

Ruoppausmassan stabilointi uusiosideaineilla

Hiilijalanjäljen, lujuuden ja kustannusten
tarkastelu Matalahden kenttäkokeessa

Jan-Erik Eriksson, Jaakko Karvonen,
Thomas Kronberg ja Jani Salminen

31 / 2022

Ruoppausmassan stabilointi uusiosideaineilla

Hiilijalanjäljen, lujuuden ja kustannusten
tarkastelu Matalahden kenttäkokeessa

**Jan-Erik Eriksson, Jaakko Karvonen,
Thomas Kronberg ja Jani Salminen**



Suomen ympäristökeskuksen raportteja 31 | 2022

Suomen ympäristökeskus

Kulutuksen ja tuotannon keskus

Kirjoittajat: Jan-Erik Eriksson¹⁾, Jaakko Karvonen²⁾, Thomas Kronberg¹⁾, Jani Salminen²⁾

¹⁾ Åbo Akademi

²⁾ Suomen ympäristökeskus

Vastaava erikoistoimittaja: Ari Nissinen

Rahoittaja: Suomen rakennerahasto-ohjelma Kestävää kasvua ja työtä 2014–2020,
Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR), Åbo Akademi ja Suomen ympäristökeskus

Julkaisija ja kustantaja: Suomen ympäristökeskus (SYKE)

Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki, puh. 0295 251 000, syke.fi

Taitto: Outi Pyy ja Pirkko Väänänen

Kannen kuva: Adobe Stock.

Sisäsivujen kuva: Jan-Erik Eriksson.

Julkaisu on saatavana veloituksetta internetistä: www.syke.fi/julkaisut | helda.helsinki.fi/syke

ISBN 978-952-11-5504-8 (PDF)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

Julkaisuvuosi: 2022



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

6Aika



Uudenmaan liitto
Nylands förbund



Tiivistelmä

Ruoppausmassan stabilointi uusiosideaineilla

– Hiilijalanjäljen, lujuuden ja kustannusten tarkastelu Matalahden kenttäkokeessa

Maan stabilointi mahdollistaa pehmeiden maiden lujittamisen rakentamiseen soveltuvaksi. Samalla voidaan sitoa haitallisia aineita ja hillitä esimerkiksi haponmuodostusta rikkihaitteisissa maa-aineksissa. Tyypillisesti stabilointiin on käytetty sementtiä. Sen valmistamisesta aiheutuu kuitenkin paljon hiilidioksidipäästöjä ja maankäytön muutoksia. Stabilointiin voidaan käyttää teollisuuden sivuvirtoja, myös sellaisia sideaineita, joita päätyy nykyisin kaatopaikoille.

Tämä CircVol2 -projektin osahankkeen raportti tarkastelee ruoppausmassojen stabilointia käytettyjen sideaineiden ilmastopäästöjen, saavutetun lujuuden ja sideaineiden kustannusten suhteen. Laskennan kohteena oleva stabiloinnin kenttäkoe sekä ruoppaus ja läjitys suoritettiin Naantalissa Matalahdella vuonna 2020. Tällöin tehtiin kenttäkokeena stabilointikoeruutuja, joissa testattiin eri sideaineseoksia. Käytettyjä sideaineita olivat sementti, masuunikuona, monipolttolaitoksen tuhka, jätteenpolton pohjakuona, kalkinpolton uunipöly ja kahden yrityksen tekemät seokset.

Maata on mahdollista stabiloida riittävän lujaksi käyttämällä teollisuuden jäte- ja sivuvirtoja osana stabilointiseosta ja vähentää samalla huomattavasti ilmastopäästöjä ja säästää kustannuksissa verrattuna stabilointiin pelkällä sementillä. Tämän hankkeen sideaineseoksia käyttämällä raaka-aineiden kustannukset voitiin pudottaa kolmannekseen ja päästöjen määrä kymmenykseen sementtipainotteisiin seoksiin verrattuna.

Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että maan stabiloinnissa on mahdollista hyödyntää jäte- ja sivuvirtoja. Samalla voidaan vähentää merkittävästi ilmastopäästöjä ja kustannuksia, mutta silti saavuttaa riittäviä lujuuksia. Työn osuus päästöistä ja kustannuksista voi olla merkittävä, kuljetusten harvemmin. Päästöjen ja kustannusten suhteen optimaalinen sideaine tai sideaineseos tulee valita tapauskohtaisesti. Kaupungistumisen jatkuessa ja rakentamisen laajentuessa kohteille, joiden maaperiä pitää stabiloida, on mahdollista löytää kustannustehokkaita ja ilmastoa merkittävästi vähemmän kuormittavia vaihtoehtoja ja samanaikaisesti edistää kiertotaloutta.

Asiasanat: Maan stabilointi, sideaineet, puristuslujuus, hiilijalanjälki, kenttäkoe, kiertotalous, kustannukset

Sammandrag

Stabilisering av muddringsmassa med hållbara bindemedel

– Undersökning av koldioxidavtryck, tryckhållfasthet och kostnad för fälttestet i Matalahti

Markstabilisering gör det möjligt att förstärka mjuka jordar som grund för byggande. Samtidigt kan skadliga ämnen bindas och till exempel syrabbildning i svavelhaltiga jordar kan kontrolleras. Cement har vanligtvis använts för stabilisering. Dess produktion släpper dock ut mycket koldioxid och orsakar även förändrad markanvändning. Industriella biprodukter kan användas för stabilisering, inklusive material som idag hamnar på deponier. Att använda dessa material som ersättning för cement främjar cirkulär ekonomi och minimerar miljöpåverkan.

Denna rapport undersöker CircVol2-projektet som en fallstudie i termer av klimatutsläpp, uppnådd tryckhållfasthet och bindemedelskostnader för bindemedel som används för att stabilisera muddermassor. Fältförsöket med stabilisering, som är föremål för beräkningen, utfördes i Matalahti, Nådendal, år 2020. Fältförsöket hade olika provrutor, i vilka olika bindemedelsrecept undersöktes. Bindemedlen som användes var cement, masugnsslagg, aska från flerbränslekraftverk, bottenaska från avfallsförbränning, kalkugnsdamm samt färdiga blandningar från två kommersiella företag.

Det är möjligt att stabilisera marken tillräckligt stark genom att använda industriavfall och biproduktströmmar som en del av stabiliseringsmixen. Samtidigt reduceras klimatutsläppen och kostnadsbesparingar avsevärt jämfört med stabilisering med enbart cement. Med bindemedelsblandningarna i detta projekt skulle kostnaden för råvaror kunna minskas med en tredjedel och mängden utsläpp med en tiondel jämfört med cementvägda blandningar.

Undersökningens slutsatser visar att det är möjligt att kunna utnyttja avfalls- och biproduktströmmar för att stabilisera lermassor. Samtidigt som klimatutsläppen och kostnaderna minskar avsevärt, kan man ändå uppnå tillräckliga tryckhållfastheter. Arbetskraftens andel av utsläpp och kostnader kan vara betydande, medan transporterna ofta spelar en mindre roll. Det optimala bindemedlet eller bindemedelsblandningen vad gäller utsläpp och kostnader bör väljas från fall till fall. I takt med att urbaniseringen fortsätter och byggandet utökas på platser som behöver markstabiliseras, är det möjligt att hitta kostnadseffektiva och betydligt mindre klimatförstörande alternativ samtidigt som man främjar en cirkulär ekonomi.

Nyckelord: Mark stabilisering, bindemedeln, tryckhållfasthet, koldioxidavtryck, fältförsök, cirkulär ekonomi, kostnader

Abstract

Stabilization of dredged marine sediments with sustainable binders

– Examination of carbon footprint, compressive strength, and costs in Matalahti field test

Soil stabilization makes it possible to solidify soft soils for construction. At the same time, harmful substances can be bound and, for example, acid formation in sulphur-containing soils can be controlled. Cement has typically been used for stabilization. However, its production causes a lot of carbon dioxide emissions and involves changes in land use. Industrial waste and side streams can be used for stabilization, including binders that currently end up in landfills.

This subproject report of the CircVol2 project examines the stabilization of dredged material in terms of greenhouse gas emissions, achieved strength, and costs of the binders. The stabilization field test, dredging, and disposal, which are the subject of the calculation, were performed in Matalahti, Naantali, in 2020. The field test was performed in different experimental plots, in which different binder mixtures were tested. The binders used were cement, blast furnace slag, ash from a co-fired combined heat and power plant, bottom ash from municipal waste incineration, lime kiln dust, and ready mixtures from two commercial companies.

It is possible to stabilize the soil to sufficient strength by using industrial waste and side streams as part of the stabilization mix, while significantly reducing climate emissions and costs compared to stabilization with cement alone. With the binder mixtures of this project, the cost of raw materials could be reduced by a third and the amount of emissions by a tenth compared to cement-based mixtures.

In conclusion, it is possible to utilize industrial waste and side streams for soil stabilization. This can significantly reduce greenhouse gas emissions and costs, while still achieving sufficient strength. The labour's share of emissions and costs can be significant, while transport often plays a minor role. The optimal binder or binder mixture in terms of emissions and costs should be chosen on a case-by-case basis. As urbanization continues and construction expands to sites that need soil stabilization, it will be possible to find cost-effective alternatives with significantly less impact on the climate, while promoting circular economy.

Keywords: Soil stabilization, binders, compression strength, carbon footprint, field test, circular economy, costs

Esipuhe

Ilmastovaikutusten arviointi on yleistynyt käytäntö infrarakentamisen alalla. Kasvihuonekaasupäästöjen arvioimiseen ei kuitenkaan toistaiseksi ole olemassa yleistä menetelmäohjeistusta. CircVol 2 -hanke tuotti uutta tietoa infrarakentamisessa käytettyjen uusiomateriaalien laskennasta ja hiilijalanjäljestä. Tavoitteenamme on edesauttaa muutosta epäyhtenäisistä laskukäytännöistä kohti tilannetta, missä toimijoilla on yhtenäiset pelisäännöt infrarakentamisen hiilijalanjäljen laskemiseen.

Tämän raportin tavoitteena on nostaa esiin mahdollisuuksia ja haasteita, joita havaitaan, kun maan stabilointia arvioidaan samanaikaisesti päästöjen, lujuuden ja kustannusten näkökulmista. Yhtä oikeaa tapaa lähestyä muuttuvia tekijöitä ja monikriteeristä ongelmaa ei ole. Raportin avulla pyrimmekin lähinnä avaamaan keskustelun kiertotalousajattelun sisällyttämiseksi myös maan stabiloinnissa. Työmme osoittaa tarpeen tuleville tutkimukselle ja jättää runsaasti tilaa metodologiselle kehittämiselle.

Suomen ympäristökeskuksen ja Åbo Akademin tutkijat kirjoittivat tämä raportin osana CircVol 2-hanketta 1.5.2021–30.4.2022. Työtä rahoittavat Suomen rakennerahasto-ohjelma Kestävää kasvua ja työtä 2014–2020, Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR) sekä Åbo Akademi ja Suomen ympäristökeskus.

Raportin kirjoittajina kiitämme rahoittajia mahdollisuudesta toteuttaa selvitys. Toivomme, että raportin tulokset edesauttavat CircVol 2-projektin tavoitteiden saavuttamista tukemalla systeemistä muutosta kohti kiertotaloutta yrityksissä ja kaupungeissa, samalla pienentäen infrarakentamisen seurauksena syntyvää hiilijalanjälkeä ja hilliten siten ilmastonmuutosta.

Helsingissä 29. huhtikuuta 2022

Jan-Erik Eriksson, Jaakko Karvonen, Thomas Kronberg ja Jani Salminen

Sisällys

Tiivistelmä	3
Sammandrag	4
Abstract.....	5
Esipuhe.....	7
1 Johdanto	9
2 Stabilointikokeiden toteutus	11
2.1 Maan stabilointi	11
2.2 Naantalin stabilointikoe	11
3 Hiilijalanjälkilaskenta	14
3.1 Hiilijalanjälki	14
3.2 Standardien kirjo.....	15
3.3 Stabilointikokeissa käytettyjen sideaineiden hiilijalanjälkilaskenta.....	16
3.4 Rajaukset.....	17
3.4.1 Karbonatisaatio.....	17
3.4.2 Muut laskennan rajaukset.....	18
4 Tulokset ja tulosten tarkastelu	20
4.1 Sideaineiden CO ₂ e -päästöt	20
4.2 Käytettyjen reseptien CO ₂ e -päästöt ja niillä saavutetut lujuudet	22
4.3 CO ₂ e -päästöt suhteutettuna lujuuteen.....	23
4.4 Sideaineen ja kustannusten suhde.....	25
4.5 Yhteistarkastelu: Lujuus, kasvihuonekaasupäästöt ja hinta.....	27
5 Yhteenveto tuloksista.....	29
6 Pohdintaa tapaustutkimuksen jäte- ja sivuvirtojen päästölaskennasta	30
7 Johtopäätökset	31
Sanasto	32
Lähteet	33
Liite.....	35

1 Johdanto

Ihannekiertotaloudessa ei ole jätteitä, on vain raaka-aineita, joita hyödynnetään yhä uudestaan ja uudestaan. Tällä hetkellä eri tuotannon aloilla syntyy merkittäviä määriä erilaisia jäte- ja sivuvirtoja, joita ei kyetä hyödyntämään, vaan ne loppusijoitetaan kaatopaikoille. Maan stabiloinnissa voitaisiin hyödyntää erilaisia tuhkia ja kuonia, jolloin säästettäisiin rahaa ja raaka-aineita sekä vähennettäisiin toiminnan ilmastovaikutuksia.

