennäköisesti asteittain jonkin verran energiankäytön tehostumisen ja ehkä sähkön päästökehityksen myötä. Talonrakennuksen päästötietokannassa (CO<sub>2</sub>data 2021) on tällä hetkellä erikseen arvot romu- ja primääriraaka-ainepohjaiselle alumiinille, ja suuren eron vuoksi se on tarpeen jatkossakin.

## 6.6 Uusiomateriaalit ja luonnon kiviainekset

Forsman ym. (Forsman, et al., 2020) mukaan uusiomaarakentamisella tarkoitetaan uusiomateriaalien hyötykäyttöä maarakentamisessa. Uusiomateriaaleilla voidaan korvata mm. luonnon kiviaineksiä tai sementtiä stabiloinnin sideaineena.

Väyläviraston uusiomateriaalien käyttöä koskevan ohjeen (Väylävirasto, 2020) mukaan uusiomateriaaleilla tarkoitetaan:

- Teollisuuden sekä purku- ja kierrätystoiminnan jätteitä tai jäteperäisiä tuotteita, joita käytetään maarakentamisessa joko ympäristöluvan tai MARA-asetuksen perusteella.
- Teollisissa prosesseissa tai purku- ja kierrätystoiminnassa syntyneitä materiaaleja, jotka ovat tuotteita joko hallinnollisilla tai oikeudellisilla päätöksillä tai EoW -kriteerien täyttymisen myötä. Näiden tuotteiden käyttöön ei tarvita ympäristölupaa.
- Rakenteesta poistettua, sinne aikaisemmin sijoitettua uusiomateriaalia, jota käytetään uudelleen

Tuotestandardissa SFS-EN 13242 (2008) mukaan uusiokiviaineksella tarkoitetaan kiviainesta, joka on valmistettu aikaisemmin rakentamisessa käytetystä epäorgaanisesta aineesta, esimerkiksi betonimurskeesta. Ylijäämämaat ovat väylärakenteesta tai tie- tai rata-alueelta peräisin olevia luonnon maa-aineksia, joita ei ole pystytty väylähankkeella hyödyntämään ja ne on poistettu käytöstä joko niiden heikkolaatuisuuden tai väylähankkeen massaylijäämän vuoksi (Väylävirasto, 2020).

Eurooppalaisen standardin EN 15643 (2021) puolestaan määrittelee termit sekundäärimateriaali ja jäte seuraavasti:

- *Secondary material - material recovered from previous use or from waste which substitutes primary materials.*

*Note: Materials recovered from previous use or from waste from one product system and used as an input in another product system are secondary materials. Examples for secondary materials (to be measured at the system boundary) are recycled metal, crushed concrete, glass cullet, recycled wood, recycled plastic granulates (EN 15643, 2021).*

- *Waste -substance or object which the holder discards or intends or is required to discard*

*Note 1 to entry: Adapted from the definition in the European Waste Directive 2008/98/EC.*

Sekundäärimateriaalien ja jätteen tunnistamisen avuksi eurooppalainen standardi EN 15804 antaa seuraavat neljä kriteeriä. Materiaalin jättestatus päättyy, kun seuraavat neljä vaatimusta täyttyvät (suomennos kirjoittajien) (EN 15804, 2019) (liite B):

- käytetään tiettyyn käyttötarkoitukseen
- tarve tai markkina on olemassa
- olemassa erityiset vaatimukset ja määräykset
- täyttää vaatimukset, joilla rajoitetaan erityistä huolta aiheuttavien aineiden pitoisuuksia.

Jos materiaali on jätettä, se hävitetään esimerkiksi polttamalla tai loppusijoitetaan kaatopaikalle. Jätteen luokittelun päättymisellä tarkoitetaan sitä, että jäte on hyödyntämistoimien (mukaan lukien kierrätys) seurauksena lakannut olemasta jätettä eikä siihen näin ollen enää sovelleta jätelain säännöksiä. Materiaalikohtaiset kriteerit tarvitaan edelleen. Jätelain mukaan aine tai esine ei ole jäte vaan sivutuote, jos se syntyy sellaisessa tuotantoprosessissa, jonka ensisijaisena tarkoituksena ei ole tämän aineen tai esineen valmistaminen, ja täyttää jätelaissa esitetyt aineen tuotantoprosessiin, ominaisuuksiin ja käytön varmuuteen liittyvät kriteerit (Väylävirasto, 2020).

Eurooppalainen standardi antaa määritelmän myös direktiivin mukaisen määritelmän haitattoman jätteen maarakennuskäytölle:

- *Backfilling - recovery operation where suitable non-hazardous waste is used for purposes of reclamation in excavated areas or for engineering purposes in landscaping. Non-hazardous waste used for backfilling substitutes non-waste materials, is suitable for the afore-mentioned purposes, and is limited to the amount strictly necessary to achieve those purposes (EN 15643, 2021)*

Väyläviraston ohjeessa (Väylävirasto, 2020) kuvataan yleisluontoisesti väylärakentamisen keskeisimmät uusiomateriaalit, joita ovat

- 1) Asfalttirouhe ja asfalttimurske
- 2) Betonimurske
- 3) Ferrokromikuonamurske ja ferrokromikuonahiekka
- 4) Käsitelty jätteenpolton pohjakuona
- 5) Kalkkikivimurske
- 6) Lentotuhka
- 7) Masuunihiekka
- 8) Masuunikuonamurske
- 9) Pohjatuhka ja leijupetihiekka
- 10) Rengasleike ja kokonaiset renkaat
- 11) Rikastushiekka, kalsiitin erottamisesta
- 12) Teräskuonamurske
- 13) Vaahtolasimurske

Näille annetaan ns. materiaalikortit, jotka sisältävät yleisluontoista tietoa esimerkiksi materiaalien syntytavasta, koostumuksesta, teknisistä ominaisuuksista, käyttömahdollisuuksista ja käyttöön liittyvästä ympäristölainsäädännöstä.

Uusiomaarakentamisen lisäämisen pääasiallinen motiivi on halu parantaa resurssitehokkuutta, mutta sillä voidaan yrittää pyrkiä myös vähähiiliseen rakentamiseen.

UUMA-hankkeen mukaan ”UUMA-materiaaleja voidaan käyttää maarakentamisessa joko sellaisenaan tai komponentteina korvaamaan neitseellisiä kiviaineksia tai parantamassa niiden ominaisuuksia...Rakentamiseen käytetään Suomessa kiviaineksia yli 100 miljoonaa tonnia vuodessa. Luonnon kiviainesten käyttö on noin 70–80 miljoonaa tonnia vuodessa. Uusiomateriaalien käytön edistäminen on erittäin tehokas keino materiaalitehokkuuden edistämiseen ja sillä voidaan vähentää merkittävästi neitseellisten luonnonvarojen käyttöä sekä niiden kuljetusten tarvitseman energian kulutusta. Maarakentamisessa hyödynnettävien uusiomateriaalien käyttöä voidaan lisätä merkittävästi materiaaleja tuotteistamalla ja kaupallistamalla sekä rakentamistekniikkaa, suunnittelua ja hankintamenettelyjä kehittämällä.” (UUMA 4, 2018) Pilottilaskelmien avulla on todettu, että uusiomaarakentamisella voidaan usein säästää neitseellisiä luonnonvaroja, saada jäte- ja sivutuotepohjaisia materiaaleja tai ylijäämämaita hyötykäyttöön, vähentää rakentamisen kasvihuonekaasupäästöjä, vähentää kuljetustarvetta sekä parantaa kustannustehokkuutta kuljetusmatkojen ollessa kohtuullisia (Ramboll, 2021).

