

Anna Tuominen

PÄÄSTÖVÄHENNYSMÄHDOLLISUUDET RATAHANKKEEN MASSATALOUDEN SUUNNITTELUSSA

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Syyskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Anna Tuominen: Päästövähennysmahdollisuudet ratahankkeen massatalouden suunnittelussa
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Materiaalitekniikka
Syyskuu 2023

Rakennusala aiheuttaa merkittävän osan Suomen kasviuonekaasupäästöistä, minkä vuoksi sen aiheuttamia päästöjä tulisi vähentää radikaalisti ja nopeasti. Infrarakentamisen saralla on tunnistettu useita päästövähennyskohteita, joiden päästövähennyspotentiaalia ei tällä hetkellä täysin hyödynnetä. Yksi tunnistettu päästövähennyskohde on infrahankkeiden massatalouden suunnittelu, jossa päästövähennyksiä voidaan saavuttaa leikkausmassojen kuljetusten ja käytön optimoinnilla. Massatalouden suunnittelun päästövähennyspotentiaali jää nykyisin hyödyntämättä pitkälti lähtötietojen epätarkkuuden ja suunnittelun monimutkaisuuden vuoksi.

Diplomityön tavoitteena oli tutkia Turun Tunnin Juna -hankkeeseen kuuluvan Espoo-Salo-oikoradan massataloutta ORIS-ohjelmistoalustalla ja löytää ilmastovaikutusten suhteen uusia suunnitteluratkaisuja hankkeen päästövaikutusten hillitsemiseksi. Tavoitteen saavuttamiseksi tuli ensin selvittää, mitkä massatalouden suunnitteluun liittyvät muuttujat vaikuttavat ratahankkeen hiilidioksidipäästöihin. Työn teoriaosuudessa esitellään yleisellä tasolla radan suunnittelun ja massatalouden suunnittelun periaatteet sekä leikkausmassojen hyödyntämisen reunaehdot. Teoriaosuudessa tarkastellaan myös infrarakentamisen elinkaariarvioinnin käytäntöjä, päästölaskentamenetelmiä sekä kiertotalouden periaatteita ja tuodaan esiin näihin liittyviä haasteita ja kehityskohteita.

Diplomityön kokeellisessa osiossa Espoo-Salo-oikoradan massataloussuunnitelmien päästövaikutuksia tutkittiin ORIS-ohjelmistoalustan avulla. Työssä muodostettiin kaksi skenaariota leikkausmassojen käytöstä ja kuljetuksista ja selvitettiin ORIS-ohjelman avulla näiden skenaarioiden kasviuonekaasupäästöt. Työssä hyödynnettiin pääsääntöisesti ratasuunnitelmavaiheen suunnittelutietoja, ja tarvittaessa suunnittelutietoja täydennettiin yleissuunnitelmavaiheen suunnittelutiedoilla. Tuloksia verrattiin Turun tunnin juna -hankkeen ympäristövaikutusten arviointiselostuksessa (YVA) sekä Espoo-Salo-oikoradan yleissuunnitelmassa esitettyihin päästölaskennan tuloksiin, jotka perustuivat yleissuunnitelmavaiheen suunnittelutietoihin.

Työssä muodostettujen skenaarioiden päästöt eivät poikenneet merkittävästi hankkeen YVA:ssa ja yleissuunnitelmassa esitetyistä päästöistä. Tulosten vertailuun liittyy epävarmuutta käytetyistä laskentamenetelmistä ja päästökertoimista johtuen. Työn tulosten perusteella tunnistettiin kuitenkin massatalouden osalta päästövähennyskohteita, joiden vaikutuksia hankkeen kokonaispäästöihin kannattaisi jatkossa tutkia. Näitä kohteita ovat muun muassa ratageometrian uudelleentarkastelu leikkausmassojen muodostumisen välttämiseksi, hyödyntämiskohteiden etsiminen heikkolaatuisille leikkausmassoille sekä vähähiilisten rakennusmateriaalien tai uusiomateriaalien käytön tutkiminen.

Työssä havaittiin, että tarkkojen massataloussuunnitelmien tekeminen on vielä ratasuunnitelmavaiheessakin haastavaa lähtötietojen epätarkkuuden vuoksi. ORIS-ohjelmiston hyödynnettävyydessä tunnistettiin useita mahdollisuuksia, joita heikentävät suunnittelun kompleksinen luonne, elinkaariarvioinnin prosesseihin liittyvä suuri työmäärä sekä inhimilliset tekijät. Ohjelmistoa tulisi jatkossa kehittää siten, että se olisi helpommin integroitavissa osaksi suunnittelua ja päätöksentekoa.

Avainsanat: massatalouden suunnittelu, infrarakentaminen, päästölaskenta, elinkaariarviointi, kiertotalous.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Anna Tuominen: Reducing greenhouse gas emissions in mass haul planning of railway design
Master's Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Materials Science
September 2023

Construction causes a significant part of Finland's greenhouse gas emissions, which is why the emissions caused by it should be reduced radically and quickly. Several emissions reduction targets have been identified in the field of infrastructure construction, whose emission reduction potential is currently not fully utilized. One identified target is the of the mass haul planning of infrastructure projects, where emission reductions can be achieved through the optimization of transportation and use of surplus masses. The emission reduction potential of mass haul planning is not currently fully utilized due to the inaccuracy of the initial data and the complexity of the planning.

The aim of the master's thesis was to study the mass economy of the Espoo-Salo railway line with ORIS software platform and to find new design solutions in terms of mitigating the greenhouse gas emissions of the project. In order to achieve the goal, it was first necessary to find out which variables related to mass haul planning affect the greenhouse gas emissions of railway construction. In the theoretical part of the thesis, the principles of railway track design and mass haul planning are presented, as well as the boundary conditions for the utilization of surplus masses. Emission calculation methods, principles of circular economy and life cycle assessment procedures are also examined.

In the experimental part of the master's thesis, the greenhouse gas emissions of different mass haul plans of the Espoo-Salo railway line were investigated using the ORIS software platform. Two scenarios for the use and transport of surplus masses were created and the greenhouse gas emissions of these scenarios were determined with the ORIS software platform. The results were compared with the emission calculation results presented in the environmental impact assessment report (EIA) of Turku one hour train project and emission calculations made in the previous design phase of Espoo-Salo railway line.

The emissions of the scenarios created in the work did not deviate significantly from the emissions presented in the project's EIA and previous design phase. The comparison of the results involves uncertainties due to the different calculation methods and emission factors used. However, based on the results of the work, several emission reduction targets were identified for the mass haul planning. These targets include for example the re-examination of railway track geometry to avoid the formation of unnecessary surplus masses, the search for utilization targets for low-quality surplus masses, and the use of recycled or low-carbon construction materials.

It was found that making accurate mass haul plans is still challenging even in the railway track design phase due to the inaccuracy of the initial data. Several possibilities were identified in the usability of the ORIS software, which are weakened by the complex nature of the mass haul planning, the large amount of work related to the life cycle assessment procedures, and human factors. In the future, the software should be developed in such a way that it can be more easily integrated into railway track design and decision-making process.

Keywords: Mass economy planning, infrastructure construction, emission calculation, life cycle assessment.

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

ALKUSANAT

Päästölaskenta ja kiertotalous ovat ajankohtaisia aiheita infrarakentamisessa, ja niihin liittyviä käytäntöjä ja laskentamenetelmiä kehitetään parhaillaan. Lisäksi Suomessa on työni kirjoitushetkellä käynnissä poikkeuksellisen monta uuden radan suunnitteluun tähtäävää hanketta. Diplomityön aikana pääsin seuraamaan näitä rautatiealan kehitysnäkymiä aitiopaikalta sekä perehtymään niihin syvällisesti. Parasta on, että työn valmistuttua-kin saan jatkaa töitä rautateiden parissa.

Haluaisin ensimmäisenä kiittää työn toimeksiantajaa Turun Tunnin Juna Oy:tä, joka tarjosi mielenkiintoisen ja monipuolisen aiheen diplomityölleni. Suuret kiitokset Annika Salokankaalle ja Ari-Pekka Niemelälle luottamuksesta sekä kannustamisesta kouluttautumaan rautatiealalle. Erytiskiitos myös esihenkilölleni Tommi Latvalle sekä työparilleni Ilari Parkkoselle Welado Oy:stä. Luomanne avoin ja empaattinen työilmapiiri ovat olleet korvaamattomia työn, opiskelun ja muun elämän yhteen sovittamisessa.

Kiitän ohjaajiani Pirjo Kuulaa, Juha Nykästä ja Tero Leppästä työni ohjaamisesta ja tarkastamisesta. Apunne ja tukenne kirjoitusprosessin aikana merkitsivät minulle paljon. Kiitos myös koko ORIS-tiimille ORIS SAS:lta ja Arkance Systems Oy:ltä. Intohimonne aiheita kohtaan oli tarttuvaa ja kanssanne työskentely oli vaivatonta ja opettavaista.

Haluan kiittää erikseen myös Jyrki Katajaa rohkaisusta sekä työelämässä että painonostolavoilla, sekä Taina Milánia tuesta ja neuvoista työurani ensimetreillä. Erytiskiitos kuuluu myös Isälleni, joka on kannustanut minua tekniikan alalle ja tuonut uusia näkökulmia opiskelemini aiheisiin.

Lopuksi haluan kiittää vielä kaikkia läheisiäni ja ystäviäni, jotka ovat kulkeneet matkasani opintojeni ajan.

Tampereella 17.9.2023,

Anna Tuominen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. RATAHANKKEIDEN SUUNNITTELU	3
2.1 Ratahankkeen suunnittelun vaiheet	3
2.2 Ratageometrian suunnittelu	5
2.3 Radan rakenne	7
2.4 Ratarakenteissa käytetyt materiaalit.....	12
2.5 Massatalouden suunnittelu.....	17
3. KESTÄVÄ INFRARAKENTAMINEN.....	21
3.1 Infrarakentaminen osana kestävää kehitystä	21
3.2 Infrarakenteiden elinkaariarviointi.....	22
3.3 Infrarakentamisen hiilidioksidipäästöt.....	25
3.4 Kiertotalous infrahankkeilla	28
4. YLIJÄÄMÄMASSOJEN HYÖDYNTÄMINEN RATAHANKKEESSA.....	33
4.1 Ylijäämämassojen määrittely	33
4.2 Ylijäämämassojen hyödyntämistä koskeva lainsäädäntö	35
4.3 Ylijäämämassojen hyödyntämisen periaatteet.....	37
5. CASE-HANKKEEN ESITTELY.....	38
5.1 Turun tunnin juna ja Espoo-Salo-oikorata	38
5.2 Hankkeen ilmastovaikutukset.....	39
5.3 Hankkeen massatalous.....	41
6. MASSATALOUDEN SUUNNITTELU ORIS-OHJELMISTOLLA.....	43
6.1 ORIS – ohjelmisto massatalouden suunnitteluun	43
6.2 Tavoitteen ja soveltamisalan määrittely ORIS-ohjelmistossa.....	44
6.3 Inventaarioanalyysi ja tiedon kerääminen.....	45
6.4 Vaikutusten arviointi	48
6.5 Tulosten tulkinta.....	52
7. MATERIAALIT JA MENETELMÄT	54
7.1 Tavoitteen ja soveltamisalan määrittely	54
7.2 Inventaarioanalyysi	56
7.3 Vaikutusten arviointi	61
8. TULOKSET	62
8.1 Ylijäämämassojen määrä ja hyödynnettävyys	62
8.2 Päästövaikutukset.....	63
8.3 Tulosten tulkinta.....	67
8.3.1 Ylijäämämassojen määrä ja hyödynnettävyys.....	67

8.3.2 Päästövaikutukset.....	68
8.3.3 ORIS-ohjelman hyödynnettävyys.....	70
8.4 Toimenpidesuosituksset	70
9.YHTEENVETO.....	73
LÄHTEET.....	75

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CML	Centrum voor Milieukunde
EPD	Environmental product declaration
GWP	Global warming potential
LCA	Life cycle assessment
MAL	Maa-aineslaki
SYKE	Suomen ympäristökeskus
YS	Yleissuunnitelma
YSL	Ympäristönsuojelulaki
YVA	Ympäristövaikutusten arviointi

1. JOHDANTO

Ilmaston lämpenemisen vuoksi kansainväliset toimijat ja valtiot ovat asettaneet päästövähennystavoitteita, joiden saavuttaminen edellyttää toimia lähes kaikilla yhteiskunnan sektoreilta. Rakennusala, johon myös infrarakentaminen kuuluu, aiheuttaa merkittävän osan Suomen kasvihuonekaasupäästöistä (Rakennusteollisuus 2020). Infrarakentamisen päästöjä tulisi vähentää radikaalisti ja nopeasti (Green Building Council 2021). Infrarakentamisessa on tunnistettu useita päästövähennyskohteita, joiden koko päästövähennyspotentiaalia ei tällä hetkellä hyödynnetä (Rakennusteollisuus 2020). Tällaisia merkittäviä päästövähennyskohteita ovat muun muassa hankkeissa muodostuvien maa- ja kiviainesten tehokas hyödyntäminen, kierrätys- ja uusiomateriaalien käyttö, kuljetusten optimointi sekä työmaatoimintojen energiatehokkuuden kehittäminen (Green Building Council 2021, Rakennusteollisuus 2020).

Massatalouden suunnittelulla tarkoitetaan infrahankkeen rakennusvaiheessa muodostuvien leikkausmassojen sekä rakentamisessa vaadittavien maa- ja kalliomassojen kuljetusten ja käytön suunnittelua. Ratahankkeissa massatalous suunnitellaan yleispiirteisesti yleissuunnitelmavaiheessa ja tarkemmin ratasuunnitelmavaiheessa (Väylävirasto 2008). Massatalouden suunnittelu ja massalaskenta ovat monimutkaisia ja aikaa vieviä työvaiheita, minkä vuoksi niitä ei yleisesti tehdä tarkkaan yleissuunnitelmavaiheessa. Massataloutta on perinteisesti tarkasteltu lähinnä kustannusten hallinnan näkökulmasta, vaikka massojen kuljetuksilla on merkittävä vaikutus myös hankkeiden päästöihin. Yleis- ja ratasuunnitelmavaiheen massataloussuunnittelussa keskitytään lisäksi pitkälti leikkaus- ja täyttömassojen tasapainotarkasteluihin, jolloin massojen siirroista aiheutuvat todelliset vaikutukset jäävät selvittämättä (Manninen 2009). Suuri osa massataloussuunnittelun päästövähennyspotentiaalista jää tällä hetkellä hyödyntämättä suunnittelun monimutkaisuuden sekä lähtötietoihin liittyvän epätarkkuuden vuoksi.

Turun Tunnin Juna -hankkeen tavoitteena on suunnitella nopea, kaksiraiteinen raideyhteys Espoon ja Turun välille. Hankkeeseen kuuluvalla Espoo-Salo-oikorataosuudella on arvioitu muodostuvan noin 8 miljoonaa kuutiota ylijäämäisiä maa- ja kiviainesmassoja, joiden kuljetuksella, käsittelyllä sekä sijoittamisella on merkittäviä vaikutuksia ympäristöön ja hankkeen päästöihin (Väylävirasto 2020a). Hankkeessa on pyritty löytämään uusia keinoja päästöjen vähentämiseen sekä kiertotalouden edistämiseen tarkemman

massatalouden suunnittelun kautta. Ylijäämäisten leikkausmassojen käsittelyn optimointia varten hankkeessa testataan ORIS-ohjelmistosovellusta, jonka avulla voidaan arvioida massojen hyödyntämisen ja kuljetusten vaikutuksia hankkeen päästöihin.

Diplomityön tavoitteena on tutkia Turun Tunnin Juna -hankkeeseen kuuluvan Espoo-Salo-oikoradan massataloutta vertailemalla eri massataloussuunnitelmia keskenään sekä mahdollisesti löytää ilmastovaikutusten suhteen uusia suunnitteluratkaisuja massojen käsittelylle. Diplomityössä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten ratahankkeen massatalouden suunnitteluun liittyvät muuttujat vaikuttavat ratahankkeen hiilidioksidipäästöihin?
- Miten hankkeessa muodostuvien leikkausmassojen hyödyntämisellä ja kuljetusten suunnittelulla voidaan vaikuttaa kasvihuonekaasupäästöihin Turun Tunnin Juna -hankkeeseen kuuluvalla Espoo-Salo-oikoradalla?

Diplomityön teoriaosuudessa (luvut 1–4) perehdytään yleisellä tasolla ratahankkeen suunnitteluun, massatalouden suunnittelun periaatteisiin sekä leikkausmassojen hyödyntämisen reunaehtoihin. Teoriaosuudessa tarkastellaan myös infrarakenteiden elinkaariarvioinnin käytäntöjä, päästölaskentaa sekä kiertotalouden periaatteita. Turun tunnin juna ja työssä tarkasteltava Espoo-Salo-oikorata esitellään lyhyesti luvussa 5.

Diplomityön kokeellisessa osassa hyödynnetään ORIS-ohjelmistoalustaa. ORIS-ohjelman toimintaperiaatteet esitellään kappaleessa 6 ja työn kokeellinen osuus luvussa 7. Työssä muodostetaan kaksi skenaariota, joissa tutkitaan hankkeessa muodostuvien leikkausmassojen hyödyntämisen ja kuljetusten optimoinnin vaikutuksia hankkeen kasvihuonekaasupäästöihin. Työ tehdään elinkaariarvioinnin (LCA) periaatteiden mukaan ja kansainvälisiä elinkaariarvioinnin standardeja noudattaen. Tuloksia verrataan Turun tunnin juna -hankkeen ympäristövaikutusten arviointiselostuksessa (YVA) sekä Espoo-Salo-oikoradan yleissuunnitelmassa esitettyihin päästölaskennan tuloksiin.

Työn tulokset esitellään kappaleessa 8. Tulosten perusteella pohditaan tarkemman massataloussuunnittelun hyötyjä ja mahdollisia kehityskohteita ratasuunnitelmavaiheessa sekä kartoitetaan päästövähennysmahdollisuuksia Espoo-Salo-oikoradan massataloussuunnittelussa. ORIS-ohjelmistoa ei ole ennen hyödynnetty suomalaisissa infrahankkeissa, joten diplomityön yhtenä tavoitteena on tutkia ohjelmistoalustan käytöllä saavutettavissa olevia hyötyjä ja verrata sillä suoritettua laskentaa perinteisiin massataloussuunnittelun ja päästölaskennan menetelmiin.

2. RATAHANKKEIDEN SUUNNITTELU

2.1 Ratahankkeen suunnittelun vaiheet

Ratahankkeen suunnittelu jaetaan neljään vaiheeseen, jotka ovat *tarveselvitys*, *yleissuunnitelman laatiminen*, *ratasuunnitelman laatiminen* sekä *rakentamissuunnitelman laatiminen*. Kaikkia suunnitteluvaiheita ei välttämättä tarvita, jos hankkeen vaikutukset arvioidaan vähäisiksi. Kun kyseessä on uusinvestointi eli uuden radan rakentaminen, kaikki suunnitteluvaiheet tulee käydä läpi. (Väylävirasto 2008)

Radan suunnittelu liittyy tiiviisti maankäytön suunnitteluun eli kaavoitukseen. Eri suunnitteluvaiheet ja niiden kytkeytyminen osaksi kaavoitusta on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Rata- ja tiesuunnittelun hankkeen vaiheet sekä niiden kytkeytyminen maankäytön suunnitteluun. (Väylävirasto 2022a)

Tarveselvityksen pohjana toimivat hankkeen tavoitteet sekä tarpeen määrittely. Selvityksen tavoitteena on määrittää kaikki hankkeeseen liittyvät työtehtävät siten, että hankkeen eri toteutusvaihtoehtojen vaikutukset voidaan arvioida riittävällä tarkkuudella. Tarveselvityksen osana tehdään myös hankearviointi ja selvitetään hankkeen aikataulu sekä kustannusten suuruusluokka. Tarveselvityksen jälkeen muodostetaan raportti, joka sisältää johtopäätökset ja toimenpidesuositukset. (Väylävirasto 2008)

Yleissuunnitelman tavoitteena on määritellä hankkeen tekninen toteutustapa, hankkeen vaikutukset sekä toiminnalliset ja ympäristölliset ratkaisut toteutus päätöksen edellyttämällä tarkkuudella. Yleissuunnitelmassa arvioidaan investoinnin laajuus sekä toteutuksen aikataulu ja laaditaan hankkeen kustannusarvio. Yleissuunnitelman tulee aina

perustua maankäyttö- ja rakennuslain mukaiseen oikeusvaikutteiseen kaavaan. (Väylävirasto 2008)

Yleissuunnitelmavaiheessa tehdään kattavat ympäristöselvitykset sekä tarvittaessa lakisääteinen YVA eli ympäristövaikutusten arviointi (Väylävirasto 2008). YVA-menettelyn tavoitteena on ympäristövaikutusten arvioinnin lisäksi lisätä kaikkien hankkeen vaikutuspiirissä olevien tiedon saantia ja osallistumismahdollisuuksia päätöksentekoon (Laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä 2017/252/ 1§). YVA-lain mukainen arviointi on aina laadittava, jos hankkeella voidaan olettaa olevan merkittäviä ympäristövaikutuksia (Ympäristöministeriö 2022). YVA-asetuksen mukaan kaukoliikenteen rautatien rakentaminen edellyttää aina YVA-menettelyä (Laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä 2017/252/ 40§).

Yleissuunnitelma voidaan tarvittaessa toteuttaa kahdessa osassa siten, että ensin laaditaan alustava yleissuunnitelma, ja vasta tämän jälkeen varsinainen yleissuunnitelma. Yleissuunnitelman kahtiajako on perustelua etenkin silloin, kun yleissuunnitelman aikana tehdään YVA-lain mukainen arviointi. Alustavassa yleissuunnitelmassa selvitetään vaihtoehtoiset ratalinjaukset ja keskitytään niiden vertailuun. Myös nykyisen radan parantamisvaihtoehto otetaan huomioon ja suunnitellaan vertailukelpoisesti. (Väylävirasto 2008)

Varsinaisessa yleissuunnitelmassa keskitytään yleensä alustavan yleissuunnitelman perusteella valitun yhden linjausvaihtoehdon tarkempaan suunnitteluun. Yleissuunnitelmassa esitetään radan liikenteelliset ja tekniset perusratkaisut, rakennuskustannusarvio, radan arvioidut vaikutukset sekä suunnitelmat vaikutusten poistamiseksi tai vähentämiseksi. Yleissuunnitelmaa laadittaessa huomioidaan YVA-selostus sekä YVA-yhteysviranomaisen lausunto ja päivitetään tarveselvityksessä tehty hankearviointi. (Väylävirasto 2008)

Ratasuunnitelma laaditaan noudattaen voimassa olevia lakeja, Traficomien määräyksiä sekä Väyläviraston ohjeita. Ratasuunnitelma on edeltäviä vaiheita huomattavasti tarkempi suunnitelma, josta ilmenevät radan linjaus ja korkeusasema, ratageometria, rataa varten vaadittavat alueet, asemat, sillat, tunnelit, rummut, kuivatussuunnitelmat, melunTORjunta, tasoristeykset sekä tiejärjestelyt. Lisäksi esitetään turvalaite- ja sähköratasuunnitelmat, tarkennetut kustannusarviot sekä ympäristösuunnitelmat. Hyväksytty yleissuunnitelma voi toimia ratasuunnitelman lähtötietoaineistona, mutta ratasuunnitelma on aina oma itsenäinen suunnitelmavaiheensa. (Väylävirasto 2022a)

Yleis- ja ratasuunnitelmien hyväksymisestä päättää Traficom. Suunnitelmien hyväksyminen on ratalain mukainen prosessi, joka alkaa suunnitelman laatimisen käynnistämi-

sestä ja päättyy Traficomien lainvoimaiseen päätökseen. Ennen yleis- tai ratasuunnitelman hyväksymistä suunnitelmat on asetettava yleisesti nähtäväksi ja varattava asianosaisille, kuten maiden ja kiinteistöjen omistajille, tilaisuus tulla kuulluksi heihin vaikuttaviin suunnitelmiin liittyen. (Väylävirasto 2021a) Hyväksytty ratasuunnitelma oikeuttaa ratasuunnitelmassa osoitettujen alueiden lunastamiseen tai työnaikaiseen haltuunottoon sekä rakentamisen käynnistämiseen (Väylävirasto 2022a).

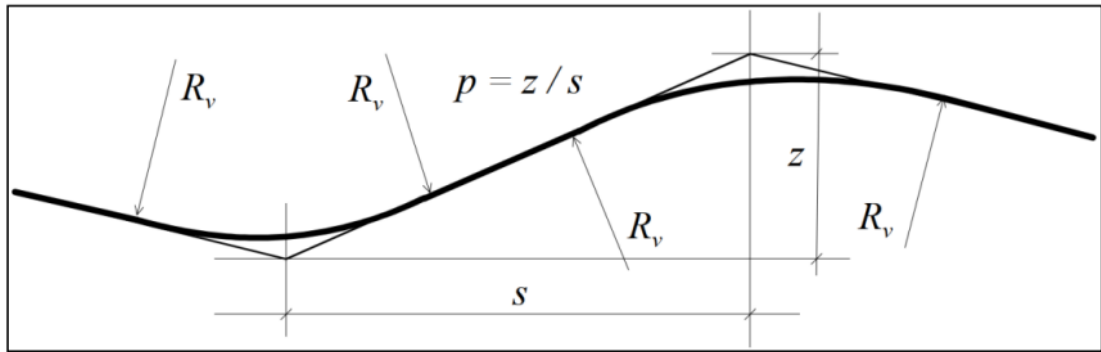
Rakentamissuunnitelmassa määritellään rakentamistoimenpiteen täsmällinen sijainti, mitoitus, rakenteet sekä rakenteissa käytettävät rakennusmateriaalit sillä tarkkuudella, että sitä voidaan käyttää rakennusurakan tarjouspyyntö- ja sopimusasiakirjana sekä työ- ja laatusuunnitelmien laatimisen lähtötietona. Rakentamissuunnitelmassa tulee myös esittää, miten rakennustyö toteutetaan turvallisesti olemassa oleva rata ja liikennöinti huomioon ottaen. Rakentamissuunnitelman lähtökohta on hyväksytty ratasuunnitelma, ja se voidaan laatia joko erillisenä suunnittelutehtävänä tai osana rakennusurakkaa. Rakentamissuunnitelma toimii rakentamista ohjaavana dokumenttina rakentamisvaiheessa. (Väylävirasto 2008)

2.2 Ratageometrian suunnittelu

Ratageometrialla tarkoitetaan radan keskilinjaa kuvaavaa kolmiulotteista matemaattista mallia. Ratageometrian suunnittelun lähtökohtana on luoda rataliikenteelle tasainen ja kantava alusta, jossa liikennöinti on turvallista, energiatehokasta sekä matkustajan näkökulmasta miellyttävää. Ratageometrian suunnittelussa tulee huomioida muun muassa radalla liikennöivän kaluston massa ja nopeus, rakentamiskelpoisuus, kunnossapidon toteutus sekä turvallisuus- ja ympäristökijät (Väylävirasto 2021b). Ratageometrian suunnittelun lopputuloksena saadaan tarkasti määritelty raiteiden muoto ja radan sijainti rakentamista ja kunnossapitoa varten (Taimela 2011).

Ratageometria jaetaan pysty- ja vaakageometriaan, jotka jaetaan edelleen näitä kuvaaviin tarkempiin elementteihin. Pysty- ja vaakageometria vaikuttavat toisiinsa, minkä vuoksi ne suunnitellaan yhtenä kokonaisuutena. (Taimela 2011)

Pystygeometria määrää raiteen sijainnin korkeussuunnassa (Väylävirasto 2021b). Radan pystygeometria muodostuu suorista kaltevuusjaksoista ja kaltevuustaitteiden pyöristyskaarista, jotka määritellään kaltevuusjaksojen taitepisteiden avulla. Pystygeometria perustuu näihin määrittäviin elementteihin, ja niiden avulla voidaan laskea radan korkeusviiva sekä raiteen pituuskaltevuus parametrien kattamalle alueelle. (Taimela 2011) Raiteen pituuskaltevuus sekä suunnittelussa käytettävät parametrit on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Radan pituuskaltevuus (Väylävirasto, 2021b), jossa
 p = raiteen pituuskaltevuus
 z = taitepisteiden korkeusero [m]
 s = taitepisteiden välimatka raidetta pitkin vaakatasossa [m]
 R_v = pyöristyskaarresäde [m].

Raiteen keskimääräinen pituuskaltevuus p määritellään taitepisteiden korkeuseron z ja vastaavan vaakasuuntaisen etäisyyden s suhteena, ja se ilmaistaan joko promilleina tai desimaalilukuina (Väylävirasto 2021b). Pituuskaltevuuksien on oltava sopivan suuntaisia esimerkiksi radan kiihdytys- ja jarrutusalueilla energian säästämiseksi ja liikennöinnin turvallisuuden takaamiseksi (Taimela 2011). Uusien raiteiden suunnittelussa on pituuskaltevuuksien osalta noudatettava Väyläviraston ratateknisissä ohjeissa määritellyt raja-arvoja. Esimerkiksi suoralla radalla pituuskaltevuuden suositusarvo on 10 ‰, joka vastaa 10 metrin nousua kilometrin matkalla. (Väylävirasto 2021b)

Vaakageometria määrää raiteen keskilinjan sijainnin vaakasuunnassa sekä kallistuksen kaarteissa (Väylävirasto 2021b). Kun juna ajaa kaarteeseen, siihen kohdistuu poikittaiskiihtyvyyttä, jonka suuruus riippuu junan kulkunopeudesta sekä kaarteeseen kaarresäteestä ja kallistuksesta. Poikittaiskiihtyvyydellä on useita haittavaikutuksia, jotka voivat lievimmillään heikentää matkustusmukavuutta, mutta pahimmillaan aiheuttaa vaurioita kalustossa tai radan rakenteissa. Äärimmillään suuri poikittaiskiihtyvyys voi aiheuttaa jopa kaluston kaatumisen tai suistumisen raiteelta. (Taimela 2011) Raidetta on usein tarpeen kallistaa, jotta haluttu nopeus voidaan saavuttaa ja poikittaiskiihtyvyyden aiheuttamia haittavaikutuksia vähentää. Käytännössä raiteen kallistus toteutetaan siten, että sisäkaarteeseen puoleinen kisko säilytetään raiteen korkeusaseman määräävässä korkeudessa, ja ulkokaarteeseen puoleista kiskoja kohotetaan kallistuksen verran. Usein raiteen kallistus joudutaan suunnittelemaan kompromissina siten, että samalla radalla eri nopeuksilla liikkuvien junien turvallinen liikennöinti voidaan varmistaa kaikilla nopeuksilla. (Väylävirasto 2021b)

2.3 Radan rakenne

Ratarakenne on kokonaisuus, joka muodostuu useista rataa tukevista rakennekerroksista sekä raiteeseen kuuluvista rakenteista. Eri rakennekerrokset ja raiteet rakennetaan joko suoraan pohjamaan päälle pintamaan poiston jälkeen (*nollatasattu rakenne*), tasamalla ja kohottamalla rakennettava maanpinta pengertämällä (*pengerretty rakenne*) tai leikkaamalla maata tai kalliota rataa ympäröivältä alueelta (*leikattu rakenne*). Kuvassa 3 on esitetty pengerretty rakenne ja kuvassa 4 leikattu rakenne.