Ihannekiertotaloudessa ei ole jätteitä, on vain raaka-aineita. Käytännössä tähän päästään, kun materiaaleja ja komponentteja käytetään aina uudelleen ja uudelleen tai niistä valmistetaan uusia tuotteita sitä mukaa, kun niitä käytöstä vapautuu tavaroiden poistuessa käytöstä tai niitä sivuvirtoina muodostuu. Niin sanottuun perinteiseen lineaaritalouteen (valmista-käytä-hävitä) verrattuna ero on selkeä, koska siinä elinkaaren pää tarkoittaa käytännössä kaatopaikkausta tai polttoa. Suomessa kaatopaikkojen käyttöä rajoittaa kaatopaikka-asetus (331/2013), eikä kaatopaikalle saa biohajoavia jätteitä käytännössä viedä. Nykyään kaatopaikalle sijoitetaan tyypillisesti mineraalisen jätteenkäsittelyn rejektejä, tuhkia, kuonia ja maa-ainesjätteitä. Kaatopaikoille toimitetuista jätteistä maksetaan jäteveroa 70 euroa tonnilta (Verohallinto 2022).

Jätteiden lajittelu ja kierrätys lähentyvät kiertotaloutta, ja käytämmekin usein virheellisesti sanaa jäte. Silti kierrätyskelpoisia, jopa oikein lajiteltuja materiaaleja ohjautuu yhä jonkin verran polttoon (YLE 2019; Korhonen ym. 2018), sillä joitakin materiaaleja ei osata kierrättää tai logistisesti poltto on järkevämpää.

Kierrätettävyyden on materiaalikohtaista. Esimerkiksi terästä on periaatteessa mahdollista kierrättää loputtomasti. Sen sijaan esimerkiksi purkupuuta voi olla vaikea uusiokäyttää ja se poltetaan usein energiaksi. Tällöin sen muoto kuitenkin muuttuu, ja toisin kuin terästä, poltossa syntyvää tuhkaa ei voi kierrättää sellaisenaan takaisin puuksi. Niinpä tuhkille joudutaan etsimään muita käyttö- tai loppusijoituskohteita.

Kiertotalouden toteutumisen este on usein toiminnan kannattamattomuus. Esimerkiksi rakennus- ja purkujätteet eivät kykene hintakilpailuun neitseellisistä raaka-aineista valmistettuja tuotteita vastaan. Lisäksi saatavuus, epäilykset laadun suhteen, vastuut, jätteeksi luokittelun päättämisen kriteerit (EEJ¹) ja muut säädökset hidastavat kiertotalouden kehittymistä (Ruokamo ym. 2021). Valtioneuvoston kiertotalouden strategisen ohjelman ehdotuksissa mainitaan muun muassa, että uudistuvassa jätelainsäädännössä tullaan tarkentamaan EEJ-säädöksiä ja helpottamaan jäteperäisten materiaalien käyttömahdollisuuksia uusien tuotteiden valmistamisessa (Valtioneuvosto 2021). Rakentaminen ja purkaminen käsittävät suuria materiaalivirtoja, joten uudistuva maankäyttö ja rakennuslaki voivat vaikuttaa osaltaan myös rakentamisen materiaalikiertoihin. Kyseisen uudistuksen on tarkoitus tulla voimaan 1.1.2024, mutta sen valmistelu on venynyt ylijälle ilmeisesti suuren kriittisen lausuntomäärän vuoksi (Kauppalehti 3.12.2021).

Ilmastotietouden lisääntyessä otetaan tuotannossa ja muun muassa rakentamisessa enenevässä määrin huomioon hankkeen ilmastovaikutukset. Vaikutusten arvioimiseen yleinen tapa on määrittää tuotteen tai tekemisen hiilijalanjälki. Hiilijalanjälki kuvaa toiminnasta kokonaisuudessaan aiheutuvaa ilmastomuutosta aiheuttavien kasvihuonekaasujen määrää (kappale 3.1).

Hiilijalanjäljen laskeminen auttaa ymmärtämään päästöjen määrän ja havaitsemaan olennaisimmat päästölähteet. Näin voidaan etsiä keinoja vähentää päästöjä ja torjua ihmisen aiheuttamaa ilmaston lämpenemistä. Ilmastomuutoksen ohella hiilijalanjälki antaa osviittaa myös muista päästökiteijöistä, kuten energian ja fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja maankäytön muutoksista, ja ilmaston muutos on

¹ EEJ eli Ei-Enää-Jätettä, englanniksi End of Waste eli EoW. Katso myös Sanasto.

myös yksi luonnon monimuotoisuutta uhkaavista tekijöistä. Hiilijalanjälki on siis myös periaatteessa sateenvarjindikaattori, mutta sen sisältämät indikaattorit, eli mistä eri tekijöistä hiilijalanjälki syntyy, on tarpeen tunnistaa, jotta muutoksia voidaan tehdä mahdollisimman tehokkaasti.

Circvol 2 -hankkeen keskiössä ovat muutamat tavallisesti penkatut, jätteiksi ja sivuvirroiksi luokiteltavat ainekset, joita voidaan tai voitaisiin käyttää kiertotalouden hengessä vaikkapa maan stabiloinnissa. Maan stabiloinnilla tarkoitetaan pehmeiden maiden puristus- ja leikkauslujuuden parantamista lisäämällä maan sekaan sideaineita, jotka kovettavat maaperää mahdollistaen rakentamisen sen päälle. Kasvavien kaupunkialueiden laajeneminen pehmeille maa-alueille onkin mahdollistettu maan stabiloinnin avulla (Paatsema & Kangas 2003).

Tämä osa CircVol 2-hanketta käsittää alkuperäisessä CircVol-hankkeessa tehdyn kenttäkokeen hiilijalanjälkilaskentaa koskien käytettyjen sideaineiden, sementin, masuunikuonan, jätteenpolton pohjakuonan, kalkkiuunin sähkösuodatinpölyn ja monipolttolaitoksen lentotuhkan käyttöä ruoppausmassojen stabiloinnissa. Lisäksi laskettiin kahden yrityksen omia sekoituksia, joiden täsmällisiä reseptejä ei kuitenkaan paljasteta. Laskenta tehtiin yhdeksälle 25 m² koeruudulle (5 m x 5 m x 1 m), joissa kussakin käytettiin eri sideaineita ja sideaineseoksia, reseptejä.

Näiden laskentojen lisäksi selvitettiin ympäristölaajennetun kansantalouden tilinpidon panos-tuotos -mallin eli ENVIMAT:in soveltuvuutta kierrätys- ja uusiomateriaalien huomioimiseksi (Liite 1).

2 Stabilointikokeiden toteutus

Maan stabiloinnissa tyypillisin sideainevalinta on sementti. Sementtiä voitaisiin korvata esimerkiksi masuuni- ja pohjakuonalla, kipsillä, kalkilla ja kalkkiuunin sähkösuodatinpölyllä tai lentotuhkalla taikka näiden seoksilla.

2.1 Maan stabilointi

Suomessa ja maailmalla otetaan rakennuskäyttöön yhä enemmän alueita, jotka ovat rakennusteknisesti haastavia, kuten savimaat, pilaantuneet maat sekä maalle läjitetyt ruoppausmassat, jotka tulee puhdistaa tai kiinteyttää eli stabiloida, ennen kuin niiden päälle voidaan rakentaa (Bahadori ym. 2019). Toisaalta isoilla kaupungeilla on suuria haasteita rakentamisen seurauksena syntyvien ylijäämämaiden hyödyntämisessä. Turun seudulla on myös tehty poliittinen päätös ruoppausmassojen läjityksestä maalle ympäristöllisesti haitallisen meriläjityksen sijaan (Turun kaupunginhallitus 363/2018). Tämä vaatii myös uudenlaista osaamista ja toimia, jotta maalle läjitetyt massat saadaan käsiteltyä ekologisesti kestäväällä tavalla ja niin, että alueita voidaan käyttää hyödyksi rakentamisessa.

Stabilointia käytetään heikosti kantaville maa-aineksille, jotka eivät kantavuutensa vuoksi sovellu rakentamiseen. Stabilointi muokkaa maa-aineksen lujaksi, muodostaen rakentamiselle paremman pohjan. Stabiloinnin etuna on, että se voidaan tehdä suoraan perusmaalle ilman kaivamisia ja kuljetuksia tai läjitetylle maa-ainekselle. Stabilointia käytetään myös jäykistämään maamassoja tekemällä niistä helpommin käsiteltäviä. Menetelmää voidaan käyttää myös kohteissa, joissa maa on pilaantunut. Stabiloinnilla voidaan myös korvata massanvaihto, jolloin säästöjä syntyy sekä rahassa että ajassa.

Stabilointimenetelmiä ovat massa- ja syvä- eli pilaristabilointimenetelmällä, joista ensimmäisessä maamassaan sekoitetaan sideainetta sekoituskoneella ja luodaan laattamaisia, tasaisesti lujittuneita alueita. Pilarimenetelmässä porataan kaira maahan muutaman metrin syvyyteen ja kairaa ylös nostettaessa sen kautta syötetään samalla sekoittaen sideainetta, jolloin syntyy nimensä mukaisesti pilarimaisia tukevia rakenteita, kun stabilointiaine reagoi ja kovettuu maan kanssa. Massa- ja pilaristabilointimenetelmillä on omat vahvuutensa eri käyttökohteissaan ja -tarpeissaan (YIT 2022; Kotilainen 2017).

Stabiloinnissa voidaan käyttää useita eri sideaineita, joista tyypillisin on sementti. Muita tunnettuja vaihtoehtoja ovat muun muassa masuuni- ja pohjakuona, kipsi, kalkki ja kalkkiuunin sähkösuodatinpöly ja lentotuhka (Forsman ym. 2014). Näitä voidaan käyttää sellaisenaan tai sekoitteina massojen stabilointiin ja esimerkiksi sementin kanssa käytetään lähes aina myös kalkkipitoisia lisäkomponentteja. Eri sideainein päästään erilaisiin lujuusominaisuuksiin, eli seos-, tai sideainevalintaa voi siis rajoittaa stabiloidulle maalle asetetut lujuusvaatimukset. Lisäksi esimerkiksi tuhkissa on merkittäviä eroja eri polttoaineiden välillä, joten koostumus on tunnettava ennen käyttöä (Wahlström ym. 2015). Myös hinta, saatavuus, lujittumisnopeus ja muodonmuutosominaisuudet, liukoisuus ja vedenläpäisykyky, muun muassa, vaikuttavat sideaineseoksen valintaan.

2.2 Naantalin stabilointikoe

Tätä hanketta edeltäneessä CircVol-hankkeessa (Jarva ym. 2021) yhtenä tavoitteena oli tunnistaa ja testata sementin korvaamiseen sopivia sivuvirtoja ja muita kierrätysmateriaaleja maan stabiloinnissa ja näin vähentää infrarakentamisen ilmastovaikutuksia ja neitseellisten raaka-aineiden käyttöä pitkällä aikavälillä. Ruoppausmassan stabiloinnin kenttäkoe tehtiin Naantalin Matalahdella pienessä mittakaavassa. Testatut raaka-aineet tuotiin kohtuullisen kuljetusmatkan päästä. Käytössä oli eri yritysten toimittamia sivutuote- tai jätepohjaisia kierrätysmateriaaleja, jotka oli todettu toimiviksi ja turvalliseksi laboratorioissa tehdyissä esiselvityksissä. Näitä olivat esimerkiksi tuhkat ja kuonat.

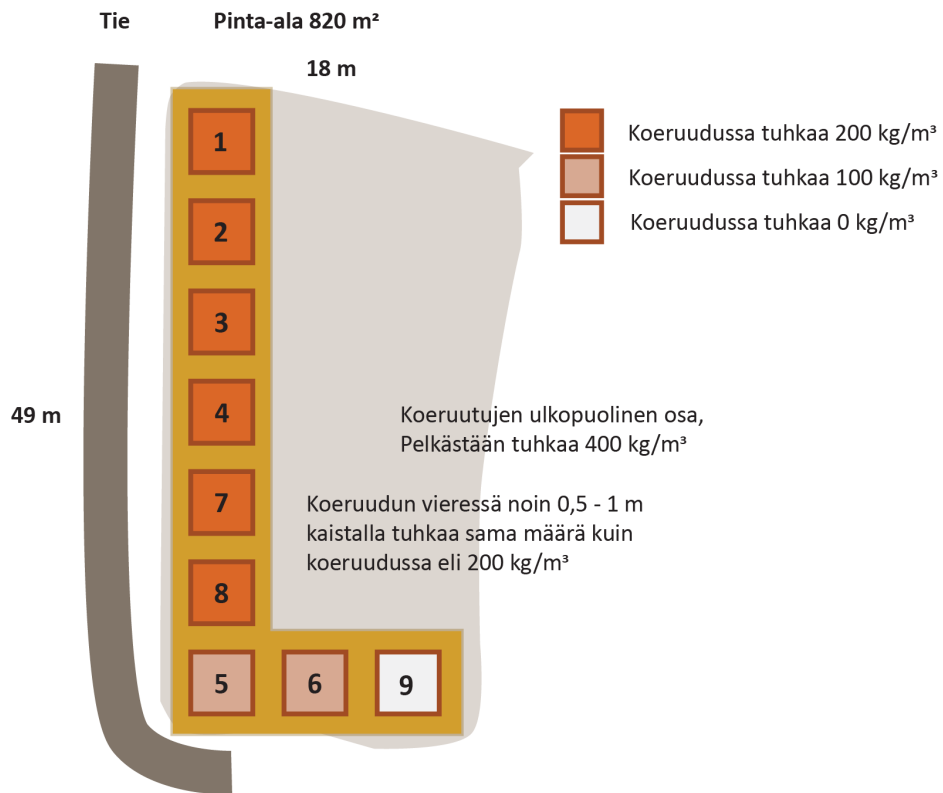
Paitsi että ruoppausmassat ovat maa-aineksina liian pehmeitä ja epävakaita (epästabiili) rakentamiselle ilman stabilointia, niin olennaisen tärkeää on myös pH:n hallinta ja haitta-aineiden eristäminen oikealla sideainevalinnalla. Esimerkiksi sulfidimaiden haponmuodostusta voidaan vähentää ja torjua, ja estää näin maa-ainesten kaivamisesta aiheutuvia ympäristöhaittoja ja -riskejä.