Viitteen (Ramboll, 2021) esittämien pilottitarkastelujen pohjalta uusiomateriaaleihin liittyvät päästösäästöt voivat joissakin tapauksissa perustua merkittävältä osalta kuljetusmatkoihin. Hyvin suuria suoraan materiaalien liittyviä päästösäästöjä voidaan Rambollin tarkastelemien pilottien pohjalta saavuttaa uusiomateriaalien avulla erityisesti stabiloinneissa ja toisaalta jos uusiomateriaaleilla voidaan korvata hyvin suuri osa luonnonmateriaaleista.

Jos päästökehitystä tarkastellaan panostasolla, itse uusiomateriaaleihin ei liity samankaltaisia päästökehityksen todennäköisiä muutoksia kuin esimerkiksi betoneihin tai metalleihin. Väylärakentamisen pitkän ajanjakson suunnittelussa voi sen sijaan olla tarve ottaa huomioon uusiomateriaalien käytön vaikutus päästöihin rakennusosa- ja hanketasolla.

Uusiomateriaaleja koskevan skenaariotyön tarpeena ei juurikaan ole materiaalien todennäköinen päästökehitys vaan pikemminkin arviot eri uusiomateriaalien saatavuudesta lähivuosikymmeninä. Tuhkien osalta saatavuudessa tapahtunee selviä muutoksia 2020-luvun aikana, kun kivihiilen käyttö sähkön tai lämmön tuotannossa kielletään. Myös masuunikuonan saatavuus vaikeutuu SSAB:n ottaessa käyttöön uuden teknologian teräksen valmistuksessa. Väylärakentamisen viime vuosina käyttämistä sivutuotteista tuhkien ja kuonien osuus on merkittävä. Suomen tierakentamisessa noin 9 prosenttia (0,14 milj. tonnia) tielinjan ulkopuolisista maa-aineksista oli sivutuotteita vuonna 2018. Näistä tuhkaa ja kuonaa on ollut keskimäärin 48 prosenttia (vuosien 2010–2018 keskiarvo), betonia 39 prosenttia ja muita sivutuotteita 13 prosenttia (Raivio ym. 2020).

Betonimurskeen, tiilimurskeen, asfalttimurskeen ja bitumikaterouheen saatavuudessa ei ole näköpiirissä isoja muutoksia. Suomessa 700 000–1 000 000 tonnia betonia pääsee nykyään uusiokäyttöön; purkubetonista kierrätetään 70–80 prosenttia. Purkubetonin kierrätyksellä korvataan neitseellisten kallio- ja hiekkaraaka-aineiden käyttöä. Betonimurske soveltuu hyvin infrarakentamiseen, koska sillä on hyvät lujuusominaisuudet. Murskeella voi korvata sora- ja kalliomurskeita jakavissa ja kantavissa kerroksissa, täyttötöissä ja joissain tilanteissa myös putkijohtokaivantojen täytteenä. Betonia kierrätetään markkinaehtoisesti ilman yhteiskunnan tukea. Purkubetonin saatavuutta infrarakentamisen käyttöön kiviainesten korvaajana saattaa kuitenkin tulevana vuosikymmeninä rajoittaa halu tai tarve hyödyntää purkuelementtejä rakennusosina.

Erialaisten teollisuudesta peräisin olevien sekundäärimateriaalien saatavuus voi olla paikallista ja masuunikuonan lisäksi saatavuudessa voi tapahtua muutoksia teknologioiden kehittyessä tai ko. teollisuustoiminnan muuttuessa määrällisesti. Sellaisen purkutuotteiden kuten betonimurskeen, tiilimurskeen, asfalttimurskeen ja bitumikaterouheen saatavuudessa ei ole näköpiirissä isoja muutoksia. Sama koskee ylijäämämaita.

Eri uusiomateriaalien inventaarioita ja skenaarioarvioita ei ole juuri saatavilla kirjallisuudessa, joten tähän raporttiin ei ole laadittu yhteenvetoa. Suosituksena kuitenkin on ottaa uusiomateriaalien saatavuuden näkökulmat mukaan uusiomateriaaleja koskeviin tutkimushankkeisiin.

Luonnon kiviaineksien päästökehitystä käsitellään tässä vain maininnanomaisesti. Soran ja kalliomurskeen päästökertoimet ovat vähäisen prosessoinnin takia varsin matalia verrattuna muihin rakentamisen materiaaleihin. Päästökerroin on suuruusluokkaa 5 kg CO<sub>2</sub>e/tonni (CO<sub>2</sub>data 2021). Hanketasolla tälläkin päästöllä on kuitenkin infrahankkeissa tärkeä merkitys kiviainesten suuren käyttömäärän takia. Kiviainesten tuotantoprosessi riippuu siitä, onko kyseessä kallio- vai sora-alue. Raivion ym. raportin (2020) mukaan kallioalueilla kiviaines irrotetaan poraamalla ja räjäyttämällä. Sen jälkeen kiviaines tarvittaessa murskataan, yhteen tai useampaan kertaan. Murskattu kiviaines seulotaan eri tuotteisiin. Soranoton yhteydessä kiviaines voidaan pelkästään seuloa eri jakeisiin ja poistaa hienoaines. Murskaus- ja seulontalaitokset käyttävät energialähteenään sähköä, jota saadaan liittymällä verkkovirtaan tai esim. kevyttä polttoöljyä käyttävällä aggregaatilla. Kuljetukset muodostavat merkittävän osan kiviainesten päästöistä. Edellä sanotun perusteella kiviainesten päästökehitys liittyy energiankäytön tehostamiseen ja merkittävämmiin kuljetusten sekä sähkön ja polttoaineiden päästökehitykseen. Näitä käsitellään erikseen kohdissa 6.8 ja 6.9.



## 6.7 Muovit

Muovien valmistuksen päästöarvot ovat suuruusluokaltaan noin 2–3 hiilidioksidiekvivalenttia kiloa kohden (CO<sub>2</sub>data 2021). Päästöstä suuri osa aiheutuu muovi-raaka-aineen valmistuksesta, joten kierrätyksen avulla olisi mahdollista vaikuttaa päästöihin hyvin paljon.

Finnfoam on aloittanut vuonna 2019 polystyreeniin pohjautuvien muovieristeiden kierrätyksen, mutta kierrätystä vaikeuttaa jakeiden likaisuus. Erityisesti työmailta kerätyt lämmöneristeiden hukkapaloissa voi olla esimerkiksi hiekkaa, betonia tai uretaaniliimoja. Finnfoam rakentaa nyt polystyreenin kierrätykseen tarkoitettua laitosta, joka keskittyy XPS- ja EPS-eristeiden kemialliseen kierrätykseen. Uudessa kierrätysprosessissa polystyreeni saatetaan uudelleen liuottimen avulla nestemäiseen muotoon, jolloin siitä on helppo siivilöidä epäpuhtaudet. Puhdistuksen jälkeä liuotin haihdutetaan uudelleen kiertoon. Kiinteään muotoon palannut polystyreeni muutetaan granuleiksi, joita voidaan hyödyntää eristetuoannon raaka-aineena. (Luotola, 2022)

Lähi vuosikymmenien aikana polystyreenipohjaisten routaeristeiden päästöarvoa saatetaan pystyä pienentämään kierrätyksen ansiosta. Suomessa Finnfoamin pyrkimyksenä olisi päästö noin 10–30 prosentin kierrätysmateriaaliosuuteen, jolloin päästö pienenesi lähes samassa suhteessa (Eräluoma, 2022).