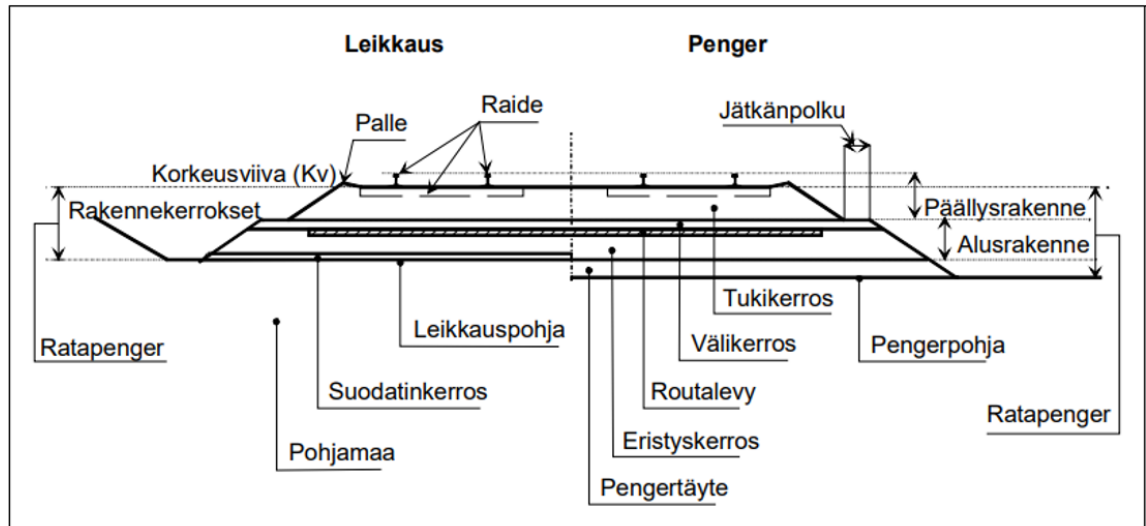
Kuva 3. Pengerretty rakenne (Kuula 2015).

Kun rata rakennetaan pengertämällä, korotus tehdään lisäämällä pengertäyttemateriaalia eristyskerroksen ja pohjamaan väliin. Pengerretyissä rakenteissa pengertäytteen alla olevaa pohjamaan pintaa kutsutaan pengerpohjaksi. Leikatussa rakenteissa leikatun pohjamaan yläpintaa kutsutaan vastaavasti leikkauspohjaksi. (Liikennevirasto 2018)



Kuva 4. Kalliroleikkaus (Kuula 2015).

Radan eri rakennekerrokset pitävät radan geometrisesti oikeassa asennossa ja muodostavat raiteelle tasaisen ja kantavan alustan. Radan rakennekerroksia ovat tuki-, väli-, eristys- ja suodatinkerros. Radan tukikerros sekä raiteeseen kuuluvat rakenteet muodostavat radan päällysrakenteen. Väli- ja eristyskerrokset sekä mahdollinen suodatinkerros ja routalevyt muodostavat puolestaan radan alusrakenteen. (Liikennevirasto 2018) Radan rakenneosat on esitetty kuvassa 5.

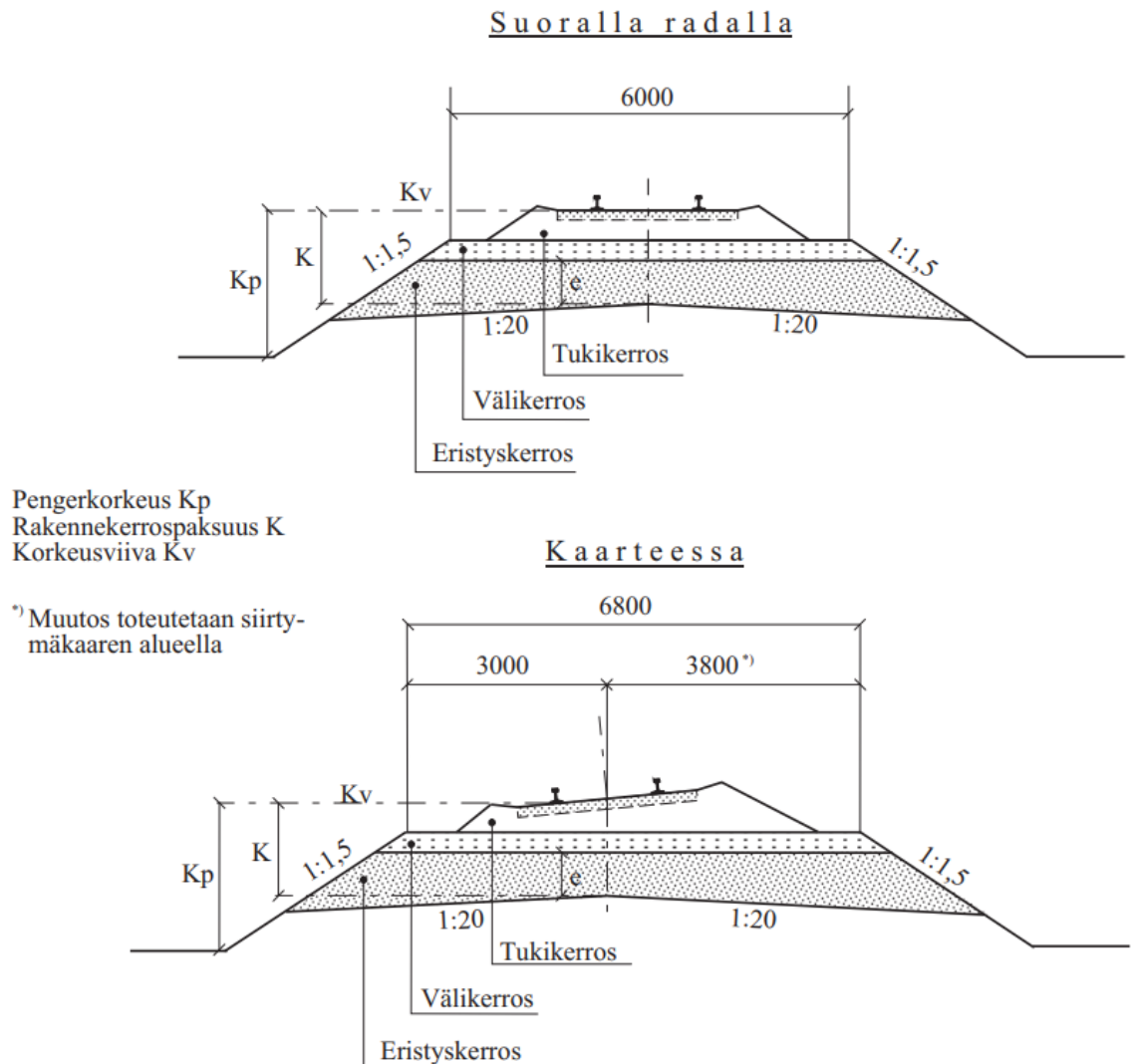


Kuva 5. Radan rakenneosat (Väylävirasto 2018).

Radan eri rakennekerrosten tärkeimmät tehtävät ovat raiteeseen kohdistuvien kuormien jakaminen ja siirtäminen alemmille rakennekerroksille ja edelleen pohjamaalle sekä radan routimisen estäminen. Eri rakennekerroksilla on lisäksi tarkempia kerroskohtaisia tehtäviä. Tukikerroksen päätehtävät ovat suunnitellun raidegeometrian säilyttäminen sekä tasaisen ja kantavan alustan muodostaminen raiteen rakenteille, kuten kiskoille, ratapölkyille ja vaihteille. Väli-, eristys- ja suodatinkerrokset estävät tukikerroksen sekoitumisen alempiin rakennekerrokseen ja estävät veden kapillaarisen nousun ratarakenteisiin. Eristyskerroksen ja muiden rakennekerrosten väliin rakennettavalla routalevyllä voidaan edelleen ehkäistä routimista ja lisätä rakenteen lämmöneristävyyttä. (Liikennevirasto 2018)

Radan mittojen määrittämistä varten radat jaetaan viiteen alusrakenneluokkaan (0–4) suurimman sallitun liikennöintinopeuden mukaan. Radan tärkeimmät mitat ovat pengerleveys sekä rakenteen kokonaispaksuus, ja ne määräytyvät pitkälti alusrakenneluokan mukaan. Pengerleveydellä tarkoitetaan leveyttä, johon alusrakenteen ylin kerros rakennetaan, ja sen määrittämiseen vaikuttavat alusrakenneluokan lisäksi muun muassa raiteiden määrä, raideväli sekä radan geometria. Rakenteen kokonaispaksuus määritetään siten, että rakenteen routimattomuus voidaan varmistaa alusrakenneluokan mukaan määräytyvillä mitoituspakkasmäärien toistumisjaksoilla. (Liikennevirasto 2018) Routimisen estämiseksi infrarakenteiden kokonaispaksuudet ovat Suomessa muuta Eurooppaa suurempia ja rakenteet vaativat huomattavasti enemmän kiviaineksia rakennusmateriaalina (Lonka & Loukola-Ruskeeniemi 2015).

Ratarakenteen minimimitat on määritelty tarkkaan erilaisille radan poikkileikkaustyypeille eli normaalipoikkileikkauksille, jotka on esitetty julkaisun *Ratatekniset ohjeet osa 3, Radan rakenne* (Liikennevirasto 2018) liitteessä 2. Kuvassa 6 on esitetty esimerkkinä jatkuvakiskoisen, yksiraiteisen radan normaalipoikkileikkaus, kun suurin sallittu liikennöinti nopeus on 200 km/h.



Kuva 6. Normaalipoikkileikkaus yksiraiteisessa jatkuvakiskoraiteessa, kun sallittu nopeus on 200 km/h (Väylävirasto 13/2018).

Kuvassa 6 esitetyn esimerkkipoikkileikkauksen rakennekerrosten minimimitat sekä betoni- että puuratapölkkyraiteelle on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Minimimitat (mm) yksiraiteiselle jatkuvakiskoraiteelle, kun sallittu nopeus on 200 km/h. K = Rakennepaksuus. (Väylävirasto 2018)

Poikkileikkausmitat							
Rakennetyyppi	Tukikerros		Eristyskerros hiekasta			Eristyskerros murskeesta	
	Betonirata-pölkky	Puurata-pölkky	Välikerros	Eristyskerros e	K	Välikerros + eristyskerros	K
Betonirata-pölkkyraide							
PB900	550		350	-	900	350	900
PB1200	550		300	350	1200	850	1400
PB1400	550		300	550	1400	1050	1600
PB1600	550		300	750	1600	1250	1800
PB1800	550		300	950	1800	1450	2000
PB2000	550		300	1150	2000	1750	2300
PB2200	550		300	1350	2200	1950	2500
PB2400	550		300	1550	2400	2150	2700
Puurata-pölkkyraide							
P800		450	350	-	800	450	900
P1200		450	300	450	1200	950	1400
P1400		450	300	650	1400	1150	1600
P1600		450	300	850	1600	1350	1800
P1800		450	300	1050	1800	1550	2000
P2000		450	300	1250	2000	1850	2300
P2200		450	300	1450	2200	2050	2500
P2400		450	300	1650	2400	2250	2700

Rakentamiseen vaadittavien maa- ja kiviainesmassojen määrää voidaan havainnollistaa karkealla laskutoimituksella käyttämällä hyväksi poikkileikkausten yhteydessä määritettyjä pengerleveyden ja rakennemittojen arvoja. Jos esimerkiksi kuvan 6 poikkileikkauksen mukaista suoraa betonipölkkyraidetta rakennetaan 1 kilometri, maa- ja kiviainesmassoja vaaditaan rakennetyypin mukaan noin 5400–16200 m³. Jos rata rakennetaan pengertämällä, tarvitaan pengertäytteeksi soveltuvia maa- ja kiviainesmassoja vielä enemmän.

2.4 Ratarakenteissa käytetyt materiaalit

Ratarakenteille suunnitellaan lähtökohtaisesti pitkä elinkaari. Esimerkiksi uuden radan alusrakenteen käyttöikävaatimus on 100 vuotta (Liikennevirasto 2018). Rakennekerrosten toimivuuden ja pitkän elinkaaren varmistamiseksi rakenteissa käytettäville materiaaleille on asetettu tarkat laatuvaatimukset. Radan tukikerros rakennetaan pääsääntöisesti raidesepeleistä, jonka laatuvaatimukset perustuvat standardiin *Raidesepeleliviainekset (SFS-EN 13450)* sekä sen kansalliseen soveltamishojeeseen *Raidesepeleliviaineksilta vaadittavat ominaisuudet ja niille asetetut vaatimustasot (SFS 7007)*. Suomessa käytettävien radan alusrakenteen materiaalien laatuvaatimukset on puolestaan esitetty InfraRYL-tietokannassa. Kaikkien radan rakennekerroksissa käytettävien materiaalien tulee olla routimattomia eivätkä ne saa sisältää epäpuhtauksia, kuten eloperäistä ainesta. Käytettäviä materiaaleja ei myöskään saa valmistaa sekoittamalla eri raaka-ainelähteistä peräisin olevia materiaaleja keskenään. (InfraRYL, päivitysversio 2022/2) Radan rakennekerrokseen soveltuvien kiviainesten tulee lisäksi olla rapautumattomia, eivätkä ne saa sisältää haitallisessa määrin sellaisia mineraaleja, jotka rapautuvat herkästi tai ovat sähköä johtavia (Väylävirasto 2022b). Soveltuvien kiviainesten teknistä kelpoisuutta tutkitaan kiviaineksen mekaanista kestävyyttä kuvaavilla testausmenetelmillä. Varsinaisille kiviainestuotteille asetetaan näiden lisäksi myös geometrisia vaatimuksia.

Ratarakentamisessa käytettävien kiviainesten tärkeimmät geometriset ominaisuudet ovat rakeisuus ja raekokojakauma. Raekokojakauma määritetään standardissa *SFS-EN 933-1* esitetyn seulontamenetelmän mukaan. Edellisten lisäksi kiviaineksen muodolle on asetettu vaatimuksia, joita kuvataan muotoarvolla. Kiviaineksen muoto-ominaisuuksia mitataan standardissa *SFS-EN 933-4* esitetyn testimenetelmän mukaan mittaamalla rakeiden pituuden (L) ja paksuuden (E) välinen suhde. Rakeiden, joiden pituuden ja paksuuden suhde on yli 3, tulkitaan olevan pitkulaisia. Pitkulaisten rakeiden osuutta koko näytteen massasta kuvataan muotoarvolla SI. Muotoarvon vaatimusluokka SI_{20} tarkoittaa, että enintään 20 prosenttia kiviainesmassan rakeista sallitaan olevan pitkulaisia. (Kalliainen ym. 2018)

Ratarakentamisessa käytettävien kiviainesten tärkeimmät mekaaniset ominaisuudet ovat iskunkestävyys ja kulutuskestävyys. Rakeisen kiviaineksen iskunkestävyyttä kuvataan Los Angeles -luvulla ja hiovan kulutuksen kestävyyttä micro-Deval -arvolla, jotka määritetään standardeissa *SFS-EN 1097-1* ja *SFS-EN 1097-2* esitettyjen testimenetelmien mukaan. Micro-Deval-arvon määrittämistä varten kiviainesnäytteitä ja vettä pyöritetään koneellisesti rumpulaitteistolla, jolloin kivet hioutuvat toisiaan vasten. Los Angeles -luvun määrittämisessä käytetään myös koneellisesti pyörivää rumpulaitteistoa, mutta testimenetelmässä rumpuun lisätään testinäytteen lisäksi raskaita teräskuulia. Molemmissa

testimenetelmissä määritetään rummun pyörimisestä aiheutuvan kulutuksen jälkeen alle 1,6 mm kokoisten rakeiden painoprosentti testinäytteen alkuperäisestä massasta. Kiviaines kestää kulutusta sitä paremmin, mitä pienempiä testimenetelmillä määritetyt LA- ja micro-Deval-arvot ovat.

Kaikista rakennekerroksista tukikerrokseen kohdistuu toistuvasti suurimmat kuormitukset, mikä aiheuttaa tukikerroksessa käytettävän kiviaineksen vähittäisen jauhautumisen sekä haitallisen hienoaineksen muodostumisen tukikerrokseen (Nurmikolu 2000). Tästä syystä raidesepelillä on kaikista rakennekerroksista käytettävistä kiviaineksista korkeimmat laatuvaatimukset. Suomessa raidesepelille käytetään kolmea standardien mukaista rakeisuusluokkaa C, E ja F, joiden mukaista raidesepeleä käytetään eri laatutasoa vaativissa kohteissa seuraavasti (Väylävirasto 2021c):

- Luokka F: pääradat
- Luokka C: kuormaus- ja vaihtotyöalueet
- Luokka E: vähäliikenteiset radat ja sivuradat, joilla vuotuinen liikennemäärä on alle 1 Mbrt.

Kaikkien rakeisuusluokkien hienoainespitoisuus on luokkaa B, eli raidesepelissä ei saa olla alle 0,063 mm kokoisia rakeita yli yhtä painoprosenttia. Kaikkien rakeisuusluokkien muotoarvon on oltava SI_{20} . (Väylävirasto 2022b) Eri rakeisuusluokkien rakeisuusvaatimukset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Raidesepeleiden rakeisuusluokat C, E ja F ja niiden rakeisuusvaatimukset (Väylävirasto 2022b)

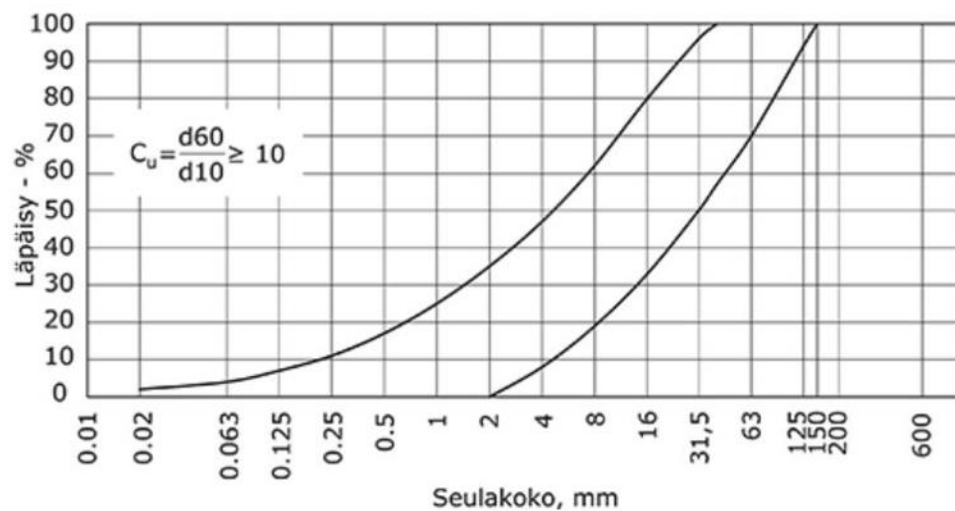
	Rakeisuusluokka ja läpäisy massaprosentteina		
Seulakoko (mm)	C	E	F
80	100	100	100
63	95...100	95...99	93...99
50	70...99	55...99	45...70
40	25...75	25...75	15...40
31,5	1...25	1...25	0...7
22,4 (*)	0...3	0...3	0...7
31,5...50	≥ 50	-	-
31,5...63	-	≥ 50	≥ 85

(* Seulaa 22,4 mm läpäisylle asetettuja vaatimuksia sovelletaan vain tuotantopaikalta otetulle raidesepeleinäytteelle. Tietyissä olosuhteissa 25 mm seulaa voidaan käyttää 22,4 mm seulan sijasta, tällöin raja-arvona käytetään 0...5 (luokassa F 0...7).

Raidesepelin kulutuskestävyyden tulee olla M_{DE11} ja iskunkestävyyden käyttökohteen mukaan LA_{RB12} , LA_{RB16} tai LA_{RB20} (Väylävirasto 2022b). Iskunkestävyysluokka valitaan rataosan vuotuisen liikennemäärän perusteella seuraavasti (Väylävirasto 2021c):

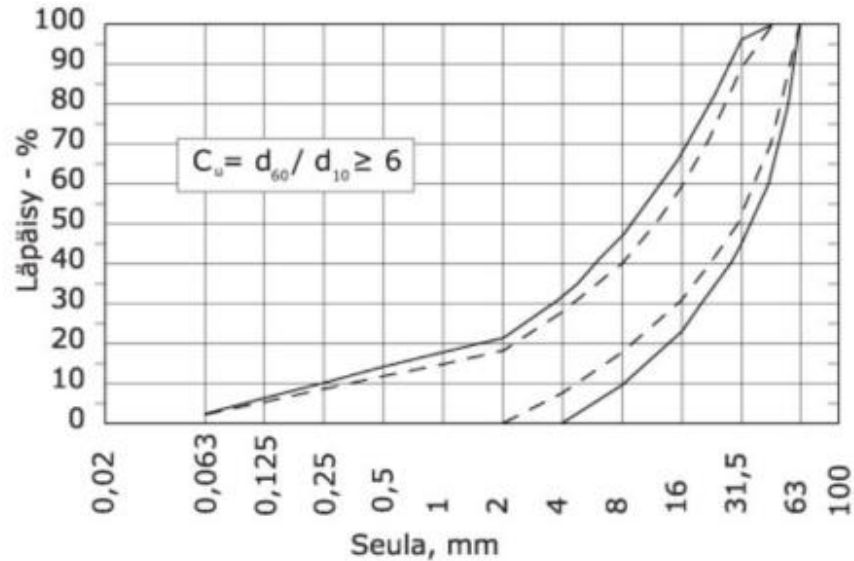
- LA_{RB12} : vuotuinen liikennemäärä ≥ 6 Mbrt
- LA_{RB16} : vuotuinen liikennemäärä > 3 Mbrt ja < 6 Mbrt
- LA_{RB20} : vuotuinen liikennemäärä ≤ 3 Mbrt.

Välikerroksen rakennusmateriaaleina käytetään routimatonta soraa tai kalliomurskettä. Jos rakennusmateriaalina käytetään soraa, tulee sen rakeisuus ja raekokosuhte olla kuvan 7 mukaiset. (InfraRYL, päivitysversio 2/2022)



Kuva 7. Välikerroksessa käytettävän soran rakeisuusvaatimukset (InfraRYL 2022).

Jos eristyskerros rakennetaan kalliomurskeesta, rakennetaan välikerros samanaikaisesti samasta, eristyskerroksen vaatimukset täyttävästä kalliomurskeesta. Väli- ja eristyskerroksessa käytettävän kalliomurskeen rakeisuusvaatimukset ja raekokosuhte on esitetty kuvassa 8. (InfraRYL, päivitysversio 2022/2)



Kuva 8. Eristys- ja välikerroksessa käytettävän kalliomurskeen rakeisuusvaatimukset (InfraRYL 2022).

Eristyskerroksen yläosassa käytettävillä kiviaineksilla on korkeammat laatuvaatimukset kuin alaosassa käytettävillä kiviaineksilla, minkä vuoksi eristyskerros rakennetaan ensisijaisesti yläosan laatuvaatimukset täyttävästä sorasta. Eristyskerroksen alaosa voidaan rakentaa myös alaosan laatuvaatimukset täyttävästä hiekasta tai kalliomurskeesta. (InfraRYL, päivitysversio 2022/2)

Eristys- ja välikerroksessa käytettäville kiviaineksille asetetut, standardiin SFS-EN 13242 perustuvat lujuusvaatimukset on esitetty taulukossa 3. Esitetyistä lujuusvaatimuksista toinen saa ylittyä, kunhan niiden summalle asetettu vaatimus toteutuu. (InfraRYL, päivitysversio 2/2022).

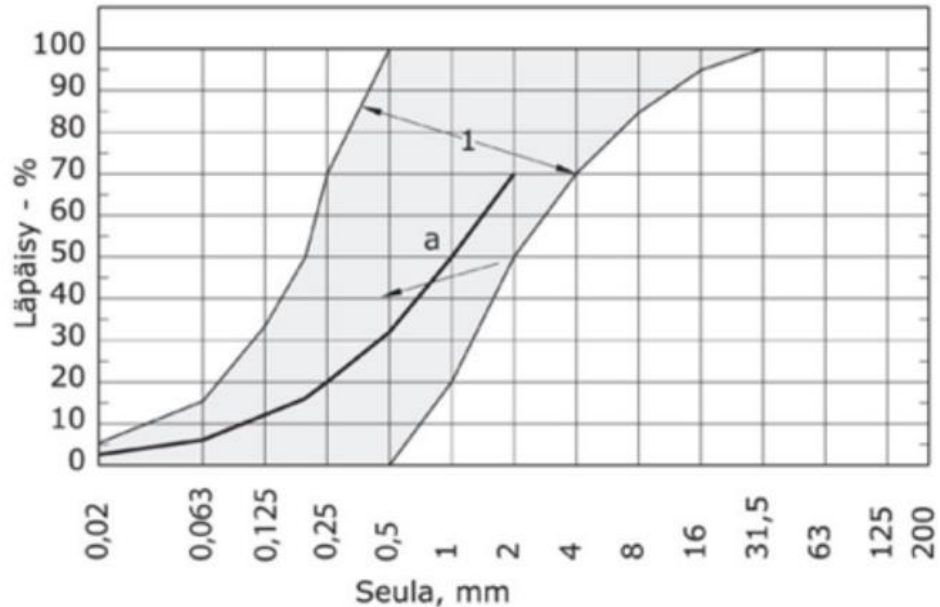
Taulukko 3. Eristys- ja välikerrosten kiviainesten lujuusvaatimukset (InfraRYL 2022).

Suure	Luku/arvo	Luokka
Los Angeles -luku ¹⁾	LA ≤ 30	LA ₃₀
micro-Deval-arvo ²⁾	M _{DE} ≤ 15	M _{DE} 15
Σ LA + M _{DE}	< 45	
¹⁾ Määritetään standardin SFS-EN 1097-2 mukaisesti		
²⁾ Määritetään standardin SFS-EN 1097-1 mukaisesti		

Suodatinkerroksen tehtävänä on estää eristyskerroksen ja pohjamaan sekoittuminen (Liikennevirasto 13/2018). Suodatinkerroksen tarve määritellään rakeisuusehdolla

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5, \text{ missä}$$

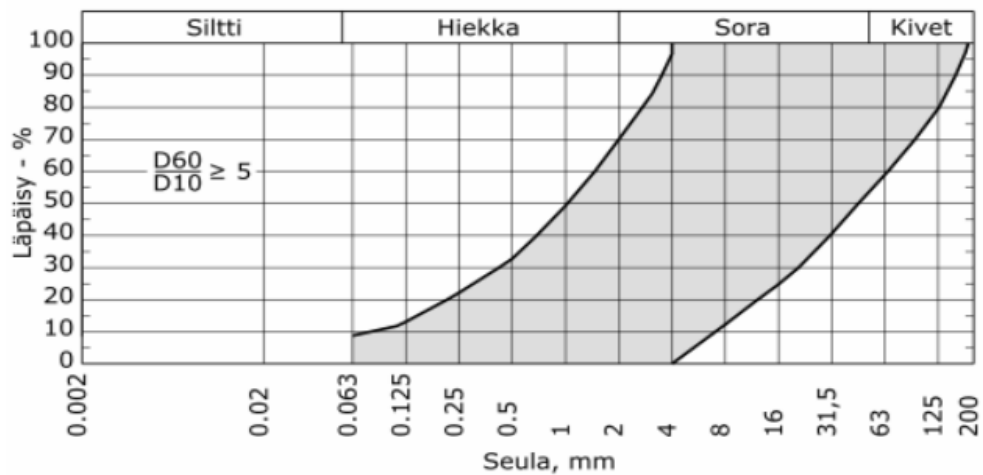
D_{15} on eristyskerrosmateriaalin läpäisyprosenttia 15 vastaava raekoko ja d_{85} pohjamaan läpäisyprosenttia 85 vastaava raekoko. Jos ehto ei täyty, tarvitaan erillinen suodatinkerros. Suodatinkerros rakennetaan kiviaineksesta, joka täyttää kuvassa 9 esitetyt rakeisuusvaatimukset. Suodatinkerros voidaan myös korvata suodatinkankaalla. (InfraRYL, päivitysversio 2/2022)



Kuva 9. Suodatinkerroksessa käytettävän kiviaineksen tai uusiomateriaalin rakeisuusvaatimukset (InfraRYL, päivitysversio 2/2022).

Suodatinkerroksen tulee normaalisti olla alueella 1, eikä rakeisuuskäyrä saa ylittää a- kirjaimella merkittyä viivaa nuolen suunnassa (InfraRYL, päivitysversio 2/2022).

Pengertäytteeseen rakennusmateriaalina voidaan käyttää hiekkaa sekä hiekkaa karkeampia maalajeja, näitä vastaavia moreenimaalajeja sekä rakeisuusvaatimukset täyttävää kalliomursketta. Penkereessä käytettävän materiaalin tulee olla homogeenista ja sen jälkitiivistämisen tulee olla vähäistä. Pengertäytteessä käytettävän kalliomurskeen rakeisuusvaatimukset on esitetty kuvassa 10. (InfraRYL, päivitysversio 2/2022)



Kuva 10. Pengertäytteessä käytettävän kalliomurskeen rakeisuusvaatimukset (InfraRYL, päivitysversio 2/2022).

Suodatinkerroksessa ja pengertäytteessä voidaan käyttää myös vaatimukset täyttäviä ja tilaajan hyväksymiä uusiomateriaaleja. Uusiomateriaaleille käytetään soveltuvin osin luonnon kiviaineksille asetettuja laatuvaatimuksia ja niiden tulee täyttää lainsäädännössä ja ympäristöluvissa määritetyt ympäristökelpoisuusehdot. (InfraRYL, päivitysversio 2/2022). Maarakentamisessa käytettäviä uusiomateriaaleja muodostuu muun muassa rakennusteollisuudesta (esim. betonimurske), jätteenpoltosta (esim. jätteenpolton kuona), metalliteollisuudesta (esim. masuunikuona, valimohiekka) sekä kaivosteollisuudesta (esim. sivukivi, rikastushiekka) (Forsman ym. 2020).