Kenttäkokeessa tutkittiin uusiomateriaalien vaikutusta stabiloidun ruoppausmassan ominaisuuksiin. Referenssinä käytettiin ruoppausmassan sekoitusta lentotuhkaan sekä lentotuhkan ja sementin sekoitukseen. Tutkittavia koeruutuja/reseptejä oli yhdeksän, ja ne on merkitty kuvaan 1. Koeruutujen koko oli 5 x 5 metriä. Ruoppausmassan syvyys altaassa oli noin 1,7 metriä (oletettu maksimisyvyys). Allas oli kuitenkin pohjastaan kalteva siten, että sen syvyys kasvoi merenlahteen päin mentäessä. Uusioaineita sekoitettiin päältäpäin ruoppausmassaan vain noin yhden metrin syvyyteen asti, käytössä olleen kaluston teknisten rajoitusten takia. Stabiloidun massan alla on siten paikoin stabiloimatonta ruoppausmassaa. Lopullinen sekoitussuhde oli 1 m³ ruoppausmassaa + 350 kg/m³ kuivia sideaineita. Kenttäkokeeseen käytetyt reseptit on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Kenttäkokeen reseptit ja niiden sisältämät sideaineet. Kukin resepti testattiin yhdessä 5x5 metrin koeruudussa. Arvot kilogrammoja. Yritysten tuotteiden (Ecolan ja Renotech) osalta on ilmoitettu vain kokonaismäärät, eikä reseptien aineosia ole niiden osalta eritelty.

Resepti	Ruoppaus- massa	Lento- tuhka	Sementti	Masuuni- kuona	Uuni- pöly	Pohja- kuona	Ecolan	Renotech
1	1200	200	150					
2	1200	200	50	100				
3	1200	200						150
4	1200	200					150	
5	1200	100	150			100		
6	1200	100	50	100		100		
7	1200	200	50	50	50			
8	1200	200	25	75	50			
9	1200	0	50	100	100	100		

Jarvan ym. (2021) kenttäkokeissa todettiin, että maalle läjitettyjä ruoppausmassoja voidaan stabiloida paitsi sementillä, masuunikuonalla tai lentotuhkalla, niin myös muilla teollisuuden sivuvirroilla. Testatuista yhdeksästä erilaisesta reseptistä kaikki saavuttivat koetoiminta-alueella geoteknisesti katsottuna hyvän ja kantavan maapohjan. Lisäksi stabilointi erilaisin sideainein neutraloi tehokkaasti happoa tuottavan ruoppausmassan, jolloin myös haitta-aineiden liukeneminen estyi merkittävästi.



Kuva 1. Eri reseptien sijoittelu ruuduittain Naantalın Matalahden kenttäkokeissa, ks. tarkka sijainti lähteestä Jarva ym. 2021.

3 Hiilijalanjälkilaskenta

Hiilijalanjälki kertoo toiminnan ilmastoa lämmittävän vaikutuksen suuruudesta. Laskentaa ohjataan useissa eri standardeissa ja ohjeissa. Hiilijalanjäljen laskennassa tietojen saatavuus ja tarkkuus määrittävät tuloksen oikeellisuuden ja rajaukset sen ”täydellisyyden”.

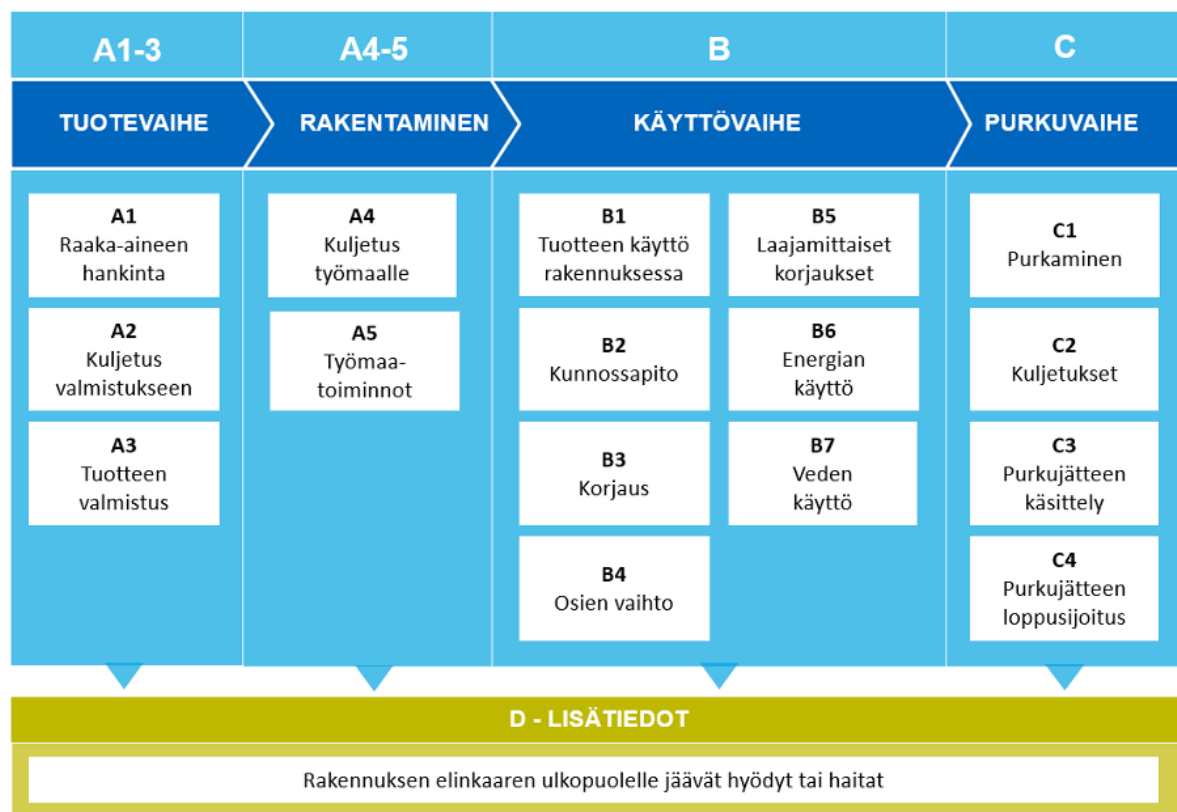
3.1 Hiilijalanjälki

Hiilijalanjälki tarkoittaa yleisesti ottaen jostakin toiminnasta aiheutuvan ilmastomuutosta aiheuttavien kasvihuonekaasujen määrää. Kyse on tarkennettuna ilmastoalan jäljestä, sillä kasvihuoneilmiötä aiheuttaa muutkin aineet kuin hiilidioksidi. Asian yksinkertaistamiseksi, kunkin eri kasvihuonekaasun teho kuitenkin yhteismitallistetaan siten, että ne vastaisivat ilmastoa lämmittävältä vaikutukseltaan hiilidioksidia sadan vuoden tarkastelujakson aikana. Tällöin puhutaan CO₂-ekvivalentista (CO₂e). Esimerkkinä typpioksiduuli on 265 kertaa ja metaani 28 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasuvaikutukseltaan kuin hiilidioksidi 100-vuoden ajalle mallinnettuna (Myhre ym. 2013). Hiilidioksidi on kuitenkin suurin ilmaston lämpenemistä aiheuttava kaasu suuren määränsä vuoksi, vaikka paljon voimakkaampia kaasuja onkin olemassa. Tieteen tarkentuessa myös nämä yhteismitallistamisen kertoimet ovat aika ajoin muuttuneet. Hiilidioksidi on kuitenkin suurin ilmaston lämpenemistä aiheuttava kaasu suuren määränsä vuoksi, vaikka paljon voimakkaampia kaasuja onkin olemassa.

Käytännössä hiilijalanjäljen laskeminen auttaa ymmärtämään päästöjen määrän ja löytämään olennaisimmat päästölähteet. Näin päästöjen vähennystä voidaan kohdentaa tarkasti ja siten torjua ihmisen aiheuttamaa ilmaston lämpenemistä.

Rakentamisen elinkaarisen hiilijalanjäljen laskemista ohjaa CEN/TC 350-standardiperhe (kuva 2). Siinä päästöjen aiheutuminen jaetaan neljään vaiheeseen ja yhteensä 16 toimintoon. Näiden lisäksi on myös niin sanottu D-osio, joka kuvaa elinkaaren ulkopuolisia vaikutuksia, joihin esimerkiksi sementin karbonatisaatio voitaisiin laskea (ks. kappale 3.3.1).

Kun tuotteen sisältämien vaiheiden kaikki toiminnot on määritetty, on tuotannon päästöjen tarkastelu yksinkertaista ja korjaavat toimenpiteet helpompi määrittää ja kohdentaa.



Kuva 2. Rakennushankkeen CEN/TC 350-standardiperheen mukainen elinkaarimalli (lähde YM 2017).

3.2 Standardien kirjo

Hiilijalanjälkien ja ympäristövaikutusten laskentaa ohjaavat useat standardit ja ohjeet. Kansainvälisestä ISO-standardijärjestelmänperheestä elinkaarilaskentaa koskettavat erityisesti 14000-sarjan standardit 14040 ja 14044. Tuotteen hiilijalanjälkilaskentaa tarkentava ISO-standardi on 14067. Muun muassa edellisiin pohjautuvat tuotteiden rakentamista ja rakennustuotteita koskettava ympäristöselosteita eli EPD:tä koskettavat EN 15804 ja ISO 21930, sekä rakennusten ympäristösuoriutuvuuden tai -vaikutusten arviointi (Assessment of environmental performance of buildings) EN 15978. Muita yrityksiä ja organisaatioita lähemmin koskettavia laskentaohjeita ovat kasviuonekaasuprotokolla (WRI 2022) sekä PAS 2050 (BSI 2011). Esimerkiksi EU:ssa yhteiseksi luotu, tuotekategoriakohtainen ympäristöjalanjälki (Product Environmental Footprint PEF) suositus (2013/179/EU) ja sitä tarkentavat tuotekategoriakohtaiset laskentasäännöt (Product Environmental Footprint Category Rules) (PEFCR 2018) ammentavat sisältöä useista eri standardeista, mukaan lukien muutamat edellä mainitut.

Standardien noudattamisen tarve koskettaa ensisijaisesti laskennan kohteen itsensä ulospäin esittämiä lukuja ja laskentoja. Esimerkiksi markkinointitarkoituksiin käytettävän raportin sisältöön ja muotoon otetaan laskentastandardeissa kantaa. Sen sijaan, pelkästään yrityksen sisäiseen käyttöön jäävää laskentaa ei tietenkään ole pakko rinnastaa mihinkään standardiin, mutta mikäli tuloksia halutaan esimerkiksi verrata kilpailevaa tuotetta vastaan, on laskentatavan oltava sama, sillä eri laskentasäännöt voivat aiheuttaa eroja, vaikka arvioidaan samaa tuotetta (Wang ym. 2018).

Voidaan sanoa, että standardeista ja ohjeista on jo muodostunut suoranainen ”viidakko”, jotka menevät monilta osin päällekkäin. Huolimatta kaikista ohjeista päästölaskentojen avainsana on läpinäkyvyys. Olennaista on, että laskennan dokumentointi on tehty niin selkeästi, että työn voi helposti toistaa ja tarvittaessa muokata, päivittää tai korjata. Dokumentoinnin tulisi käsittää muun muassa

tuotantoketjun kuvaus, käytetyt päästökertoimet, tuotantopanokset tuotannollista yksikköä kohti sekä arvioinnissa huomioitujen ja ulosrajatut asiat. Nämä mainitaan monessa standardissa.

3.3 Stabilointikokeissa käytettyjen sideaineiden hiilijalanjälkilaskenta

Hiilijalanjälkilaskenta ruoppausmassojen stabiloinnille käsittää tässä raportissa kasvihuonekaasupäästöt alkaen sideaineen valmistamisesta ja käsittelystä aina sekoittamistyön valmistumiseen asti.

Peruseriaatteena oli, että sideaineissa käytetyt jäte- tai sivuvirtajakeet ovat raaka-aineina päästöttömiä. Toisin sanoen, niitä tuottavien prosessien päästöt jyvitetään varsinaisille päätuotteille kuten lämmölle ja sähkölle, muttei esimerkiksi ohessa syntyvälle tuhalle. Hankkeen kontekstissa esimerkiksi sementti on ensisijainen tuote ja se kantaa siten sementin valmistuksen päästöt mukanaan laskennassa. Metallisulattojen masuunikuona sen sijaan on alussa päästövapaata, sillä kaikki tuotannon päästöt on kohdistettu varsinaisille metallituotteille. Masuunikuonan jälkikäsitellyt, kuljetukset ja sekoittaminen sideaineena maahan ovat puolestaan toimia, joista johtuen masuunikuonan käytöstä aiheutuu siihen kohdistuvia päästöjä.