## 6.8 Biopolttoaineet ja kuljetussuoritteet

Infrarakentamisessa kuljetusten osuus on noin kolmannes ja työmaatoimintojen kaksi kolmasosaa niiden yhteenlasketuista päästöistä. Suurimmat päästöt väylärakentamisesta aiheutuvat maa- ja kiviaineksen kuljetuksista (Raivio ym. 2020). Kottimaan kaikkien kuljetusmuotojen tonnakilometriä arvioidaan kasvavan yhteensä 18 prosenttia vuoteen 2030 mennessä verrattaessa vuoden 2017 tasoon (VTT 2021). On myös arvioitu, että vuoteen 2050 mennessä tiekuljetusten osuus kaikista kuljetusmuodoista kasvaa 72 prosentista 76 prosenttiin. Rakentamisen kuljetusten päästöt olivat vuonna 2018 noin 348 000 tonnia CO<sub>2</sub>e (Raivio ym. 2022).

Raskaan kuljetuskaluston määrän odotetaan nousevan 10 prosenttia vuoteen 2030 ja noin 20 prosenttia vuoteen 2050 mennessä (Lehtilä ym. 2021). Noin puolet kuljetuskalustosta on massaltaan 3,5–12 tonnia. EU on asettanut hiilidioksidipäästöjen vähentämistavoitteet, joiden mukaan vuodesta 2025 lähtien uusien ensirekisteröitävien autojen päästöjen on oltava 15 prosenttia pienemmät ja 2030 30 prosenttia pienemmät verrattuna vuonna 2020 rekisteröityihin autoihin (Europarl., 2019). Suurin osa kuljetussuoritteesta tapahtuu raskaammilla rekoilla. Raskaiden yhdistelmäajoneuvojen osuus on kasvanut vuoden 2013 jälkeen, kun suuremmat massat ja auton mitat mahdollistettiin uusilla säännöksillä (Raivio ym. 2020). Noin 30 prosenttia kuljetuksista tehtiin yli 68 tonnia painavilla ajoneuvoyhdistelmillä, ja pois lukien maa-ainesten kuljetukset, lähes 80 prosenttia kuljetussuoritteesta tapahtuu raskailla yli 48 tonnia painavilla rekoilla. (VTT 2021). Suurin osa kuljetusten päästöistä syntyy raskaiden ajoneuvojen suoritteesta, ja niiden sähköistämiskehitys on merkittävästi hitaampaa kuin kevyillä kuorma-autoilla (Andersson 2020). Vaikka EU:n asettaman velvoitteen mukaan kuorma-autojen energiatehokkuuden tulisi kehittyä 30 prosenttia vuoteen 2030 mennessä, mutta perusennusteessa

kuorma-autojen energiatehokkuuden arvioidaan parantuvan 18 prosenttia. Tavoitetta pienempi energiatehokkuuden parantuminen johtuu siitä, että suurin osa kuljetussuoritteesta tehdään raskailla ajoneuvoilla, jotka eivät kuulu asetuksen piiriin (VTT 2021). Pakettiautojen energiatehokkuuden oletetaan perusennusteessa parantuvan noin 22 prosenttia.

Raskaassa liikenteessä dieselmootoreiden markkinaosuus on noin 95 prosenttia ja osuuden oletetaan pysyvän yli 90 prosentin tasolla vuoteen 2030 asti (Lehtilä ym. 2021) Vuoden 2035 jälkeen raskaassa liikenteessä on skenaariossa myös vetykäyttöisiä ajoneuvoja, jotka vähentävät päästöjä. Arviolta noin viisi prosenttia perävaunuttomista rekoista ja yksi prosentti perävaunullisista rekoista on sähkömoottorillisia vuonna 2030 (VTT 2021). Raskaiden yhdistelmäajoneuvojen sähköistämiskehitys on merkittävästi hitaampaa kuin kevyillä kuorma-autoilla (Andersson 2020). Vuonna 2030 perävaunuttomissa rekoissa noin 10 prosenttia ja perävaunullisissa noin viisi prosenttia rekoista on kaasukäyttöisiä (VTT 2021). Lisäksi perävaunuttomissa rekoista noin viisi prosenttia on PHEV (DI) -hybridejä. Lehtilän ym. (2021) mukaan sähköistyminen raskaassa liikenteessä alkaa kasvaa voimakkaasti vasta vuoden 2040 jälkeen ennustemalleissa. Sähköpakettiautojen myyntiosuuden oletetaan nousevan 11 prosenttiin ja PHEV (DI) -autojen prosenttiin.

Liikenteen biopolttoaineita tuotetaan eri tekniikoilla. Ensimmäisen sukupolven kasviöljystä valmistettua biodiesel FAME:a (Fatty Acid Methyl Ester), voidaan sekoittaa fossiilisiin polttoaineisiin enimmillään 7 prosenttia tilavuudesta. (Motiva 2022; Autoalan Tiedostuskeskus 2022). Suomessa käytetään pääosin toisen sukupolven biopolttoainetta, joka valmistetaan ruoantuotantoon käytettävien raaka-aineiden sijasta kasvi- ja puupohjaisesta selluloosasta sekä jätteistä. Uusiutuva XTL-diesel on parafiinista dieseliä, mutta sitä ei ole jalostettu raakaöljystä. XTL-dieseliä voidaan valmistaa eri prosesseilla ja raaka-aineilla. JEC 5 -raportin (Prussi ym. 2020) mukaan NExtBTL-tekniologialla raaka-aineesta riippuen päästövähennys verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin on 35–88 prosenttia. Esimerkiksi Nesteen My Diesel on vetykäsiteltyä kasviöljyä (HVO), jonka päästövähennys fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna on jätteistä ja tähteistä valmistamalla lähes 90 prosenttia (Prussi ym. 2020; Neste 2020). Kolmannen sukupolven biopolttoaineet ovat vasta kehitteillä. Neste Oy on maailman suurin uusiutuvan dieselin tuottaja 2,7 miljoonan tonnin globaalilla tuotantokapasiteetillaan (Neste 2020). Suomessa tuotettujen biopolttoaineiden ja bionesteiden tuotantokapasiteetti on yhteensä noin 540 000 tonnia vuodessa (Maa- ja metsätalousministeriö 2022). Biojakeluvetoisuuden myötä nopeampi siirtyminen biopolttoaineisiin vaikuttaa dieselin pumppuhintoihin, koska biopolttoaineiden hinnat ovat fossiilisia polttoaineita korkeampia (Sipilä ym. 2021).

Raskaan kuljetuskaluston sähköistymiskehitys on ennustettu merkittävästi hitaammaksi kuin henkilöautoilla, ja sähköistäminen on sitä haastavampaa, mitä suurempi auton kokoluokka on (Andersson 2020). Liimataisen ym. (2019) mukaan Suomessa voidaan nykytekniologialla sähköistää vain 10 prosenttia kuljetusten tonnikilometreistä ja skenaariosta riippuen maksimissaan arviolta 35 prosenttia tonnikilometreistä teknologian kehittyessä (Liimatainen ym. 2019). Tämän vuoksi biopolttoaineiden hyödyntäminen voi olla merkittävässä asemassa erityisesti raskaassa liikenteessä, jossa fossiilisten polttoaineiden korvaamiseksi on tarjolla vähemmän vaihtoehtoja kuin henkilöautoliikenteessä. Kun fossiilisten polttoaineiden käyttöä vähennetään, vähentyvät samalla niiden tuotantoon ja kuljetukseen liittyvät elinkaariset päästöt. Kuitenkin myös biopolttoaineet voivat aiheuttaa merkittäviä päästöjä

tuotantoketjun eri vaiheissa, erityisesti maankäyttöön liittyvien suorien ja epäsuorien vaikutusten kautta (Soimakallio ym. 2009). Jos biopolttoaineissa voidaan hyödyntää nopeasti lahoavia ja muuten käyttämättä jääviä jätteitä ja teollisuuden tähteitä, päästöt ovat merkittävästi pienempiä kuin fossiilisilla polttoaineilla. Puupohjaisten biopolttoaineiden hankinta puolestaan heikentää metsien hiilinielua, ja pelto- ja metsämaata tarvitsevien kasvien käyttö aiheuttaa epäsuoria maankäyttövaikutuksia. Energia- ja ilmastostrategiassa (Huttunen 2017) biopolttoaineet perustuvat lähinnä jätteisiin ja teollisuuden tähteisiin. Niitä on kuitenkin saatavilla vain rajattu määrä, ja metsävaroihin saatetaan turvautua kasvavissa määrin biojaketuvelvoitteen tiukentuessa (Soimakallio ym. 2017).

Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035-tiekartan mukaan kuljetusyrittäjien kuljetusten päästövähennysten esteenä on tiukka hintakilpailu, mikäli vähäpäästöisyyttä ei erikseen edellytetä urakoiden kilpailutuksissa (Raivio ym. 2020). Esimerkiksi biopolttoaineiden käytölle voitaisiin asettaa vähimmäisvaatimuksia kilpailutuksen yhteydessä. Kuljetusyrittäjien näkökulmasta kuljetusmatkojen, esimerkiksi kivenotto- ja maanrakennuskohteeseen, tulisi optimoida kustannusten ja päästöjen pienentämiseksi. Lisäksi tieverkoston kunnon parantaminen ja korjausvelan pienentäminen mahdollistaisi HCT-kuljetusten tehokkaamman käytön (Klimscheffskij ym. 2020).

SYKEN päästötietokannan (CO2data 2021) mukaisesti esimerkiksi maansiirtoauton päästöarvo maantiekuljetuksessa (50 prosentin kuorma-aste) on 0,085 kg CO<sub>2</sub>e/tonni km.

Tässä arvioidaan VTT:n perusennusteen (VTT 2021) mukaisesti rakentamisen kuljetusten päästöjen laskevan laskevat vuoden 2020 tasolta vuoteen 2030 noin 35 prosenttia ja vuoteen 2050 mennessä noin 50 prosenttia. Kuljetuksen autotyyppeinä huomioitiin tässä arvioissa pakettiautot ja perävaunulliset sekä perävaunuttomat rekat. Perusennusteessa tärkeimpiä päästöjä ohjaavia keinoja ovat raskaan kaluston CO<sub>2</sub>-raja-arvot sekä biopolttoaineiden osuuden nostaminen. Perusennusteessa E5-polttoaineen jakelu lopetetaan, ja loppu biosekoiteluvelvoitteesta täytetään uusiutuvan dieselin muodossa, jonka osuus dieselissä siten nousisi vähitellen 43,3 prosentin tasolle vuonna 2029. Biopolttoaineiden käyttöä tulisi ohjata raskaan liikenteen tarpeisiin, koska sen sähköistäminen on vaikeampaa kuin henkilöautoliikenteen.

## 6.9 Työkonesuoritteet

Työkoneet ovat liikkuvia koneita, jotka on suunniteltu erilaisiin työsovelluksiin. VTT:ssä kehitetty työkoneiden päästölaskentamalli TYKO sisältää kaikkiaan noin 50 työkoneyyppiä. Laskenta perustuu kahteen pääelementtiin: suoritteeseen eli kunkin työkoneen työntekijän vuotuisen työn määrään (kWh/a) ja suoritekohtaisiin päästökertoimiin ja kulutukseen (g/kWh).

Seuraava katsaus perustuu pääasiassa Rakennusteollisuus RT:n hankkeessa tehtyyn arvioon (Raivio ym. 2020).

Sähkökäyttöisten työkoneiden energiankulutus on kokonaisuuteen verrattuna pieni. Bensiinikäyttöisten työkoneiden kulutus on työkoneiden polttoaineenkulutuksesta sekin alle 10 prosenttia. Ylivoimaisesti suurin osa päästöistä (n. 90 %)

syntyy dieselkäyttöisistä työkoneista, joiden polttoaineena yleensä käytetään kevyesti verotettua moottoripolttoöljyä. Hiilidioksidi on kasvihuonekaasupäästöistä merkittävin, mutta työkoneista tulee myös pieniä määriä metaani- ja dityppioksidipäästöjä. Työkoneille ominaisia päästöjä lisääviä tekijöitä ovat mm. tarve jäähdyttää konetta ilman ajoneuvon nopeuden tuottamaa ilmapirtta sekä yleisesti käytössä olevan hydrostaattisen voimansiirron huono hyötysuhde.

Merkittävin osa työkoneiden ympäristövaikutuksista syntyy käytön aikana. Käytön aikaiseen ympäristökuormitukseen vaikuttavat erityisesti kaluston ominaisuudet, mutta myös ajo- tai käyttötavalla sekä työvaiheiden suunnittelulla on merkitystä. Työkoneiden energiankulutukseen voidaan vaikuttaa suosimalla ratkaisuja, joissa työkoneiden käyttö on tehokasta, hukka-ajat minimoidaan ja hankkeen massansiirrot (sisäiset ja ulkoiset) optimoidaan. Hintakilpailu rajaa mahdollisuuksia vähäpäästöisempien mutta kalliimpien polttoaineiden käyttöön. Olennaista on myös hyvä tiedonjako eri hankkeiden ja toimijoiden välillä. Esimerkiksi samoja katuja kaivetaan auki useita kertoja, kun eri toimijat eivät tiedä yhdistää hankkeitaan samaan kaivuu-urakkaan.

VTT:n mukaan (Nylund ym. 2016) energiatehokkuuden parantaminen ja CO<sub>2</sub>-päästöjen vähentäminen työkoneissa voidaan jakaa neljään osin toisistaan riippuvaan vaihtoehtoon (suluissa päästövähennyspotentiaali nykytasoon verrattuna):

1. Energiatehokkuuden parantaminen moottoritasolla (15 %)
2. Vähähiiliset polttoaineet (0–90 %)
3. Energiatehokkuuden parantaminen työkonetasolla (50 %)
4. Työkoneen käytön tehostaminen (35 %)

Energiatehokkuuden parantaminen moottoritasolla tarkoittaa moottorin hyötysuhteen parantamista. On arvioitu, että esimerkiksi kitkaa, kaasunvaihtoa, palamista ja lämmönhallintaa kehittämällä olisi saavutettavissa hyötysuhteen nousu, jolla päästöt pienenisivät 15 prosenttia.

Uuden sukupolven biopolttoaineet ovat teknisesti sopivia suurimpaan osaan dieselkäyttöisistä työkoneista. Parhaimmilla polttoaineilla voidaan saavuttaa 80–90 prosentin päästövähennys fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna. Tällä hetkellä ei kuitenkaan ole olemassa mekanismeja, joka ohjaisi työkoneita biopolttoaineiden käyttöön. Myös biopolttoaineiden saatavuus on merkittävä haaste. Esimerkiksi Nesteen biodieselin vuosituotanto on noin 3 miljardia litraa mikä vastaa korkeintaan yhtä prosenttia työkoneiden maailmanlaajuisesta polttoaineenkulutuksesta. Vähäpäästöisten polttoaineiden käyttö olisi rajattava niihin työvaiheisiin, joita on haastavaa toteuttaa muuten. Esimerkiksi kaikista raskaimman kaluston sähköistäminen on ollut vaikeaa (Tähkänen & Tähtinen, 2021).

Energiatehokkuuden parantaminen työkonetasolla tarkoittaa hydrauliiikan ja muun voimansiirron toiminnan kehittämistä tai koneiden hybridisointia tai sähköistämistä. Kehitystyön päästövähennyspotentiaaliksi arvioidaan jopa 50 prosenttia. Energiatehokkuusratkaisuja on jo markkinoilla, ja niiden takaisinmaksuajaksi on arvioitu jopa vain muutamia vuosia.