2.5 Massatalouden suunnittelu

Radan rakentaminen edellyttää laajoja maanrakennustöitä, sillä vaadittavan ratageometrian ja radan rakenteen toteuttaminen vaihtelevaan maastoon edellyttää maan siirtämistä, louhintaa sekä kasvillisuuden poistoa. Massatalouden suunnittelulla tarkoitetaan radan rakentamisen aikana kaivettavien ja siirrettävien maa- ja kalliomassojen käsittelyn suunnittelua ja hallintaa (Lindholm & Junnonen 2012). Massatalouden suunnittelun lähtökohtana on pyrkiminen massatasapainoon ja hankkeessa muodostuvien maa- ja kiviainesmassojen mahdollisimman tehokkaaseen hyödyntämiseen hankkeen sisällä. Massatasapainolla tarkoitetaan tilannetta, jossa hanke on maa- ja kiviainesten suhteen mahdollisimman omavarainen ja jossa massojen kuljetukset on minimoitu (Helsingin kaupunki 2019). Rakennettavan väylän suunnittelussa tulisi lisäksi pyrkiä suunnitteluratkaisuihin, joissa leikattavien maa- ja kalliomassojen laatu on mahdollisimman hyvä ja leikattavien massojen kokonaismäärä mahdollisimman pieni, mutta kuitenkin riittävä

hankkeen massatarpeisiin (Lindholm & Junnonen 2012). Käytännössä kaikkia rakentamisessa tarvittavia maa- ja kiviainesmassoja ei kuitenkaan saada ratalinjalta, vaan materiaaleja joudutaan hankkimaan myös ulkopuolisilta toimittajilta.

Ratahankkeessa massatalouden suunnittelu kytkeytyy tiiviisti osaksi hankkeen kustannuksien arviointia eli kustannuslaskentaa. Väylähankkeissa keskeisimmät päätökset tehdään kustannusarvioiden perusteella, mikä korostaa kustannuslaskelmien ja siten myös massalaskelmien luotettavuuden merkitystä (Manninen 2009). Tästä huolimatta tarkkoja massataloussuunnitelmia ei yleisesti tehdä yleissuunnitelmavaiheessa (Väylävirasto 2021d). Massalaskenta on työläs ja aikaa vievä työvaihe, minkä vuoksi sillä saavutettavat hyödyt koetaan yleissuunnitelmavaiheessa vähäisiksi vaadittavaan työmäärään nähden (YIV 2019). Toisaalta yksityiskohtaisten massatarkastelujen tekemistä yleissuunnitelmavaiheessa ei koeta mielekkääksi lähtötietojen epätarkkuuden vuoksi (Manninen 2009). Yleissuunnitelmavaiheessa on usein käytettävissä vain alustavia tietoja ja arvioita leikattavien massojen laadusta, mikä lisää massatalouden suunnitteluun ja siten myös kustannuslaskentaan liittyvää epävarmuutta. Lisäksi esi- ja yleissuunnittelua ohjaavat suurelta osin ympäristö ja muu maankäyttö, jolloin massatalouden suunnittelu ei välttämättä nouse suunnittelua ohjaavaksi tekijäksi. (Lindholm & Junnonen 2012) Massatalouden suunnittelun tueksi on olemassa ohjelmistoja ja prosesseja tukevia järjestelmiä, mutta niiden sovittaminen osaksi suunnitteluprosessia saatetaan kokea haastavaksi (Manninen 2009).

Alustava massataloussuunnitelma laaditaan ratasuunnitelmavaiheessa, jolloin kaikki maa- ja kalliroleikkauksista muodostuvat sekä rakenteisiin tarvittavat massamäärät ovat tiedossa. Suunnitelmassa esitetään karkealla tasolla hankkeessa muodostuvat massat, hankkeen massatarpeet materiaaleittain ja käyttökohteittain sekä sijoitusalueille toimitettavat ylijäämäiset maa- ja kiviainesmassat. Lisäksi suunnitelmassa kuvataan maa- ja kiviainesten ottoalueet ja massojen sijoitusalueet. (Väylävirasto 2022b) Massatalouden suunnittelua tarkennetaan suunnittelun edetessä (Lindholm & Junnonen 2018). Massataloussuunnitelman yhteydessä selvitettäviä tekijöitä on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Alustavassa massataloussuunnitelmassa selvitettävät tekijät (Väylävirasto 2022b)

OTTOALUEET	SIJOITUSALUEET
<ul style="list-style-type: none"> • Hankkeessa tarvittavat maa- ja kiviainesmassat • Maanrakennusmateriaalien saatavuus ratalinjalta • Maa-ainesten ottoapaikat sekä niistä otettavat määrät • Ulkopuolelta hankittavat maanrakennusmateriaalit • Maanoton ja kuljetusten kustannukset ja ympäristövaikutukset • Ottoalueiden jälkihoitotoimenpiteet 	<ul style="list-style-type: none"> • Sijoitettavien massojen laatu ja määrät • Sijoitusalueiden sijainnit ja kelpoisuus sijoitusalueiksi • Sijoitusten ja kuljetusten kustannukset ja ympäristövaikutukset • Pilaantuneiden maiden käsittely ja sijoitusalueet • Sijoitusalueiden vaatimat pato- ja suojarakenteet sekä kuivatustoimenpiteet • Sijoitusalueiden maisemointi

Pelkkä massatasapainoon pyrkiminen itsessään ei ole riittävä tavoite, vaan suunnittelussa tulisi pyrkiä löytämään hankeohjelman tavoitteita tukevia ratkaisuja esimerkiksi kustannuksien suhteen. Vaihtoehtoisia suunnitteluratkaisuja voidaan etsiä muun muassa muuttamalla radan poikkileikkausta, etsimällä vaihtoehtoisia rakennusmateriaaleja, jatkojalostamalla heikkolaatuisia leikkausmassoja ja siten parantamalla niiden hyödyntämismahdollisuuksia hankkeen sisällä, sekä etsimällä sijoitettaville massoille muita käyttökohteita esimerkiksi meluvälillä tai maisemointitöissä. (Lindholm & Junnonen 2012)

Ratasuunnitelmavaiheessa tehdyn massataloussuunnitelman perusteella arvioidaan massojen kuljetusmatkat eli laaditaan massansiirtosuunnitelma. Massojen siirrot ja niiden kustannukset määritellään hankekohtaisesti erikseen sovittavilla tavoilla. Leikkaus- ja pengermassojen sekä päällysrakenteiden massojen kuljetusetäisyytenä voidaan käyttää esimerkiksi yhtä lukuarvoa, joka kuvaa tyypillisintä kuljetusetäisyyttä hankkeella. (Väylävirasto 2021d) Massojen kuljetuksilla on huomattavat vaikutukset hankkeen kustannuksiin, sillä esimerkiksi kiviaineksen hinnasta noin puolet muodostuu kuljetuskustannuksista (Lonka & Loukola-Ruskeeniemi 2015). Massojen kuljetuksesta aiheutuu myös päästöjä, joiden määrä on suoraan verrannollinen kuljetusmatkoihin ja kuljetettavien massojen määrään (Väylävirasto 2020a). Näistä seikoista huolimatta massojen siirroista aiheutuvat todelliset kustannukset ja päästöt jäävät suunnitteluvaiheissa määrittämättä (Manninen 2009).

Rakennussuunnitteluvaiheessa massatalouden suunnittelun painopiste siirtyy enemmän työjärjestyksen suunnitteluun sekä rakenteiden mitoitukseen. Ratasuunnitelmavaiheessa tehtyä massansiirtosuunnitelmaa tarkennetaan suunnittelijan ilmoittamien massamäärien ja massojen kelpoisuuden mukaan ja suunnitelma sovitetaan rakentamisen aikatauluun. Rakennussuunnitteluvaiheessa massataloutta tulisi pyrkiä edelleen parantamaan etsimällä ja toteuttamalla sitä hyödyttäviä toimenpiteitä. (Lindholm & Junnonen 2012) Rakennussuunnittelu- ja rakentamisvaiheessa massansiirtosuunnitelman laadinnassa noudatetaan muun muassa seuraavia periaatteita:

- Kaikki käyttökelpoiset massat käytetään niiden laadun perusteella ensisijaisissa kohteissa
- Heikkolaatuisia massoja leikataan mahdollisimman vähän
- Massojen välivarastointia vältetään
- Rakentamisessa huomioidaan vuodenaikojen vaikutus
- Kuljetusmatkat pidetään mahdollisimman lyhyinä
- Kuljetuksissa suositaan meno-paluukuljetuksia
- Suunnittelussa huomioidaan hankkeen ulkopuoliset maanrakennuskohteet, joihin voidaan toimittaa ylijäämäisiä massoja tai joista voidaan saada hankkeessa tarvittavia massoja (Lindholm & Junnonen 2012).

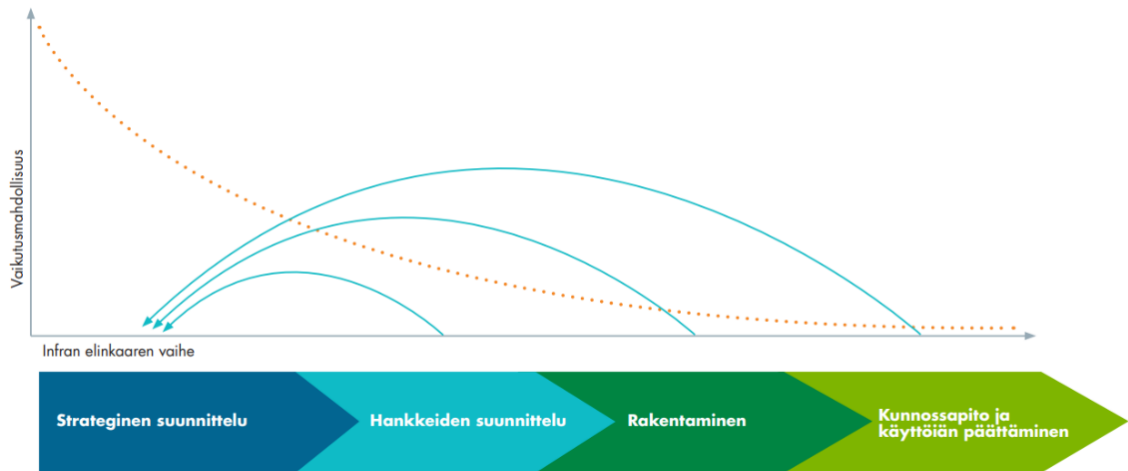
Massatalouden suunnittelussa on monia suunnittelua vaikeuttavia erikoispiirteitä verrattuna muuhun työjärjestyksen suunnitteluun. Kaivettavat maalajit ovat päinvastaisessa järjestyksessä niiden tarpeeseen nähden, sillä ensimmäisenä kaivettava maakerros käytetään lähes aina vasta viimeisinä töinä tehtäviin täyttöihin. Aikataulusuunnittelun haasteena on puolestaan samanaikaisten työtehtävien suuri määrä ja samaan ketjuun kuuluvien työtehtävien suorittaminen samanaikaisesti kahdessa eri paikassa. Yhden työvaiheen viivästyminen saattaa siten heijastua useisiin kohteisiin työmaalla. (Lindholm & Junnonen 2012)

3. KESTÄVÄ INFRARAKENTAMINEN

3.1 Infrarakentaminen osana kestävästä kehitystä

Suomen valtioneuvoston (2020) mukaan kestävä kehitys voidaan määritellä ihmisen hyvinvoinnin toteutumiseksi maapallon kantokyvyn asettamien rajojen sisällä. Saman määritelmän mukaan kestävä kehitys voidaan jakaa kolmeen eri ulottuvuuteen, jotka ovat ekologinen, sosiaalinen ja taloudellinen kestävyys. Ekologinen kestävyys kuvaa maapallon kantokyvyn rajoja ja sisältää muun muassa luonnon monimuotoisuuden säilyttämisen, ilmastonmuutoksen hillitsemisen sekä kiertotalouden periaatteiden edistämisen. Sosiaalinen kestävyys sisältää ihmisen hyvinvointiin liittyvät tekijät, kuten terveyden, toimeentulon sekä tasa-arvon turvaamisen. Taloudellinen kestävyys kuvaa yhteiskunnan toiminnan ja palveluiden järjestämistä kestävästi sekä tuotannon ja kulutustottumusten kestävyttä. Kestävän kehityksen eri ulottuvuudet ovat monin eri tavoin kytköksissä toisiinsa, minkä vuoksi eri kestävyiden parantamiseen tähtäviä toimia tulisi aina tarkastella kaikista kestävyiden näkökulmista. (Valtioneuvosto 2020)

Vaikutusmahdollisuudet rakennettavan infran kestävyteen eivät ole samat eri elinkaaren vaiheissa. Vaikka rakennettavan infran kestävyteen voidaan vaikuttaa kaikissa elinkaaren vaiheissa, vaikutusmahdollisuudet ovat suurimmat hankkeen alussa, aikaisissa suunnitteluvaiheissa sekä jokaisen uuden vaiheen alussa. Näissä vaiheissa on eniten mahdollisuuksia ja liikkumavaraa päätöksenteon, suunnitteluratkaisujen sekä mahdollisesti uusien, innovatiivisten käytäntöjen kehittämisen näkökulmasta. Koska jokainen uusi vaihe käynnistetään edellisen vaiheen lopputuloksesta käsin, kussakin vaiheessa tehdyt kestävyteen liittyvät ratkaisut periytyvät seuraavaan vaiheeseen, ja vaikutusmahdollisuudet kestävyteen pienenevät hankkeen loppua kohden. (Fenner & Ainger 2009) Vaikutusmahdollisuuksia rakennettavan infran kestävyteen on havainnollistettu kuvassa 11.



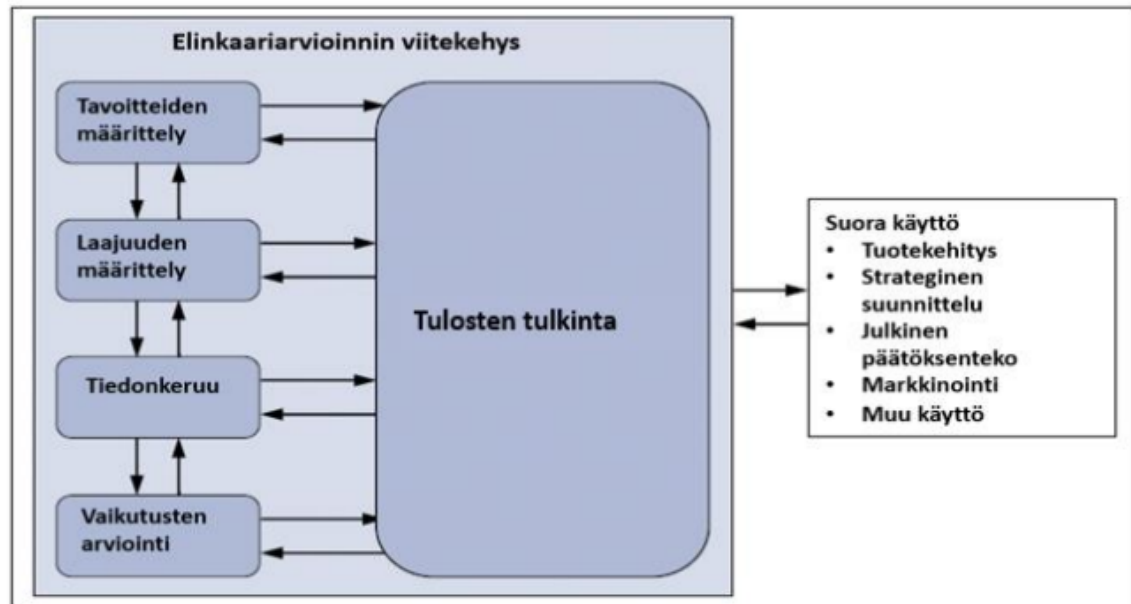
Kuva 11. Vaikutusmahdollisuudet rakennettavan infran kestävyyyden elinkaaren eri vaiheissa (Green Building Council Finland 2021).

3.2 Infrarakenteiden elinkaariarviointi

Kestävän infrarakentamisen määritelmän mukaan infrarakenteen kestävyttä tulee tarkastella kokonaisvaltaisesti koko rakenteen elinkaaren ja arvoketjun osalta. Infrarakenteilla on pitkä elinkaari ja kestäväällä suunnittelulla, rakentamisella ja kunnossapidolla voidaan vaikuttaa rakenteen käyttöikäen ja koko elinkaaren aikaisiin vaikutuksiin. (Green Building Council Finland 2021)

Yleisimmin käytetty elinkaariarviointimenetelmä on LCA eli *Life Cycle Assessment*, jota käsitellään ISO-standardeissa 14040 ja 14044. LCA:n tavoitteena on selvittää tuotteen tai palvelun koko elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset raaka-aineiden hankinnasta ja tuotteen valmistuksesta aina tuotteen hylkäämiseen asti. Sosiaalisia ja taloudellisia vaikutuksia ei yleisesti sisällytetä LCA:han. (Klöpffer & Grahl 2014) LCA:ta käytetään tyypillisesti vaihtoehtoisten tuotteiden tai palveluiden ympäristövaikutusten vertailuun, jotta saataisiin selville, mikä vaihtoehto on ympäristölle vähiten haitallinen (Horne ym. 2009). Elinkaariarvioinnin avulla voidaan myös varmistaa, että suunnitellut toimenpiteet vaikuttavat ympäristöä säästävasti, eivätkä siirrä esimerkiksi hiilidioksidipäästöjä yhdestä elinkaaren vaiheesta toiseen (Merenheimo ym. 2018).

LCA koostuu neljästä pakollisesta vaiheesta, jotka ovat tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely (*goal and scope*), inventaarioanalyysi (*life cycle inventory, LCI*), vaikutusten arviointi (*impact assessment*) ja tulosten tulkinta (*interpretation*). Elinkaariarvioinnin vaiheet on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Elinkaariarvioinnin vaiheet (Väylävirasto 2020b).

Ensimmäisessä vaiheessa, eli tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyssä, määritellään elinkaariarvioinnin tavoite ja tarkoitus, tutkittava tai tutkittavat tuotteet tai palvelut sekä tutkimuksen kohteena oleva toiminnallinen yksikkö. Ensimmäisessä vaiheessa määritellään myös elinkaariarvioinnin laajuus eli tarkasteltavat elinkaaren vaiheet ja tutkittavat ympäristövaikutukset. LCA on iteratiivinen prosessi, eli tavoitteet ja soveltamisala voivat muuttua arvioinnin edetessä. Toisessa vaiheessa, inventaarioanalyysissä, kerätään tarvittavat tiedot arvioinnin kohteena olevan tuotteen tai palvelun elinkaaren ajalta. Inventaarioanalyysi kattaa kaikki palvelun tai tuotteen elinkaaren aikaiset materiaali- ja energiavirrat sekä näiden aikana muodostuvat ympäristövaikutukset toiminnalliseen yksikköön suhteutettuna. Kolmannessa vaiheessa, vaikutusten arvioinnissa, arvioidaan inventaarioanalyysissä kerättyjen tietojen avulla tuotteen tai palvelun ympäristövaikutukset arvioinnin tekijän valitsemissa vaikutusluokissa. Vaikutusten arvioinnissa keskeistä on vaikutusten karakterisointi eli muuntaminen valittuihin vaikutusluokkiin, jolloin tulokset ovat vertailukelpoisia vastaavien tutkimusten kanssa. Vaikutukset esitetään ensimmäisessä vaiheessa valittua toiminnallista yksikköä kohden. Viimeisessä vaiheessa tulkitaan inventaarioanalyysin ja vaikutusten arvioinnin tulokset, muodostetaan johtopäätökset sekä esitetään toimintasuositukset. (Klöpffer & Grahl 2014) LCA:n vaiheet on kuvattu yksityiskohtaisemmin standardeissa *Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework (ISO 14040:2006)* ja *Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)*.

Puitestandardin *Sustainability of Construction Works. Framework for Assessment of Buildings and Civil Engineering Works (SFS-EN 15643:2021)* mukaan infrarakenteen

elinkaari muodostuu tuotevaiheesta (vaiheet A1-A3), rakentamisvaiheesta (vaiheet A4-A5), käyttövaiheesta (vaiheet B1-B8) sekä elinkaaren loppuvaiheesta (vaiheet C1-C4). Elinkaaren vaiheet voidaan jakaa vielä pienempiin osiin eli elinkaari-moduuleihin, jotka on esitetty taulukossa 5. Elinkaari-moduulien tarkat sisällöt on kuvattu standardissa *Sustainability of Construction Works – Environmental Product Declarations – Core Rules for The Product Category of Construction Products (SFS-EN 15804:2012+A2:2019)*.

Taulukko 5. *Infrahankkeen elinkaariarvioinnissa tarkasteltavat moduulit standardin SFS-EN 15643:2021 mukaan*

Yhdyskuntateknisten hankkeiden elinkaaren vaiheet				
A0 Esivalmistelu	A1-3 Tuote	A4-5 Rakentaminen	B1-8 Käyttö	C1-4 Elinkaaren loppu
A0 Tutkimukset, kustannuslaskenta konsultaatiot	A1 Raaka-aineiden hankinta A2 Kuljetus A3 Tuotanto	A4 Kuljetus A5 Asentaminen	B1 Käyttö B2 Kunnossapito B3 Korjaaminen B4 Korvaaminen B5 Kunnostus B6 Energiankulutus B7 Muut prosessit B8 Käyttäjien toiminta	C1 Purkaminen C2 Kuljetus C3 Uudelleenkäyttö ja kierrätys C4 Loppusijoittaminen
D Täydentävä informaatio elinkaaren vaiheiden aikana				
Tuotejärjestelmän hyödyt ja kuormitukset Kierrätys- ja uudelleenkäyttöpotentiaali Vaihtoehtoisen käytön vältetyt vaikutukset				

Infrahankkeiden elinkaariarviointien tuloksissa on havaittu esiintyvän paljon vaihtelua, eivätkä samanlaisista rakennushankkeista tai -materiaaleista tehdyt elinkaariarviointien tulokset ole välttämättä vertailukelpoisia keskenään. Tulosten eroavaisuudet ovat peräisin useista lähteistä, kuten epäyhtenäisistä laskentatavoista tai soveltamisalan, vaikutusluokkien, käytettävien tietojen ja vaikutusluokkien määrittelystä. (Väylävirasto 2020b)

Väyläviraston julkaisussa *Tie- ja raitinfrakstruktuurin elinkaariarvioinnin opas (2020b)* annetaan ohjeita infrahankkeiden elinkaariarvioinnin tekemiseen ja se on laadittu yhdenmukaisempien ja vertailukelpoisempien tulosten saavuttamiseksi. Opas perustuu edellä esiteltäviin elinkaariarvioinnin standardeihin, minkä lisäksi opas käsittelee tie- ja rautatieinfrastruktuurin arviointiin liittyviä erityiskysymyksiä, vähentää standardien tulkinnanvaraisuutta ja huomioi tie- ja rautatieliikenteeseen kehitetyt tuoteryhmäsäännöt. Opas annetaan ohjeita muun muassa toiminnallisen yksikön valintaan, kerätyn tiedon laadun arviointiin sekä vaikutusluokkien valintaan eri suunnitteluvaiheissa. Esimerkiksi esi- ja tarveselvityksissä on tarkoituksenmukaista valita toiminnalliseksi yksiköksi valmis hanke, jolloin elinkaariarvioinnin tulokset raportoidaan koko hankkeen kokonaisuutena. Myöhemmissä suunnitteluvaiheissa toiminnalliseksi yksiköksi soveltuu paremmin yksi

tie- tai ratakilometri, jolloin tulokset esitetään yhtä tie- tai ratakilometriä kohden yhdessä kaistojen tai raiteiden lukumäärän ja ajoneuvotyypin kanssa. Tulokset voidaan esittää esimerkiksi hankkeen hiilidioksidipäästöinä kaksiraiteisen radan yhtä ratakilometriä kohden, kun ajoneuvotyyppinä on suurnopeusjuna. (Väylävirasto 2020b)

3.3 Infrarakentamisen hiilidioksidipäästöt

Rakennettu ympäristö on yksi merkittävimmistä päästölähteistä Suomessa. Rakennusteollisuuden selvityksen (2020) mukaan rakennettu ympäristö muodostaa noin kolmasosan koko Suomen hiilidioksidipäästöistä, minkä vuoksi rakennusalan päästöjen vähentäminen on välttämätöntä kansallisten päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi. Infrarakentamisen osalta suurimmat päästöt muodostuvat rakennusmateriaaleista, jotka ovat päästöintensiivisiä joko niiden valmistuksen (esim. betoni, teräs) tai kuljetusmäärien vuoksi (maa- ja kiviainekset) (Teittinen ym. 2020).

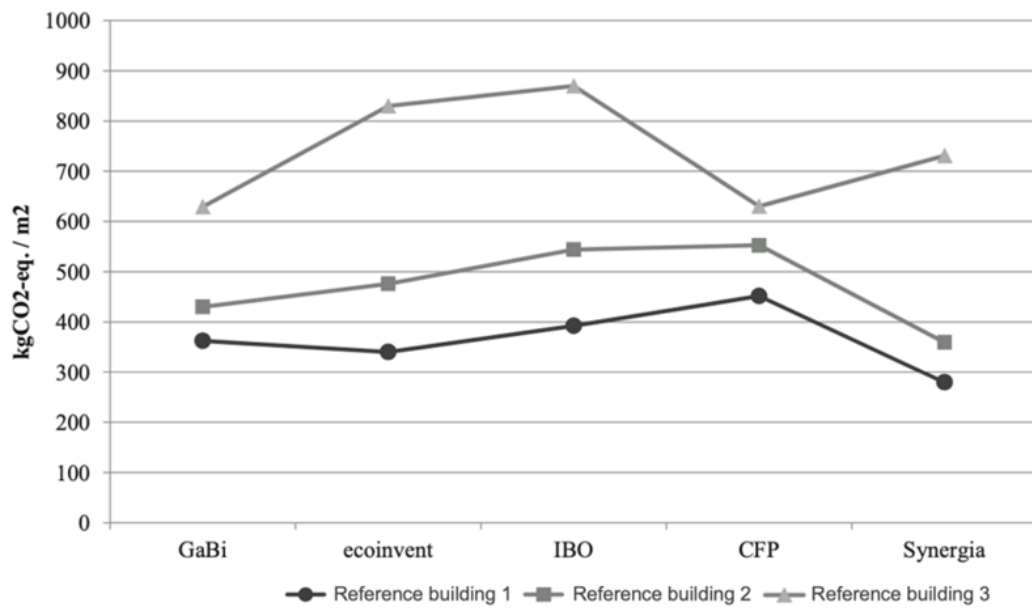
Kestävien suunnitteluratkaisujen tekeminen edellyttää tietoa infrarakentamisen päästöistä, jota tuotetaan päästölaskennan avulla. Päästölaskennan tavoitteena on tuottaa tietoa hankkeen elinkaaren aikaisista hiilidioksidipäästöistä sekä vertailla eri ratkaisujen vaikutusta hankkeen kokonaispäästöihin. Päästölaskenta voi myös kohdistua vain tiettyyn osaan tarkasteltavan kohteen elinkaaresta tai tiettyjen materiaalien päästöjen vertailemiseen. Päästölaskenta tulisi sisällyttää osaksi suunnittelua mahdollisimman aikaisin, sillä vaikutusmahdollisuudet päästöjen vähentämiseksi pienenevät hankkeen loppua kohti. Toisaalta päästölaskennan tulisi olla kiinteä osa suunnittelua myös myöhemmissä suunnitteluvaiheissa, sillä laskennan tarkkuustaso paranee suunnitelmien tarkentuessa. (Teittinen ym. 2020)

Yksi päästölaskennan muoto on hiilijalanjäljen laskeminen (*carbon footprint*), jossa huomioidaan ainoastaan tarkasteltavan kohteen ilmastonmuutos-vaikutusluokka (*global warming potential, GWP*) eli elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt. Hiilijalanjäljen laskeminen noudattaa LCA:n periaatteita ja on siten yksinkertaistettu versio elinkaariarvioinnista. Hiilijalanjälki ilmaistaan yksikössä hiilidioksidiekvivalentti (CO₂-ekv.), joka kuvaa eri kasvihuonekaasujen vaikutusta ilmakehässä muunnettuna hiilidioksidin ilmastoalämmittäväksi vaikutukseksi. Hiilikädenjälki (*carbon handprint*) on tarkasteltavan kohteen myötä muodostuvien ilmastohyötyjen mittari, ja se ilmoitetaan hiilijalanjäljentapaan yksikössä CO₂-ekv. Hiilikädenjälkeen laskettavia ilmastohyötyjä ovat muun muassa rakennusmateriaaleihin sitoutunut eloperäinen hiili ja hankkeen myötä vältetyt kasvihuonekaasupäästöt. Hiilikädenjälkeä ei vähennetä hiilijalanjäljestä, vaan se esitetään negatiivisena lukuna. Hiilikädenjälki on rakennusalalla vielä suhteellisen uusi käsite. (Teittinen ym. 2020)

Päästölaskentaa voidaan tehdä perinteisillä taulukkolaskentaohjelmilla tai laskentaan erikoistuneilla ohjelmistotyökaluilla (Teittinen ym. 2020). Suomessa infrarakentamisen päästölaskentaa on tehty muun muassa Fore- ja One Click LCA -ohjelmilla. Fore on infrahankkeiden määrä- ja kustannuslaskentaan tarkoitettu ohjelmisto, joka hyödyntää kustannuslaskentaa varten koottuja määrätietoja päästölaskennan pohjana. One Click LCA ja sen infrastruktuurityökalu taas laskee päästöt siihen syötetyn määräluettelon perusteella. (Häkkinen ym. 2022) Väylävirasto on lisäksi tutkinut päästölaskennan toteuttamista kustannuslaskentaan tarkoitettulla lhku-työkalulla, jolloin päästötietoja voitaisiin käsitellä ja päivittää samanaikaisesti kustannustietojen kanssa. Päästölaskennan suora integroiminen kustannuslaskentaan mahdollistaisi laskelmien yhteneväisyyden ja helpotaisi päästötietojen hyödyntämistä suunnittelun ohjauksessa ja päätöksenteon tukena. (Peltola ym. 2022)

Päästölaskenta perustuu niin kutsuttuihin päästökertoimiin eli tuotteiden ja materiaalien, kuljetusten ja työsuoritteiden keskimääräisiin päästötietoihin (Teittinen ym. 2020). Päästötiedon keskeisiä lähteitä infra-alalla ovat päästötietokannat, joissa julkaistaan tuotteiden ja materiaalien ympäristövaikutukset sisältäviä ympäristöselosteita (*environmental product declarations, EPD*). Suomalaisissa rakennushankkeissa merkittävimpiä tietolähteitä ovat ne tietokannat, jotka sisältävät kotimaisten tuotteiden ja materiaalien ympäristöselosteita. Kotimaisten tietokantojen lisäksi tietoa voidaan kansainvälisistä tietokannoista. (Peltola ym. 2022) Esimerkkejä yleisesti käytetyistä kansainvälisistä tietokannoista ovat muun muassa Ecoinvent, Environdec sekä ICE (*Inventory of Carbon and Energy*). Osa tietokannoista vaatii käyttäjältään lisenssin, kun taas jotkut tietokannat ovat kaikille käyttäjille avoimia ja maksuttomia.

Päästötietokannan valinta ja käytettyjen päästökertoimien laatu vaikuttavat päästölaskennan lopputuloksiin (Teittinen ym. 2020). Kuvan 13 esimerkissä Takano ym. (2014) tutkivat kolmen eri rakennuskohteen tuotevaiheen päästöjä viiden eri päästötietokannan (GaBi, Ecoinvent, IBO, CFP ja Synergia) päästökertoimien avulla. Tutkimuksessa eri päästötietokantojen avulla tehtyjen laskelmien tulokset poikkesivat toisistaan kuvan 13 mukaisesti. Vaikka tulokset noudattelivat samoja trendejä, niissä havaittiin osittain myös suurta vaihtelua (Takano ym. 2014).