Hankkeessa käytetyt sideaineet, niihin liittyvät alkuperätiedot eli kuljetusmatkat kohteelle sekä jalostusprosessien tuotantopanostiedot ja laskennassa käytetyt laskentaparametrit, kuten stabilointityön polttoaineenkulutus, saatiin urakoitsijalta ja yrityksiltä. Niitä kutsutaan primäärisiksi tiedoiksi, koska ne ovat oikeasti hankkeen prosessien tietoja. Nämä tiedot ovat listattuina taulukkoon 2. Polttoaineiden päästökertoimet saatiin tilastokeskuksen polttoaineluokituksesta. Kuljetusten kulutustiedot ovat sekundäärisiä tietoja, koska ne on otettu yleisistä tietolähteistä, tässä tapauksessa VTT:n LIPASTO-tietokannasta (vuoden 2019 tiedot).

Taulukko 2. Laskennassa käytetyt parametrit, parametrien tarkennukset ja tietolähteet.

Toiminto	Tarkennus	Kerroin, kg CO ₂ e	Yksikkö	Lähde
Kuljetus täytenä 40 t kuorma, 60 t kokonaismassa	Maantieajo	0,0301	Tonnikilometri	LIPASTO 2019
Kuljetus täytenä 40 t kuorma, 60 t kokonaismassa	Katuajo	0,0537	Tonnikilometri	LIPASTO 2019
Kuljetus tyhjänä	Maantieajo	0,796	Ajoneuvokilometri	LIPASTO 2019
Kuljetus tyhjänä	Katuajo	1,419	Ajoneuvokilometri	LIPASTO 2019
Stabiloitavan sideaineen sekoitus maahan	Telakaivinkone, 11 litraa dieseliä per tunti	4,63	Stabiloitu kuutiometri maata	Hankkeessa saatu tulos
Materiaali	Sisällytetyt toimenpiteet	Päästölaskennan peruste	Tarkenne	Päästökerroin lähde
Sementti	Sekä raaka-aineen valmistus että kuljetus	612 kg CO ₂ e/tonni 51 km kuljetusmatka	Plussementti, Parainen Maantieosuus 70 %	Finnsementti 2020 LIPASTO 2019
Monipolttolaitoksen tuhka	Vain kuljetus	6,2 km	Maantieosuus 30 %	LIPASTO 2019
Masuunikuonajauhe, Pori.	Kuonan murskaus ja kuljetus	52,96 168 km	EPD-kerroin Maantieosuus 80 %	Finnsementti 2021 LIPASTO 2019
Kalkkiuunipöly (LKD)	Vain kuljetus, ei vaadi prosessointia	51 km	Maantieosuus 70 %	LIPASTO 2019
Erityisjätteen polton pohjakuona	Vain kuljetus	190 km kuljetusmatka	Maantieosuus 80 %	LIPASTO 2019

Materiaali	Sisällytetyt toimenpiteet	Päästölaskennan peruste	Tarkenne	Päästökerroin lähde
Ecolan Sideainereseptiä ei julkaista tarkasti	Kuljetus Sähkö	170 km 40 kWh/t	Maantieosuus 80 % Suomen keskimääräinen sähköntuotanto, energiamenetelmä	LIPASTO 2019 Motiva 2022
Renotech Sideainereseptiä ei julkaista tarkasti	Kuljetus Sähkö	170 km 40 kWh/t	Maantieosuus 80 % Suomen keskimääräinen sähköntuotanto, energiamenetelmä	LIPASTO 2019 Motiva 2022

Sideaineita kuljetettaessa rahtitilan koko ei ole rajoittava tekijä, jolloin niitä voidaan ajaa täysmassaisilla kuormilla. Täysi kuorma tuottaa vähemmän päästöjä kuljetettua tonnikipometriä kohti kuin vajaa kuorma, eli kuljetus on tehokkaampaa. Kuljetusmäärä stabiloitua kuutiometriä kohti riippuu paitsi raaka-aineen hankintapaikasta niin myös käytettävästä sideainemäärästä, joka kuutiota kohden tarvitaan. Katujon osuus arvioitiin karkeasti ja sen päästöt kilometriä kohti ovat liki kaksinkertaiset maantieajoon verrattuna.

3.4 Rajaukset

3.4.1 Karbonatisaatio

Sementin karbonatisaatiota ei huomioitu sementin päästöä vähentävänä tekijänä, mutta sen vaikutus nettohiilidioksidipäästöihin on pitkän aikajänteen tarkastelussa olennaista tunnistaa ja siksi se on tärkeä avata tässä raportissa.

Sementin valmistuksessa kalkkikivestä vapautuu hiilidioksidia. Vapautuvan hiilidioksidin määrässä voi olla merkittävää vaihtelua klinkkerin koostumuksen mukaan, mutta oletusarvona voidaan käyttää 510 kg CO₂e/sementtiklinkkeritonni (van Oss & Padovani 2003). Kun sementin valmistuksen kokonaispäästöt ilman kaivosteollisuutta ovat esimerkiksi Finnsementin ympäristöselosteessa noin 626–764 kg CO₂e/t sementtilaadusta riippuen (Finnsementti 2021), on dekarbonatisaation osuus merkitsevä sementin kokonaisilmastovaikutuksista. Teoriassa sementti absorboi tämän kalsinaatioissa vapautuneen hiilen itseensä karbonatisaatioreaktion kautta kokonaan, mutta täydellinen karbonatisaatio ei ehdi tapahtua esimerkiksi betonirakenteen normaalin käyttöiän tai tyypillisen 100 vuoden tarkastelujakson aikana, koska yleinen ”joskin karkea” - nyrkkisääntö on, että karbonatisaatio etenee millimetreissä ajan vuosissa neliöjuuren suhteen, eli 100 vuodessa karbonatisaatio on edennyt 10 millimetrin syvyyteen. Toisin sanoen, kappaleen paksuus ja pinta-ala ovat karbonatisoitumisen kannalta kriittiset suuret. Muita reaktion nopeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa, huokoisuus, ilman hiilidioksidipitoisuus ja paine, betonin tiheys (Branco & Lubovič 2016; Understanding Cement 2022; Betoniteollisuus ry 2020). Reaktion nopeuden vaihtelu on näistä tekijöistä johtuen suurta (Betoniteollisuus ry 2015; Possan ym. 2017).

Karbonatisaation vaikutusten arviointi on siis paitsi epävarmaa, niin myös tapauskohtaista. Sitä voi nopeuttaa erityisesti lisäämällä kappaleiden pinta-alaa, käytännössä siis murskaamalla betonikappaleita pienemmiksi. Karbonatisaation merkitys globaalissa mittakaavassa on joidenkin arvioiden mukaan jopa muutaman prosentin luokkaa kaikista hiilidioksidipäästöistä; siltikään sitä ei huomioida päästöinventaariorissa (Xi ym. 2016). Mikäli se huomioitaisiin, voisi karbonatisaation vaikutuskerroin laskennoissa perustellusti olla täydellistä karbonatisoitumista pienempi (Concrete solution 2020).

Tämän projektin tapauskontekstissa on huomattava, että kaasujen vaihtuminen maan sisällä on hitaampaa kuin maan pinnalla, jolloin karbonatisaatio hidastuu (Dodoo ym. 2009).

3.4.2 Muut laskennan rajaukset

Suurelle stabilointikohteelle ainakin tuontikuljetukset pyrittäneen järjestämään yksinomaan stabilointiaineiden kuljetuksia varten. Mahdollisesti myös paluut ainakin lyhyille etäisyyksille omistetaan yhtä tarvetta varten. Tällä perusteella kuljetukset mallinnettiin täyden tuontikuorman ja tyhjän paluuajon kuljetuksina yksinomaan sideaineelle. Samalla tämä myös yksinkertaistaa laskentaa.

Todellisuudessa kuljetus voi kuitenkin olla vajaa, tai sekä tulo- että menomatalla voidaan kuljettaa eri asiakkaiden osakuormia. Kuormien ja matkojen perusteella kuljetusten päästöjä voidaan jyvittää eri tuotteille ja asiakkaille. Käytetyt katu- ja maantieajojen osuudet ovat karkeita arvioita ja otollisia tarkennuksille, joskin niistä aiheutuva päästö kokonaisuutta katsoen, toisin sanoen tarkastelun herkkyyden, on varsin maltillinen. Samoin saadut hintatiedot voivat poiketa tässä esitetystä, mutta kustannusrakenne ei ole kovinkaan herkkä kuljetuskustannusten heilahteluille.

Kuljetusten päästölaskennan alkuperäinen lähde VTT:n LIPASTO-tietokanta on vanhenumassa ja poistumassa käytöstä elokuussa 2022. Aiemmat päivitykset ovat tuottaneet marginaalisia muutoksia kertoimiin, eli pieniä muutoksia kuljetuksiin voidaan odottaa, jos tätä laskentaa toistaa uudemmin kertoimin.

Seuraavana esitettäviä tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, ettei tässä hankkeessa ole etsitty optimaalisia sideaineseoksia, vaan kukin seos on tehty samalla suhteella: 1200 kg ruoppausmassaa ja 350 kg sideaineita. Tämä huomioiden sideaineiden määrien muuttaminen optimaalisen vaihtoehdon löytämiseksi voi muuttaa tuloksia paljonkin.



4 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Maan stabiloinnissa käytettyjen erilaisten sideaineiden aiheuttamien kasvihuonekaasujen, saavutetun lujuuden ja aiheutuneiden kustannusten välillä on eroja. Sideaineseoksen valinnalla pyritään tarvittavan lujuuden saavuttamiseen kohtuullisin kustannuksin ja vähin päästöin.

4.1 Sideaineiden CO₂e -päästöt

Stabilointikokeissa sementtinä käytettiin Plussementtiä (Finnsementti Oy, CEM II/B-M (S-LL) 42.5 N). Tämä on normaalisti kovettuva sementtilaatu, joka saavuttaa 42,5 MPa lujuuden 28 vuorokauden iässä. Standardin mukaan Plussementissä saa olla muita seosaineita yhteensä 21–35 %. Tähän sementtiin on lisätty masuunikuonaa (10–25 %) ja kalkkikiveä (6–15 %). Masuunikuonan päästökerroin on noin vajaat 10 % sementin päästökertoimesta ja muilla vähemmän, joten päästövähennä on liki suoraviivaista sementin osuuden vähentymisen suhteen.

Masuunikuonajauhe (Finnsementti Oy, KJ 400) on valmistettu terästuotannosta tulevasta kuonasta. Lähtökohtaisesti tämän materiaalin hiilijalanjälki alussa on 0, koska kaikki päästöt on jo allokoitu terästuotantoon. Masuunikuonajauhe valmistetaan granuloimalla ja jauhamalla raakaraudan valmistuksessa syntyvää masuunikuonaa. Lisäksi kuonaa pitää kuljettaa. Tästä prosessoinnista syntyy tuotteen hiilijalanjälki (n. 50 kg CO₂e/t), joka kuitenkin on hyvin matala esimerkiksi sementtiin verrattuna.

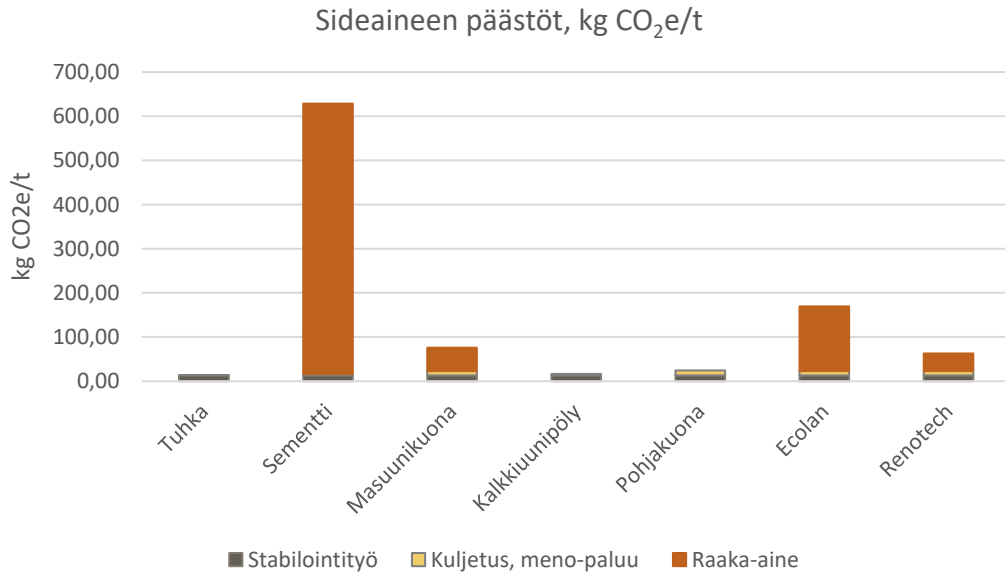
Muille käytetyille jättepohjaisille sideaineelle, itse materiaalin hiilijalanjälki on 0. Tuhka toimitettiin Lassila & Tikanoja Oy:n toimesta Naantalın monipolttolaitoksesta. Tuhkalle ei ole tehty jälkikäsitteilyä vaan se toimitettiin suoraan työmaalle. Vastaavalla tavalla toimitettiin kalkinpolton uunipöly eli LKD-pöly (Nordkalk Oy) sekä jätteenpolton pohjakuonan jae 0-2 mm (Suomen Erityisjäte Oy).