Työkoneen käyttöä voidaan tehostaa monin tavoin: käyttämällä työkonetta nykyistä taloudellisemmin (moottorin optimikierroslukua, tyhjäkäynnin välttäminen, kuljettajaa opastavat järjestelmät) sekä optimoimalla operointia (esim. tehtävän työn ennakointi ja siihen perustuva energiatehokas suorittaminen). Pienentyneet

kulutus ja tuottavuuden kasvaminen tehostavat toimintaa ja säästävät kustannuksia.

Työkoneiden päästöt kuuluvat EU:n taakanjakosektorille ja muodostavat sektorin päästöistä Suomessa noin 10 prosenttia eli 2,5 Mt. Teollisuus ja rakentaminen muodostavat tästä noin puolet. Taakanjakosektorin päästövähennystavoite on 39 prosenttia vuoteen 2030 vuoden 2005 tasoon verrattuna. KAISU-suunnitelma (YM, 2021) asettaa tavoitteita työkoneiden päästöille; tavoiteltu päästövähennys on 0,35–0,55 Mt. KAISU:ssa esitetyjä päästövähennystoimia ovat mm.

- Moottoripolttoöljyn biokomponenttisekoitusvelvoite
- Osallistutaan EU-tasolla työkoneiden CO<sub>2</sub>-päästöjen sääntelyn kehittämiseen
- Edistetään vähäpäästöisten ja energiatehokkaiden työkoneiden osuutta
- Edistetään työkoneiden energiatehokasta käyttöä informaatio-ohjauksen keinoin
- Vahvistetaan työkoneiden CO<sub>2</sub>-päästöjen tietopohjaa.

Oletetaan että rakentamisen työmaakäytön energiankulutuksen kysyntä ei oleellisesti muutu. Jos työkoneiden keski-ikäsi oletetaan 15 vuotta, voidaan olettaa että 2035 puolet työkonekannasta on uusiutunut. Oletetaan että

- Uusien koneiden energiatehokkuus tänä aikana paranee keskimäärin 10 %,
- Energiatehokkuus ajoneuvotasolla paranee 20 %
- Uusien työkoneiden käytön tehostaminen vähentää polttoaineenkulutusta 15 %.

Tällöin uusien koneiden päästöt olisivat noin 40 prosenttia pienemmät, ja koko konekannan päästöt olisivat noin 20 prosenttia pienemmät kuin nyt.

Oletetaan että biopolttoaineiden sekoitusvelvoite ulotetaan moottoripolttoöljyyn esimerkiksi siten että 80 prosenttia päästöjä vähentävää biopolttoainetta tulisi olla polttoaineessa 5 prosenttia. Tällöin saavutettaisiin polttoainetasolla 4 prosentin päästövähennys. Tällöin kokonaispäästövähennys olisi vanhalle ja uudelle konekannalle 4 prosenttia so. lisäpäästövähennys olisi noin 3 prosentin luokkaa nykytasoon verrattuna. Täten työkoneiden päästöt perusuralla 2035 olisivat 20–23 prosenttia pienemmät kuin nyt. Arvio on suuruusluokaltaan linjassa KAISU:n tavoitteen kanssa.

Kuulin eräältä urakoitsijalta, että tällä hetkellä biopohjaisen moottoriöljyn kehityksessä ei olla vielä sillä tasolla, että sen käyttö olisi järkevää - käytännössä käyttö lyhentäisi öljynvaihtoväliä, jolloin kokonaispäästövaikutus voisi olla jopa kielteinen. Ennen kuin sekoitusvelvoite otetaan käyttöön, tulisi kuitenkin varmistaa, että tuotteet toimivat vastaavasti kuin nyt käytössä olevat ilman vaikutusta esimerkiksi öljynvaihtoväleihin.

Vuonna 2050 koko työkonekanta on uusiutunut kahteen kertaan. Teknologisesti ollaan käytännössä liian kaukana luotettavien ennusteiden laatimiseksi. Oletetaan tätä varten että

- Energiatehokkuus uusien koneiden moottoreissa tänä aikana olisi parantunut keskimäärin 15 %,
- Energiatehokkuus ajoneuvotasolla paranisi 40 %

- Työkoneiden käytön tehostaminen vähentäisi polttoaineenkulutusta 25 %

Oletetaan myös, että rakentamisen työmaakäytön energiankulutuksen kysyntä ei oleellisesti muutu. Tällöin koko konekannan päästöt olisivat noin 60 prosenttia pienemmät kuin nyt. Mikäli biopolttoaineiden saatavuus olisi parantunut oleellisesti, voitaisiin karkeasti olettaa, että puolet käytettävästä polttoaineesta olisi biopohjaista ja biopolttoaineiden yksikköpäästövähennys olisi 90 prosenttia. Tällöin lisäpäästövähennys nykytilanteeseen verrattuna olisi 18 prosenttiyksikköä. Täten työkoneiden päästöt perusuralla 2050 olisivat 60–78 prosenttia pienemmät kuin nyt.

Päästöjen leikkaaminen tätä enemmän edellyttäisi merkittävää panostusta työkoneiden tuotekehitykseen ja/tai biopolttoaineiden saatavuuden merkittävää lisäämistä. Karkeasti voidaan arvioida, että jos rakentamisen energiankulutuksen kysyntä ei muutu, vähähiilisyysuralla päästöt voisivat olla 2035 25–30 prosenttia pienemmät kuin nyt, ja 2050 70–90 prosenttia pienemmät kuin nyt.

Arvioitu perusskenaarion (VN, 2017) mukainen päästövähennys on varsin pieni. Sektorille ei ole toistaiseksi kohdistettu päästövähennystoimenpiteitä. Säätelyn ulottaminen CO<sub>2</sub>-päästöihin ohjaisi EU:ssa työkonesektorilla toimivien valmistajien kehitystyötä ja takaisi laskevan kasvihuonekaasujen päästökemityksen työkonekannan uusiutumisen myötä. Näin voitaisiin edistää energian kulutuksen kannalta innovatiivisten teknisten ratkaisujen käyttöönottoa (VN, 2017).

Edellisen pohjalta tässä arvioidaan työkoneiden 10 ja 20 vuoden päästökemitykseen 20 ja 50 prosenttia.

## 7 Johtopäätökset ja ehdotus

Väylärakentamisen hankkeiden suunnitteluajat voivat olla pitkiä, minkä vuoksi infrarakentamisen päästötietokannassa on tarpeen ottaa huomioon päästöarvojen todennäköinen muuttuminen 10 vuoden aikavälillä ja lähivuosisikymmenien aikana.

Infrarakentamisen panospohjaisessa päästötietokannassa on monia materiaaleja ja palveluita, joiden päästöt tulevat muuttumaan merkittävästi jo 10 tai viimeistään 20 vuoden kuluessa. Näistä merkittävimmät ovat seuraavat:

- sementti
- betoni
- asfaltti
- teräs
- kuljetukset
- työkoneiden käyttö

Uusiomateriaaleilla on kohtalaisen vähäinen merkitys panostasolla. Merkitys on olennainen vasta rakennusosa- ja hankeosatasolla.

Markkinoilla on jo nyt päästöarvoiltaan hyvin erilaisia samaan ryhmään kuuluvia ja samalla tavoin toimivia tuotteita. Tilanne tulee todennäköisesti vahvistumaan. Päästöarvojen erilaistuminen voi aluksi kehittyä asteittain. Kuitenkin siinä vaiheessa, kun ensimmäiset valmistajat tekevät radikaaleja muutoksia tuoteryhmien sisäiset erot voivat joksikin aikaa kasvaa hyvin merkittäviksi. Näin voi tapahtua esimerkiksi terästeollisuuden ensimmäisten toimijoiden siirtyessä vetyteknologian hyödyntämiseen malmipohjaisen teräksen valmistuksessa tai sementtiteollisuuden edelläkävijöiden ottaessa käyttöön hiilidioksidin hyötykäyttöä (CCU) tai varastointia (CCS).