Kuva 13. Kolmen rakennuskohteen tuotevaiheen (A1-A3) hiilidioksidipäästöt viiden eri päästötietokannan avulla laskettuna (Takano ym. 2014).

Suomessa tehtävissä päästölaskennoissa on otettava huomioon, että kansainvälisistä tietokannoista haetut päästötiedot eivät välttämättä vastaa Suomen olosuhteita (Teittinen ym. 2020). Tämän sekä päästötietokantojen välillä esiintyvien eroavaisuuksien vuoksi Takano ym. (2014) ehdottavat tutkimuksessaan kansallisen päästötietokannan laatimista. Selkeä ja paikallista tietoa sisältävä tietokanta olisi käyttäjäystävällinen vaihtoehto päästölaskennan asiantuntijoiden lisäksi myös suunnittelijoille ja urakoitsijoille (Takano ym. 2014).

Suomessa julkaistiin vuonna 2021 ensimmäinen kaikille avoin rakentamisen päästötietokanta CO2data, jonka on kehittänyt Suomen ympäristökeskus (SYKE) yhteistyössä rakennustuotteiden ja rakennusten elinkaariarvioinnin asiantuntijoiden kanssa. Tietokanta sisältää päästötiedot noin 250 tuotteelle, palvelulle tai järjestelmälle (Häkkinen ym. 2022). Tietokannan laatimisen päämääränä on ollut yhdenmukaistaa rakentamisen elinkaariarviointeja ja ilmastovaikutusten laskentaa sekä edistää vähähiillistä rakentamista Suomessa (Peltola ym. 2022). Tietokanta on askel kohti vertailukelpoisempia elinkaariarvioinnin ja ilmastovaikutusten laskennan tuloksia suomalaisissa rakennushankkeissa (CO2data, hiilineutraalisuomi.fi 2022).

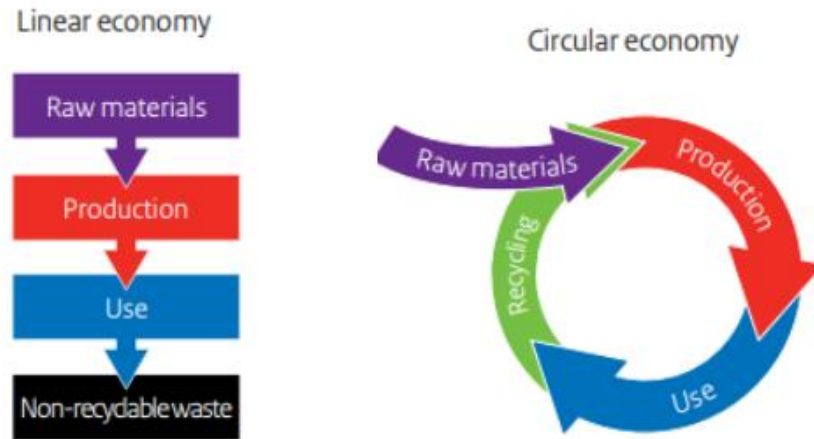
Päästölaskennalla saatujen tulosten vertailukelpoisuutta heikentää epäyhteneväisten päästötietokantojen lisäksi yhtenäisten laskentamenetelmien ja ohjeistuksien puute (Häkkinen ym. 2022). Väyläviraston julkaisussa *Infrarakentamisen kansallinen päästö-*

tietokantahanke (2022) todetaan, että hiilidioksidipäästöjen laskentamenetelmä tulisi kehittää samanaikaisesti päästötietokannan kehittämisen kanssa. Valittu laskentamenetelmä vaikuttaa päästötietokantaan kohdistuviin vaatimuksiin, minkä vuoksi laskennassa tehtävät valinnat tulisi olla tiedossa mahdollisimman varhaisessa vaiheessa päästötietokantaa laadittaessa. (Häkkinen ym. 2022) Diplomityön kirjoitushetkellä Väylävirasto valmistelee infrarakentamisen vähähiilisyiden arviointimenetelmää, jonka tavoitteena on infrarakentamisen päästölaskelmien yhdenmukaistaminen ja vertailukelpoisuuden parantaminen. Arviointimenetelmässä kuvataan esimerkiksi, mitkä elinkaaren osat laskennan tulee sisältää, mitä tietolähteitä ja päästötietokantoja voidaan käyttää ja miten kuljetetäisyydet tulee määrittää. Arviointimenetelmä mahdollistaa päästölaskennan tuomisen entistä kiinteämmäksi osaksi suunnitteluprosessia sekä suunnittelun ohjausta ja päätöksentekoa. (Väylävirasto 2022c)

3.4 Kiertotalous infrahankkeilla

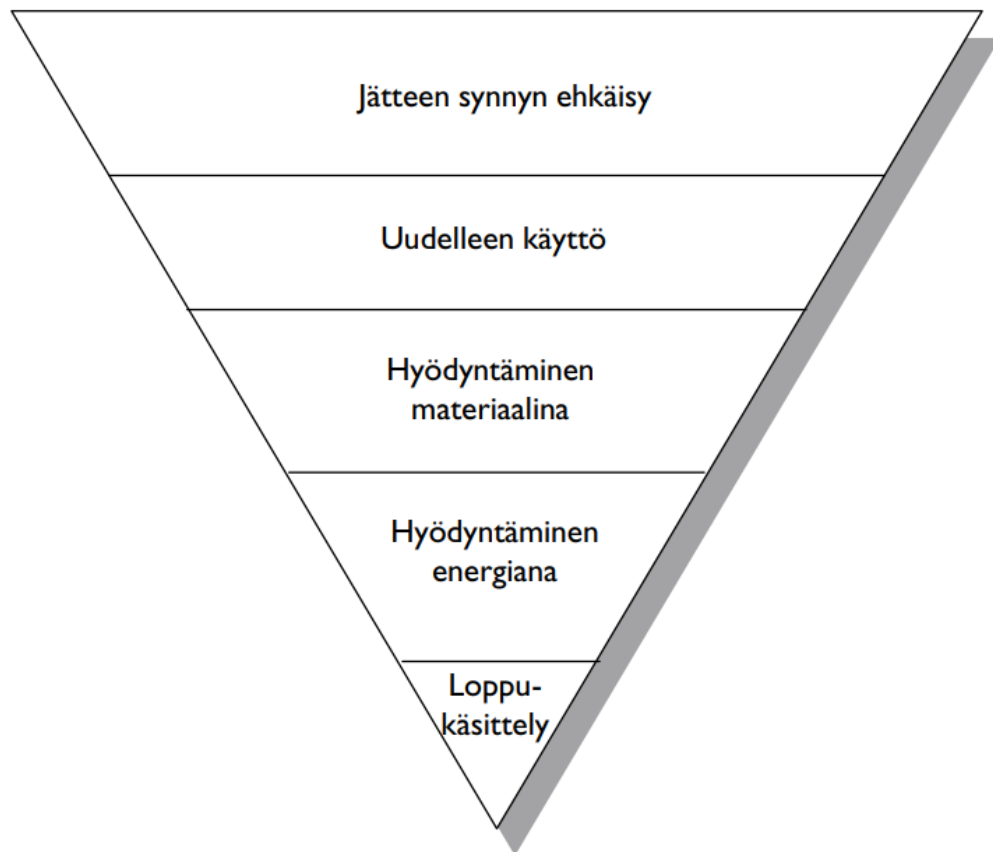
Kiertotaloudella tarkoitetaan toimintatapaa, jossa elinkaarensa lopussa olevat tuotteet hyödynnetään uusien tuotteiden raaka-aineina. Kiertotaloudessa uusien tuotteiden valmistamisen sijasta vanhat tuotteet pyritään korjaamaan, käyttämään uudelleen tai kierrättämään. Kiertotaloutta voidaan verrata luonnossa tapahtuviin prosesseihin, joissa jäätettä ei muodostu, vaan ravinteet ja raaka-aineet kiertävät. (Stahel 2016) Kiertotalous mielletään usein ympäristöä säästäväksi lähestymistavaksi, mutta sen avulla on mahdollista saavuttaa myös taloudellisia ja sosiaalisia hyötyvaikutuksia (Ellen McArthur Foundation 2013). Kiertotalousajattelun mukaan tuotteen koko potentiaali pyritään hyödyntämään sen elinkaaren jokaisessa vaiheessa, jolloin uusien tuotteiden valmistuksessa vaadittavien resurssien, kuten raaka-aineiden ja energian tarve vähenee. Kiertotalouteen siirtyminen edellyttää uusien tuotteiden, prosessien ja toimintatapojen kehittämistä, mikä puolestaan luo työpaikkoja. (Stahel 2016)

Kiertotalouden vastakohta on lineaarinen talousmalli, jossa tuotteiden ja hyödykkeiden elinkaari päättyy niiden tullessa käyttöikänsä päähän (Van Buren ym. 2016). Lineaarisen talousmallin ja kiertotalouteen perustuvan talouden eroja on havainnollistettu kuvassa 14.



Kuva 14. Lineaarinen talousmalli vs. kiertotalouteen perustuva malli (Haulos ym. 2022).

Kansainvälisessä kirjallisuudessa kiertotaloutta käsitellään pääosin kolmen R:n periaatteen avulla, jotka ovat jätteen määrän vähentäminen (*Reduction*), uudelleen käyttö (*Reuse*) ja kierrättäminen (*Recycle*) (Ghisellini ym. 2016). Kaikkia kolmea periaatetta ei pidetä keskenään tasavertaisina, vaan ensisijaisena periaatteena pidetään jätteen määrän vähentämistä (Feng & Yan 2007). Uudet tuotteet tulisi suunnitella siten, että niiden valmistuksessa käytetään mahdollisimman vähän raaka-aineita ja energiaa, ja prosessissa muodostuvan jätteen määrä minimoidaan (Van Buren ym. 2016). Myös Euroopan Unionin jätesäätelyn mukaan ensisijainen kiertotalouskeino on jätteen synnyn ehkäiseminen, ja vasta sen jälkeen tulevat uudelleen käyttö ja kierrättäminen (Suvantola & Lankinen 2008). Euroopan Unionin jätehierarkia on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. EU:n jätehierarkia vuoden 2008 jättepuitedirektiivin määritelmän mukaisesti (Suvantola & Lankinen 2008).

Ghisellinin ym. (2016) mukaan kiertotalousratkaisuihin korostetaan usein kierrättämistä jätteen määrän vähentämisen ja uudelleen käytön sijaan. Suvantolan ja Lankisen (2008) mukaan kierrättämistä korostavan lähestymistavan ongelma on, että vaikka kierrättäminen on kestävä kehityksen kannalta tärkeää, sen tehostamisella on vain vähän vaikutusta tuotettavan jätteen määrään. Jätteen vähentämiseen ja materiaalitehokkuuden parantamiseen tähtäävien toimenpiteiden on myös todettu olevan taloudellisesti tehokkaampia kuin kierrätyksen parantaminen. Tuhlatun materiaalin tuotanto ja sen kierrättäminen aiheuttavat kahdet kustannukset, kun taas jätteen määrän vähentämisellä ja materiaalien säästeliäällä käytöllä vältytään raaka-aineiden tuhlamiselta sekä tuhlattun raaka-aineen kierrättämiseltä. (Suvantola & Lankinen 2008) Lisäksi kierrättäminen on ympäristövaikutuksiltaan ja kustannuksiltaan tehokasta vain tiettyyn pisteeseen asti, minkä jälkeen kierrätysprosessin vaikutukset ylittävät sillä saavutetut ympäristö- tai kustannushyödyt (Ghisellini ym. 2016).

Kiertotalouteen perustuvat prosessit eivät ole automaattisesti lineaariseen malliin perustuvia prosesseja parempia. Kiertotalousprosessit voivat olla ekologisesti, sosiaalisesti tai

taloudellisesti kestävämpiä esimerkiksi silloin, jos ne ovat energiaintensiivisiä, edellyttävät pitkiä kuljetusmatkoja tai vaikuttavat epäsuotuisasti työoloihin (Van Buren ym. 2016). Vaikka kiertotalouden periaatteiden mukaan valmistettujen tuotteiden ympäristövaikutukset olisivat vähäiset yhtä tuotantoyksikköä kohden, niiden suosiminen voi johtaa kulutuksen ja edelleen tuotantomäärien kasvuun, jolloin kiertotalouden avulla saavutetut ympäristöhyödyt vähenevät tai minimoituvat kokonaan. Zink ja Geyer (2017) kutsuvat edellä kuvattua tilannetta kiertotalouden *rebound*-ilmiöksi. *Rebound*-ilmiö toteutuu esimerkiksi silloin, kun kiertotaloustuote on lineaarista vastinpariaan laadullisesti heikompi, jolloin sen elinkaari jää lyhyemmäksi, se joudutaan vaihtamaan useammin uuteen ja sitä joudutaan valmistamaan enemmän. (Zink & Geyer 2017)

Kiertotalous on verrattain uusi käsite eikä sille ole olemassa yksiselitteistä määritelmää. Myös infrarakentamisen osalta kiertotalouden periaatteiden on todettu tarvitsevan kirjastamista (Haulos ym. 2022). Väyläviraston julkaisussa *Kiertotalous väylänpidossa – Nykytilaselvitys* väylähankkeiden kiertotalouden todetaan käsittävän laajasti eri tasoisia ja vaikuttavuudeltaan eri asteisia teemoja. Julkaisussa tunnistettiin seuraavat väylänpidon kiertotalousteemat:

- Rakenteiden korkea laatu, pitkäikäisyys ja kunnossapito
- Massatalouden optimointi ja materiaalitehokkuus
- Materiaalien kierrättäminen, uusiomateriaalien käyttö ja jätteiden hyödyntäminen
- Päästöjen vähentäminen
- Maankäyttö ja ekosysteemit (Haulos ym. 2022).

Julkaisussa todetaan, että infrarakenteiden suunnittelu kestäviksi ja pitkäikäisiksi on itsessään vaikuttava kiertotalousratkaisu. Kiertotaloutta edistetään parhaiten käyttämällä pitkäikäisiä ja korkealaatuisia rakennusmateriaaleja sekä hoitamalla ja korjaamalla rakenteita oikea-aikaisesti. Massatalouden ja kuljetusmatkojen optimoinnin merkitys korostuu etenkin Suomessa, jossa välimatkat ovat pitkiä. Suurimmat massamäärät tulee hankkia läheltä ja massojen siirrot tulee suunnitella hankkeen kokonaiskuva huomioiden. Infrahankkeiden materiaalitehokkuutta voidaan parantaa kierrättämällä ja käyttämällä materiaaleja uudestaan sekä ohjaamalla hankkeessa muodostuvat jätteet hyötykäyttöön. (Haulos ym. 2022)

Hauloksen ym. (2022) mukaan infrahankkeiden suunnittelun eri vaiheissa tulisi huomioida ja selvittää uusiomateriaalien käyttömahdollisuus. Infrahankkeilla uusiomateriaalien käytön tulee olla tarkoituksenmukaista ja perusteltua. Kiertotalouden periaatteiden mukaisesti hankkeella tulee ensin hyödyntää hankkeen sisällä muodostuvat maa- ja kivi-

nesmassat sekä oman toiminnan jätteet ja vasta sen jälkeen tutkia ulkopuolelta hankittavien luonnon- tai uusiomateriaalien tarve. Hyvälaatuisten materiaalien käyttöä toissijaisiin kohteisiin tulee välttää, ja esimerkiksi hyvälaatuiset maa- ja kiviainekset voi olla tarkoituksenmukaista käyttää hankkeen ulkopuolella, jos hankkeella ei ole korkean vaatimustason rakennuskohteita. (Väylävirasto 2022d) Massatalouden optimoinnissa tulisi kin pyrkiä hankerajat ylittävään sekä alueelliseen yhteistyöhön (Haulos ym. 2022).

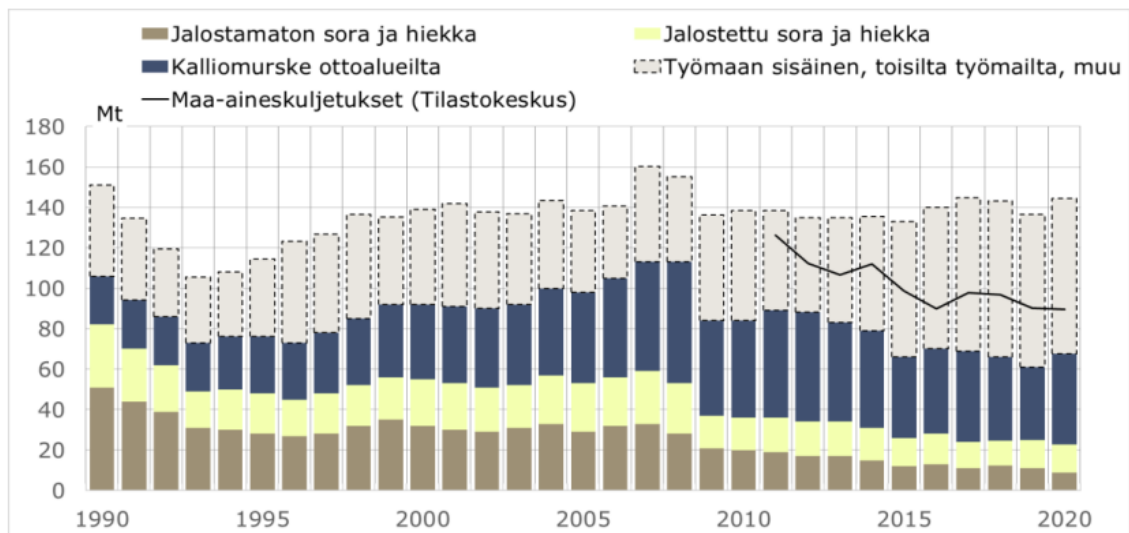
Kiertotalousratkaisujen mielletään usein vaikuttavan infrahankkeiden hiilidioksidipäästöjä vähentävästi. Jos esimerkiksi uusiomateriaaleja käytetään luonnonkiviainesten korvaajana tai stabiloinnin sideaineena, päästöjä pystytään mahdollisesti vähentämään, sillä uusiomateriaalien valmistamisen päästöt ovat vastaavien perinteisten materiaalien valmistusta pienemmät (Forsman ym. 2020). *Rebound*-ilmiön ja pitkien kuljetusmatkojen vuoksi hankkeiden hiilidioksidipäästöt voivat kuitenkin myös kasvaa kiertotalousratkaisujen myötä. Väyläviraston julkaisussa *Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa* todetaan, että uusiomateriaalien käyttö voi myös lisätä hankkeen hiilidioksidipäästöjä, jos uusiomateriaalia tarvitaan merkittäviä määriä ja kuljetusmatkat ovat pitkiä. Tällainen tilanne voi muodostua esimerkiksi silloin, kun pengermateriaalina käytetään uusiomateriaaleja mahdollisesti läheltä saatavien luonnonmateriaalien sijaan. *Rebound*-ilmiön välttämiseksi käytettävien uusio- ja kierrätysmateriaalien soveltuvuus ja pitkäaikaiskestävyys väylärakenteissa tulee selvittää elinkaaritarkasteluin, esimerkiksi LCA-laskelmilla, tai muulla hankekohtaisesti määriteltävällä tavalla. (Väylävirasto 2022d)

4. YLIJÄÄMÄMASSOJEN HYÖDYNTÄMINEN RA-TAHANKKEESSA

4.1 Ylijäämämassojen määritelmä

Ylijäämämassoilla tarkoitetaan maa- ja kallioperäisiä massoja, jotka on jostain syystä poistettu alkuperäiseltä paikaltaan, ja joille ei välttämättä ole niiden muodostumishetkellä osoittanut käyttökohdetta tai lopullista sijoituspaikkaa. Ylijäämämassoja muodostuu muun muassa väylien rakentamiseen liittyvän kalliolouhinnan seurauksena sekä rakentamiseen liittyvän esirakentamisen yhteydessä, kun maa-aineksia siirretään rakennusten ja rakenteiden perustusten rakentamisen vuoksi. Kiviainekset, joita ei ole irrotettu alkupe- räiseltä paikaltaan tai jotka on irrotettu paikaltaan tietyn, ajankohtaisen käyttötarkoituk- sen vuoksi, kutsutaan neitseellisiksi kiviaineksiksi. (Pokki ym. 2009)

Suomessa käytetään arviolta 130–150 miljoonaa tonnia maa- ja kallioperäisiä aineksia vuodessa, mikä on asukalukuun suhteutettuna suurimpia määriä EU:n alueella (Ympä- ristöministeriö 2020). Vuodessa kiviaineksia käytetään arviolta 25 tonnia asukasta kohti, josta noin puolet on peräisin ottotoimintaan luvan saaneilta kiviainesten ottamisalueilta (Afray Oy 2022). Kuvassa 16 on esitetty kiviainesten arvioidut käyttömäärät Suomessa vuodesta 1990 alkaen.



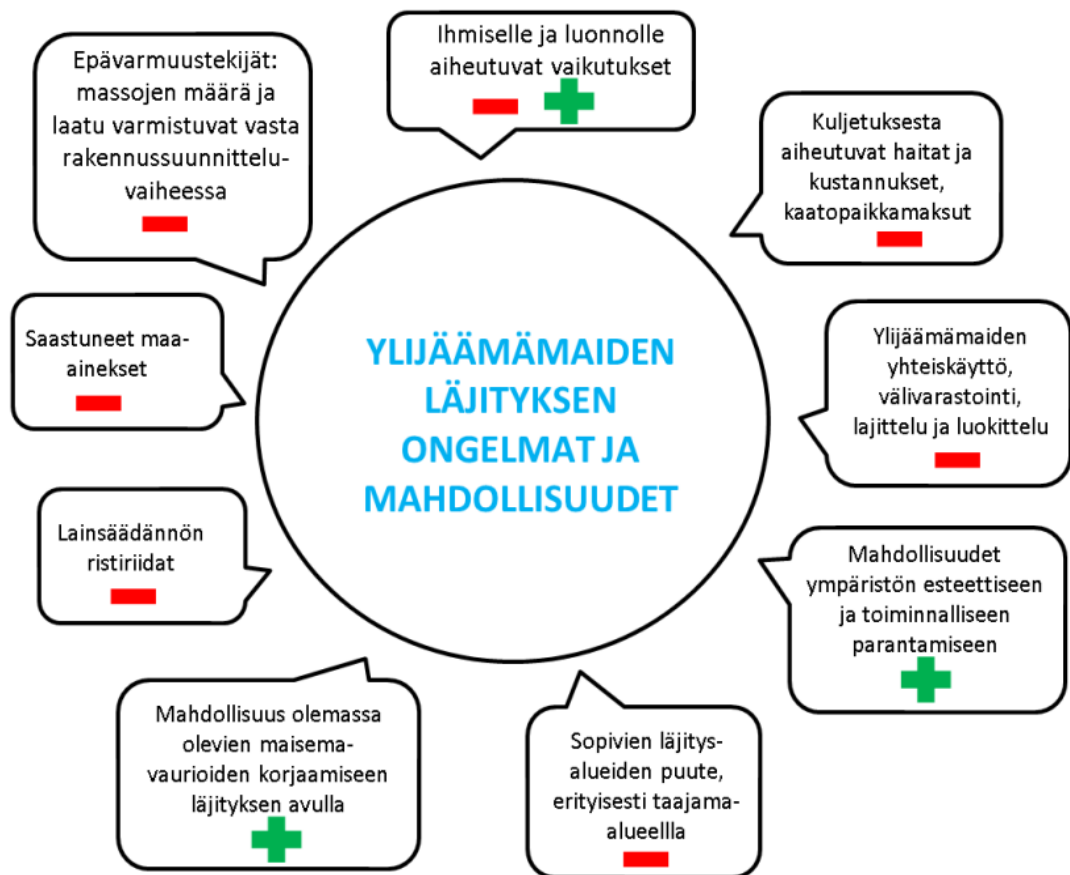
Kuva 16. Kiviainesten arvioitu käyttö Suomessa (Afray Oy 2022).

Suomi on kiviainesten suhteen omavarainen, mutta maa-ainesvarantojen laadussa ja riittävyudessa on suuria alueellisia eroja. Rakentamisessa käytettävän neitseellisen kiviaineksen saatavuus on paikoin heikentynyt, mistä syystä niiden kuljetusmatkat ovat

pidentyneet (Pokki ym. 2009). Esimerkiksi suurten asutuskeskusten läheisyydessä on jo pulaa hyvälaatuisesta luonnonsorasta (Lonka & Loukola-Ruskeeniemi 2015). Samanaikaisesti rakentamisen aikana muodostuvia ylijäämämassoja joudutaan soveltuvien käyttökohteiden puutteessa sijoittamaan erityisille vastaanottoalueille, jotka sijaitsevat yhä kauempana rakennuskohteista (Pokki ym. 2009).

Ylijäämämaiden tehokkaaseen hyödyntämiseen tähtäviä toimenpiteitä ja menetelmiä on tärkeää kehittää. Ohjaamalla ylijäämämaat hyötykäyttöön voidaan säästää neitseellisiä kiviaineksia, vähentää sijoitusalueiden tarvetta sekä vähentää kuljetuksista aiheutuvia kustannuksia ja ympäristövaikutuksia. Ylijäämämassojen soveltuvuus eri käyttökohteisiin riippuu niiden laadusta, jota voidaan nostaa jatkojalostustoimenpitein. (Pokki ym. 2009). Ylijäämämaiden hyödyntämisessä keskeistä on hyötykäyttö mahdollisimman lähellä niiden muodostumispaikkaa, jolloin kuljetukset voidaan minimoida (Afy Oy 2022).

Ylijäämämaiden hyödyntämättä jättämisen taustalla on tavallisesti useita syitä. Heikkolaatuisten ylijäämämassojen hyödyntämisen esteenä on toistaiseksi ollut parempilaatuisten maa- ja kiviainesten suhteellisen hyvä saatavuus ja edullinen hinta, minkä lisäksi heikkolaatuisempien massojen käsittely koetaan työlääksi ja kalliiksi (Korkiala-Tanttu ym. 2010). Ylijäämämaiden käsittelyyn soveltuvia välivarastointi- ja jatkojalostuspaikkoja voi olla haastavaa löytää etenkin suurien asutuskeskusten läheisyydessä, ja ylijäämämaiden kierrättämisen kustannukset saattavat nousta neitseellisten kiviainesten tuotantokustannuksia korkeammiksi kuljetuskustannusten ja varastoinnin vuoksi. Ylijäämämaiden kierrätystä hidastaviksi tekijöiksi on lisäksi tunnistettu lainsäädännön edellyttämät lupaprosessit. (Härmä ym. 2010) Ylijäämämassojen hyödyntämiseen ja sijoittamiseen liittyviä ongelmia ja mahdollisuuksia on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Ylijäämämassojen hyödyntämiseen ja sijoittamiseen liittyviä ongelmia ja mahdollisuuksia (Tiehallinto 1999).

Rakentamisen aikana muodostuvia ylijäämäisiä maa-aineksia voidaan hyödyntää muun muassa tiepohjissa, pengerryksissä, meluvalleissa, maisemoinnissa sekä varasto- ja muiden vastaavien kenttien pohjarakenteissa (Ympäristöministeriö 2015).

4.2 Ylijäämämassojen hyödyntämistä koskeva lainsäädäntö

Kaivetun maa-aineksen hyödyntämistä säätelevät useat lait ja asetukset. Lainsäädännön tavoitteena on varmistaa, että hyödynnettävät maa- ja kiviainekset ovat pilaantumattomia eivätkä ne aiheuta haittaa ympäristölle, niiden hyödyntäminen on suunnitelmallista ja kestävä, ja että jätteeksi katsottavat massat käsitellään jätelain asettamien velvollisuuksien mukaisesti (Ympäristöministeriö 2015). Ylijäämämassojen hyödyntämistä säädelään muun muassa jätelailla, maa-ainelailla (MAL) sekä ympäristönsuojelullailla (YSL).

Ylijäämämassojen jäteluonnetta arvioitaessa sovelletaan jätelain 5 §:n mukaista jätteen määritelmää. Jätelain (2011/646) 5 §:n mukaan sellaiset maamassat, jotka niiden haltija

on poistanut, aikoo poistaa tai on velvollinen poistamaan käytöstä, ovat oikeudellisesti jätettä. Jätelaisissa sivutuotteeksi määritellään aineet ja esineet, jotka syntyvät sellaisessa tuotantoprosessissa, jonka ensisijaisena tavoitteena ei ole kyseisen aineen tai esineen valmistaminen, jonka jatkokäyttö on varmaa, joka voidaan käyttää sellaisenaan ja joka täyttää sen käyttöön sekä ympäristösuojeluun liittyvät vaatimukset (Jätelaki 2011/646/5§). Sivutuotteen määritelmän mukaisten ylijäämämassojen ei siten katsota olevan jätettä, jos niille on osoittaa varma jatkokäyttökohde ja jos ne eivät aiheuta haittaa ympäristölle. Lisäksi ne tulee pystyä hyödyntämään sellaisenaan ilman kemiallisia, fysikaalisia tai biologisia muuntamistoimia, eikä niiden seassa saa olla merkittäviä määriä muuta jätettä, kuten rakennus- ja purkujätettä tai tuhkaa (Ympäristöministeriö 2015).

Jos kaivetun maa-aineksen ei todeta jätelakiin perustuvan kokonaisarviointin perusteella olevan jätettä ja se päätetään hyödyntää rakennuskohteessa, on sen puolestaan täytettävä kaikki kyseiselle tuotteelle asetetut lainsäädännölliset vaatimukset. Lainsäädännöllisiä vaatimuksia ovat muun muassa rakennustuoteasetuksen mukaiset CE-merkityt rakennustuotteet, kuten kiviainekset. Jos kyseessä olevalle rakennustuotteelle ei ole olemassa lainsäädäntöä, tulee hyödynnettävän maa-aineksen täyttää sille asetetut tekniset vaatimukset ja infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. (Ympäristöministeriö 2015)

Ympäristösuojelulain (YSL 527/2014) 27 §:n sekä liitteen 1 taulukon 1 kohdan 13 nojalla jätelain soveltamisalaan kuuluvan maa-ainesjätteen ammattimainen tai laitostmainen käsittely edellyttää ympäristölupaa. Vähäistä maa-ainesjätteen käsittelytoimintaa ei siten katsota ympäristöluvan alaiseksi toiminnaksi. Myöskään maarakennuskohteista tuodun tai kallion räjäytyksestä ja louhinnasta peräisin olevan, pilaantumattoman kiviaineksen varastointi ja murskaus eivät edellytä ympäristölupaa, sillä sen ei jätelain valossa katsota olevan jätettä. Ympäristölupa edellytetään kuitenkin niissä tilanteissa, joissa kiviaineksen katsotaan olevan jätettä esimerkiksi silloin, kun se varastoidaan pitkäksi aikaa tai sen jatkokäytöstä ei ole varmuutta. Ympäristösuojelulain mukaan myös kivenmurskaus edellyttää ympäristölupaa, jos kyseessä on kiinteä murskaamo tai siirrettävä murskaamo, jonka yhtäjaksoinen toiminta-aika on vähintään 50 päivää. (Ympäristöministeriö 2015)

Maa-ainesten ottoa ja hyödyntämistä säädetään maa-aineslailla (MAL 1981/555). Maa-aineslakia ei kuitenkaan sovelleta rakentamisen aikana irrotettuihin maa- ja kiviaineksiin, kun niiden irrottaminen perustuu viranomaisen antamaan lupaan tai hyväksymään suunnitelmaan. (Ympäristöministeriö 2015)

4.3 Ylijäämämassojen hyödyntämisen periaatteet

Maa- ja kiviainekset ovat uusiutumaton luonnonvara, minkä vuoksi niiden käytön tulee olla kestävä ja resurssitehokasta (Ympäristöministeriö 2020). Rakentamisen aikana muodostuvien ylijäämäisten maa- ja kiviainesten hyödyntämisellä voidaan tukea kestävää luonnonvarojen käyttöä, mutta hyödyntämisen tulee olla suunnitelmallista (Ympäristöministeriö 2015) ja sen tulee noudattaa kiertotalouden periaatteita (Haulos ym. 2022).