Ecolan mix on kaupalliseen tuotteeseen Ecolan Stabi 80 perustuva seos. Siinä on pääraaka-aineena energiateollisuuden lentotuhkaa (n. 80 %). Tämän lisäksi seos sisältää noin 20 % sementtiä.

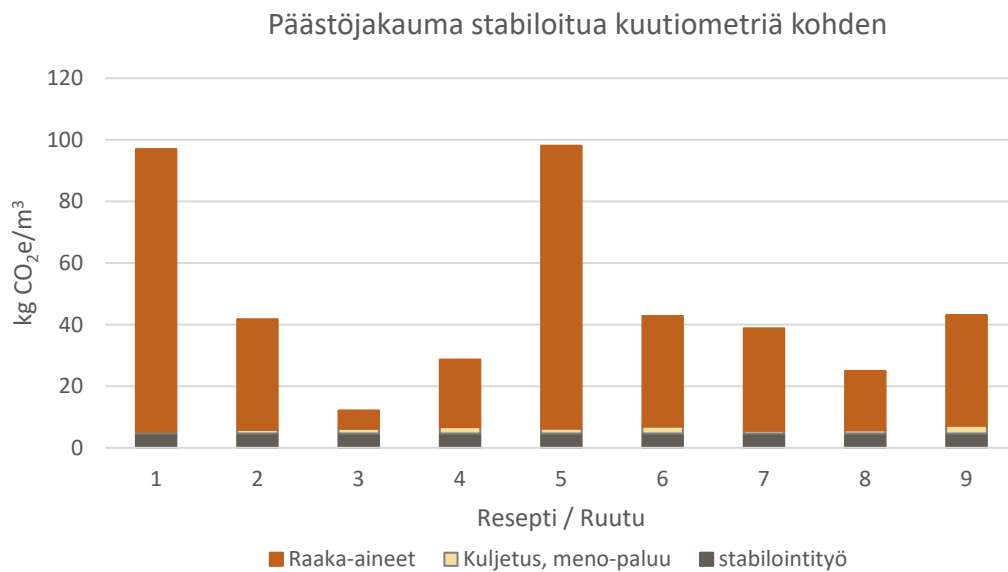
Renotech mix on testatuista ainoa täysin sementtivapaa seos. Renotech Oy:n kehittämä testiseos käyttää pääraaka-aineena masuunikuonaa, ja lisäksi kipsiä ja lentotuhkaa.

Kokeissa käytettiin erilaisia sideaineseoksia, eli reseptejä, joita kokeiltiin omissa koeruuduissaan (kts. taulukko 1). Kuva 3 osoittaa, että raaka-aineina päästöttömien jäte- ja sivuvirtajakeiden hyödyntäminen on ilmastollisesti yliverstaista sementin käyttöön verrattuna. Tämä johtuu siitä, että niiden syntyprosessin päästöt jyvitetään muille tuotteille, eikä niiden prosessointi, esimerkiksi jauhatus, aiheuta läheskään yhtä suuria ilmastovaikutuksia. Sideaineeseen liittyvien päästöjen jälkeen logistiikan merkitevyys päästöjen suhteen riippuu siitä, kuinka pitkä käytetyn sideaineen kuljetusmatka on, eli se on suoraan riippuvainen työmaan etäisyydestä sideaineen valmistuspaikkaan. Kuljetus mallinnettiin meno-paluukuljetuksena sillä ajatuksella, että kuljetuskalusto omistetaan stabilointia varten, kuten uskottiin suuren kokoluokan stabiloinnissa tehtävän.

Sementin aiheuttamat päästöt näkyvät myös kokeissa käytettyjen sideainereseptien kokonaispäästöissä. Taulukossa 1 esitellyt reseptit voidaan sementtimäärän mukaan jakaa neljään eri tyyppiin; korkean sementtipitoisuuden (150 kg/m³, reseptit 1 ja 5), keskikorkean sementtipitoisuuden (50 kg/m³, reseptit 2, 6, 7 ja 9), matalan sementtipitoisuuden (< 25 kg/m³ reseptit 4 ja 8) ja sementin nollapitoisuuden (resepti 3) resepteihin. Reseptien 3 ja 4 tarkkoja sisältöjä ei paljasteta taulukossa. Matalan sementtitason resepteillä myös kuljetus ja stabilointityön päästöt vaikuttavat suhteellisesti selvästi enemmän kokonaispäästöihin kuin korkean sementtitason resepteillä (Kuva 4.)



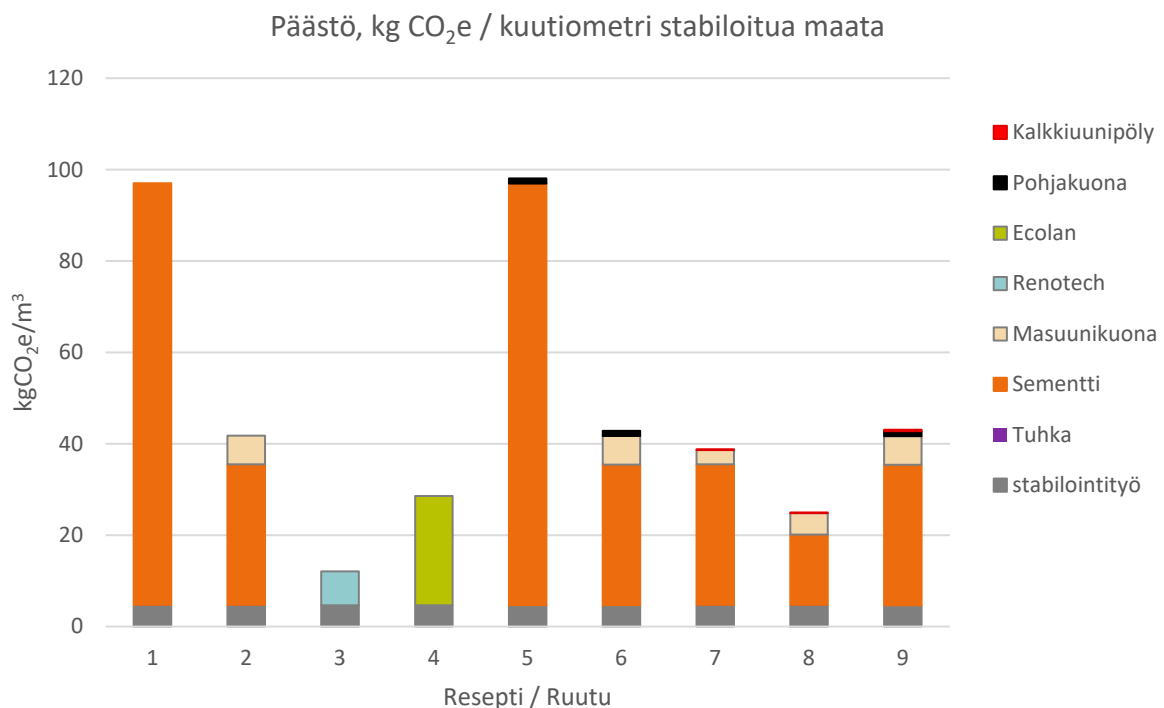
Kuva 3. Eri sideaineina käytettävien raaka-aineiden valmistamiseen, niiden kuljetukseen Matalahdelle ja stabilointityöhön liittyvät päästöt. Ecolanin ja Renotechin sideaineet ovat erilaisia sideaineseoksia.



Kuva 4. Eri sideaineiden seoksille eli resepteille lasketut päästöt. Kaaviossa ovat mukana myös stabilointityön ja sideaineiden meno-palukuljetusten osuudet.

4.2 Käytettyjen reseptien CO₂e -päästöt ja niillä saavutetut lujuudet

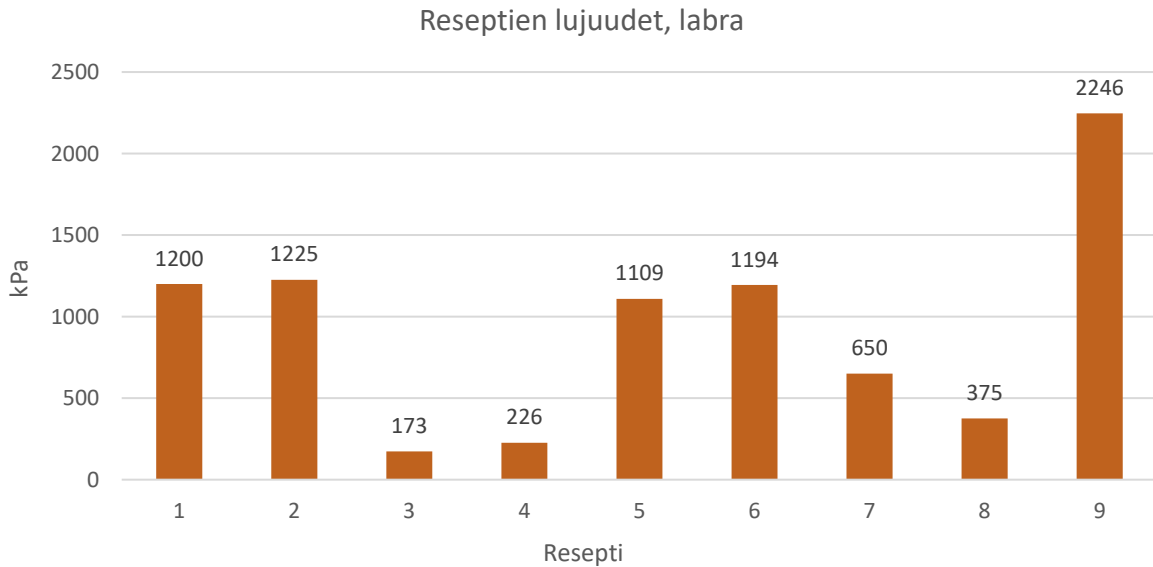
Tuloksissa näkyy sementin määrän vaikutus kokonaispäästöihin; Selvästi korkeimmat CO₂e-päästöt olivat resepteillä 5 ja 1 (98,1 ja 97,0 kg CO₂e/m³), joissa sementin määrä oli korkein ja matalimman arvon sai täysin sementitön resepti 3 (12,2 kg CO₂e/m³). Seuraavaksi sijoittuivat reseptit 8 (24,9 kg CO₂e/m³) ja 4 (28,7 kg CO₂e/m³). Loput sijoittuivat 38–43 kg CO₂e/m³ välille. Stabilointityössä syntyviin päästöihin sideaineella ei raportoitu olevan merkitystä, vaan kaivinkone joutui käyttämään yhtä lailla aikaa ja polttoainetta sideaineista riippumatta sekoittaakseen ne ruoppausmassan kanssa. Tämän vuoksi stabilointityön päästö näyttyy identtisenä kaikille ruuduille resepteistä riippumatta. Kuvassa 5 on stabiloinnissa käytettyjen reseptien CO₂e -päästöt laskettuna kuutiometriä stabiloitua massaa kohden.



Kuva 5. Kasvihuonekaasupäästöjen määrä ruuduissa stabilointityön ja käytettyjen sideainereseptien osalta. Reseptien päästöt sisältävät myös päästöt kuljetuksesta Matalahdelle.

Käytännössä lujuus on yleensä tärkein kriteeri maan stabiloinnissa. Puristuslujuuden asetettu tavoite hankkeessa oli 150 kilopascalia (kPa). Matalahden kenttäkokeessa sideainemäärät vakioitiin käytetyn ruoppausmassan mukaan (350 kg sideaineita /m³ ruoppausmassaa). Tähän tasoon oli päädytty tekemällä ruoppausmassan läjityksen jälkeen runsaasti esitestejä, joiden perusteella arvioimme, että näillä määrillä saavutettaisiin hieman tavoitetta korkeampia lujuuksia.

Kuvassa 6 on esitettyä laboratorioissa kolmen kuukauden kovettumisen jälkeen mitatut puristuslujuusarvot kaikille resepteille. Testiruutujen eli reseptien välille syntyi huomattavia lujuuseroja, vaihteluvälinä 173–2246 kPa (kuva 6). Moni seos tuotti kohteessaan siis tarpeettoman suuria lujuuksia, kovin jopa 15-kertaisen tavoiteltuun tasoon nähden, vaikka esitestit antoivat olettaa saavutettavan selvästi maltillisempia lujuuksia. Tämä johtunee suureksi osaksi itse ruoppausmassassa tapahtuneista muutoksista läjityksen ja stabiloinnin välisenä aikana, minkä vuoksi esitestien perusteella tehdyt arviot eivät pärineet enää itse kenttäkokeessa. Sideainemäärien vakioiminen ei näin ollen onnistunut toivotulla tavalla eikä koeasetelmasta johtuen näin ollen voi tehdä valintaa parhaan ja huonoimman vaihtoehdon välillä, vaan tulokset kuvaavat vain vakioitun sideainemäärän tuottamia lujuuksia, ei reseptien potentiaalia määrasuhteita optimoimalla.