Tämän vuoksi keskiarvot tai ns. tyypilliset geneeriset arvot tulevat olemaan lähivuosisikymmeninä vähemmän merkityksellisiä ja ne kuvaavat todellisuutta nykyistä selvästi huonommin.

Samaan aikaan, kun markkinoilla olevien tuotteiden päästöarvot voivat olla hyvinkin vaihtelevia sen mukaan, kuinka vauhdikkaasti saman tuotteen eri valmistajat ottavat käyttöön vähäpäästöisiä teknologioita, tuotteilla saattaa olla myös merkittävä hintaero. Hintaerot voivat kasvaa hyvin huomattavasti pitkällä aikajaksolla. Summat saattavat toisaalta olla yritysten liikevaihtoon verrattuna niin suuria, että tämän päivän näkökulmasta on hyvin hankalaa suhteittaa investointitarpeita hintakehityksiin. Esimerkiksi sementin hyvin merkittävän päästökehityksen aikaansaaavat teknologiat merkitsevät jopa satojen miljoonien investointia tehdasta kohden.

Infrarakentamisen kannalta olennaisten tuotteiden suotuisan päästökehityksen tekee joka tapauksessa todennäköiseksi se, että mahdollisia vaihtoehtoja merkittävään päästökehityksen toteuttamiseen on olemassa kaikille tuotteille. Toisaalta kaikkien vaihtoehtojen tiellä on myös esteitä, ja mitään koko tuoteryhmän kattavaa nopeaa kehitystä ei nähtävissä minkään tuoteryhmän suhteen.

Näiden asioiden vuoksi vaikuttaisi siltä, että päästökehityksen huomioon ottamiseksi päästötietokantaan ei ole perusteltua kehittää samanlaisia ja kattavia skenaarioihin pohjautuvia arvoja kuin tällä hetkellä on tehty talonrakennuksen päästötietokannassa energiapalvelujen suhteen (CO2data2021).

Sen sijaan suosituksena on muodostaa vastaavan kaltaisia eri tuoteryhmien päästöluokkia kuin valmispölylle on tehty. Päästöluokkia olisi mahdollista käyttää hankinnan kriteereinä. Tällainen menettely soveltuu erityisen hyvin infra-alalle ja aivan erityisesti väylärakentamiseen, jossa tilaajan rooli on hyvin keskeinen. Samanlaisesti päästöarvojen luokituksen kanssa tulisi arvioida myös päästöluokkien kustannusmerkitystä. Tämän raportin johtopäätöksenä ei ole mahdollista luoda suositteluja luokituksia, vaan luokitusten tekeminen esitetään suosituksena infrarakentamista palvelevalle teollisuudelle.

Seuraavan 10 ja 20 vuoden perspektiivillä kirjallisuuden ja teollisuuden raporttien ja asiantutijanäkemyksien pohjalta useimmille rakennusmateriaaleille ei ole näkyvissä radikaalia muutosta. Nopein muutos on odotettavissa teräksen suhteen, ja markkinoilla voikin olla saatavissa sekä hiilipelkistykseen perustuvaa suhteellisen korkean päästöarvon terästä että lähes nollapäästöistä terästä.

Useimpien infrarakentamisen keskeisten tuotteiden suhteen voidaan ennustaa asteittaista kehitystä niin, että päästöt vähenevät noin 15 ja 30 prosenttia seuraavalle kahdelle vuosikymmenelle. Lähiajan suosituksena päästöarvojen käsittelyyn 10 ja 20 vuoden perspektiivillä onkin käyttää apuna näitä kertoimia – 0,85 ja 0,70 – rakennusosa- ja hankeosatasoisesti, kun halutaan arvioida 10–20 vuoden kuluttua toteutettavia hankkeita.

Tämän työn yhteenvetona esitetään kuitenkin koottuun aineistoon pohjautuvat hyvin karkeat arviot infrarakentamisen kannalta keskeisten materiaaliyhmien päästöarvojen mahdollisesta päästökehityksestä ”hyvässä luokassa” lähivuosisikymmeninä. Arviot esitetään taulukossa 3.

Uusiomateriaalien suhteen suosituksena on skenaariotyön jatkaminen tekemällä selvitys eri uusiomateriaalien saatavuudesta. Infrarakentamisen uusiomateriaaleista suuri osa pohjautuu metalli- ja energiateollisuuden tuhkiin ja kuoniin, joiden saatavuudessa tapahtunee lähivuosisikymmeninä merkittäviä muutoksia. Tämä voi johtaa infrarakentamisen rakennusosa- ja hanketasolla päinvastaisiinkin päästöskenaarioihin kuin, mitä on odotettavissa muiden materiaalien päästökehityksen avulla tapahtuvaksi.

Kuljetuksien ja työkonien osalta arvioidaan päästökehityksen tapahtuvan 10 ja 20 vuoden aikana niin, että päästöt vähenevät keskimäärin

- 10 vuodessa noin 35 % kuljetussuoritteilla ja noin 20 % työkonosuoritteilla
- 20 vuodessa noin 50 % sekä kuljetussuoritteilla että työkonosuoritteilla.



*Taulukko 3. Yhteenveto infrarakentamisen materiaalien päästökehityksestä (kg CO<sub>2</sub>e / tonni).*

	Nyt	10 vuoden kuluttua	20 vuoden kuluttua	Yksikkö
Asfaltti	50	40	30	kg CO <sub>2</sub> e/kg
Sementti	400–750	300–600	keskimäärin noin 400	kg CO <sub>2</sub> e/kg
P-lukubetonit	275–370	230–320	190–265	kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
Teräs	2500	2500 - lähes nolla	1000 – lähes nolla	kg CO <sub>2</sub> e/kg

## Lähdeluettelo

- Ahlberg, T., 2020. Kiertotalous keventää sementin päästöjä. *Betoni*, s. 74-81.
- Andersson, A., Jääskeläinen, S., Saarinen, N., Mänttari, J. & Hokkanen, E. 2020. Fossiilittoman liikenteen tiekartta -työryhmän loppuraportti. Liikenne- ja viestintäministeriö. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2020/17. Helsinki.  
<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162508>
- Betoniyhdistys 2022. BY-vähähiilisyysluokitus. <https://vahahiilinenbetoni.fi/> Haettu 14.11.2022
- Bui, Mai ym. 2018. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science*. Issue 5. 2018. <https://pubs.rsc.org/en/content/article-landing/2018/ee/c7ee02342a#!divAbstract> Haettu 14.11.2022
- Cementir, 2022. Cementir's FutureCem vision. [Online]  
<https://www.aalborgwhite.com/aalborg-white-world/media/press-release/cementirs-futurecem-vision> Haettu 1.6.2022
- CO2data, 2021. Rakentamisen päästötietokanta. Suomen ympäristökeskus. Haettu 14.11.2022
- DACH, ei pvm Rakenna tulevaisuutta varten, s.l.: Teknologiateollisuus.
- EEA, 2022. The aluminium effect. [Online]  
<https://www.european-aluminium.eu/about-aluminium/the-aluminium-effect/> Haettu 14.11.2022
- EN 15643, 2021. Sustainability of construction works. Framework for assessment of buildings and civil engineering works.
- EN 15804, 2019. SFS-EN 15804:2012 + A2:2019. Kestävä rakentaminen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt.
- Eräluoma, A., 2022. Polystyreenieristeiden päästökehityksestä. Asso Eräluoma Finnfoam . Haastattelu. 1.6.2022).
- Europarl., 2019. MEPs approve new CO2 emissions limits for trucks. Euroopan parlamentti.. [Online]  
<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/press-room/20190412IPR39009/meps-approve-new-co2-emissions-limits-for-trucks> Haettu 14.11.2022
- Finnsementti, 2020a. Kohti hiilineutraalia betonia. [Online]  
<https://finnsementti.fi/nosto/kohti-hiilineutraalia-betonia/> Haettu 11.2.2022
- Finnsementti, 2020b. Ympäristöraportti. [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti\\_ymparistoraportti\\_2020.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti_ymparistoraportti_2020.pdf) Haettu 14.11.2022
- Finnsementti, 2021. Sementtien ja masuunikuonajauheen ympäristöselosteet. [Online] <https://finnsementti.fi/palvelut/ymparisto/sementtien-ymparistoselosteet/> Haettu 14.11.2022