Ympäristöministeriön muistiossa *Kaivetut maa-ainekset – jäteluonne ja käsittely* on esitetty ei-jätteenä luokiteltavan maa-aineksen hyödyntämisen yleisiä periaatteita. Hyödyntämisen periaatteena on, että rakentamisen aikana kaivetuilla maa-aineksilla korvataan muita materiaaleja, jotka olisi muutoin käytettävä kyseisessä kohteessa. Hyödynnettävien ylijäämäisten maa- ja kiviainesten tulee täyttää niiden toiminnalle asetetut tekniset laatuvaatimukset, jotka on säädetty eurooppalaisissa ja kansallisissa standardeissa sekä kansallisissa ohjeissa. Rakentamisen aikainen maa-ainesten kaivaminen tulee toteuttaa siten, että hyödyntämiskelpoiset maa-ainekset erotellaan muista aineksista. Hyödynnettävien maa-ainesten joukkoon ei saa päätyä esimerkiksi rakennusjätettä, josta voi aiheutua käyttö- tai sijoituspaikassa ympäristöhaittaa tai roskaantumista. (Ympäristöministeriö 2015)

Ylijäämäisten leikkausmassojen hyödyntämistä ohjaavat pitkälti samat periaatteet kuin massataloussuunnittelussa noudatettavat periaatteet. Hyödyntämisen yleisenä periaatteena on kaivettujen maa-ainesten mahdollisimman lyhytaikainen varastointi ja kuljetusmatkojen minimointi (Ympäristöministeriö 2015). Kaikki käyttökelpoiset massat tulee hyödyntää oikeissa kohteissa ja heikkolaatuisten maamassojen kaivamista tulee välttää (Lindholm & Junnonen 2012). Ylijäämäiset maa- ja kiviainekset tulee pyrkiä hyödyntämään mahdollisimman lähellä niiden muodostumispaikkaa. Tarkoituksenmukaisinta on, jos kaivettu maa-aines pystytään hyödyntämään suoraan sen kaivuupaikalla. (Ympäristöministeriö 2015)

Diplomityön kirjoitushetkellä Väylävirasto valmistelee ohjeistusta ylijäämämaiden hallintaan tie- ja ratahankkeissa. Ohjeistuksen tavoitteena on ohjata ylijäämämassojen hyötykäytön suunnitteluun mahdollisimman aikaisissa suunnitteluvaiheissa sekä edistää tie- ja ratahankkeiden kiertotaloutta. Ohjeistus valmistuu vuoden 2023 aikana.

5. CASE-HANKKEEN ESITTELY

5.1 Turun tunnin juna ja Espoo-Salo-oikorata

Turun tunnin juna on Helsingin ja Turun välille suunnitteilla oleva kaksiraiteinen junayhteys, jonka tavoitteena on lyhentää matka-aikaa ja sujuvoittaa raideliikennettä kaupunkien välillä. Hanke koostuu neljästä eri osasta, jotka ovat Espoon kaupunkirata, Espoo-Salo-oikorata, Salo-Turku-kaksoisraide sekä Turun ratapiha-alue. Turun tunnin junan ratalinjaus on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Turun tunnin junan ratalinjaus. Kuvakaappaus Turun tunnin junan Louhi-karttapalvelusta.

Espoo-Salo-oikoradan ja Salo-Turku kaksoisraiteen ratasuunnitelmien laadinnasta vastaa Turun Tunnin Juna Oy. Tämä diplomityö keskittyy Espoo-Salo-oikorataan, jonka suunnittelu on diplomityön kirjoitushetkellä pisimmällä.

Espoo-Salo-oikorata on Espoon ja Salon välille suunniteltava täysin uusi, noin 98 kilometriä pitkä junayhteys. Ratasuunnittelu on jaettu neljään suunnitteluosaan eli osatehtävään (OT), jotka ovat

- OT1: Espoo-Vihti
- OT2: Vihti-Lohja
- OT3: Lohja-Suomusjärvi
- OT4: Suomusjärvi-Salo.

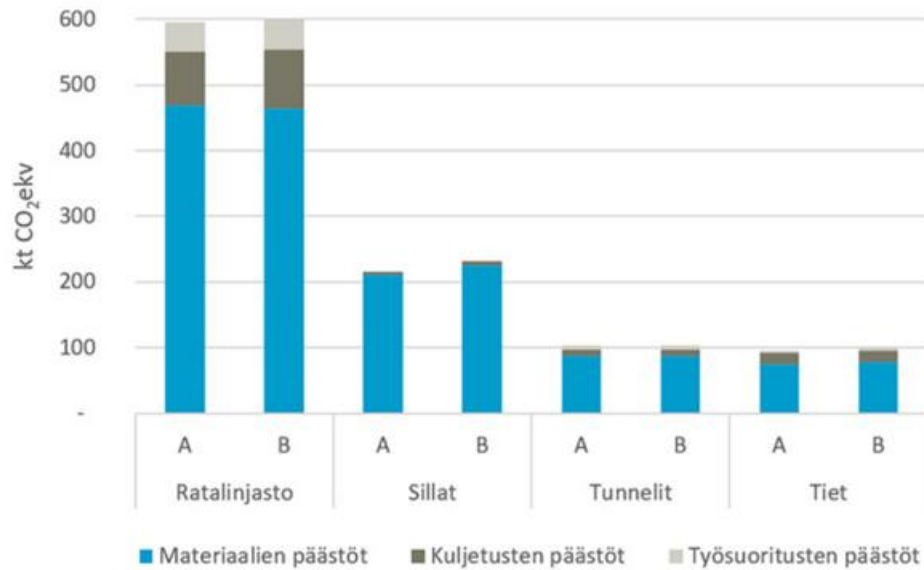
Espoo-Salo oikoradan ratageometria suunnitellaan paikoin mahdollistamaan 300 km/h liikennöintiänopeus, jolloin rata olisi toteutuessaan ensimmäinen suurnopeusrata Suo-

nessa. Suurnopeusradan ratageometria on pääpiirteittäin loivakaarteista ja jäykkää. Esimerkiksi nopeudelle 300 km/h vaakatasossa kaarresäteen minimiarvo on 5000 metriä ja pystytasossa pyöristyskaarresäteen minimiarvo on 30 000 metriä ja maksimiarvo 50 000 metriä (Väylävirasto 2021b). Loivakaarteisen ratageometrian toteuttaminen vaihtelevaan maastoon edellyttää laajoja maanrakennustöitä, kuten maan siirtämistä, louhintaa sekä maa- ja kalliroleikkauksien ja penkereiden rakentamista. Maanrakennustöitä aiheutuu ratageometrian toteuttamisen ja reitin tasaamisen lisäksi taitorakenteiden ja teiden rakentamisesta, sillä Espoo-Salo-oikoradan suunnittelu sisältää arviolta 113 siltaa, 22 tunnelia sekä yli sata tietä.

5.2 Hankkeen ilmastovaikutukset

Espoo-Salo-oikoradan, Salo-Turku kaksoisraiteen sekä Turun ratapihan rakentamisesta aiheutuvia ilmastovaikutuksia on arvioitu YVA-menettelyllä vuonna 2020. YVA-menettelyn yhteydessä tehdyissä päästölaskelmissa huomioitiin standardin *Sustainability of Construction Works: Assessment of Environmental Performance of Buildings – Calculation Method (SFS-EN 15978:2012)* mukaan tuote- (A1-A3), kuljetus- (A4) ja rakentamisvaiheet (A5). Laskennassa huomioitiin merkittävimmät rakenteet, rakennusmateriaalit ja työvaiheet. Rakennusmateriaalien ja massojen kuljetuksista aiheutuvat päästöjen arvioinnissa käytettiin kuljetusmatkojen arvoja 10 kilometriä hankkeen sisällä muodostuville ja hankkeeseen tuotaville maa- ja kiviainesmassoille ja 25 kilometriä tuotteistetuille rakennusmateriaaleille. Kuljetusmatkojen valinnassa oletettiin, että maa-ainesten ottopaikat ja sijoitusalueet sijaitsevat lähellä ratalinjaa, ja että tuotteistetut rakennusmateriaalit voidaan hankkia lähellä sijaitsevista kaupungeista. Radan sähköistys, turvalaitteet ja muut ratatekniset laitteet rajattiin päästölaskennan ulkopuolelle. Laskenta suoritettiin taulukkolaskentaohjelmaan pohjautuvalla päästölaskentaohjelmalla. (Väylävirasto 2020a)

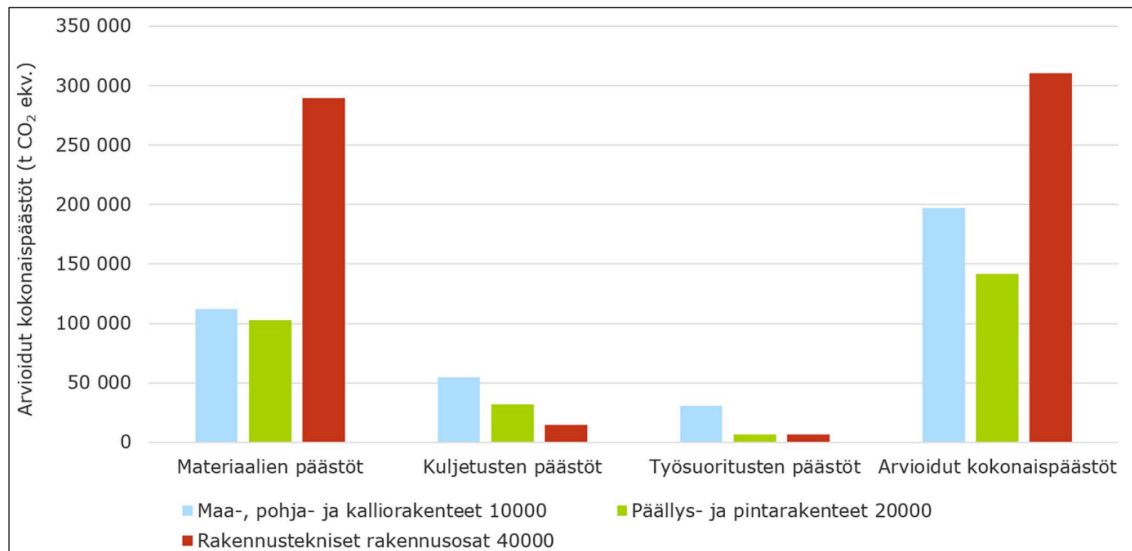
YVA-selostuksessa rakentamisesta aiheutuvien kokonaispäästöjen arvioitiin olevan noin 1011–1038 ktCO₂-ekv, riippuen tarvittavien rataoikaisujen määrästä. Ratakilometriä kohden laskettuna rakentamisesta aiheutuvien kokonaispäästöjen arvioitiin olevan noin 6,7–7,0 ktCO₂-ekv/km (147,5–150 km). (Väylävirasto 2020a) Arvioidut päästöt rakenteittain on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Helsinki-Turku nopean raideyhteyden arvioidut rakentamisen aikaiset päästöt vaihtoehdoissa A ja B. Vaihtoehto B sisältää Piikkiön rataoikaisun välillä Salo-Turku. (Väylävirasto 2020a)

Valtaosa rakentamisen aikaisista päästöistä muodostuu päästöintensiivisten rakennusmateriaalien, kuten betonin ja teräksen tuotannosta, mutta myös luonnonkivimateriaalien louhinta ja käsittely aiheuttavat merkittävän osan päästöistä. Eri rakenteita vertailtaessa ratalinjan rakentaminen aiheuttaa suurimmat päästöt, sillä radan rakentaminen edellyttää laajimpia maanrakennustöitä. Ratalinjan rakentaminen aiheuttaa myös suurimmat kuljetusten päästöt, sillä hankkeessa muodostuu huomattava määrä leikkausmassoja, joiden kuljetuksista aiheutuu päästöjä. Kuljetuksista aiheutuvat päästöt ovat suoraan verrannollisia kuljetusmatkoihin, joten kuljetusmatkojen tuplaantuminen tarkoittaisi myös niiden aiheuttamien päästöjen tuplaantumista. (Väylävirasto 2020a)

Espoo-Salo-oikoradan rakentamisen aikaisia päästöjä on arvioitu myös hankkeen yleissuunnitelmassa vuonna 2022. Päästöjen arviointi toteutettiin niin ikään standardin SFS-EN 15978 mukaan. Rakentamisen aikaisten päästöjen arvioitiin Espoo-Salo oikoradan osalta olevan kokonaisuudessaan 649 ktCO₂-ekv ja ratakilometriä kohden 6,62 ktCO₂-ekv (98 km). (Väylävirasto 2022e) Yleissuunnitelmassa arvioidut kokonaispäästöt ovat esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Yleissuunnitelmassa arvioidut kokonaispäästöt eriteltynä InfraRYL:n mukaisen nimikkeistön mukaan (Väylävirasto 2022e).

Myös yleissuunnitelmassa rakennusmateriaalien tuotannon todetaan olevan suurin rakentamisen aikainen päästöjen lähde. Rakennustekniset rakennusosat, kuten betoni- ja terästuotteet, muodostavat suurimmat päästöt. (Väylävirasto 2022e) Yleissuunnitelmavaiheen päästölaskennan tulokset ovat saman suuntaisia YVA-selostuksessa esitetyn päästölaskelman kanssa, jossa materiaalien päästöt korostuvat, ja kuljetusten sekä työsuoritusten päästöt muodostavat verrattain pienen osan kokonaispäästöistä.

Turun Tunnin Juna Oy:n tavoite on vähentää rakentamisen aikaisia hiilidioksidipäästöjä kymmenellä prosentilla YVA-selostuksessa esitetystä tasosta. Keinoja päästöjen vähentämiseen sekä kiertotalouden edistämiseen etsitään muun muassa ylijäämämassojen hyödyntämiseen ja sijoittamiseen kohdistuvilla suunnitteluratkaisuilla. (Turun Tunnin Juna Oy 2022)

5.3 Hankkeen massatalous

Espoo-Salo-oikorata on vahvasti massaylijäämäinen hanke. Yleissuunnitelmavaiheessa Espoo-Salo-oikoradalla on arvioitu muodostuvan noin 12 miljoona kuutiota maa- ja kiviainesmassoja, joista arviolta 8 miljoonaa kuutiota on ylijäämäistä massaa. Yleissuunnitelmavaiheessa tehtyihin arvioihin massojen hyödyntämiskelpoisuudesta todetaan YVA:ssa liittyvän epävarmuutta, sillä tarkempaa tietoa ylijäämämaiden ja -kiviainesten laadusta ei ollut saatavilla. Lisäksi hankkeen YVA-selostuksessa todetaan, että hankkeessa tarvitaan myös suuri määrä korkealaatuista kiviainesta, kuten raidesepeliä. Korkealaatuiset kiviainekset joudutaan todennäköisesti hankkimaan ulkopuolelta, mistä aiheutuu liikennevaikutuksia. Hankkeen yleissuunnitelmassa ei esitetty sijoitusalueita,

mikä aiheuttaa epävarmuutta massojen kuljetuksiin liittyvien vaikutusten arviointiin. Hankkeen YVA:ssa kuitenkin todetaan, että massojen mahdollisimman tehokas hyödyntäminen sekä optimoitu logistiikka massojen siirroissa on tehokas keino rakentamisen aikaisten ilmastovaikutusten lieventämiseksi. (Väylävirasto 2020a)

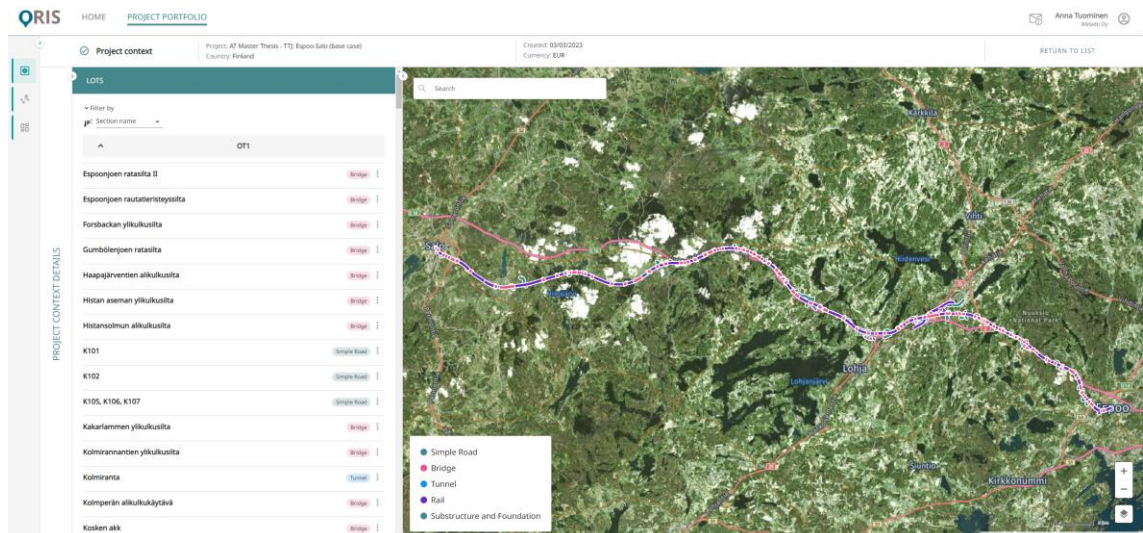
Turun tunnin juna -hankkeen tavoitteena on etsiä innovatiivisia keinoja rakentamisen aiheuttamien päästöjen vähentämiseksi sekä edistää luonnonvarojen kestävästä hyödyntämisestä ja kiertotaloutta (Turun Tunnin Juna Oy 2022, Väylävirasto 2020a). Turun Tunnin Juna Oy:n teettämän kiviainesselvityksen perusteella Turun tunnin junan suunnitellulla ratalinjalla ja sen läheisyydessä on saatavilla monipuolisesti eri käyttökohteisiin soveltuvaa kiviainesta, jonka tehokkaalla hyödyntämisellä voidaan edistää kiertotaloutta ja resurssitehokasta rakentamista (Räisänen ym. 2023). Ylijäämäisten maa- ja kiviainesten hyödyntämistä ja logistiikkaa pyritään puolestaan optimoimaan massatalouden suunnitteluun tarkoitetun ORIS-ohjelmiston avulla (Turun Tunnin Juna Oy 2022).

6. MASSATALOUDEN SUUNNITTELU ORIS-OHJELMISTOLLA

6.1 ORIS – ohjelmisto massatalouden suunnitteluun

ORIS on infrahankeiden massatalouden suunnitteluun ja optimointiin tarkoitettu ohjelmistosovellus, jonka toiminta perustuu suunnittelu- ja projektitiedon keräämiseen, yhdistelyyn ja jakamiseen. ORIS-ohjelmistoa ylläpitää ja kehittää ranskalainen ohjelmistoyritys ORIS SAS. Ohjelmiston avulla on mahdollista mallintaa massataloussuunnitelmia ja arvioida eri suunnitteluratkaisujen vaikutusta haluttuihin mittareihin, kuten hankkeen kustannuksiin, hiilidioksidipäästöihin tai elinkaaren aikaisiin vaikutuksiin. Turun tunnin juna on ensimmäinen infrahanke Suomessa sekä maailmanlaajuisesti ensimmäinen ratahanke, jossa ORIS-ohjelmistoa hyödynnetään massatalouden suunnittelussa.

ORIS-ohjelmiston käyttöliittymä on esitetty kuvassa 21. Kuvassa on esitetty ohjelmiston alunäkymä ennen määrittelyjä tai laskennan suorittamista. Karttanäkymässä on kuvattu ratalinjaus rakenteineen. Rakenteet on esitetty käyttöliittymän vasemmassa reunassa listauksena, josta yksittäisiä rakenteita voi tarkastella yksityiskohtaisemmin.



Kuva 21. ORIS-ohjelmiston selainpohjainen käyttöliittymä.

Massataloussuunnittelun prosessi ORIS-ohjelmistolla perustuu kansainvälisiin elinkaariarvioinnin standardeihin ISO 14040, ISO 14044 ja SFS-EN 15804. Elinkaariarviointi ORIS-ohjelmalla voi sisältää kaikki elinkaaren vaiheet tai käsittää vain osia siitä. Tuote-, rakentamis- ja käyttövaiheet voivat olla esimerkiksi erillisiä iteraatioita, joiden tulokset yhdistetään lopuksi keskenään. Päästöindikaattorina ORIS-ohjelmistossa käytetään

CO₂-ekvivalenttia, jonka laskenta perustuu standardeihin ISO 14067, SFS-EN 15804 ja ISO 21930 sekä elinkaariarviointien tuloksien karakterisoinnissa yleisesti käytettyyn CML- eli *Centrum voor Milieukunde Leiden* -metodiin. ORIS-ohjelmistolla tehdyt kustannusarviot perustuvat ohjelmistolle syötettyihin hinta- ja kustannustietoihin, eikä ORIS itsessään sovellu tarkkojen kustannusarvioiden tekemiseen tai kustannushallinnan työkaluksi.

Massatalouden suunnittelu ORIS-ohjelmistolla on iteratiivinen prosessi, joka perustuu eri osa-alueiden vaiheittaiseen optimoimiseen ja lopulta eri iteraatioiden yhdistämiseen. Eri iteraatiot suunnitellaan hankekohtaisesti riippuen projektin tavoitteista. Ensimmäinen iteraatio voi olla esimerkiksi hankkeen nykytilannetta kuvaava skenaario, johon myöhempien iteraatioiden tuloksia verrataan. Myöhemmät iteraatiot voivat sisältää esimerkiksi rakennusmateriaalien korvaamisen ympäristöystävällisemmällä vaihtoehdoilla, kuljetusanalyysijä tai ylijäämämassojen hyödyntämiseen liittyviä ratkaisuja. Iteratiivinen prosessi auttaa tunnistamaan ne kohteet, jotka vaikuttavat eniten tarkastelun alla oleviin mittareihin ja toisaalta valitsemaan ne kohteet, joiden suunnittelua optimoimalla voidaan saavuttaa merkittävimmät hyötyvaikutukset.

6.2 Tavoitteen ja soveltamisalan määrittely ORIS-ohjelmistossa

Suunnittelu ORIS-ohjelmistolla käynnistyy mallinnettavan iteraation tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyllä LCA:n periaatteiden mukaisesti. Koska ohjelmisto rakennetaan aina erikseen kullekin hankkeelle, tavoitteet ja soveltamisala määritellään hankkeen tavoitteiden ja tarpeiden mukaisesti. Ennen tiedon keräämistä ja iteraation mallinnusta määriteltäviä asioita ovat muun muassa:

- Tarkoitus – kartoitetaanko esimerkiksi hankkeen päästövähennyspotentiaalia tai mahdollisia kustannussäästöjä?
- Tavoite – tarkastellaanko esimerkiksi vaihtoehtoisten materiaalien, kuljetusratkaisujen tai ylijäämämassojen hyödyntämisen vaikutuksia?
- Soveltamisala – huomioidaanko kaikki elinkaaren vaiheet vai vain osia siitä?
- Vertailukohde – verrataanko tuloksia esimerkiksi aikaisempiin ympäristöselvityksiin, aikaisempiin suunnitteluvaiheisiin vai aikaisempiin ORIS-ohjelmistolla muodostettuihin iteraatioihin?
- Raportointitapa – missä muodossa ja kenelle tulokset raportoidaan?

Toiminnallisen yksikön määrittely ei ole välttämätöntä, sillä valmiin ohjelmistosovelluksen avulla vaikutuksia on mahdollista laskea koko hankkeen kokonaisuutena tai tulokset voidaan rajata esimerkiksi haluttuihin rataosuuksiin tai rakenteisiin. Jos mallinnettavasta iteraatiosta muodostetaan raportti, voidaan asiakkaan ja ohjelmiston käyttäjien kesken sopia toiminnallinen yksikkö, jossa tulokset raportoidaan.

6.3 Inventaarioanalyysi ja tiedon kerääminen

Inventaarioanalyysissa ORIS-ohjelmistoalustalle kerätään kaikki massatalouden suunnittelussa vaadittavat tiedot. Kerättävät tiedot voidaan jakaa karkeasti projektitietoihin, joita ovat muun muassa ratalinjan sijainti sekä tiedot paikallisista toimittajista ja standardeista, sekä suunnittelutietoihin, joita ovat esimerkiksi ratageometria, leikattavat massat sekä rakenteissa vaadittavat rakennusmateriaalit. Projekti- ja suunnittelutietoa päivitetään alustalle jatkuvasti suunnittelun edetessä.

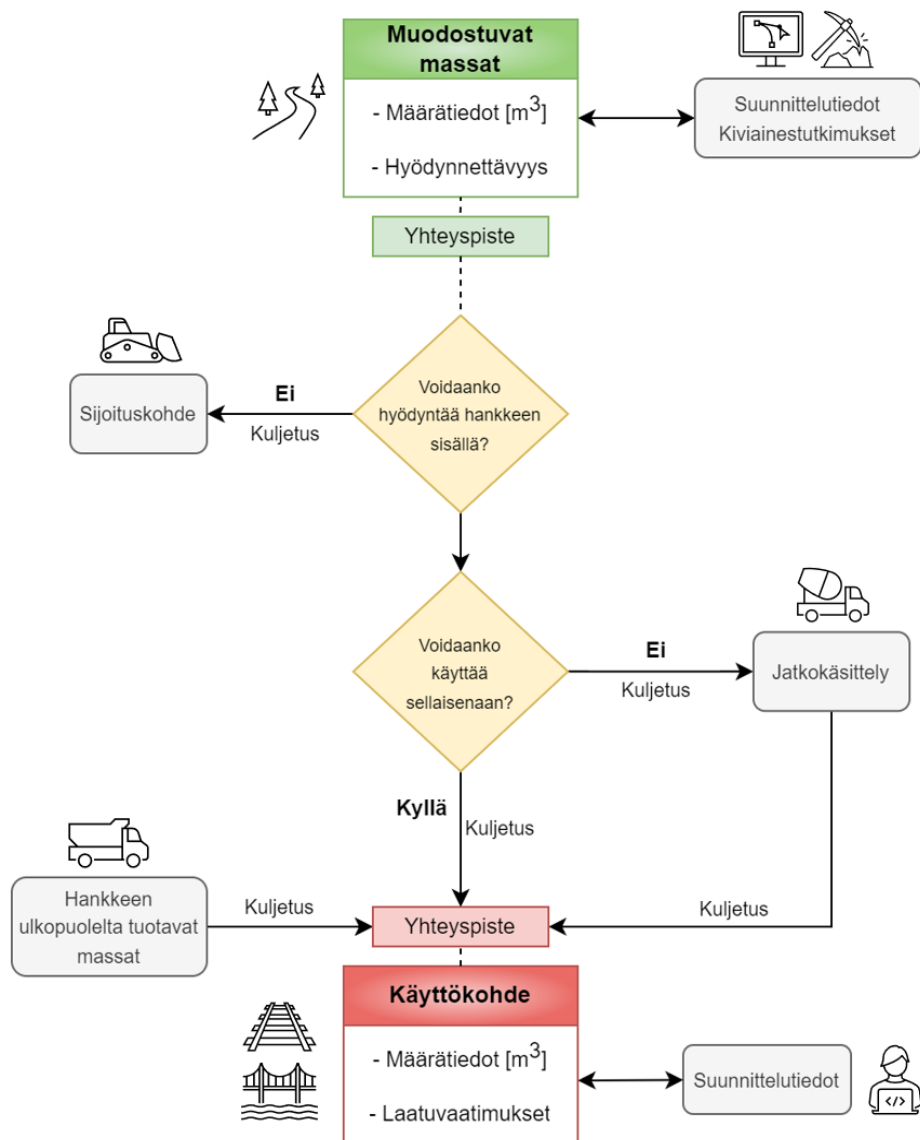
ORIS-ohjelmiston varsinaisessa käyttöönötossa ensimmäinen vaihe on hankkeen yhdistäminen ohjelmiston käyttöympäristöön. Alustalle kerätään paikalliset rakennusmateriaalien toimittajat, materiaaleihin liittyvät kansalliset ja kansainväliset standardit sekä standardien mukaiset vaatimukset. Kun paikallinen toimintaympäristö on määritelty, alustalle kerätään valitun iteraation toteuttamiseksi tarvittavat suunnittelutiedot. Ratahankkeen massatalouden suunnittelua varten on kerättävä suunnittelutieto sisältää muun muassa

- Radan pysty- ja vaakageometrian
- Radan pituus- ja poikkileikkaukset
- Määrätiedot radan rakenteissa, silloissa, tunneleissa ja teissä vaadittavista rakennusmateriaaleista sekä maa- ja kiviaineksista
- Määrätiedot tunneleista louhittavista kiviainesmassoista
- Määrätiedot kallio- ja maaleikkauksista saatavista maa- ja kiviainesmassoista
- Sijoitusalueiden sijainnit ja kunkin sijoitusalueen kapasiteetit.

Massatasapainotarkasteluja varten alustalle kerätään tietoa hankkeen sisällä muodostuvien maa- ja kiviainesmassojen laadusta ja ominaisuuksista sekä mahdollisista käyttökohteista. Saatavilla olevat tiedot riippuvat hankkeesta ja usein maa- ja kiviainesmassojen hyödyntämiskelpoisuuden määrittämisessä joudutaan tekemään oletuksia käytettävissä olevaan tietoon pohjalta.