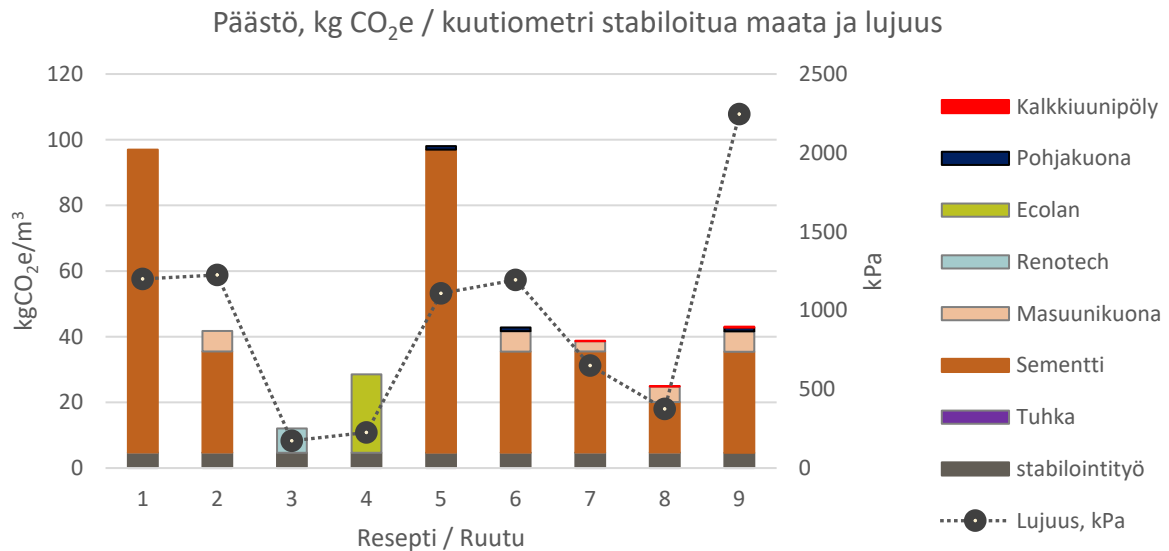
Kuva 6. Reseptien laboratorioissa saavuttamat lujuudet 91 päivän jälkeen.

4.3 CO₂e -päästöt suhteutettuna lujuuteen

Edellä on todettu, että eri sideaineilla saavutettavat lujuus- ja kantavuusominaisuudet vaihtelevat samoin kuin aiheutuneet ilmastovaikutukset. Olennainen kysymys on, mikä sideaine tai niiden seos saavuttaa stabilointikohteessa halutun lujuuden vähimmin ilmastovaikutuksin? Jos kantavuudelle asetettu vaade voidaan saavuttaa useilla sideainevaihtoehdoilla, voidaan ilmastovaikutuksia tällöin käyttää valintakriteerinä.

Seuraavia tuloksia tarkastellessa on tärkeää huomata, että on erittäin epätodennäköistä, että lujuus muuttuisi suorassa suhteessa jonkin sideaineen tai näiden seoksen määrään. Se ehkä toteutuu tietyssä sideainemäärävalissa, mutta sen ulkopuolella sideainemäärän vähetessä tai kasvaessa lujuus todennäköisesti heikkenee nopeasti tai jopa romahtaa. Maksimaalinenkaan lujuus ei siis oletettavasti löydy 100 % sideainepitoisuuden kohdalta. Tämä tulee ymmärtää lujuutta ja sideaineiden päästöjä tarkasteltaessa, eikä seuraavana esitettävistä luvuista pidä vetää sellaisia suoria johtopäätöksiä, että esimerkiksi sideaineen puolittamisella myös lujuus puolittuisi (samoin kuin päästöt), vaan lujuus tulee todentaa kokein.

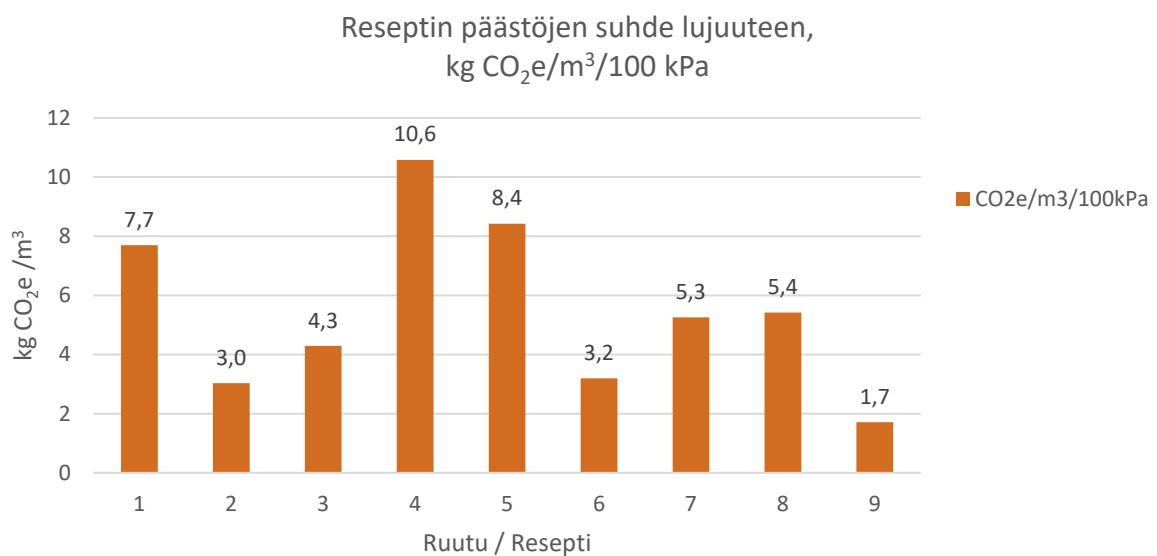
Kuvassa 7 on stabiloinnissa käytettyjen reseptien hiilidioksidipäästöt laskettuna kuutiometriä stabiloitua maata kohden sisältäen kuljetuksen sekä resepteillä saavutetut lujuudet. Kaikkein vähäpäästöisimmät reseptit (3, 4 ja 8) olivat myös lujuudeltaan heikoimmat, 173–375 kilopascalia (kPa), mutta suurimmat päästöt eivät johtaneet kovimpaan lujuuteen (vrt. ruudut 5 ja 9). Sementin korvaaminen muilla sideaineilla ruudussa 9 tuottikin ehkä yllättäen huomattavasti kovemman lopputuloksen kuin ruudun 5 korkeampi sementtipitoisuus.



Kuva 7. Kokeiltujen sideainereseptien eri komponenttien kasvihuonekaasupäästöt per stabiloitu maakuutiometri kuljetettuna kohteelle. Katkoviivalla yhdistetyt pisteet ilmaisevat kyseisen reseptin puristuslujuuden 3 kk kohdalla.

Vertaillaksemme lujuuden suhdetta päästöihin, jaoimme ruutukohtaiset päästöt per stabiloitu kuutiometri reseptikohtaisesti näytteestä mitattua 100 kPa lujuutta kohden (kuva 8). Kokeissa 100 kPa lujuutta kohden laskettuna, vähäpäästöisimmiksi vaihtoehdoiksi osoittautuivat ruutujen 9, 2 ja 6 reseptit järjestyksessään tuloksilla 1,7, 3,0 ja 3,2 kg CO₂e/m³/100 kPa. Suurimmat päästöt tulivat järjestyksessään ruutujen 4, 5 ja 1 reseptein (10,6, 8,4 ja 7,7 kg CO₂e/m³/100 kPa).

Vertailussa pelkkään päästövertailuun, erityisesti reseptin 9 asema ruutujen välisessä vertailussa parani, ruudusta 4 tuli puolestaan huonoin vaihtoehto. Resepti 3 oli pelkässä ruutukohtaisessa stabiloinnissa selvästi matalapäästöisin, mutta lujuuteen suhteuttaminen pudottaa sen tässä vertailussa sijalle 4. Tässä voidaan kuitenkin huomioida, että resepti 3 on testatuista ainoa täysin sementtivapaa. Yleisesti voidaan sanoa, että keskitason sementtipitoisuuden reseptit, joissa 2/3 sementistä oli korvattu masuunikuonalla, näyttäytyivät tässä suhteutuksessa hyvinä.



Kuva 8. Kasvihuonekaasupäästöjen määrä per stabiloitu kuutiometri per saavutettu 100 kilopascalin lujuus kenttäkokeessa.

4.4 Sideaineen ja kustannusten suhde

Maan stabiloinnin ensisijainen tavoite on saavuttaa lujuus, joka mahdollistaa sen suunnitellun mukaisen käytön. Kun tämä tavoite voidaan saavuttaa hankkeen tulosten perusteella useammalla sideainevaihtoehdolla, on mahdollista jatkaa valintaa muilla kriteereillä. Kenties arkipäiväisin hankintakriteeri on hinta. Pyysimme eri raaka-aineiden ja kuljetusten hintatietoja asiantuntijoilta karkeilla arvioilla (taulukot 3 ja 4). Niiden perusteella laskimme eri ruuduissa testattujen seosten hinnat ja hinnan suhteessa lujuuteen.

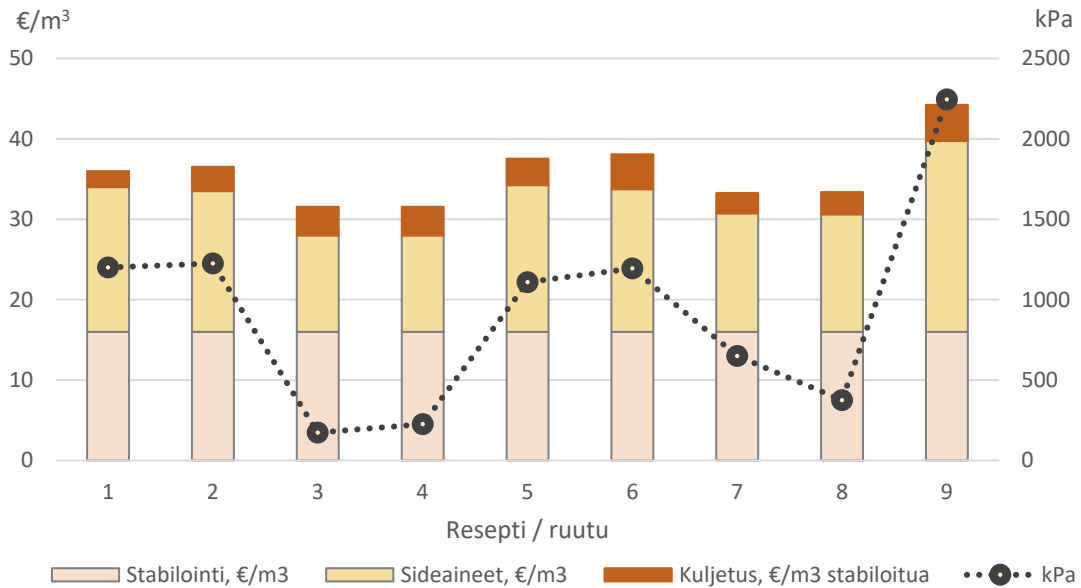
Taulukko 3. Sideaineen ja kuljetuksen kustannukset Matalahdelle sideainekohtaisesti.

Kustannukset	Polttolaitos- tuhka €/t	Perus- sementti €/t	Masuuni- kuona €/t	LKD pöly €/t	Pohja- kuona €/t	Renotech €/t	Ecolan €/t
Sideaine	0	120	115	60	2,5	80	80
Kuljetus	5	6,62	7	6,62	18	17	17

Taulukko 4. Kenttäkokeessa käytettyjen sideaineiden hinta-arvio ruutujen resepteille stabiloitua kuutiometriä kohti.