- Forsman, J. ym., 2020. Uusiomateriaalit kaupunkien infrarakentamisessa – käsikirja.  
[https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Uusiomateriaalit%20kaupunkien%20infrarakentamisessa-kasikirja%202019\\_07\\_02%20-%20UUMA3.pdf](https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Uusiomateriaalit%20kaupunkien%20infrarakentamisessa-kasikirja%202019_07_02%20-%20UUMA3.pdf)  
Haettu 14.11.2022
- Griffiths, S. ym., 2021. Industrial decarbonization via hydrogen: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy options. *Energy Research & Social Science*, Osa/vuosikerta 80, p. 102208.
- Habert, G. ym., 2020. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature reviews earth & environment*, Osa/vuosikerta 1, pp. 559-573.
- Heikkilä, E., 2017. Future of cement - 200 years after Louis Vicat. The international scientific symposium "The Future of Cement" pp. 24-25.
- Huttunen, R. (toim.). 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriö. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/79189>
- Häkkinen, T., 1993. Influence of high slag content on the basic mechanical properties and carbonation of concrete. Dissertation for the degree of Doctor in Technology., Espoo: VTT Publications 141.
- Härkönen, T., 2021. Vähähiilinen betoni tulee vauhdilla, by. *Betoni* 4/2021.
- IEA, 2021a. Iron and Steel. Technology roadmap. Towards more sustainable steelmaking. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron\\_and\\_Steel\\_Technology\\_Roadmap.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf) Haettu 14.11.2022
- IEA, 2021b. Aluminium, Online: <https://www.iea.org/reports/aluminium>. Haettu 14.11.2022
- Jernkontoret, ei pvm Processer. [Online]  
<https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/processer/> Haettu 14.11.2022
- Klimscheffskij, M., Raivio, T., Laine, A., Heino, A., & Lehtomäki J. 2020. Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035. Osa 3. Vähähiilisyiden skenaariot. Gaia Consulting Oy. Helsinki. [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiili\\_seminaaries/raportit\\_lopulliset/rt-raportti-3\\_vahahiilisyiden-skenaariot\\_final.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiili_seminaaries/raportit_lopulliset/rt-raportti-3_vahahiilisyiden-skenaariot_final.pdf)
- Koljonen, Tiina ym. 2019a . Pitkän aikavälin kokonaispäästökehitys. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 24/2019. Kirjoittajat: Koljonen, Tiina; Soimakallio, Sampo; Lehtilä, Antti; Similä, Lassi; Honkatukia, Juha; Hildén, Mikael; Rehunen, Antti; Saikku, Laura; Salo, Marja; Savolahti, Mikko; Tuominen, Pekka; Vainio, Terttu (2019-02-28) <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161409>

Koljonen, Tiina ym. 2019b. Hiilineutraali Suomi 2035 - Skenaariot ja vaikutusarviot. VTT TECHNOLOGY 366.129 s. + liitt. 17 s.

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2020/T366.pdf>

Kronlöf, A., 1997. Filler effect of inert mineral powder in concrete: Dissertation., Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland.

Laurila, J., 2022. Asfaltin päästökehityksen vaihtoehtoista Haastattelu. 25.5.2022

Lehtilä, A., 2019. Muutospolkujen vaikutusarviot Suomen energiatalouteen ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Valtioneuvoston selvitysja tutkimustoiminnan julkaisusarja 24/2019.

Lehtilä, A., Koljonen, T., Laurikko, J., Markkanen, J. & Vainio, T. 2021. Energiajärjestelmän ja kasvihuonekaasujen kehitykset. Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto- ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset. Valtioneuvoston kanslia. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:67. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163645>

Leppänen, H., 2022. Terästeollisuuden päästökehityksestä. Harri Leppänen SSAB. Haastattelu 1.6.2022

Leveelahti, U., 2020a. Hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä - tämä on tavoitteemme. Betoni, s.. 100-103.

Leveelahti, U., 2020b. Huima Harppaus tulevaisuuteen. Betoni, s. 100-107.

Leveelahti, U., 2021a. Blogikirjoitus: Suuri askel sementtiteollisuudelle - ensimmäinen hiilidioksidin talteenotto- ja varastointihanke etenee Norjassa. [Online] <https://finnsementti.fi/nosto/suuri-askel-sementtiteollisuudelle-ensimmainen-hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointihanke-etenee-norjassa/> Haettu 11.2.2021

Leveelahti, U., 2021b. Suuri askel sementtiteollisuudelle - ensimmäinen CO2 talteenotto ja varastointihanke etenee. Betoni, s. 92-95.

Lujabetoni, 2021. Lujabetoni näyttää tietä kohti hiilineutraaliutta - uusi vähähiilinen betoni leikkaa päästöt puoleen. [Online] <https://www.luja.fi/2021/06/04/lujabetoni-nayttaa-tieta-kohti-hiilineutraaliutta- uusi-vahahiilinen-betoni-leikkaa-co2-paastot-puoleen/> Haettu 1. 2 2022].

Lujabetoni, 2021. Lujabetonin hiilineutraali valmisbetoni. [Online] Available at: <https://lujabetoni.fi/tuotteet/valmisbetonit/kompensoitubetoni/> Haettu 1.2.2022.

Luotola, J., 2022. Finnfoam rakentaa Saloon uudenlaisen muovinkierrätyslaitoksen. Insinöörilehti, 28 4, p. 1.

Merenheimo, T., Österlund, H. & Berglund, I.-M., 2018. Ympäristönäkökohtien huomioiminen päällystehankintojen kehittämisessä: Liikennevirasto.Liikenneviraston julkaisut 1241.

<https://www.doria.fi/handle/10024/165321>

- Miettunen, E., 2021. Vähähiilistä ja vahvaa teko Finnsementin uudella kolmossementillä. [Online] [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti\\_2-2021\\_.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti_2-2021_.pdf) Haettu 14.11.2022
- Motiva. 2022. Nestemäiset biopolttoaineet. Haettu 19.4.2022. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/bioenergia/nestemaiset\\_biopolttoaineet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/nestemaiset_biopolttoaineet)
- Neste. 2020. Neste renewable diesel handbook. Neste corporation. Neste Proprietary publication. [https://www.neste.com/sites/default/files/attachments/neste\\_renewable\\_diesel\\_handbook.pdf](https://www.neste.com/sites/default/files/attachments/neste_renewable_diesel_handbook.pdf) Haettu 14.11.2022
- Niittyniemi, E., 2018. CO<sub>2</sub> -päästöjen vähentäminen asfaltointiprosessissa, toimenpiteet ja niiden vaikutukset, Espoo. Aalto-yliopisto.
- Nylund, N-O, Söderena, P. Rahkola, P. Työkoneiden CO<sub>2</sub>-päästöt ja niihin vaikuttaminen. VTT-R-04745-16
- Oulun yliopisto, 2022. Vähähiilisempää terästuotantoa valokaariuunilla. [Online] <https://www oulu.fi/yliopisto/uutiset/valokaariuunilla-vahahiilisempaa-terasta> Haettu 1.6.2022
- Papadis, E. & Tsatsaronis, G., 2020. Challenges in the decarbonization of the energy sector. Energy, Osa/vuosikerta 205, p. 118025.
- PTL, 2012. Uusioasfaltti. <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/infra/tietoa-ja-tilastoja/uusioasfalttiesite.pdf>
- Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M., Edwards, R. and Lonza, L., JEC Well-to-Tank report v5: Annexes. 2020. Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-19926-7, doi:10.2760/959137, JRC119036.
- Punkki, J., 2022. Betonin valmistuksen päästökehityksestä Haastattelu. 21.3.2022
- Purso , 2021. Purso – laatu ja vastuullisuus käsi kädessä. [Online] <https://purso.fi/purso/greenline/> Haettu 14.3.2022
- Pöyry, 2015. Jätteiden energiahyödyntäminen Suomessa. Loppuraportti. Julkaisija Energiateollisuus r.y. [https://energia.fi/files/405/ET\\_Jatteiden\\_energiakaytto\\_Loppuraportti\\_161015.pdf](https://energia.fi/files/405/ET_Jatteiden_energiakaytto_Loppuraportti_161015.pdf) Haettu 14.11.2022
- Raivio, T. ym., 2020. Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035. Osa 2: Vähähiilisyden mahdollisuuksien tarkastelu. Julkaisija Rakennusteollisuus RT.
- Ramboll, 2021. Uusiomaarakentamisen vaikutukset ja indikaattorit. [https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Uusiomaarakentamisen%20vaikutukset%20ja%20indikaattorit\\_Raportti\\_30092021%20ver2\\_0.pdf](https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Uusiomaarakentamisen%20vaikutukset%20ja%20indikaattorit_Raportti_30092021%20ver2_0.pdf)
- Rockström, J. ym., 2017. A roadmap for rapid decarbonization. Science, 355(6331), s. 1269-1271.