ORIS-ohjelmistoalustalla jokaiselle rakenteelle, kuten sillalle, tunnelille tai tietylle rataosuudelle, määritetään yhteyspiste (*access point*), joka kuvaa rakenteeseen liittyvien

tetään joko suora käyttökohde, käyttökohde jatkokäsittelyn kautta tai sijoituskohde. Mallinnuksen näkökulmasta suora käyttökohde tarkoittaa tilanteita, joissa tarkasteltava massa voidaan joko hyödyntää sellaisenaan, tai joissa massojen käsittely tapahtuu käyttöpaikalla. Käyttökohde jatkokäsittelyn kautta kattaa tilanteet, joissa kiviaines on kuljettava erilliselle murskaus- tai käsittelyalueelle, ennen kuin se voidaan hyödyntää lopullisessa käyttökohteessa. Ulkopuolelta tuotaville rakennusmateriaaleille ja massoille määritetään toimittaja, suora käyttökohde tai käyttökohde väliavarastoinnin kautta. Kuvassa 23 on esitetty yksinkertaistettu prosessikaavio vaadittavien tietojen määrittelystä.



Kuva 23. Leikkausmassojen hyödyntämistä tutkivan skenaarion prosessikaavio.

Määrittelyyn voidaan sisällyttää myös rakentamisen aikataulu, jolloin alustalle viedään tietoa sekä hankkeen yleisaikataulusta että työvaihekohtaisista aikatauluista. Koska ai-

kataulusuunnittelu lisää mallinnuksen monimutkaisuutta huomattavasti, se on usein tarkoituksenmukaista sisällyttää määrittelyyn vasta myöhäisissä suunnitteluvaiheissa. Aikataulusuunnittelua koskevat mallinnukset voivat olla esimerkiksi kokonaan omia iteraatioitaan, joissa vertaillaan eri aikataulutukseen liittyvien ratkaisujen vaikutusta haluttuihin mittareihin.

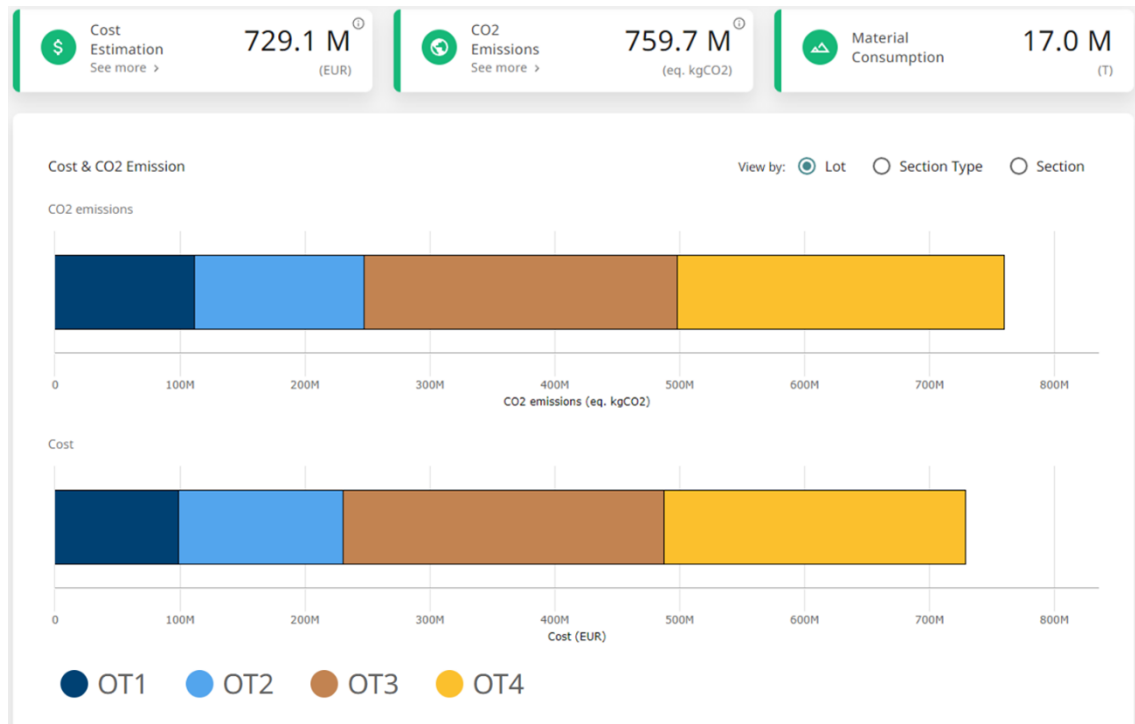
Määrittelyn kautta muodostuu optimointiongelma, jonka ORIS-ohjelma ratkaisee määrittelemällä lyhyimmät mahdolliset kuljetusmatkat. Samanaikaisesti ohjelma laskee suunnitelman myötä muodostuvat päästöt sekä arvion kustannuksista. Tulosten tulkinnan kannalta on olennaista, että kaikki määrittelyn vaiheet ja sen aikana tehdyt valinnat dokumentoidaan. Jos määrittelyyn tehdään muutoksia, niitä käsitellään uusina, erillisinä iteraatioina.

6.4 Vaikutusten arviointi

ORIS-ohjelmistolla arvioidaan tyypillisesti suunnitteluratkaisujen päästöjä tai kustannuksia. Ohjelmisto laskee hankkeen ilmastomuutos-vaikutusluokan (*GWP*) muuntamalla inventaarioanalyysissä kerätyt päästötiedot yksikköön CO₂-ekvivalentti. Ilmastomuutosvaikutus-luokan laskenta ORIS-ohjelmistossa perustuu *Centrum voor Milieukunde Leiden (CML)* -metodiin, joka on yleisesti käytetty menetelmä elinkaaritarkastelujen ympäristövaikutusten karakterisoinnissa ja arvioinnissa (Gabathuler 2006, Klöpffer & Grahl 2014). Laskentamalli on luotu ottaen huomioon kansainväliset standardit SFS-EN 15804:2012+A2:2019, ISO 14067:2018 sekä ISO 21930:2017.

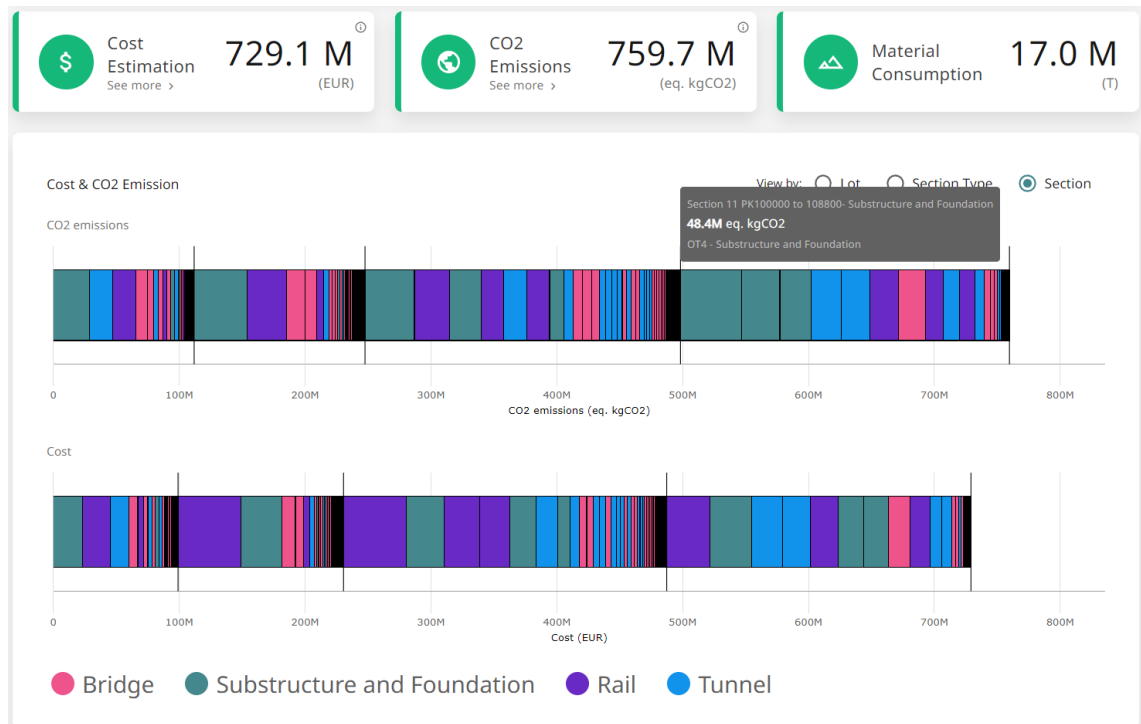
Vaikutusten arviointi voidaan tehdä koko hankkeen kokonaisuutena tai arviointi voidaan rajata vain tiettyihin rataosuuksiin tai rakenteisiin. Tutkittava kohde voidaan rajata käytännössä kuinka pieneen osaan tahansa koko hankkeesta yksittäiseen radan päällystys- tai alusrakennepäähän, siltaan, tunneliin tai tiehen. Laskennan tulosten avulla voidaan tarkastella vaikutusten jakautumista ja selvittää suurimpien päästöjen ja kustannusten lähteet, joiden suunnitteluratkaisuja optimoimalla voidaan saavuttaa merkittävimmät päästö- tai kustannussäästöt.

Päästöjen ja kustannusten jakautumista koko hankealueelle voidaan tarkastella koko hankkeen kokonaisuutena osuuksittain tai rakennetyypeittäin. Kuvassa 24 on esitetty esimerkki yhden laskelman tuloksista osatehtävittäin koko Espoo-Salo-oikoradalta.



Kuva 24. Esimerkki laskennan tuloksista koko hankkeen kokonaisuutena. Tuloksissa on esitetty kokonaiskustannukset ja -päästöt sekä niiden jakautuminen osatehtävittäin.

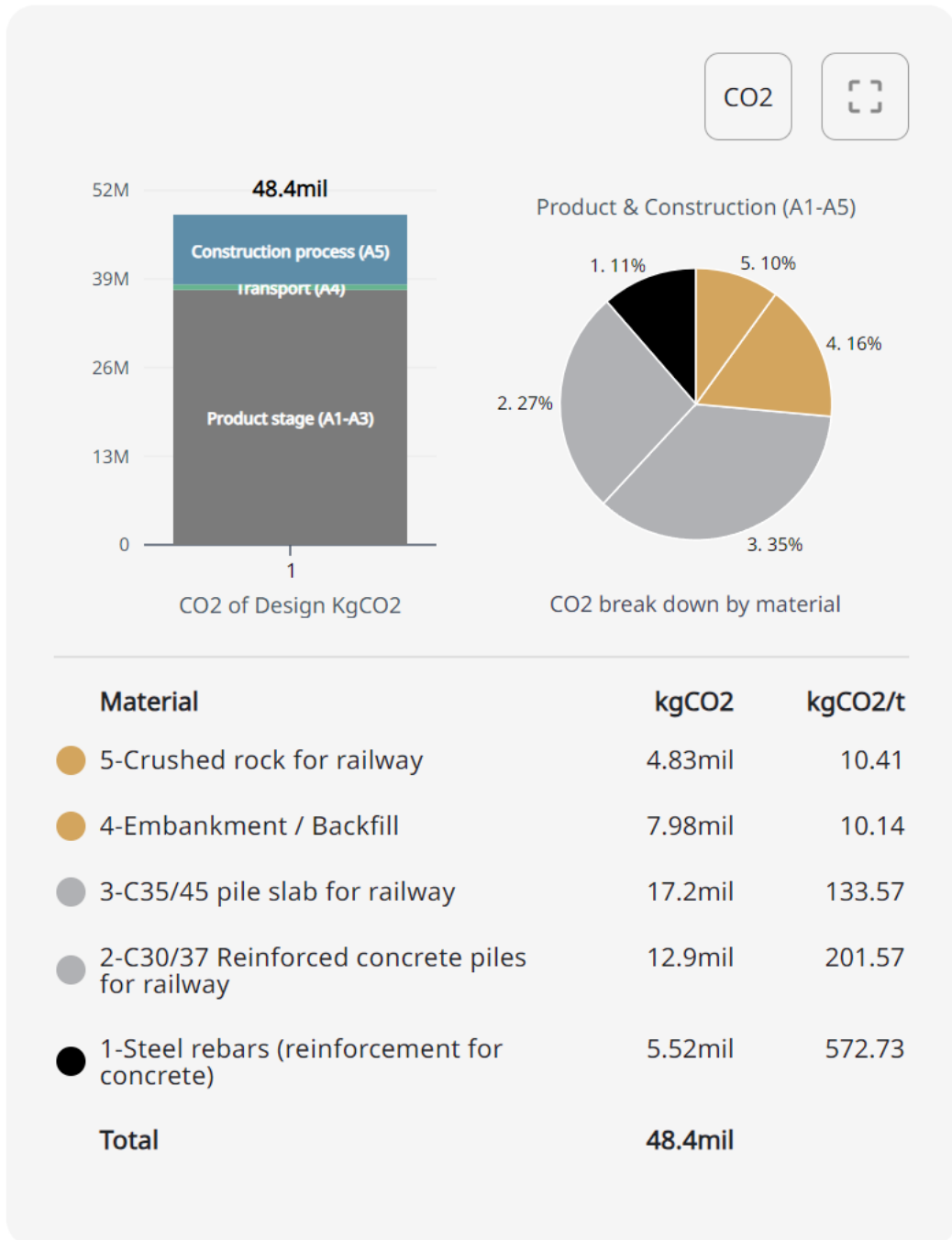
Kuvan 24 esimerkkilaskelman diagrammiesityksestä nähdään, että suurimmat päästöt muodostuvat osatehtävillä 3 ja 4. Kun tarkasteluun lisätään rakennetyypit, voidaan lisäksi tarkastella, mikä rakenne kullakin osatehtävällä aiheuttaa merkittävimmät päästö- ja kustannusvaikutukset. Kuvassa 25 on esitetty sama esimerkkilaskelma siten, että tarkasteluun on lisätty osatehtävien lisäksi eri rakennetyypit.



Kuva 25. Esimerkki laskennan tuloksista koko hankkeen kokonaisuutena. Tuloksissa on esitetty kokonaiskustannukset ja -päästöt ja niiden jakautuminen rakenteittain osatehtävien sisällä. Päästöjä ja kustannuksia voi tarkastella rakenteittain viemällä hiiren kursorin eri kohteisiin. Kuvassa kursori on kohdistettu suurimpaan päästöjen lähteeseen.

Kuvan 25 esimerkkilaskelman diagrammiesityksen avulla voidaan tarkastella vaikutusten jakautumista ja tunnistaa suurimmat päästöjen ja kustannusten lähteet. Esityksestä voidaan esimerkiksi huomata, että suurimmat päästöt muodostuvat noin kilometrin mittaisella alusrakenneosuudella osatehtävällä 4. Esimerkkilaskelman perusteella kyseinen alusrakenneosuus muodostaa noin 7 prosenttia koko hankkeen päästöistä, eli sen voidaan katsoa olevan koko hankkeen kannalta merkittävä päästölähde.

Kun tarkastelua rajataan pienempiin osiin, myös ohjelmiston suorittaman laskennan tarkkuus paranee. Kun tarkastelu kohdistetaan tiettyyn rakenteeseen, ohjelmisto laskee vaadittavien rakennusmateriaalien, kuljetusten ja työsuoritteiden päästö- ja kustannusvaikutukset ja piirtää niistä diagrammiesitykset. Kuvassa 26 on esitetty esimerkkinä ohjelman suorittamat päästölaskelmat aikaisemmin tunnistetulle noin kilometrin mittaiselle radan alusrakenneosuudelle.



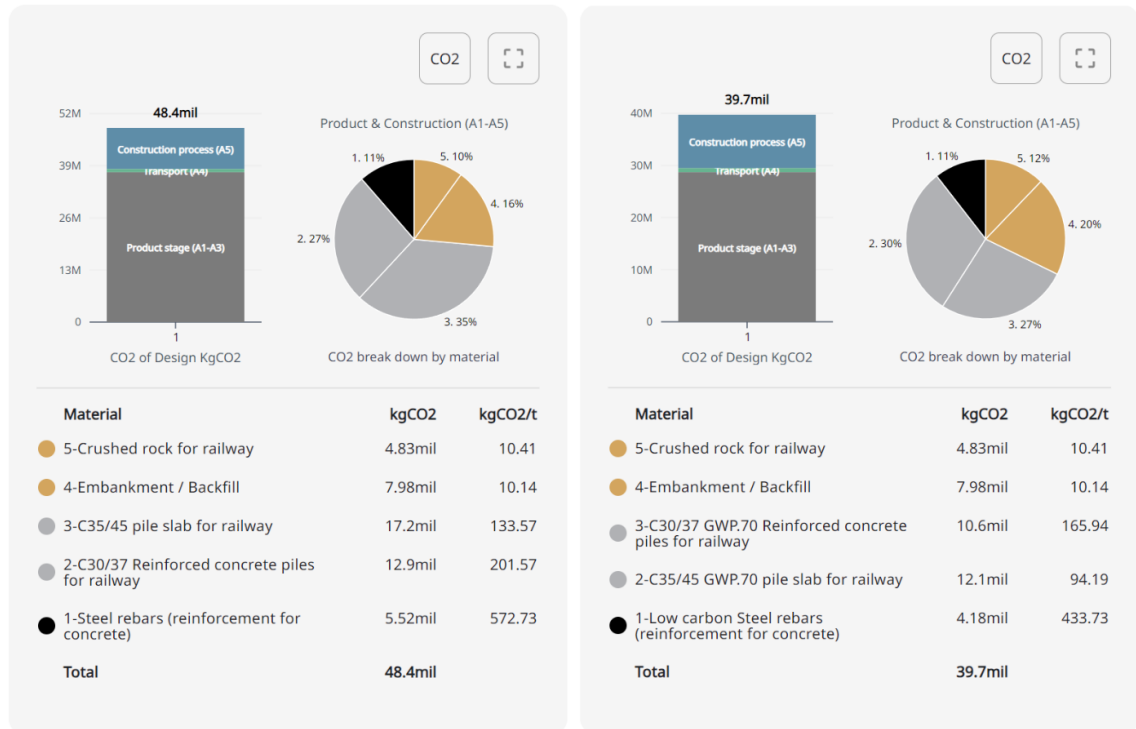
Kuva 26. Esimerkki ORIS-ohjelmalla lasketuista tuloksista noin kilometrin mittaiselle radan alusrakenneosuudelle. Esimerkkilaskelmassa on huomioitu ainoastaan tuote- (A1-A3), kuljetus- (A4) sekä rakentamisvaiheet (A5).

Kuvan 26 esimerkkilaskelmassa päästöt on esitetty sekä tuotevaiheittain pylväskaaviona että materiaaleittain piirakkakaaviona. Lisäksi rakenteissa vaadittavien materiaalien päästöt on esitetty materiaaleittain sekä nettopäästöinä että päästöinä yhtä tonnia kutakin materiaalia kohden. Kokonaispäästöjä kuvaavasta pylväskaaviosta nähdään, että esimerkkilaskelmassa suurimmat päästöt muodostuvat tuotevaiheesta (A1-A3) ja toiseksi suurimmat rakentamisvaiheesta (A5), kun taas kuljetusvaiheen (A4) vaikutus

kokonaispäästöihin on vähäinen. Materiaalien päästöistä suurin osa muodostuu paalulaatoissa (35%) ja pohjanvahvistuksessa (27%) käytettävästä betonista, minkä jälkeen päästöt muodostuvat pengermateriaaleista (16%), betonin raudoitukseen käytettävästä teräksestä (11%) sekä alusrakenteen kiviaineksista (10%). Ohjelmalla on mahdollista tarkastella myös kustannusten jakautumista kuvan 26 mukaisesti eri materiaalien ja elinkaaren vaiheiden välillä.

6.5 Tulosten tulkinta

Laskennan tuloksista pyritään tunnistamaan merkittävimmät päästöjen lähteet sekä toisaalta vertailemaan tuloksia ennalta valittuun vertailukohteeseen. Jos tuloksia verrataan johonkin ORIS-ohjelmalla aikaisemmin suoritettuun iteraatioon, voidaan tuloksia tarkastella käyttöliittymässä rinnakkain vertailun helpottamiseksi. Kuvassa 27 on esitetty kahden eri esimerkkilaskelman päästölaskennan tuloksien vertailu aikaisemmin tunnistetun alusrakenneosuuden osalta. Esimerkkilaskelmissa verrattiin perinteisten rakennusmateriaalien (betoni, teräs) korvaamista vähähiilisillä vaihtoehtoilla.



Kuva 27. Kahden esimerkkilaskelman vertailu. Vasemmalla puolella esitettyssä laskelmassa käytettiin perinteisiä rakennusmateriaaleja. Oikealla puolella esitettyssä esimerkkilaskelmassa betoni ja teräs korvattiin vähähiilillä vaihtoehtoilla. Esimerkilaskelmassa on huomioitu ainoastaan tuote- (A1-A3), kuljetus- (A4) sekä rakentamisvaiheet (A5).

Kuvan 27 esimerkkilaskelmien tuloksista voidaan havaita, että betonin ja teräksen korvaaminen vähähiilillä vaihtoehtoilla laskee kyseisen kohteen hiilidioksidipäästöjä noin 18 %. Tulosten perusteella vähähiilisten materiaalien käytöllä voidaan vaikuttaa merkittävästi kyseisen kohteen hiilidioksidipäästöihin ilman kuljetusten optimointiin tai ylijäämämassojen hyödyntämiseen liittyviä toimenpiteitä. Vastaavanlaista vertailua voidaan suorittaa koko hankkeen tasolla tai rajata vertailua tiettyihin rakenteisiin.

Tulosten tulkinnan aikana muodostetaan toimenpidesuosituksia. Toimenpidesuosituksissa esitetään merkittävimmät kohteet, joiden suunnittelun optimoinnilla voidaan saavuttaa suurimmat päästö- ja kustannussäästöt. Vertailun perusteella esitetään suositukset toimenpiteistä. Tulosten tulkinnan yhteydessä esitetään myös ehdotuksia seuraavista tutkittavista iteraatioista.

7. MATERIAALIT JA MENETELMÄT

7.1 Tavoitteen ja soveltamisalan määrittely

Tässä diplomityössä muodostettiin ORIS-ohjelmistolla skenaario Espoo-Salo-oikoradalla rakentamisen aikana muodostuvien ylijäämämassojen hyödyntämisestä hankkeen sisällä sekä verrattiin skenaarion aiheuttamia päästöjä ORIS-ohjelmistolla muodostettuun nollavaihtoehtoon sekä Turun tunnin juna -hankkeen YVA-selostuksessa ja Espoo-Salo oikoradan yleissuunnitelmavaiheessa esitettyihin päästöihin. Työn tavoitteena oli vastata toiseen diplomityön tutkimuskysymyksistä:

- Miten hankkeessa muodostuvien leikkausmassojen hyödyntämisellä ja kuljetusten suunnittelulla voidaan vaikuttaa kasvihuonekaasupäästöihin Turun Tunnin Juna-hankkeeseen kuuluvalla Espoo-Salo-oikoradalla?

Työssä elinkaariarviointi suoritettiin standardien ISO 14040, ISO 14044 ja SFS-EN 15804 ohjeistusten mukaisesti. Tulosten vertailtavuuden helpottamiseksi sekä virhelähtöjen rajoittamiseksi tutkimus rajattiin koskemaan standardin SFS-EN 15804 mukaan tuote- (A1-A3), kuljetus- (A4) sekä rakentamisvaiheita (A5). Työssä huomioitiin radan rakenteet, sillat, tunnelit ja tiet. Tulokset päätettiin raportoida sekä koko hankkeen kokonaisuutena että yhtä ratakilometriä kohden yksikössä CO₂-ekvivalentti.

Työssä arvioitiin ainoastaan kasvihuonekaasupäästöjä eikä siihen sisällytetty muita ympäristövaikutuksia tai kustannustarkasteluja. Työssä ei huomioitu hiilinieluja eikä laskettu hiilikädenjälkeä. Radan sähköistys, turvalaitteet ja muut ratatekniset laitteet rajattiin päästölaskennan ulkopuolelle. Työhön ei myöskään sisällytetty rakentamisen aikataulusuunnittelua, jolla on huomattava vaikutus infrahankkeen massatalouden ja kuljetusten optimointiin. Kattavampien tuloksien saamiseksi arvioinnissa tulisi huomioida kaikki radan elinkaaren vaiheet, muutokset hiilinieluissa, rakentamisen aikataulusuunnittelu sekä päästövaikutusten ohella muut ympäristövaikutukset.

Työn kohdeyleisönä ovat työn tilaajat Turun Tunnin Juna Oy ja Welado Oy, sekä muut infrasuunnittelua ja -rakentamista toteuttavat tahot. Työn tuloksena esitellään yksi keino massataloussuunnitelmien vaikutusten arvioimiseksi ja verrataan sen tuloksia perinteiseen, aikaisessa suunnitteluvaiheessa käytettävään arviointitapaan (YVA-menettely). Tutkimustuloksia voidaan hyödyntää infrahankkeiden massataloussuunnitelmien elinkaari-vaikutusten ja päästölaskelmien arvioinnissa ja menetelmien valinnassa.

Tutkimuksessa muodostettujen iteraatioiden sekä YVA-menettelyn yhteydessä tehdyn massatalousarvion pääpiirteet on esitetty kuvassa 28.

BASE SCENARIO	YLIJÄÄMÄMASSOJEN HYÖDYNTÄMINEN	YVA-SELVITYS
<ul style="list-style-type: none"> Hankkeessa muodostuvia ylijäämämassoja ei hyödynnetä hankkeen sisällä Ylijäämämassat kuljetetaan sijoitusalueille tai louhoksille Kaikki hankkeessa tarvittavat maa- ja kiviainekset hankintaan ulkopuolelta Kuljetukset arvioidaan tarkasti 	<ul style="list-style-type: none"> Hankkeessa muodostuvat ylijäämämassat hyödynnetään niiden käyttökelpoisuuden mukaan Hyödyntämiskelvottomat massat kuljetetaan sijoitusalueille tai louhoksille Kiviainekset, joita ei saada ratalinjalta, hankintaan ulkopuolelta Kuljetukset arvioidaan tarkasti 	<ul style="list-style-type: none"> Maa- ja kiviainesten hyödynnettävyyttä arvioitu julkisesti saatavilla olevan aineiston perusteella Tietoa sijoitusalueiden sijainneista ei ollut käytettävissä Kuljetusetäisyydet arvioitu karkeasti

Kuva 28. Tutkimuksessa muodostettujen iteraatioiden sekä YVA-menettelyn yhteydessä tehdyn massatalousarvion pääpiirteet.

Base scenarion tarkoituksena oli toimia vertailussa niin sanottuna nollavaihtoehtona, jossa mitään hankkeen sisällä muodostuvia ylijäämämassoja ei hyödynnetä, ja jossa kaikki rakentamisessa vaadittavat maa- ja kiviainesmassat hankitaan hankkeen ulkopuolelta. Base scenario toimi myös lähtökohtana ja testialustana muodostettaessa myöhempiä iteraatioita.

Ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivan iteraation tarkoituksena oli selvittää, miten hankkeessa muodostuvien ylijäämämassojen hyödyntäminen vaikuttaa hankkeen kasvihuonekaasupäästöihin. Iteraation tavoitteena oli huomioida kiertotalouden periaatteet sekä tutkia ylijäämämassojen hyödyntämisestä saatavia hyötyjä suhteessa niiden jatkokäsittelyn ja kuljetusten vaikutuksiin. Iteraation lähtökohtana oli kaikkien hankkeessa muodostuvien kiviainesten hyödyntäminen niiden laadun mukaan mahdollisimman korkean vaatimustason kohteissa, ja niiden käyttöä toissijaisissa kohteissa pyrittiin välttämään. Kiviainesten hyödynnettävyyttä arvioitiin Espoo-Salo-oikoradalla tehtyjen kiviainesselvitysten perusteella. Hyödyntämiskelvottomat maa- ja kiviainekset pyrittiin sijoittamaan mahdollisimman lähellä sijaitseville sijoitusalueille tai louhoksille, jotka toimivat iteraatioissa maanvastaanottoaikkoina. Hankkeen sisällä muodostuvien ylijäämämassojen tarkastelun jälkeen määriteltiin ulkopuolelta hankittavien kiviainesten tarve ja etsittiin niiden lähin toimittaja.

YVA-selostus toimi ylijäämämassojen hyödyntämiseen keskittyvän iteraation toisena vertailukohtana. YVA-selostuksessa ylijäämämassojen määrää ja hyödynnettävyyttä on arvioitu hankealueen maa-, kallioperä- ja luonnonolosuhteiden, kiviaineslupa- ja varantotietojen sekä yleissuunnitelmavaiheen suunnittelun määrätietojen perusteella. Ratalinjalta saatavien maa- ja kiviainesten hyödynnettävyyttä hankkeen sisällä arvioitiin muun muassa Geologian tutkimuskeskuksen maaperäaineiston (Hakku-latauspalvelu) sekä Suomen ympäristökeskuksen rajapinta-aineiston avulla. YVA-menettelyn yhteydessä tehtyjen päästölaskelmien menetelmiä ja rajauksia on kuvattu tarkemmin kappaleessa 5.2.

7.2 Inventaarioanalyysi

Inventaarioanalyysissä kerättiin kaikki kappaleessa 6.3 esitetyt suunnittelutiedot ne integroitiin ohjelmistoalustalle. Päästölaskennan suorittamista varten päästökertoimia haettiin ensisijaisesti suomalaisesta CO2data.fi:sta, minkä jälkeen puuttuvat kertoimet haettiin kansainvälisestä Ecoinvent -päästötietokannasta.

Arviot tunneleista saatavista kiviainesmassoista saatiin suoraan hankkeessa toimivilta tunnelisuunnittelijoilta, kun taas maa- ja kallioleikkauksista muodostuvien massojen määrätiedot kerättiin ratasuunnittelijoiden toimittamista NovaPoint-suunnittelumalleista. Suunnitteluaineisto koostui suurelta osin yleissuunnitelmavaiheen suunnittelutiedoista. Ratasuunnitelmavaiheen suunnittelutietoa pyrittiin kuitenkin hyödyntämään niissä tilanteissa, joissa sitä oli saatavilla. Esimerkiksi osatehtävien 1 ja 2 osalta työssä pystyttiin hyödyntämään ratasuunnitelmavaiheen määrätietoja ja suunnittelumalleja. Tunneleista sekä kallio- ja maaleikkauksista saatavien maa- ja kiviainesten määrät on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Suunnittelijoilta ja suunnittelumalleista kerätyt määrätiedot tunneleista ja kallio- ja maaleikkauksista saatavista kiviaines- ja maamassoista.

OT	Rock blasting (million m ³)	Rock cutting (million m ³)	Excavation (million m ³)	Total (million m ³)
OT1	0.4	0.9	0.2	1.5
OT2	0.1	1.3	1.1	2.4
OT3	1.1	1.1	2.9	5.1
OT4	1.2	1.1	1.3	3.6
OT1-OT4 (million m³)	2.8	4.4	5.4	12.6

Vastaavasti rakenteissa vaadittavat määrätiedot kerättiin suunnittelumalleista. Massatasapainotarkasteluja varten rakentamisessa vaadittavien kiviainesten sekä betonin ja as-

valtin valmistuksessa vaadittavien kiviainesten ja sideaineiden määrät muunnettiin kuutiometreistä tonneiksi. Vastaavasti hankkeessa muodostuvien ylijäämämassojen määrätiedot muunnettiin kuutiometreistä tonneiksi. Rakenteissa vaadittavien kiviainesten määrät on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Rakentamisessa vaadittavat maa- ja kiviainesmassat.