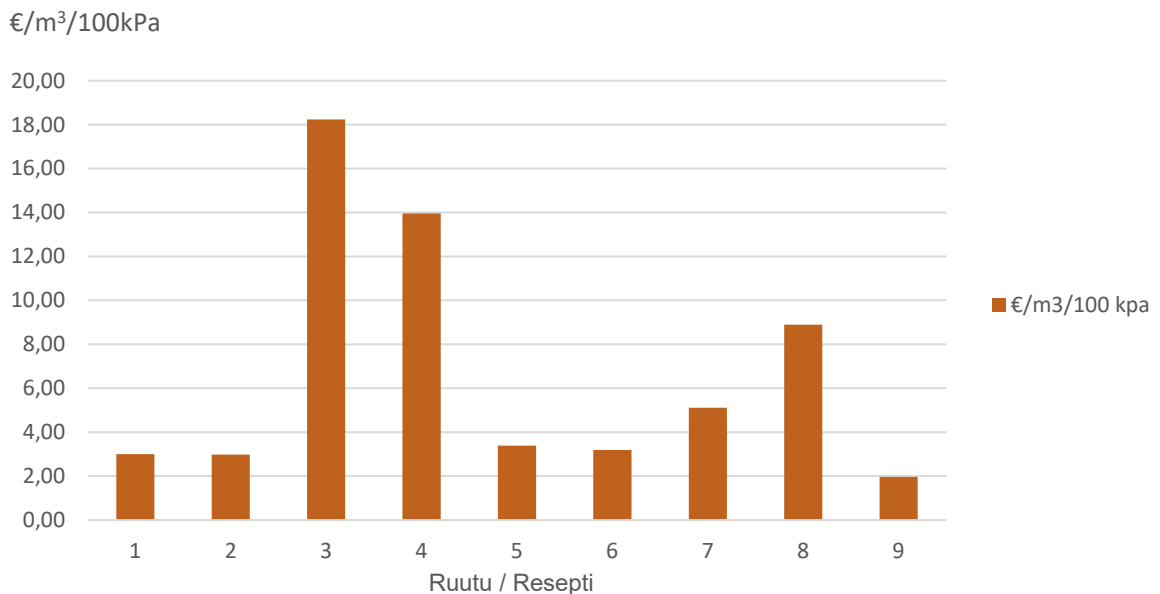
Ruutu/ Resepti	Sideaineet €/m ³	Kuljetus kohteelle €/m ³	Stabilointi €/m ³	Kustannukset yhteensä €/m ³
1	18,00	1,99	16,00	35,99
2	17,50	3,03	16,00	36,53
3	12,00	3,55	16,00	31,55
4	12,00	3,55	16,00	31,55
5	18,25	3,29	16,00	37,54
6	17,75	4,33	16,00	38,08
7	14,75	2,51	16,00	33,26
8	14,63	2,77	16,00	33,40
9	23,75	4,49	16,00	44,24

Raaka-ainehinnan perusteella halvinta olivat reseptien 3 ja 4 seokset ja kalleinta ruudun 9 seos, eli 12 € ja 23,75 € per stabiloitu kuutiometri maata (taulukko 4, kuva 9). Kalleimman reseptin raaka-aineiden hinta oli siis yli kaksinkertainen halvimpiin vaihtoehtoihin verrattuna. Toisaalta reseptit 3 ja 4 olivat myös lujuudeltaan heikoimmat ja resepti 9 lujin. Todellisen kokoluokan stabilointikohteessa ero kasvaa siis helposti satoihin tuhansiin euroihin. Stabilointityön kustannus laskettiin hankkeen kokeiden toteutuskustannuksista. Se on merkittävä osa ruutujen kokonaiskustannuksista, jopa yli puolet halvimmissa ja liki kolmannes kalleimmissa resepteissä. Kuljetukset olivat vain noin kymmenyksen luokkaa kokonaiskustannuksista, mutta pitkiä etäisyyksiä ja siitä aiheutuvia rahtikustannuksia ja päästöjä kannattaa luonnollisesti välttää. Kuten raaka-aineiden kustannukset, niin myös yhteen lasketut kustannukset olivat halvimmat reseptien 3 ja 4 seoksille ja kalleimmat ruudun 9 seokselle, eli 31,55 € ja 44,24 € stabiloitua maakuutiometriä kohti.



Kuva 9. Reseptien / ruutujen hinnat stabiloitua maakuutiometriä kohti. Kuvaajassa esitetty myös reseptin saavuttama puristuslujuus 3kk kohdalla.

Kun reseptien hintoja suhteutetaan saavutettuun lujuuteen, näyttäytyvät tulokset taas erilaisina. Halvimmat sideaineseokset olivat myös lujuudeltaan heikoimpia, jolloin suhteutettuna puristuslujuuteen reseptit 3 ja 4 antavat selvästi korkeimmat, ja reseptit 9, 1 ja 2 halvimmat hinnat (Kuva 10). Myös ruudun 8 korkeahko hinta nousee näkyvästi esiin ruutujen 3 ja 4 lisäksi.



Kuva 10. Reseptien hinnat suhteutettuna lujuuteen stabiloitua maakuutiometriä kohti.

Tässä laskentatavassa on myös haasteita ja rajoituksia. Matalahden kenttäkokeessa saavutetut puristuslujuudet olivat niin vaihtelevia, että suora hinnan ja päästöjen suhteutus lujuuteen ei ole ongelmattonta. Käytännössä tulokset olisivat todennäköisesti hyvin erilaisia, jos sideainemäärät olisi optimoitu jokaiselle seokselle erikseen tavoitelujuutta silmällä pitäen ja saavutetut lujuudet olisivat täten

olleet lähellä toisiaan. Tämän tutkimuksen tarkoitus oli kuitenkin tarkastella eri tapoja vertailla stabilointiin käytettyjä materiaaleja ja siihen Matalahden tulokset soveltuvat hyvin.

4.5 Yhteistarkastelu: Lujuus, kasvihuonekaasupäästöt ja hinta

Valittaessa jokin tässä hankkeessa testatuista seoksista voidaan hyödyntää lujuuden, hinnan ja päästöjen tietoja, sekä näiden yhdistelmiä. Valinta riippuu luonnollisesti päätökselle asetetuista kriteereistä. Taulukkoon 5 on listattu tämän hankkeen tuloksia, joiden perusteella valintoja voidaan tehdä ja perustella. Kuva 11 havainnollistaa päästöjen ja kustannusten suhteita lujuuteen.

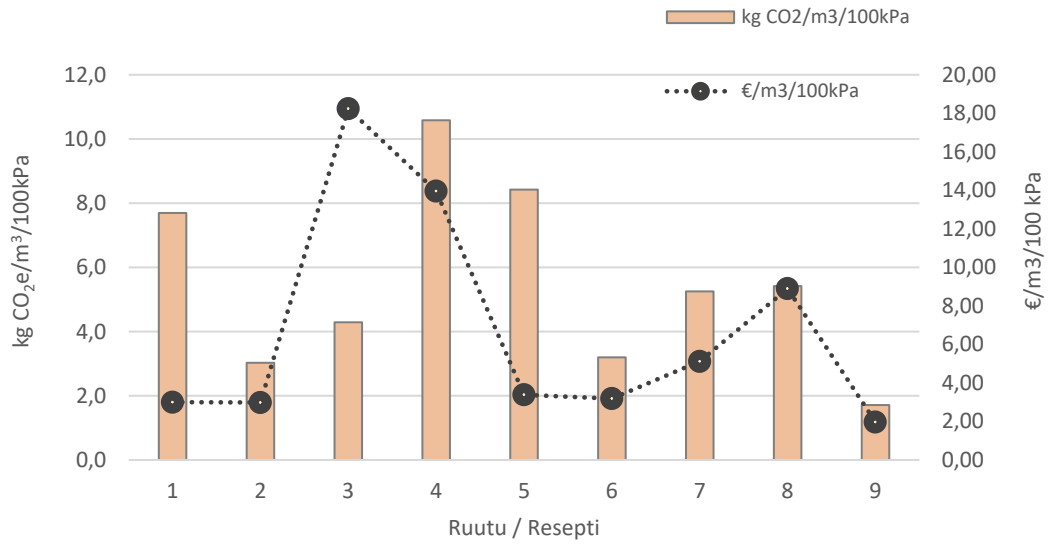
Lujuudeltaan jokainen ruutu saavutti tavoitelujuuden 150 kPa, eli mikä tahansa testiseos olisi siinä suhteessa kelpo valinta. Lujuuden suhteen kustannustehokkain oli ruutu 9, jossa 100 kPa lujuutta kuutiometriä kohden maksaa noin kaksi euroa. Kalleimman hinta-per-lujuus (€/m³/100kPa) -suhteen sai ruutu 3, jossa 100 kilopascalin lujuuteen stabiloidun kuution hinnaksi tuli yli 18 €, mutta sen kokonaispäästöt per kuutiometri ovat selvästi pienimmät. Päästöt ja lujuuden yhdistävän yksikön kg CO₂e/m³/100kPa perusteella selkeästi pienimpään eli parhaaseen lukuun pääsee ruutu 9 arvolla 1,71 kg CO₂e/m³/100kPa.

Lujuuksia, päästöjä ja kustannuksia ei ole suoraviivaista laittaa vertailuun yhtä aikaa, etenkin kun seoksen muuttaminen voi muuttaa saavutettua lujuutta epälineaarisesti. Optimaalista sideainemäärää päästöjen ja/tai hinnan suhteen halutun lujuuden saavuttamiseksi ei tässä kenttäkokeessa etsitty. Taulukon 5 luvut ja johdetut yksiköt kuitenkin mahdollistavat erilaisia pohdintoja stabilointiprojektin sideainevalinnalle. On kuitenkin eri asia, kuinka hintaa, lujuutta ja päästöjä arvioidaan. Maksimaalisen lujuuden kannalta valinta olisi resepti 9, alhaisimman hinnan suhteen resepti 3 tai 4 ja päästöjen suhteen resepti 3. Heikoimmin samaisessa järjestyksessä menestyivät reseptit 3, 9 ja 5.

Eriävä paremmuus eri suureiden suhteen johtaa tilanteeseen, jossa valinta on tehtävä jonkinlaista päätöstukimenetelmää soveltaen. Huonoimpia voi rajata pois esimerkiksi asettamalla erikseen sallittu maksimipäästö ja -hintaa ja/tai korkeampi vähimmäislujuus, mutta kriteerit täyttävistä on valinta tehtävä jotain ominaisuutta painottamalla tai arvalla.

Taulukko 5. Sideaineeseen liittyvät päästöt, kg CO₂e/m³

Ruutu / Resepti	kPa	Sideaineeseen liittyvät päästöt, kg CO ₂ e/m ³				CO ₂ e/m ³ / 100kPa	Kustannus yhteensä €/m ³	€/m ³ / 100 kPa
		Raaka- aineet	Kuljetukset kg CO ₂ e/m ³	Stabilointityö kg CO ₂ e/m ³	Yhteensä kg CO ₂ e/m ³			
1	1200	91,80	0,57	4,64	97,01	7,70	35,99	3,00
2	1225	35,90	1,22	4,64	41,76	3,03	36,53	2,98
3	173	5,95	1,57	4,64	12,06	4,29	31,55	18,24
4	226	21,93	2,08	4,64	28,56	10,58	31,55	13,96
5	1109	91,80	1,62	4,64	98,06	8,42	37,54	3,39
6	1194	35,90	2,28	4,64	42,81	3,20	38,08	3,19
7	650	33,25	0,90	4,64	38,78	5,25	33,26	5,12
8	375	19,27	1,06	4,64	24,97	5,42	33,40	8,90
9	2246	35,90	2,54	4,64	43,08	1,71	44,24	1,97



Kuva 11. Reseptien päästöt ja hinta suhteutettuna lujuuteen laskettuna yhdelle kuutiometrille.

5 Yhteenveto tuloksista

Luvussa 4 esitetyt tulokset ovat monitulkintaisia ja niitä tulkittaessa on varottava tekemästä pitkälle meneviä johtopäätöksiä. Joitain kohtia voidaan kuitenkin sanoa varmasti ja joihinkin asioihin on saatu viitteitä.

Sementin korvaaminen jäte- ja sivuvirtoja hyödyntämällä vähentää sekä kustannuksia että kasvihuonekaasupäästöjä maan stabiloinnissa. Kasvihuonekaasujen osalta kyse on laskentatavasta, jossa jäte- ja sivuvirroille ei kohdisteta niiden syntyprosessin päästöjä (ks. kappale 3.3).

Sideaineiden välillä kustannusten vaihtelua on paljon. Masuunikuonan hinta on melko lähellä sementtiä. Yritysten reseptit olivat noin kolmanneksen edellisiä halvempia. Vastaavasti kalkkiuunipöly on kolmanneksen yritysten seoksia halvempaa. Ääripäässä ovat polttolaitosten tuhkat, jotka ovat liki ilmaisia.

Kuljetusten osuus kustannuksista ja päästöistä on pääasiassa maltillisella tasolla, mutta stabilointityöllä sen sijaan voi olla merkittävä osuus sekä työn kokonaiskustannuksista että CO₂e päästöistä.

Lujuusominaisuudet poikkesivat suuresti eri reseptien välillä huolimatta siitä, että esitestien perusteella odotettiin maltillisia eroja. Lujuuden suuri vaihtelu aiheuttaa sen, etteivät lujuuteen suhteutetut arvot ole täysin vertailukelpoisia, koska sideainemäärän ja lujuuden ei voida olettaa olevan suorassa suhteessa. Jotta näin voitaisiin tehdä ja eri suureiden suhteen optimaalisia reseptejä löytää, tulisi stabilointikohteella tehdä paljon kokeita eri resepteillä etsien niitä, joilla riittävä lujuus kuitenkin saavutetaan – onhan lujuus joka tapauksessa kriittinen suure, joka tulee saavuttaa rakentamisen mahdollistamiseksi.

6 Pohdintaa tapaustutkimuksen jäte- ja sivuvirtojen päästölaskennasta

Arvioinnin aikana nousi esiin elinkaarilaskentaa tekeville tuttuja kysymyksiä laskentametodologiasta ja -logiikasta. Laskennan kohteena olevat rajaukset ja jättemateriaalien päästöallokaatio sekä toiminnallinen yksikkö nousivat esiin erityisesti pohdittavina asioina.

Tässä arvioinnissa jäte- ja sivuvirtojen osalta käytettiin yleistä periaatetta, että ne ovat raaka-aineina päästöttömiä ja ne synnyttäneen prosessin päästöt osoitetaan varsinaiselle tuotteelle tai tuotteille, muttei jätteelle tai sivuvirroille. Tämä periaate tuo yksinkertaisuutta ja selkeyttä laskentaan ja seuraa sikäli myös markkina-ajuria, että päästö suunnataan tuotteelle, jota varten päästöt ovat aiheutuneet. Tämä tapa on jossain määrin loogisesti ja metodologisesti kyseenalaistettavissa. Tavallaan se perustuu oletukseen, että jäte- tai sivuvirrat pysyvät jätteinä ja tuottajalleen arvottomina myös tulevaisuudessa. Niistä voi kuitenkin tulla myöhemmin myös rahanarvoista materiaalia. Tällöin päästöjen jyvitysperusteita olisi syytä miettiä uudelleen päästölaskennassa. Tämä koskettaa elinkaari- ja jalanjälkilaskentaa laajasti, ei pelkästään tämän hankkeen kontekstissa.