RT 2020. Rakennusteollisuuden tiekartta vähähiilisyteen. [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys\\_uudet/rt-vahahiilisen-rakennusteollisuus-tiivistelma-2020-08-20.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys_uudet/rt-vahahiilisen-rakennusteollisuus-tiivistelma-2020-08-20.pdf) Haettu 14.11.2022

SFS-EN 13242, 2008. Maa- ja vesirakentamisessa ja tienrakenteissa käytettävät sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset

Sipilä, E., Poikolainen, H., Lilja, A., Rautio, T. & Nylund N.O. 2021. Liikenteen jakeluvelvoitetason nosto. Afry AB. VN/13870/2021. [https://tem.fi/documents/1410877/53440649/AFRY\\_jakeluvelvoite\\_selvitys\\_joulukuu2021.pdf/2409f3ce-89d2-5178-7cb7-6a5ad3931ca1/AFRY\\_jakeluvelvoite\\_selvitys\\_joulukuu2021.pdf?t=1638529141014](https://tem.fi/documents/1410877/53440649/AFRY_jakeluvelvoite_selvitys_joulukuu2021.pdf/2409f3ce-89d2-5178-7cb7-6a5ad3931ca1/AFRY_jakeluvelvoite_selvitys_joulukuu2021.pdf?t=1638529141014) Haettu 14.11.2022

Soimakallio, S., Antikainen, R., & Thun, R. 2009. Assessing the sustainability of liquid biofuels from evolving technologies: a Finnish approach. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT RESEARCH NOTES 2482. Edita Prima Oy. Helsinki. <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2009/T2482.pdf>

Soimakallio, S., Hildén, M., Repo, A. & Lepistö, A. 2017. Biopolttoaineiden tuotannon lisäämisen vaikutukset. Teoksessa: Koljonen, T., Soimakallio, S., Ollikainen, M., Lanki, T., Asikainen, A., Ekholm, T., Hildén, M., Honkatukia, J., Lehtilä, A., Saarinen, M. & Seppälä, J. Keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman vaikutusarviot. Valtioneuvoston kanslia. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 57/2017. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-439-9>

SSAB HYBRIT, 2022. Fossil-free steel. <https://www.hybritdevelopment.se/> Haettu 14.11.2022

SSAB, 2016. ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION. Structural hollow sections, precision tubes, line pipes, steel sections. Julkaisija The Norwegian EPD Foundation.

SSAB, 2020. SSAB:n Raahan tehtaan ympäristövuosi 2020. [Online] <file:///D:/Users/E1008180/Downloads/SSAB-Raahan-tehtaan-ymparistovuosi-2020.pdf> Haettu 14.2.2022

SSAB, 2021. Tuoreimmat uutiset fossiilivapaasta teräksestä. [Online] <https://www.ssab.fi/fossiilivapaa> Haettu 14.2.2022

SYKE, ei pvm Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. [Online] <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointi> Haettu 14.11.2022

Teknologiaeollisuus, 2021. Alumiinituotteet. [Online] <https://teknologiaeollisuus.fi/fi/teknologiaeollisuus/toimialaryhmat/alumiinituotteet> Haettu 10 3 2022

Teittinen, T., Dettenborn, T. & Pahkakangas, S. Uusiomaarakentamisen päästö-laskenta. 7.12.2020. <https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Uusiomaarakentamisen%20p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6laskenta.pdf> . Haettu 14.11.2022

Tähkänen, M. & Tähtinen, L., 2021. Katsaus kiinteistö- ja rakennusalan ilmastokestävyiden nykytilaan, s.l.: Green Building Council Finland.

Uski, V.-M., Surakka, H. & Laitonen, T. 2021. Helsinki–Turku nopean junayhteyden hankekokonaisuuden YVA Ympäristövaikutusten arviointiselostuksen täydennysraportti. Väyläviraston julkaisuja 55/2021. Helsinki. 119 sivua ja 12 liitettä. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-894-6 (pdf). [https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/181576/vj\\_2021-55\\_978-952-317-894-6.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/181576/vj_2021-55_978-952-317-894-6.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Haettu 14.11.2022

UUMA 4, 2018. Mitä uusiomaarakentaminen on?. [Online] Available at: <https://www.uusiomaarakentaminen.fi/mit%C3%A4-uusiomaarakentaminen> Haettu 11.3.2022

Vares, S., 2022. Asfaltin taustaraportti infrarakentamisen päästötietokannassa - luonnos. Tulossa julkaisuksi.

Vehmas, T., 2022. Hiilidioksidikövetettujen betonien päästöistä. Haastattelu. 1.6.2022

VN, 2017. Valtioneuvoston selonteko keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmasta vuoteen 2030, s.l.:YMPÄRISTÖMINISTERIÖN RAPORTTEJA 21 | 2017.

Vogl, V., Åhman, M. & Nilsson, L., 2018. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. Journal of Cleaner Production, Osa/vuosikerta 203, pp. 736-745.

VTT Oy. Suomen betoni hiilineutraaliksi 2035. Tapahtumat 2019

Väylävirasto, 2022. Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa. Väyläviraston ohjeita 2/2022. Julkaisija Väylävirasto. [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo\\_2022-20\\_uusiomateriaalien\\_kaytto\\_web.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-20_uusiomateriaalien_kaytto_web.pdf)

YM, 2021. Keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelma Kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa 2035. Ympäristöministeriön julkaisuja 2021. [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164186/YM\\_2022\\_12.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164186/YM_2022_12.pdf?sequence=4&isAllowed=y)

VN. 2022. Ehdotus rakentamislainsäädännön muuttamisesta. 15.9.2022. <https://valtioneuvosto.fi/paatokset/paatos?decisionId=0900908f807d311e> 4.11.2022

YM. 2022. Ympäristöministeriön ehdotus ilmastaselvitystä koskevaksi asetukseksi. <https://www.lausuntopalvelu.fi/FI/Proposal/Participation?proposalId=70fe9e3d-e065-4143-ba6e-4e1f63299842> 4.11.2022



Väylävirasto  
Trafikledsverket

ISSN 2490-0745  
ISBN 978-952-405-052-4  
[www.vayla.fi](http://www.vayla.fi)