Product	OT1 (tons)	OT2 (tons)	OT3 (tons)	OT4 (tons)	Total (tons)
Sand & filler for asphalt	3,268	11,457	1,937	1,366	18,027
aggregates for asphalt	4,854	17,706	2,669	1,882	27,111
0/16 .. 32 .. 56 (dividing layer, base layer etc.)	96,642	250,260	120,445	84,341	551,688
Sand & filler for concrete	106,155	99,466	203,798	297,366	706,785
aggregates for concrete	145,693	135,869	302,801	424,533	1,008,895
Crushed rock for railway intermediate layer	765,959	783,669	1,256,871	1,233,355	4,039,853
Embankment	1,758,597	1,542,353	3,350,130	1,784,580	8,435,660
Total	2,881,167	2,840,779	5,238,650	3,827,423	14,788,019

Rakentamisessa vaadittavien kiviainesten lisäksi työssä huomioitiin rakentamisessa vaadittavat terästuotteet, kuten ratakiskot ja betonirauδοitteet, sekä betonista valmistetut ratapölkkyt. Ratakiskojen oletettiin olevan profiiliin 60E1 mukaiset, jatkuvasti hitsattavat ratakiskot. Ratapölkkyjen oletettiin olevan B99-betoniratapölkkyjä.

Ohjelmistoalustalle kerättiin saatavilla olevat tiedot sijoitusalueista sekä niiden kapasiteeteista. Työn kirjoitushetkellä sijoitusalueiden suunnittelu oli valmistunut ainoastaan kahden osatehtävän osalta. Iteraatioiden mallinnuksessa hyödynnettiin näitä sijoitusalueita, eikä työssä tehty oletuksia kahden osatehtävän puuttuvien sijoitusalueiden sijainneista tai kapasiteeteista. Työssä hyödynnettäviä sijoitusalueita oli yhteensä 52, ja ne sijaitsivat väleillä Vihti-Lohja ja Suomusjärvi-Salo.

Base scenariota varten ei tehty ylijäämämassojen hyödynnettävyyttä koskevia määrityksiä, vaan kaikki hankkeessa muodostuvat massat asetettiin kulkemaan muodostumispaikkaa lähimmästä yhteyspisteestä lähimmille sijoitusalueille tai louhoksille, jotka toimivat työssä maan vastaanottopaikkoina. Vastaavasti kaikki hankkeessa tarvittavat kiviainekset sekä muut rakennusmateriaalit hankittiin lähimmältä materiaalin toimittajalta, ja ne asetettiin kulkemaan toimittajan sijainnista käyttöpaikkaa lähimpänä sijaitsevaan yhteyspisteeseen.

Ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivassa iteraatiossa määrittelyt tehtiin kuvassa 23 esitetyn kaavion mukaisesti. Varsinaista ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivaa iteraatiota varten hankkeessa muodostuville kiviainesmassoille määritettiin potentiaalinen

käyttökohde hankkeen aikana suoritetun kiviainesselvityksen tulosten perusteella. Kiviainesselvityksestä tutkittiin niiden muoto-ominaisuudet sekä mekaaniset ja geometriset ominaisuudet. Tulosten perusteella Kiviaineksille tunnistettiin seuraavat potentiaaliset käyttökohteet:

- Radan eristys- ja välikerros
- Teiden kantavat rakenteet
- Teiden muut rakennekerrokset
- Betonin kiviainekset
- Asfaltin kiviainekset
- Penkereet ja täytöt.

Kuvassa 29 on esitetty esimerkki kiviainesselvityksen tulosten koonnista massatalous-suunnittelua varten.

Käyttökohde						
EV-kerros	Tien kantava	Tien jakava	Asfaltti	Betoni > 4 mm	Kuormitettu penger	Täyttömateriaali
Intermediate	Bearing layer	Dividing layer	Asphalt	Concrete	Embankment	Filling
x	x	x	x		x	x
x	x	x	x		x	x
x	x	x	x		x	x
x	x	x	x		x	x
x	x	x	x		x	x
		x		x	x	x
x	x	x		(x)	x	x
	x	x		(x)	x	x
x	x	x	x	Äijäsuo petro	x	x
x	x	x	x	Karnainen/petro	x	x
x	x	x	x	Karnainen/petro	x	x
						x
		Ei		Ei	x	x
			Ei	Ei		(x)
		x		x	x	x
		x		x	x	x

Kuva 29. Ratalinjalta saatavien kiviainesten luokittelua potentiaalisten käyttökohteiden mukaan. Kuvasta on rajattu kiviainesten tarkat sijaintitiedot.

Iteraation lähtökohtana oli kaikkien kiviainesten hyödyntäminen korkeimman vaatimustason kohteessa. Jos korkeimman vaatimustason kohteen tarve saatiin täytettyä, ylijäämäinen korkealaatuinen kiviaines käytettiin hyväksi matalamman vaatimustason kohteessa siten, että mahdollisimman suuri osa hankkeessa muodostuvista kiviaineksista hyödynnettäisiin hankkeen sisällä. Käytännössä matalamman vaatimustason kohteiksi katsottiin teiden rakennekerrokset (pois lukien kantavat rakenteet), joihin on saatavilla

runsaasti kiviainesresursseja (Räisänen ym. 2023) sekä penkereet ja täytöt, joissa käytettäviin kiviaineksiin ei kohdistu yhtä suuria laatuvaatimuksia kuin muihin rakennekeroksiin. Kaikki raidesepeli oletettiin tuotavaksi hankkeen ulkopuolelta. Heikkolaatuisille maamassoille ei etsitty käyttökohteita, vaan ne määritettiin kokonaisuudessaan sijoitettaviksi ylijäämämassoiksi.

Ratalinjalta saatavien kiviainesten laatuun vaikuttavat geologisten ominaisuuksien lisäksi muun muassa louhinta, jatkokäsittelyprosessit, kuljetus ja varastointi (Räisänen ym. 2023). Tästä syystä työssä oletettiin, ettei kaikkea ratalinjalta saatavaa kiviainesta pystytä hyödyntämään, vaan osa hyvälaatuisesta kiviaineksestä menetetään louhinnan, murskauksen ja jatkokäsittelyn seurauksena. Yksinkertaisuuden vuoksi oletettiin, että tunneleista saatavasta kiviaineksestä 80 prosenttia pystytään hyödyntämään kiviainestutkimusten tulosten osoittamissa käyttökohteissa, ja loput 20 prosenttia joudutaan sijoittamaan. Kallioleikkausten osalta oletettiin, että leikkauksen pinnasta 20 cm syvyyteen asti ulottuva kiviaines joudutaan sijoittamaan, seuraavat 80 cm voidaan käyttää penkereissä ja täytöissä, ja loput saatavasta kiviaineksestä voidaan hyödyntää kiviainestutkimusten tulosten osoittamissa käyttökohteissa.

Koska ratasuunnitelmavaiheessa ei ollut tietoa mahdollisista kiviainesten murskaus- ja jatkokäsittelyalueista, ne sijoitettiin suunnitelmissa esitettyjen sijoitusalueiden yhteyteen. Betonin ja asfaltin kiviaineksiksi sopivat ylijäämäiset kiviainesmassat määritettiin kuljettavaksi lähimmälle betonin tai asfaltin toimittajalle ja sieltä edelleen käyttökohteeseensa. Sijoitusalueiden kapasiteetin täytyessä loput ylijäämämassat kuljetettiin lähimmille louhoksille, jotka toimivat mallinnuksessa maanvastaanottopaikkoina.

Vaadittavien tietojen keräämisen jälkeen kerätyt tiedot yhdisteltiin massansiirtosuunnitelman tekemiseksi. Tunneleista ja maa- ja kallioleikkauksista saatavat määrätiedot yhdistettiin kiviainesselvitysten tuloksiin kuvan 30 mukaisesti.

OT	Tunnel name	quantity (m ³)	Embankment	Filling	Road dividing layer	Concrete	Asphalt	Intermediate layer	Road bearing layer
OT1	Mikkela	274,000	x	x	x		x	(x)	x
OT1	Myntinmaki	92,000	x	x	x	x			
OT1	Kolmiranta	64,000	x	x	x	x			
OT2	Vihti I	22,000	x	x	x	(x)		(x)	x
OT2	Vihti II	52,000	x	x	x	(x)		(x)	x
OT3	Lempola	35,000	x	x	x	(x)	(x)	x	x
OT3	Aijassuo	45,000	x	x	x	(x)	x	x	x
OT3	Lehmihaka	61,000	x	x	x	(x)	x	x	x
OT3	Karnainen	430,000		x					

Kuva 30. Esimerkki tunneleista saatavista kiviaineksista sekä kiviainesten mahdolliset käyttökohteet.

Esimerkiksi Mikkelan tunnelin kohdalla tarkastelu eteni seuraavasti. Tunnelista louhinnan ja räjäytystöiden seurauksena saatavan kiviainesmäärän arvioitiin olevan 274 000 m³. Määrä muunnettiin massayksikköön, jolloin saatavilla olevan kiviaineksen määrä on 753 500 tonnia. Hyödynnettävän kiviaineksen osuuden arvioitiin olevan 80 % eli 602 800 tonnia. Hyödyntämiskelvoton 20 % eli 150 700 tonnia ohjattiin lähimmälle maanvastaanotto paikalle, minkä jälkeen tarkasteltiin varsinaista hyödynnettävissä olevaa määrää. Kuvasta 30 nähdään, että Mikkelan tunnelista saatavaa kiviainesta voidaan käyttää monipuolisesti eri kohteissa, kuten asfaltin kiviaineksena sekä tien rakennekerroksissa. Kuvasta 30 nähdään myös, että Mikkelan tunneli on osatehtävillä 1 ja 2 ainoa tunneli, josta on mahdollisesti saatavilla asfaltin kiviaineksia. Tästä syystä Mikkelan tunnelista saatavien kiviainesten ensisijaiseksi kohteeksi valittiin asfaltin kiviainekset ja toissijaiseksi kohteeksi teiden rakennekerrokset. Kun tiedot yhdistettiin rakentamisessa vaadittujen kiviainesten määrätietoihin, havaittiin, että Mikkelan tunnelista saatavasta kiviaineksesta 7 % riittää kattamaan osatehtävien 1 ja 2 asfaltin kiviainesten tarpeen. Tämän jälkeen tarkasteltiin osatehtävällä 1 teiden rakennekerroksissa vaadittavien kiviainesten määrä, jolloin havaittiin, että 23 % Mikkelan tunnelista saatavilla olevasta kiviaineksesta kattaa kokonaan teiden rakennekerroksissa tarvittavan määrän. Hyödynnettävissä olevat kiviainekset ohjattiin ensin niille määritettyyn jatkokäsittelykohteeseen, minkä jälkeen ne ohjattiin hyödyntämispaikalleen. Koska korkeamman vaatimustason kohteet olivat osatehtävän 1 osalta tässä kohtaa täytetty, loput 70 % hyödynnettävästä määrästä ohjattiin pengeri- ja täyttömateriaaleiksi. Penger- ja täyttömateriaaleina hyödynnettävät kiviainek-

set ohjattiin niin ikään jatkokäsittelyalueen kautta hyödyntämispaikalleen. Vastaava tarkastelu toteutettiin kaikille hankkeen tunneleista sekä kallioleikkauksista saataville kiviainesmassoille.

7.3 Vaikutusten arviointi

Vaikutusten arvioinnissa huomioitiin ainoastaan eri suunnitelmien kasvihuonekaasupäästöt koko hankkeen kokonaisuutena sekä ratakilometriä kohden. Hankkeen kasvihuonekaasupäästöt arvioitiin laskemalla hankkeen ilmastonmuutos-vaikutusluokka (*GWP*) muuntamalla inventaarioanalyysissä kerätyt päästötiedot yksikköön CO₂-ekvivalentti. ORIS-ohjelmisto laskee samanaikaisesti päästötietojen kanssa myös sille määritetyn iteraation kustannukset sekä elinkaaren aikaiset vaikutukset, mutta vaikutusten arvioinnin ja tulosten tulkinnan yksinkertaistamiseksi ne rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle.

Elinkaariarvioinnin tuloksissa esiintyy oletettavasti epätarkkuutta eri virhelähteiden vuoksi. Laskentamallissa ei huomioitu rakentamisen aikataulusuunnittelua, vaan kaikkien massojen ja materiaalien kuljetusten oletettiin tapahtuvan käytännössä samanaikaisesti ja toisistaan riippumatta. Samoin laskentamallissa oletettiin, että kaikkia ulkopuolelta hankittavia kiviaineksia ja rakennusmateriaaleja on aina saatavilla, eivätkä niiden mahdolliset saatavuusongelmat vaikuta tuloksiin. Tämä voi vaikuttaa vaikutusarvioinnin tuloksiin etenkin korkealaatuisten kiviainesten osalta, joiden saatavuus on paikoin heikentynyt (Pokki ym. 2009, Lonka & Loukola-Ruskeeniemi 2015). Myös esimerkiksi rakentamisessa vaadittavien terästuotteiden osalta on mahdollista, ettei tutkimuksessa määritelty terästoimittaja pysty toimittamaan kyseistä terästuotetta, jolloin tuotteen kuljetusmatka voi pidentyä merkittävästi.

Ratahankkeen massatalouden suunnittelu on monimutkainen kokonaisuus, ja tutkimuksessa jouduttiin tekemään useita yksinkertaistuksia ja oletuksia käytettävissä olevan tiedon ja ajan puitteissa. Kaikkia suunnittelutietoja, kuten tietoja sijoitusalueista, ei työn kirjoitushetkellä ollut saatavilla. Kallioleikkauksista saatavilla olevan, hyödynnettävissä olevan kiviaineksen määrien arvioinnissa tehtiin oletus, että kiviaineksen laatu paranee, mitä syvemmältä kiviainesta louhitaan, mikä ei välttämättä vastaa todellisuutta. Samoin murskaukseen ja kiviainesten jatkokäsittelyyn liittyy epävarmuutta, sillä työsuoritteiden päästöt arvioitiin karkealla tasolla. Tutkimuksessa ei tarkasteltu heikompilaatuisten maaainesten hyödynnettävyyttä esimerkiksi täytöissä tai meluvälleissa, mikä oletettavasti vaikuttaa tutkimustuloksiin.

8. TULOKSET

Tässä luvussa esitetään tutkimuksen tulokset ja niiden tulkinta sekä pohditaan massataloussuunnitteluun liittyvän elinkaariarvioinnin ja päästölaskennan mahdollisuuksia ja kehityskohteita. Tulokset esitetään kahdessa osassa. Ensin tarkastellaan muodostuvien ylijäämämassojen määriä ja arvioita niiden hyödynnettävyydestä eri skenaarioiden välillä. Toiseksi tarkastellaan suunnitelmiin liittyvää päästölaskentaa ja laskennan tuloksia. Päästölaskennan osalta vertailussa on huomioitu YVA-selostuksen lisäksi myös Espoo-Salo-oikoradan yleissuunnitelmassa esitetyt päästölaskennan tulokset. Lopuksi tuloksia peilataan kirjallisuudessa esitettyihin tuloksiin sekä pohditaan mahdollisia toimenpidesuosituksia Espoo-Salo-oikoradan massatalouden suunnitteluun.

8.1 Ylijäämämassojen määrä ja hyödynnettävyys

Taulukossa 9 on esitetty eri skenaarioiden mukaan hankkeessa muodostuvat maa- ja kiviainesmassat, hyödyntämiskelpoisten massojen määrät sekä hankkeessa muodostuvien ylijäämäisten massojen määrä. Hankkeessa muodostuvien maa- ja kiviainesmassojen arvioidut määrät ovat samankaltaiset eri skenaarioiden välillä, mikä oli odotettavissa, sillä kaikki skenaariot pohjautuivat osittain samoihin yleissuunnitelmavaiheen suunnittelutietoihin.

Taulukko 9. Hankkeessa muodostuvat ja hyödynnettävät maa- ja kiviainesmassat eri skenaarioissa

	Base scenario	YVA-selostus	Ylijäämämassojen hyödyntäminen
Maaleikkaukset			
Leikataan, m ³	5400000	5820000	5400000
Hyödynnetään, m ³	0	0	0
Kallioleikkaukset ja tunnelit			
Leikataan, m ³	7200000	6800000	7200000
Hyödynnetään, m ³	0	4380000	4500000
Yhteensä			
Leikataan, m ³	12600000	12620000	12600000
Hyödynnetään, m ³	0	4380000	4500000
Käytetään, %	0	34,7 %	35,7 %
Ylijäämä, m ³	12600000	8240000	8100000

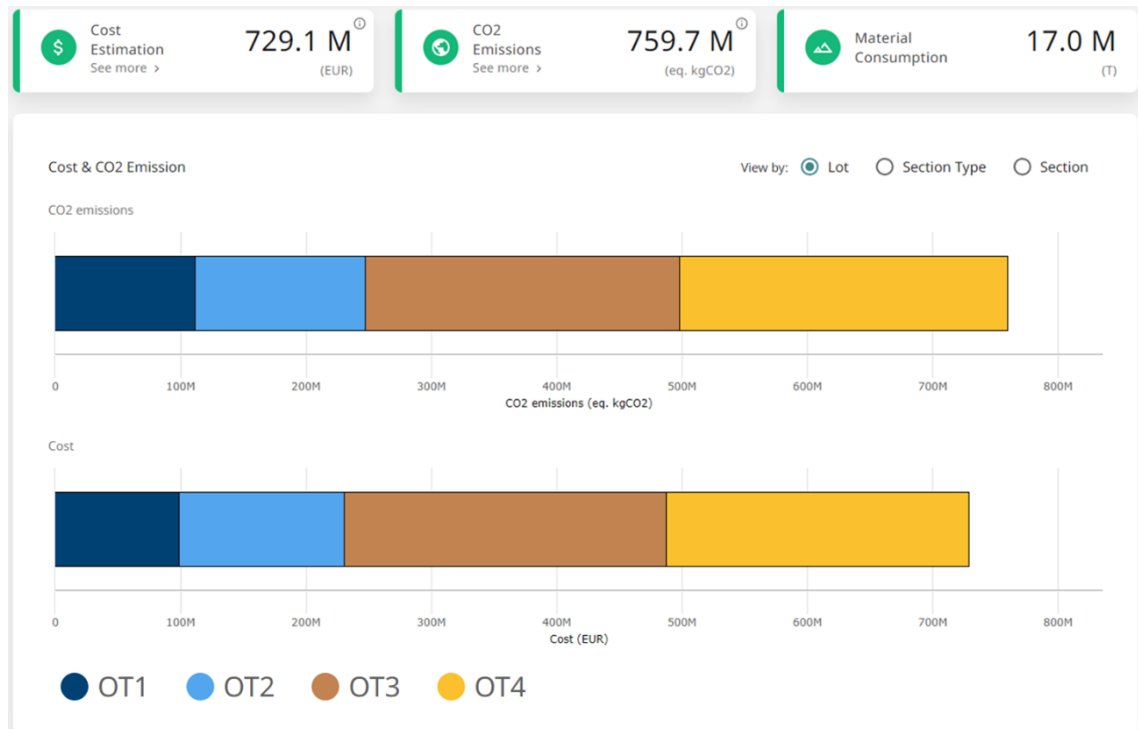
Kaikkien skenaarioiden mukaan hankkeessa muodostuu noin 12,6 miljoonaa kuutiota maa- ja kiviainesmassoja. Base scenarion ja ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivan

iteraation muodostamisessa käytettiin osittain myös ratasuunnitelmavaiheen suunnittelutietoa, joissa leikkauksista muodostuvat massat oli arvioitu yleissuunnitelmavaihetta tarkemmin. Näissä skenaarioissa ainoastaan maa- ja kalliroleikkauksista muodostuvien massojen määrissä havaittiin muutoksia yleissuunnitelmavaiheessa esitettyihin arvioihin. Tarkempien suunnittelutietojen hyödyntämisestä huolimatta massojen kokonaismäärä ei muuttunut merkittävästi YVA:ssa arvioiduista määristä.

Merkittävimmät erot eri skenaarioiden välillä muodostuvat hyödynnettävien maa- ja kiviainesmassojen määrissä sekä muodostuvassa ylijäämässä. Base scenarion mukaan mitään hankkeessa leikattavia massoja ei hyödynnetä hankkeen sisällä, joten siihen liittyvien massalaskelmien tulosten odotettiin eroavan muista skenaarioista merkittävästi. YVA-selostuksen ja ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivan iteraation väliset erot ovat sen sijaan pienemmät. Ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivan iteraation mukaan ylijäämämassoja muodostuu noin 140 000 kuutiota vähemmän YVA-selostuksessa arvioiduista määristä, ja kaikista leikkauksissa muodostuvista massoista pystytään hyödyntämään yhden prosenttiyksikön verran enemmän verrattuna YVA-selostuksen arvioon.

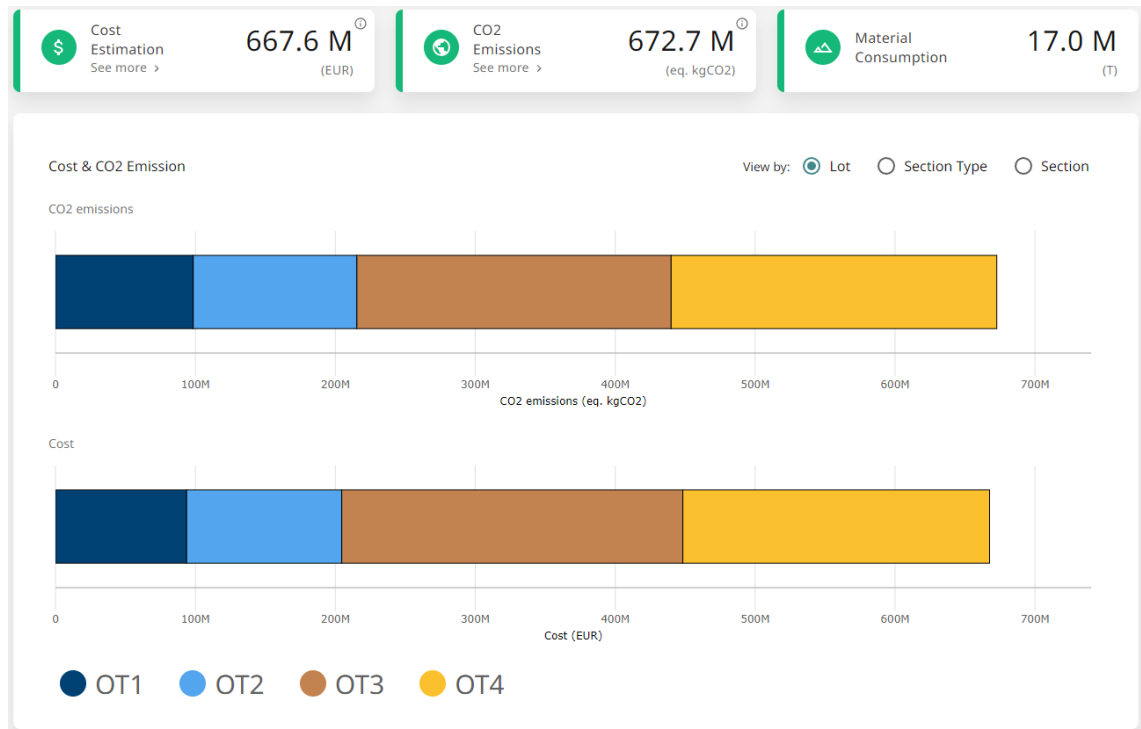
8.2 Päästövaikutukset

Base scenario -iteraatioon liittyvän laskennan tulokset koko hankkeen kokonaisuutena on esitetty kuvassa 31. Base scenariossa hankkeen laskennalliset kokonaispäästöt ovat 759,7 ktCO₂-ekv ja päästöt ratakilometriä kohden 7,73 ktCO₂-ekv/km (98 km). Suurimmat päästövaikutukset muodostuvat osatehtävillä 3 ja 4.



Kuva 31. Base scenario -iteraation tulokset koko hankkeen kokonaisuutena.

Ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivan iteraation tulokset koko hankkeen kokonaisuutena on esitetty kuvassa 32. Iteraation mukaan hankkeen laskennalliset kokonaispäästöt ovat 672,7 ktCO₂-ekv ja päästöt ratakilometriä kohden 6,86 ktCO₂-ekv/km (98 km). Suurimmat päästövaikutukset muodostuvat osatehtävillä 3 ja 4.



Kuva 32. Ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivan iteraation tulokset koko hankkeen kokonaisuutena.

Työssä muodostettujen skenaarioiden, YVA-selostuksen sekä yleissuunnitelmavaiheen päästölaskennan tulokset on esitetty taulukossa 10. Päästöjen vertailussa on huomiotava, että YVA-selostuksessa päästöt on esitetty koko hankeosuudelle Espoo-Turku. Päästöt ratakilometriä kohden laskettiin ratasuunnitelmavaiheen ratalinjauksen pituuden mukaan (98 km) paitsi YVA-selostuksessa, jossa päästöt oli ilmoitettu koko hankeosuudelle (150 km).

Taulukko 10. Hankkeen kokonaispäästöt sekä päästöt ratakilometriä kohden

	YVA-selostus	Espoo-Salo oikorata YS	Base scenario	Ylijäämämassojen hyödyntäminen
Päästöt koko hankkeen kokonaisuutena, ktCO ₂ -ekv	1011–1038	649	759,7	672,7
Päästöt ratakilometriä kohden, ktCO ₂ -ekv/km	7	6,62	7,73	6,86

Kokonaispäästöt rakenteittain eri skenaarioissa on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Hankkeen kokonaispäästöt rakenteittain

	YVA-selostus	Espoo-Salo oikorata YS	Base scenario	Ylijäämämassojen hyödyntäminen
Ratalinja, kt-CO ₂ -ekv	595–602	286	428	366
Tunnelit, ktCO ₂ -ekv	104	97	158	143
Sillat, ktCO ₂ -ekv	216–231	201	161	152
Huolto- ja pelastustiet, ktCO ₂ -ekv	96–101	65	14	11

Päästöjen jakautuminen rakenteittain eri skenaarioissa on esitetty taulukossa 12. YVA-selostuksen päästöjen jakautuminen laskettiin hankevaihtoedon A mukaan.

Taulukko 12. Päästöjen jakautuminen rakenteittain eri skenaarioissa

	YVA-selostus	Espoo-Salo oikorata YS	Base scenario	Ylijäämämassojen hyödyntäminen
Ratalinja	59 %	44 %	56 %	54 %
Tunnelit	21 %	15 %	21 %	21 %
Sillat	10 %	31 %	21 %	23 %
Huolto- ja pelastustiet	9 %	10 %	2 %	2 %

Päästöjen jakautuminen materiaalien, kuljetusten ja työsuoritteiden päästöjen kesken on esitetty taulukossa 13. YVA-selostuksen päästöjen jakautuminen laskettiin hankevaihtoedon A mukaan.

Taulukko 13. Päästöjen jakautuminen rakenteittain eri skenaarioissa

	YVA-selostus	Espoo-Salo oikorata YS	Base scenario	Ylijäämämassojen hyödyntäminen
Materiaalit	86 %	78 %	70 %	69 %
Kuljetukset	9 %	15 %	4 %	4 %
Työsuoritteet	5 %	7 %	26 %	27 %

Työssä pyrittiin tarkastelemaan päästöjä koko hankkeen kokonaisuutena ja välttämään osaoptimointia, joten tarkempia kohdekohtaisia päästölaskelmia ei tarkasteltu tuloksissa.

8.3 Tulosten tulkinta

8.3.1 Ylijäämämassojen määrä ja hyödynnettävyys

Eri skenaarioiden välillä ei havaittu suuria eroavaisuuksia hankkeessa muodostuvien leikkausmassojen määrissä. Leikkausmassoissa oletettiin esiintyvän enemmän vaihtelua YVA-selostuksen ja ORIS-ohjelmalla mallinnettujen skenaarioiden välillä, sillä ohjelmistoalustalle kerättiin myös ratasuunnitelmavaiheessa laadittuja, tarkempia määrätietoja leikkausmassoista. Samoin hyödynnettävien massojen sekä lopullisen ylijäämän määrissä odotettiin esiintyvän enemmän vaihtelua erityisesti ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivan iteraation ja YVA-selostuksen välillä, sillä käytössä oli tarkempia tutkimustuloksia ratalinjalta saatavien kiviainesten laadusta.

Tarkkoja massataloussuunnitelmia ei yleisesti tehdä yleissuunnitelmavaiheessa (Väylävirasto 2021d), sillä massalaskenta on työlästä ja sillä saavutettavat hyödyt koetaan vähäisiksi vaadittavaan työmäärään nähden (YIV 2019). Työn tulokset ovat linjassa massalaskennasta tehtyjen käytännön kokemusten ja havaintojen kanssa. Myös tässä työssä toteutettu yksityiskohtainen leikkausmassojen tarkastelu sekä massatasapainon ja kuljetusten optimointi olivat siihen tarkoitettujen ohjelmistosovelluksen hyödyntämisestä huolimatta aikaa vieviä työvaiheita ja vaativat paljon resursseja tilaajalta, suunnittelukonsulteilta, kiviainesten tutkijoilta, sekä ohjelmistosovelluksen parissa työskennelleiltä konsulteilta. Tulokset olivat tästä huolimatta hyvin samankaltaisia kuin yleissuunnitelmavaiheessa karkeasti arvioidut määrätiedot leikattavista ja hyödynnettävistä maa- ja kiviainesainemassoista. Tulosten perusteella vielä ratasuunnitelmavaiheessakaan ei saavuteta lähtötietojen suhteen sellaista tarkkuustasoa, joka mahdollistaisi yleissuunnitelmavaihetta tarkemman massatalouden suunnittelun.

Tulosten kannalta on kuitenkin huomioitava, että työssä toteutettiin vain yksi mahdollinen skenaario ylijäämämassojen hyödyntämisestä, ja muitakin tehokkaita tapoja ja skenaarioita voi olla olemassa. Tulosten kannalta eniten epävarmuutta liittyy heikkolaatuisten maa-ainesten sekä ylijäämäisten kiviainesten hyödyntämiseen hankkeen sisällä tai muissa kohteissa. Työssä ei esimerkiksi tarkasteltu lainkaan ylijäämäisten maa-ainesten hyödyntämistä, vaan tehtiin YVA-selostuksen tapaan oletus, että kaikki heikkolaatuiset maa-ainekset ovat hyödyntämiskelvottomia ja joudutaan sijoittamaan tai kuljettamaan maankaatopaikoille. Myöskään hyödyntämiskelvottomille kiviaineksille ei etsitty hyödyntämiskohteita hankkeen ulkopuolelta.

8.3.2 Päästövaikutukset

Päästövaikutusten arvioinnissa keskityttiin vertailemaan päästöarvoja ratakilometriä kohden. Päästöissä ratakilometriä kohden ei base scenariota lukuun ottamatta havaittu merkittäviä eroavaisuuksia eri skenaarioiden välillä. Suurimmat päästöt muodostuivat odotetusti base scenariossa, johon verrattuna kaikki muut skenaariot osoittautuivat päästöjen vähentämisen kannalta paremmiksi ratkaisuksi. Esimerkiksi ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivan iteraation päästöt ratakilometriä kohden ovat noin 11 % pienemmät kuin base scenariossa. Base scenarion ja muiden skenaarioiden vertailun tulokset tukevat kirjallisuudessa esitettyjä arvioita, joiden mukaan ylijäämämassojen tehokkaalla hyödyntämisellä ja kuljetusten optimoimisella voidaan vaikuttaa päästöjä vähentävästi (Väylävirasto 2020a, Forsman ym. 2020, Pokki ym. 2009). Base scenarion ja muiden skenaarioiden välinen vertailu on kuitenkin ongelmallista, sillä base scenario ei kuvaa todellista toimintatapaa suomalaisissa infrahankkeissa, joissa pyritään massatasapainoon ja hankkeessa muodostuvien leikkausmassojen mahdollisimman tehokkaaseen hyödyntämiseen (Haulos ym. 2022, Väylävirasto 2022d, Helsingin kaupunki 2019). Ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivan iteraation tuloksia on siksi mielekkäämpää verrata YVA-selostuksessa ja yleissuunnitelmassa esitettyjen päästölaskelmien tuloksiin, sillä niissä on pyritty arvioimaan myös hyödynnettävien leikkausmassojen määrää.

YVA-selostuksen osalta ei ollut käytettävissä tietoa Espoo-Salo-oikoradan päästövaikutuksista, vaan selostuksessa on esitetty päästöt koko Turun tunnin juna -hankkeen osalta. Tästä aiheutuu epävarmuutta tulosten tulkintaan ja päästölaskennan tulosten vertailuun. Espoo-Salo-oikoradan oletettiin olevan Turun tunnin juna -hankkeen päästöintensiivisin osa, sillä se on kokonaan uusi rataosuus, jonka rakentaminen edellyttää täysin uuden maastokäytävän sekä radan rakentamista. Myös pisimmät tunnelit ja sillat sijaitsevat Espoo-Salo-oikoradalla. Salo-Turku-rataosuuden ja Turun ratapiha-alueen rakentamisen päästöt muodostavat todennäköisesti pienemmän osan koko hankkeen päästöistä kuin Espoo-Salo-oikorata. Tästä syystä YVA-selostuksessa esitetyt päästöt ratakilometriä kohti saattavat olla jonkin verran suuremmat Espoo-Salo-oikoradalla kuin koko hankkeen päästöt ratakilometriä kohti. Toisaalta Espoo-Salo-oikoradan yleissuunnitelmassa esitetyt päästöt ratakilometriä kohden olivat pienemmät kuin YVA-selostuksessa esitetyt päästöt. Yleissuunnitelmassa esitettyjen päästölaskelmien menetelmät eivät olleet tiedossa, mistä niin ikään aiheutuu epävarmuutta tulosten tulkintaan ja vertailuun.

Ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivan iteraation päästöt ratakilometriä kohden olivat 2 prosenttia pienemmät verrattuna YVA-selostuksessa esitettyihin ja 3,5 prosenttia suuremmat verrattuna Espoo-Salo-oikoradan yleissuunnitelmassa esitettyihin päästöihin.

Erot päästölaskennan tuloksissa ovat sen verran pienet, että ne voivat käytännössä selittyä eroavaisuuksilla käytetyissä laskentamenetelmissä ja päästötietokannoissa (Väylävirasto 2020b, Teittinen ym. 2020, Takano ym. 2014).

Kaikissa skenaarioissa materiaalien päästöt muodostivat suurimman osan kokonaispäästöistä, mikä oli odotettavissa kirjallisuudessa esitettyjen arvioiden perusteella (Teittinen ym. 2020). ORIS-ohjelmalla mallinnetuissa skenaarioissa materiaalit muodostivat 8–17 prosenttia pienemmän osuuden kokonaispäästöistä ja työsuoritteet puolestaan 19–22 prosenttia suuremman osuuden kokonaispäästöistä verrattuna YVA-selostuksessa ja yleissuunnitelmassa arvioituihin kokonaispäästöihin. Erot työsuoritteiden päästöissä johtuvat todennäköisimmin eroavaisuuksissa laskennassa tehdyistä oletuksista muun muassa työkoneiden tyypeistä, kaluston määristä, polttoainetyypeistä sekä kuormaukseen, murskaukseen ja muihin työsuoritteisiin käytettävästä työajasta.

Erot päästöjen jakaumassa voivat selittyä suunnittelutietojen tarkentumisella ja muuttumisella yleis- ja ratasuunnitelmavaiheiden välillä. Kun hankkeen kokonaispäästöjä tarkasteltiin rakenteittain, havaittiin, että ORIS-ohjelmalla mallinnetuissa skenaarioissa siltajen ja teiden päästöt olivat yleissuunnitelmavaiheen laskelmia pienemmät. Siltojen rakentamisessa vaaditaan paljon päästöintensiivisiä materiaaleja, kuten betonia ja terästä. Yleissuunnitelmavaiheen jälkeen siltasuunnitelmat ovat tarkentuneet, mikä voi vaikuttaa tuloksissa havaittuihin eroihin sekä päästöjen jakautumisessa sekä rakenteiden että materiaalien, kuljetusten ja työsuoritteiden kesken.

Eri skenaarioiden välillä havaittiin lisäksi eroavaisuuksia kuljetusten osuudessa kokonaispäästöihin. ORIS-ohjelmalla mallinnetuissa skenaarioissa kuljetusten päästöt muodostivat 5–11 prosenttia pienemmän osuuden kokonaispäästöistä kuin YVA:ssa ja yleissuunnitelmassa arvioiduista kokonaispäästöistä. Kuljetusten muodostamat päästöt pienenevät, kun ne suunniteltiin ja optimoitiin tarkasti, mikä on linjassa kirjallisuudessa esitettyjen arvioiden kanssa (Väylävirasto 2020a, Forsman ym. 2020, Pokki ym. 2009). Kuljetusten osalta on huomioitava, että ylijäämämassojen hyödyntämistä tutkivassa iteratiossa käytettiin vain kahden osatehtävän sijoitusalueita. Jos kaikkien osatehtävien sijoitusalueet olisivat olleet käytettävissä, kuljetusmatkat olisivat todennäköisesti lyhentyneet entisestään, ja samoin myös kuljetusten aiheuttamat päästöt. Toisaalta kaikkien ulkopuolelta hankittavien materiaalien suhteen ei tehty saatavuuden tarkastelua, vaan kaikkien materiaalien oletettiin olevan hankittavissa lähimmältä materiaalintoimittajalta. Todellisuudessa ulkopuolelta hankittavien materiaalien kuljetusmatkat voivat olla huomattavasti pidemmät.

8.3.3 ORIS-ohjelman hyödynnettävyys

ORIS-ohjelmistoalustan hyödyntämisessä ratahankkeen massatalouden suunnittelussa tunnistettiin useita mahdollisuuksia. Ohjelmistoalusta kerää yhteen kaikki massatalouden suunnitteluun liittyvät muuttujat ja muuttaa niihin liittyvän monimutkaisen toimintakentän visuaaliseksi käyttöliittymäksi. Ohjelmiston avulla on helppoa tunnistaa suurimmat päästöjen lähteet sekä rataosuuksittain että materiaaleittain, jolloin päästövähennystoimenpiteet voidaan kohdistaa päästöintensiivimpiin kohteisiin ja näin vaikuttaa tehokkaasti koko hankkeen päästöihin kohdekohtaisen osaoptimoinnin sijaan. Ohjelmistoalustaa on kohtalaisen helppoa käyttää yksittäisten suunnitteluratkaisuiden vaikutusten nopeaan vertailuun sen jälkeen, kun suunnittelutiedot ja toimintaympäristö on kerran kerätty alustalle. ORIS-ohjelmalla tehdyillä skenaarioilla voidaan kohtalaisen nopeasti selvittää yksittäisiin muuttujiin liittyvien päästövähennysten suuruusluokka, ja näitä tietoja voidaan hyödyntää suunnittelussa ja päätöksenteossa.

ORIS-ohjelmiston käyttöön liittyy myös haasteita, joista osa liittyy yleisesti massataloussuunnittelun kompleksiseen luonteeseen, osa elinkaariarvioinnin vaatimaan suureen työmäärään ja osa inhimillisiin tekijöihin. Monimutkaisten massataloussuunnitelmien mallintaminen ja skenaarioiden määrittelyjen tekeminen LCA:n periaatteiden mukaisesti on työlästä, minkä lisäksi kokonaan uuden skenaarion laskentaan kuluu kohtalaisen paljon aikaa. Tällöin riskinä on, että kun tiettyyn skenaarioon liittyvän laskennan tulokset ovat käytettävissä, on niihin liittyvän päätöksenteon aikaikkuna jo mennyt.

Ohjelmiston toimintaympäristön pystyttäminen sekä tarvittavien suunnittelutietojen vieminen alustalle vaatii aina siihen perehtyneen konsultin työpanoksen. Samoin muodostettavissa skenaarioissa tehdyt valinnat vaativat ohjelmiston käyttöön perehtyneen konsultin tekemään määrittelyn vaatimat muutokset. Jotta ohjelmistoa pystyttäisiin paremmin hyödyntämään suunnittelun tukena, pitäisi suunnittelijalla olla mahdollisuudet tehdä itse tarvittavia muutoksia muodostettuihin skenaarioihin ja suorittaa niihin liittyvää päästölaskentaa. Massataloussuunnitelmien tekemiseen tarkoitettujen ohjelmistojen ja järjestelmien sovittaminen osaksi suunnitteluprosessia koetaan usein haastavaksi ja uusien ohjelmien käyttöönotto ja opettelu voidaan kokea työlääksi (Manninen 2009). Ohjelmistoa tulisikin jatkossa kehittää siten, että se olisi helpommin integroitavissa osaksi suunnittelua ja päätöksentekoa.

8.4 Toimenpidesuosituks

Infrahankkeiden elinkaariarvointien sekä päästölaskelmien tuloksissa on todettu esiintyvän vaihtelua, eivätkä samoista rakennushankkeista tehdyt arvioinnit ja laskelmat ole

välttämättä vertailukelpoisia keskenään erilaisten laskentamenetelmien ja käytettyjen päästötietokantojen vuoksi (Väylävirasto 2020b, Teittinen ym. 2020). Myös tässä työssä esitettyjen skenaarioiden vertailuun liittyy epävarmuutta niiden elinkaariarvioinnissa ja päästölaskennassa käytettyjen menetelmien eroavaisuuksien vuoksi. Toisaalta vaihtoehtoisissa laskelmissa on tehty samat rajaukset, käytetty osittain samoja lähtötietoja sekä päädytty hyvin samankaltaisiin määrätietoihin, mikä lisää vertailun mielekkyyttä. Vaikka skenaarioiden välillä ei havaittu merkittäviä eroavaisuuksia, voidaan niiden perusteella tehdä joitain yleisiä johtopäätöksiä sekä muodostaa toimenpidesuosituksia case-hankkeen massatalouden suunnitteluun jatkossa. Työn aikana tunnistettiin useita päästövähennysmahdollisuuksia, joista voidaan tehdä vertailulaskelmia vielä ratasuunnitelmavaiheessa.

Kiertotalouden periaatteiden mukaan ensisijainen kiertotalousratkaisu on aina muodostuvan jätteen määrän vähentäminen (Suvantola & Lankinen 2008). Myös infrahankkeissa tehokkain keino ylijäämämassojen käsittelyyn on niiden muodostumisen ehkäiseminen. ORIS-ohjelmalla tehtyjen mallinnusten perusteella Espoo-Salo-oikoradalla suurimmat hiilidioksidipäästöt ja massamäärät muodostuvat osatehtävillä 3 ja 4. Näiden osatehtävien suunnitteluratkaisujen tarkastelu muodostuvien leikkausmassojen vähentämisen näkökulmasta on yksi mahdollinen päästövähennyskeino. Vaihtoehtoiset ratkaisut voisivat käsittää esimerkiksi tavoitenopeuden laskemisen rataosuuksilla, jotka edellyttävät suuria pituuskaltevuuden muutoksia. Kallioleikkaukset ja tunnelit muodostavat suurimman osan väylähankkeiden maanrakennustöiden päästöistä (Häkkinen ym. 2022), joten niihin liittyvien suunnitteluratkaisujen tarkastelulla voidaan myös mahdollisesti saavuttaa päästövähennyksiä. Vaihtoehtoisista suunnitteluratkaisuista voitaisiin muodostaa omat skenaarionsa, joiden vaikutuksia voitaisiin tutkia ORIS-ohjelmistolla.

Kaikissa tutkituissa skenaarioissa muodostuu huomattava määrä ylijäämäisiä, hyödyntämiskelvottomia maa- ja kiviainesmassoja. Näille pääosin heikkolaatuisemmille maa-aineksille tulisi etsiä hyödyntämiskohteita läheltä ratalinjaa siten, että niiden varastointiaika ja kuljetukset minimoidaan. Jos sopivia hyödyntämiskohteita ei löydy hankkeen sisältä, tulisi kohteita etsiä hankkeen ulkopuolelta (Haulos ym. 2022). Hancerajat ylittävä, alueellinen yhteistyö massojen käytön koordinoinnissa tukee rakentamisen päästövähennystavoitteita ja edistää luonnonvarojen kestävää hyödyntämistä (Räisänen ym. 2023). Yksi tulevista ORIS-ohjelmalla mallinnettavista skenaarioista voisi olla esimerkiksi heikkolaatuisten maa-ainesten mahdollisimman tehokkaalla hyödyntämisellä saavutettavissa olevan päästövähennyspotentiaalin kartoittaminen.

Kaikissa skenaarioissa materiaalien päästöt aiheuttavat ylivoimaisesti suurimman osan hankkeen päästöistä, joten niihin liittyvissä suunnitteluratkaisuissa ovat myös suurimmat

päästövähennysmahdollisuudet. Päästöintensiivisten materiaalien tilalle tulisi etsiä vähähiilisiä vaihtoehtoja tai niiden käyttökohteisiin soveltuvia uusiomateriaaleja. Hankkeessa tulisi selvittää esimerkiksi vähähiilisen betonin tai vähähiilisen- tai kierrätysteräksen käytön mahdollisuuksia. Näitä vaihtoehtoja on jo hankkeessa tarkasteltu jonkin verran, ja selvitystyötä tulisi jatkaa (Turun Tunnin Juna Oy 2022).

Häkkisen ym. (2022) teettämien asiantuntijahaastattelujen mukaan suomalaisissa infra-hankkeissa päästölaskelmia tehdään lähinnä hankkeiden loppuvaiheissa ja niiden tuloksia hyödynnetään päätöksenteossa harvoin. Tässä työssä toteutettujen vertailulaskelmia tulisi hyödyntää päätöksenteossa ja kehittää uusia vertailtavia skenaarioita yhteistyössä tilaajan, suunnittelijoiden sekä asiantuntijoiden kesken. Lopuksi ratasuunnitelmavaiheessa arvioituja päästöjä tulisi myöhemmin verrata rakennussuunnittelun aikana arviointeihin sekä rakentamisen jälkeen laskettuihin, toteutuneisiin päästöihin. Vain näin saataisiin tietoa siitä, miten tarkkoja aikaisemmissa suunnitteluvaiheissa käytetyt laskenta- ja arviointimenetelmät todellisuudessa ovat.

9. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä pyrittiin selvittämään, miten massatalouden suunnitteluun liittyvät muuttajat vaikuttavat ratahankkeen hiilidioksidipäästöihin, sekä miten Espoo-Salo-oikoradan muodostuvien maa- ja kiviainesmassojen hyödyntämisellä ja kuljetusten suunnittelulla voidaan vaikuttaa hankkeen hiilidioksidipäästöihin. Työn tavoitteena oli tunnistaa massatalouden suunnitteluun liittyviä päästövähennysmahdollisuuksia hyödyntämällä siihen kehitettyä ORIS-ohjelmistosovellusta.

Infrahankkeen massatalous on monimutkainen kokonaisuus, joka käsittää hankkeessa muodostuvien leikkausmassojen sekä hankkeessa vaadittavien maamassojen kaivuun, louhinnan ja käsittelyn, kuljetukset, välivarastoinnin sekä sijoittamisen. Kestävyyden näkökulmasta massatalous tulisi suunnitella siten, että hankkeessa pyritään massatasaamiseen, massojen kuljetukset ja välivarastot minimoidaan ja hankkeessa muodostuvat massat hyödynnetään kiertotalouden periaatteiden mukaisesti. Massatalouteen liittyviä suunnitelmia tulee arvioida kansainvälisten elinkaariarvioinnin (LCA) standardien mukaisesti, ja myös niihin liittyvät päästölaskelmat tulee laatia kansainvälisten standardien ja kansallisten ohjeiden mukaisesti.

Ratahankkeen hiilidioksidipäästöihin vaikuttavia massatalouden suunnitteluun liittyviä muuttujia tunnistettiin useita. Näitä ovat muun muassa hankkeessa muodostuvat ylijäämämaat sekä niiden louhinta ja käsittely, massojen kuljetukset, varastointi ja sijoittaminen. Edellä mainitut tekijät muodostavat kuitenkin huomattavan pienen osan infrahankkeiden kokonaispäästöistä, suurimman osan muodostuessa päästöintenssiivisten rakennusmateriaalien tuotannosta.

Työssä tutkittiin Espoo-Salo-oikoradalla muodostuvien kiviainesten hyödyntämisen ja logistiikan optimoinnin vaikutuksia hankkeen hiilidioksidipäästöihin. Työssä muodostetun skenaarion päästöt ratakilometriä kohden olivat 2 prosenttia pienemmät verrattuna YVA-selostuksessa esitettyihin ja 3,5 prosenttia suuremmat verrattuna Espoo-Salo-oikoradan yleissuunnitelmassa esitettyihin päästöihin. Tuloksien vertailuun liittyy epävarmuutta johdun erilaisista laskentamenetelmistä sekä käytetyistä päästökertoimista.

Työssä tarkasteltiin lisäksi ORIS-ohjelman hyödynnettävyyttä massatalouden suunnittelussa sekä ratasuunnitelmavaiheessa tehtävän yksityiskohtaisemman massatalous-suunnittelun hyötyjä ja kehityskohteita. ORIS-ohjelman käytössä tunnistettiin useita mahdollisuuksia, mutta hyödynnettävyyttä heikentävät massataloussuunnitelmiin liittyvä kompleksisuus, elinkaariarvioinnin prosesseihin liittyvä suuri työmäärä sekä inhimilliset

tekijät. ORIS-ohjelmalla suurin hyöty voidaan saavuttaa testaamalla yksittäisten suunnitteluratkaisujen vaikutusta hankkeen kokonaispäästöihin, kun suunnittelutiedot on kerran viety alustalle. Vaikka työssä oli käytettävissä pääosin ratasuunnitelmavaiheen suunnittelutietoja ja työhön käytettiin huomattavasti resursseja, olivat tulokset sekä leikkausmassojen hyödynnettävyyden että päästölaskennan suhteen hyvin samankaltaisia kuin yleissuunnitelmavaiheessa. Tulokset tukevat kirjallisuudessa esitettyjä havaintoja, joiden mukaan vielä ratasuunnitelmavaiheessakaan ei saavuteta lähtötietojen suhteen sellaista tarkkuustasoa, joka mahdollistaisi yleissuunnitelmavaihetta tarkemman massatalouden suunnittelun tai päästölaskennan suorittamisen.

Päästölaskennan tulosten perusteella pystyttiin tunnistamaan merkittäviä päästölähteitä sekä esittämään niiden perusteella mahdollisia päästövähennyskohteita. Espoo-Salo-oi-
koradalla voitaisiin jatkossa etsiä päästövähennysmahdollisuuksia muun muassa erilaisilla ratageometriaan liittyvillä suunnitteluratkaisuilla, etsimällä hyödyntämiskohteita heikkolaatuisille maa-aineksille sekä selvittämällä vähähiilisten rakennusmateriaalien tai uusiomateriaalien käytön mahdollisuuksia.

LÄHTEET

- Afry Oy. (2022) *Luonnonkiviainesten ja sitä korvaavien uusiomateriaalien käyttö ja tarveennuste*. Raportti. Saatavissa: https://epliitto.fi/tiedostot/Raportti_final_24052022.pdf
- Ellen McArthur Foundation. (2013) *Towards the Circular Economy Vol 1: An Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. Saatavissa: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>
- Feng, Z. & Yan, N. (2007) *Putting a Circular Economy into Practice in China*. Sustainability Science, vol. 2(1), s. 95–101.
- Fenner, R. A. & Ainger, C. (2009) *Sustainable Infrastructure: Principles into Practice*. ICE Publishing, Westminster, Lontoo, Iso-Britannia. s. 16–17.
- Forsman, J., Dettenborn, T., Suikkanen, T., Harju, I., Järkkä, H., Kivimäki, J., Teittinen, T., Koivulahti, M. & Lahtinen, P. (2020) *Uusiomateriaalit Kaupunkien Infrarakentamisessa -käsikirja*. Käsikirja. Ramboll Finland Oy. Saatavissa: https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Uusiomateriaalit%20kaupunkien%20infrarakentamisessa-kasikirja%202019_07_02%20-%20UUMA3.pdf
- Gabathuler, H. (2006) *The CML Story: How Environmental Sciences Entered the Debate on LCA*. The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 11 (S1), s. 127–132.
- Ghisellini, P., Cialani, C. & Ulgiati, S. (2016) A review on Circular Economy: The Expected Transition to a Balanced Interplay of Environmental and Economic systems. Journal of Cleaner Production, vol. 114, s. 11–32.
- Green Building Council Finland. (2021) *Kestävä Infra – Kestävän Infran määritelmä ja muistilista sekä vinkkejä infran elinkaaren eri vaiheille*. <https://figbc.fi/julkaisu/kestava-infra-maaritelma>
- Haulos, S., Brander, K., Ketolainen, T., Metsävuori, J. & Lumme, E. (2022) *Kiertotalous väylänpidossa. Nykytilaselvitys*. Väyläviraston julkaisuja 28/2022.
- Helsingin Kaupunki. (2019) *Kaivumaiden, kiviaineksen ja purkumateriaalien hyödyntämisen periaatteet maarakentamisessa*. Massatyöryhmän selvitys 23.8.2019, s. 4. Saatavissa: <https://dev.hel.fi/maatokset/media/att/de/de-cab9693b7a4a2c0313669e0c14f676fdb9ddc2.pdf>

- Hiilineutraalisuomi.fi. (2022) Infrarakentamisen kansallinen päästötietokanta. Verkkosivu. Saatavissa: https://www.hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Tyokalut/Infrarakentamisen_paastotietokanta [Viitattu 26.5.2023]
- Horne, R.E., Grant, T & Verghese, K. (2009) *Life Cycle Assessment: Principles, Practice and Prospects*. CSIRO Publishing.
- Häkkinen, T., Pesu, J., Siiskonen, S-T. & Vares, S. (2022) *Infrarakentamisen kansallinen päästötietokantahanke*. Väyläviraston julkaisuja 11/2022.
- Härmä, P., Kuula-Väisänen, P., Pokki, J., Ikävalko, O., Pullinen, A., Leveinen, J., Sahala, L. & Räisänen, M. (2010) *Rakentaminen ja kiviainekset – tuotteita ylijäämästä (RAKI-hanke)*. Loppuraportti. Geologian Tutkimuskeskus.
- InfraRYL. (2022) *Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset*. Päivitysversio 2022/2. Verkko-versio. [Viitattu 26.11.2022]
- Kalliainen, A., Kuula, P. & Leppänen, M. (2018) *Väylärakenteiden valtakunnallinen kiviaines- ja geosynteettitutkimus. Vuoden 2017 tutkimukset*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 40/2018.
- Klöpffer, W. & Grahl, B. (2014) *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practise*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Korkiala-Tanttu, L., Eskola, P., Juvankoski, M., Kivikoski H. & Kiviniemi, M. (2010) *Heikkolaatuisten luonnonmateriaalien hyötykäyttö ja tehostaminen – moreeni tehokkaaseen hyötykäyttöön*. Uusimateriaalien käyttö maarakentamisessa: Tuloksia UUMA-ohjelmasta 2006–2010. Ympäristöministeriön raportteja 13/2010. Toim. Inkeröinen J. & Ala- saarela E. Saatavilla verkossa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/41387/YMra_13_2010.pdf?sequence=1
- Kuula, Pirjo. (2015) Pengerretty ratarakenne. Valokuva. Yksityinen kokoelma.
- Kuula, Pirjo. (2015) Kalliroleikkaus. Valokuva. Yksityinen kokoelma.
- Liikennevirasto. (2018) *RATO 3, Radan rakenne*. Liikenneviraston ohjeita 13/2018.
- Lindholm, M. & Junnonen, J-M. (2012) *Infrahankkeen tuotannon hallinta*. Suomen rakennusmedia Oy. Helsinki. s.16–21.
- Lonka, H. & Loukola-Ruskeeniemi, K. (2015) *Kiviaines- ja luonnonkiviteollisuuden kehitysnäkymät*. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 54/2015. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. s. 14.
- Manninen, A-P. (2009) Väylähankkeen esisuunnitteluvaiheen kustannushallinta. Väitöstyö. s. 18 ja s. 28.

Merenheimo, T., Österlund H. & Bergman, I-M. (2018) *Ympäristönäkökohtien huomioiminen päällystehankintojen kehittämisessä*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 61/2018.

Nurmikolu, A. (2000) *Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään*. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2000.

Pokki, J., Rekola, M., Härmä, P., Kuula-Väisänen, P., Räisänen M. & Tiainen, M. (2009) *Maarakentamisen ja kalliolouhinnan yhteydessä muodostuvien ylijäämäkiviainesten hyötykäytön nykytila Suomessa*. Geologian tutkimuskeskuksen tutkimusraportti 177. Vammalan Kirjapaino Oy 2009, Sastamala.

Peltola, A., Dettenborn, T., Kotiranta, H., Viita-aho, J. & Eklöf N. (2022) *Päästölaskennan mahdollisuudet Ihku-laskentapalvelussa*. Väyläviraston julkaisuja 60/2022.

Rakennusteollisuus. (2020) *Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035, Osa 4. Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyyden tiekartta 2020–2035–2050*. Saatavissa: https://www.rt.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys_uudet/rt_4-raportti_vahahiilisyiden-tiekartta_lopullinen-versio_clean.pdf [Viitattu 23.3.2023]

Räisänen, M., Nurmi, H., Poikolainen, J. & Ahlqvist, K. (2023) *Turun tunnin juna – kalliolouheiden hyötykäyttö kiertotalouden näkökulmasta*. Geologian tutkimuskeskus. Saatavissa: https://www.gtk.fi/wp-content/uploads/2023/05/Turun-tunnin-juna_Kiertotalous-selvitys_tiivistelma_GTK_2023.pdf

Stahel, W. R. (2016) *Circular economy*. Nature, vol. 531, s. 435–438.

Suvantola, L. & Lankinen, A-J. (2008) *Jätteen synnyn ehkäisyn uudet ohjauskeinot*. Ympäristöministeriön raportteja 2008:24. Ympäristöministeriö, Helsinki.

Taimela, R. (2011) *Raidegeometrian suunnittelu*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2011. Liikennevirasto, Helsinki.

Takano, A., Winter, S., Hughes, M. & Linkosalmi, L. (2014) *Comparison of Life Cycle Databases: A Case Study on Building Assessment*. Building and Environment, vol. 79.

Teittinen, T., Dattenborn, T. & Pahkakangas, S. (2020) *Uusiomaarakentamisen päästölaskenta*. Selvitysraportti. Ramboll Finland Oy. Saatavissa: <https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Uusiomaarakentamisen%20p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6laskenta.pdf>

Turun Tunnin Juna Oy. (2022) *Vastuullisuusraportti 2022*. Saatavissa: https://www.tunninjuna.fi/wp-content/uploads/2023/05/TTJ_Vastuullisuusraportti_2022_FINAL-1.pdf [Viitattu 30.7.2023]

- Valtioneuvosto. (2022) *Mitä on kestävä kehitys?* Valtioneuvoston kanslia. <https://kestavakehitys.fi/kestava-kehitys> [Viitattu 9.11.2022]
- Van Buren, N., Demmers, M. & Chiesa, V. (2016) Towards a circular economy: The role of Dutch Logistics Industries and Governments. *Sustainability*, vol. 8(7), s. 647.
- Väylävirasto. (2008) *Radan suunnitteluohje*. Helsinki, Ratahallintokeskus.
- Väylävirasto. (2020a) Helsinki-Turku nopean junayhteyden hankekokonaisuuden YVA. Ympäristövaikutusten arviointiselostus. Väyläviraston julkaisuja 55/2020.
- Väylävirasto. (2020b) *Tie- ja raitainfrastruktuurin elinkaariarvioinnin opas*. Väyläviraston julkaisuja 64/2020.
- Väylävirasto. (2021a) Maantie- ja ratahankkeiden lakisäätöisten suunnitelmien hallinnollinen käsittely. Väyläviraston ohjeita 13/2021.
- Väylävirasto. (2021b) *Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 2. Radan geometria*. Väyläviraston ohjeita 22/2021.
- Väylävirasto. (2021c) *Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 11. Radan päällysrakenne*. Väyläviraston ohjeita 29/2021.
- Väylävirasto. (2021d) *Väylähankkeiden kustannushallinta*. Väyläviraston ohjeita 39/2021.
- Väylävirasto. (2022a) *Ratasuunnitelman toimintaohje*. Väyläviraston ohjeita 24/2022.
- Väylävirasto. (2022b) *Raidesepelin laatuvaatimukset*. Väyläviraston ohjeita 3/2022.
- Väylävirasto. (2022c) *Vähähiilisempi rakentaminen infra-alan yhteinen tavoite*. Verkkosivu. Saatavissa: <https://vayla.fi/-/vahahiilisempi-rakentaminen-infra-alan-yhteinen-tavoite> [Viitattu 31.5.2023]
- Väylävirasto. (2022d) *Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa*. Väyläviraston ohjeita 20/2022.
- Väylävirasto. (2022e) *Espoo-Salo oikorata yleissuunnitelma*. Väyläviraston julkaisuja 62/2022.
- YIV (2019) *Yleiset inframallivaatimukset 2019*. https://wiki.buildingsmart.fi/fi/04_Julkaisut_ja_Standardit/YIV [Viitattu 23.10.2022]
- Ympäristöministeriö. (2015) *Kaivetut maa-ainekset – jäteluonne ja käsittely*. Muistio 3.7.2015. Ympäristöministeriön Ympäristönsuojeluosasto, Helsinki.
- Ympäristöministeriö. (2020) *Maa-ainesten ottaminen. Opas ainesten kestävään käyttöön*. Ympäristöministeriön julkaisuja 2020:24. Ympäristöministeriö, Helsinki.

Ympäristöministeriö. (2022) *Tietoa YVA:sta hankkeesta vastaavalle*. <https://www.ymparisto.fi/yva> [Viitattu 16.10.2022]

Zink, T. & Geyer, R. (2017) *Circular Economy Rebound*. *Journal of Industrial Ecology*, vol. 21(3), s. 593–602.