ISO-14044 standardin mukaan allokaatiota tulisi ylipäätään välttää, mutta se ei ole aina mahdollista tai järkevää tarkastelurajausten vuoksi. Lisäksi yleisö useimmiten tahtoo tietää jonkin tietyn tuotteen päästöt, joten jonkinlainen jyvitys on informatiivisuuden ja markkinoinnin vuoksi liki välttämätöntä. Uusiokäytöstä ja kierrätyksestä kyseisessä standardissa luetellaan ensisijaisuusjärjestykseksi fyysinen (esim. massa), taloudellinen allokaatio ja kolmantena kierrätettyjen materiaalien käyttökertojen määrä.

Esimerkiksi terästeollisuuden masuunikuonasta tehdään jo nyt kaupallisia kuonajauhetuotteita. Kun ne hyödynnetään ja ne saavat myös rahallisen arvon (joko myytävinä tuotteina tai jätemaksujen vähentyessä luovutettaessa ne muille käyttäjille) niille olisi perusteltua jyvittää osa teräksen valmistuksen päästöistä. Teräksestä päästöt olisi mahdollista jakaa kuonan ja teräksen massan osuuksien mukaan. Toisaalta polttoon perustuvassa energiantuotannossa tuhkien jyvittäminen massaperusteisesti ei onnistu, koska energialla ei ole massaa. Siksi taloudellinen jako tuhkan myynti- ja jätemaksuhinta summaten myydyn energian suhteen voisi olla parempi vaihtoehto.

Massa-allokoinnin etuna taloudelliseen jyvittämiseen nähden on se, että massaosuudet säilyvät tuotannossa todennäköisemmin kohtalaisen tasaisina osuuksina ja sen muutokset on helppo todentaa. Taloudellinen arvo saattaa puolestaan vaihdella selvästi enemmän. Tällöin taloudellinen päästöjyvitys vaatisi myös tarkkaa hintatilastointia.

Jos pelkkää jätetestusta pidetään kriteerinä jätteen nollapäästöisyydelle, irvikuvallisessa tilanteessa yritys voisi alkaa tuottaa tarkoituksella enemmän näitä virtoja. Jätevirroista saisi yhtä aikaa tuloja ja niiden nollapäästöisyydellä etua verrattuna markkinoiden vastaaviin tuotekilpailijoihin. On myös huomion arvoista, että yritys joutuu maksamaan jätteensä käsittelystä, kuten jäteveroa 70 € tonnilta. Jätteistä eroon pääseminen ilmaiseksi tai edes vähemmän kustannuksin on myös taloudellisesti hyödyllistä koko yrityksen kulurakennetta tarkasteltaessa. Periaatteessa jäte-erä on kaupattava tuote, jonka lähtöarvo on negatiivinen ja ilmainen suoramyyntiarvo 70 € tonnilta. Myynnillä voidaan siten minimoida kustannuksia ja parhaassa tapauksessa tehdään voittoa. Esimerkiksi energiateollisuuden vuosittaisesta 1,5 miljoonan tonnin tuhkamäärästä suurin osa läjitetään kaatopaikoille jätteinä (Juuma ym. 2020), jolloin tuhkien pelkkä jäteverollinen arvo on noin 105 miljoonaa euroa. Tämän päälle tulevat muut kustannukset, kuten logistiikan ja työvoiman kustannukset.

Jätteiden kierrättämisen, uusiokäytön ja ei-enää-jätettä-asetusten merkitys päästölaskennassa on tärkeää tunnistaa. Vaikka se ei tällä hetkellä tuntuisikaan kovin merkitykselliseltä, kiertotalouden hengen mukaisesti nykyisistä jätteistä pyritään koko ajan tekemään tuotteita.

7 Johtopäätökset

Massastabiloinnissa voidaan hyödyntää joitakin nykyisiä jätevirtoja, esimerkiksi erilaisia tuhkia. Niitä käyttämällä voidaan vähentää paitsi jätteiden loppusijoittamisen tarvetta kaatopaikoille myös keventää maanrakentamisen ja maan stabiloinnin hiilijalanjälkeä. Maan stabiloinnissa erityisesti sementtiä korvattaessa päästövähennykset voivat olla suhteellisesti suuria, sillä sementin ominaispäästöt ovat suuret. Riippumatta siitä, kuinka pieni tai suuri stabilointisideaineinen osuus rakennushankkeen elinkaarisista kokonaispäästöistä loppujen lopuksi onkaan, sen korvaaminen mahdollistaa verrattain helpon päästövähennyskeinon. Samalla voidaan säästää arvokkaampia ja rajallisempia resursseja muihin käyttötärpeisiin sekä hyödyntää sellaisia raaka-aineita, joista tyypillisesti pyritään vain eroon sijoittamalla ne kaatopaikalle. Lisäksi läjittäminen kaatopaikalle merkitsee lisäkustannuksia. Ympäristöhyötyjä on näin saatavilla laajasti sekä arvoketjujen alku- että loppupäästä. Samalla voidaan saavuttaa huomattavaa taloudellista etua.

Seosten sideainemäärien ja sekoitussuhteiden vaihtoehtoja on käytännössä rajattomasti, mutta vaadittavat lujuusominaisuudet saattavat rajoittaa sideainevalintaa. Joissain kohteissa voi olla korkeat lujuusvaatimukset tai erityinen maaperän koostumus, jolloin vaihtoehtojen määrä rajoittuu selvästi. Tämän hankkeen kokeissa jokainen testattu sideaine tai näiden seos saavutti tavoitellun lujuuden ruoppausmassoihin sekoitettuna.

Matalahden kenttäkokeessa tutkittiin eri sideaineiden vaikutusta stabiloidun massan ominaisuuksiin. Kokeissa sekoitettiin siksi sama kilomäärä sideainetta jokaista ruoppausmassakuutiota kohden, mikä tuotti useimmassa tapauksessa tarpeettoman suuria lujuuksia. Todellisessa hankkeessa olisikin viisasta asettaa lujuus kokeiden keskiöön. Tällöin haluttu lujuus pyritään saavuttamaan mahdollisimman vähin kustannuksin ja päästöin, etsimällä reseptejä haarukoimalla tarvittavat sideainemäärät esitesteillä. Sideraaka-aineiden hinnoissa ja päästöissä on merkittäviä eroja, joten optimointia olisi tärkeää tehdä. Jo tämän hankkeen kokemusten perusteella voidaan todeta, että sidoksen lujuus ei välttämättä käytäydy suorassa suhteessa sideainemäärien kanssa eikä esimerkiksi ilmastollisesti ja/tai taloudellisesti optimaalista seosta voida ennustaa varmasti.

Tavoiteasetannan voi asettaa kysyen, halutaanko mahdollisimman halpa, mahdollisimman luja vai ilmastollisesti paras vaihtoehto. Lisäksi voidaan kysyä, millaisia reunaehtoja käytetään ja tarvitaanko mahdollisesti erilaisia pisteytysmenetelmiä? Kun eri mahdollisuudet lujuuden saavuttamiseksi saadaan selvitettyä, on päätettävä, millä painotuksilla valinta tehdään rahan ja päästöjen välillä. On myös mahdollista käyttää muitakin arviointikriteereitä kuin tässä hankkeessa on käytetty.

Jätteitä koskettavaa nollapäästöalokaatioperiaatetta on tarkasteltava kriittisesti, vaikka muun muassa ISO 14044-standardissa niin ohjeistetaan. On perusteltua, että jätejakeille ei jyvitetä päästöjä, jos ilman jätteen hyödyntäjää kyseinen materiaali ohjautuisi kaatopaikalle. Toisaalta jätteen hyödyntämisen tuottaman taloudellisen hyödyn ohjautuessa osaltaan samaisen jätemateriaalin aiheuttajalle, esimerkiksi jätteestä ilmaiseksi eroon pääsemisen ansiosta, on perusteltua kysyä, pitäisikö päästöjen jyvitystä tehdä myös jätejakeisiin. Nehän näyttävät käyttäjälle enemmänkin tuotteina tai arvokkaina raaka-aineina kuin jätteinä. Tämänkaltainen tilanne koskettaa esimerkiksi maan stabilointia tuhkin ja kuona-ainein.

Matalahden tapaustutkimus osoittaa, että stabilointiurakkaan ryhdyttäessä on järkevää etsiä esikokein tarpeeksi vahva, mahdollisimman halpa ja pienimmät ilmastovaikutukset aiheuttava sideaineresepti. Näin voidaan säästää merkittävästi rahassa samalla kun vähennetään ympäristökuormitusta.

Sanasto

CircVol 2	Projektin nimen lyhenne hankkeelle <i>CircVol 2 - Suurivolyymisten sivuvirtojen ja maa-massojen hyödyntäminen kaupungeissa.</i>
CO₂	Hiilidioksidi
CO₂e	Hiilidioksidiekvivalentti. Suure, joka kuvaa eri kasvihuonekaasupäästöjen vaikutuksen voimakkuutta hiilidioksidia vastaavana määränä tietyllä ajanjaksolla.
ENVIMAT	Malli Suomen kansantalouden materiaalivirtojen ympäristövaikutusten arvioimiseksi
EEJ	Ei Enää Jätettä
EoW	End of Waste eli Ei Enää Jätettä
Hiilijalanjälki	Hiilijalanjälki kuvaa toiminnasta aiheutuneiden kasvihuonekaasupäästöjen (hiilidioksidiekvivalenteina eli CO ₂ e) suuruutta eli kuinka paljon kasvihuonekaasuja tuotteen tai toiminnan elinkaaren aikana syntyy.
LIPASTO	Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä
Maan stabilointi	Toimenpide, jossa pehmeää, puristuslujuudeltaan heikkoa maaperää tai maainesta tehdään kantavammaksi ja kovemmaksi sekoittamalla maahan sitä sitovaa sideainetta.
Pascal	Paineen yksikkö, jonka tunnus on Pa. Yhden Pascalin suuruinen paine syntyy, kun yhden Newtonin voima kohdistuu yhden neliömetrin alalle.
Puristuslujuus	Kuvaa kappaleen kykyä vastustaa pystysuuntaista voimaa, kunnes se murtuu. Lujuus ilmoitetaan kilopascaleina.

Lähteet

- Bahadori, H., Hasheminezhad, A. & Taghizadeh, F. 2019. Experimental Study on Marl Soil Stabilization Using Natural Pozzolans. *Journal of Materials in Civil Engineering* 31(2). DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002577.
- Branko, Š. & Lubovič, M. 2016. Carbonation of Cement Paste: Understanding, challenges, and opportunities. *Construction and Building Materials* 117 (2016), pp.285-301. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.138>
- BSI 2011. Publicly available specification PAS 2050:2011. Specific cation for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. ISBN 978 0 580 71382 8
- Concrete Solution 2020. Report Q1/2020, Kirjallisuusreferaatti (kompakti). <https://concretesolution.fi/wp-content/uploads/2020/04/CO2NCRETE-SOLUTION-kirjallisuusraportti-6p-20200206.pdf> [Viitattu 22.5.2022]
- Dodoo, A., Gustavsson, L. & Sathre, R. 2009. Carbon implications of end-of-life management of building materials. *Resources, Conservation and Recycling*. 53 (2009), pp 276-286. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.12.007>
- Betoniteollisuus ry 2015. https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1303_58-65.pdf [Viitattu 22.5.2022]
- Betoniteollisuus ry 2020. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/06/Ymp%C3%A4rist%C3%B6vst%C3%A4v%C3%A4llisen-kivitalon-suunnittelu-ja-toteutus.pdf> [Viitattu 22.5.2022]
- 2013/179/EU. Commission recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013H0179> [Viitattu 6.6.2022]
- Finnsementti 2020. Environmental Data Sheet. Finnsementin vuoden 2019 ympäristöseloste, julkaistu 15.5.2020. https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019_Parainen-Plus.pdf [Viitattu 28.4.2022]
- Finnsementti 2021. Finnsementin ympäristöselosteet. Saatavilla osoitteesta <https://finnsementti.fi/palvelut/ymparisto/sementtien-ymparistoselosteet/> [Viitattu 10.3.2022]
- Forsman, J., Jyrävä, H., Lahtinen, P., Niemelin, T. & Hyvönen, I. 2014. Massastabilointikäsi kirja 2014. Ramboll. https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/images/Massastabilointik%C3%A4sikirja%20YLEISVERSIO%20-%202014_06_24.pdf [Viitattu 22.5.2022]
- Jarva, J., Eriksson, J-E., Larkela, L., ym. 2021. CircVol-projekti Ruoppausmassojen stabiloinnin kenttäkoe Naantalissa Matalahdella. Geologian tutkimuskeskus, tutkimustyöraportteja 19/2021. <https://circvol.fi/wp-content/uploads/2021/06/Ruoppausmassojen-stabiloinnin-kenttakoel-Naantalissa-Matalahdella.pdf> [Viitattu 21.4.2022]
- Juuma, Kauhanen, Kontas, ym. 2020. Tukat kiertotaloudessa. Tutkimusraportti tuhkan tuottajille ja käyttäjille. Lapin ammattikorkeakoulun julkaisuja, Sarja B, tutkimusraportit ja kokoomateokset 27/2020. ISSN 2489-2637.
- Kauppalehti 3.12.2021. Noin 800 sivua ja 400 eri pykälää: Tämä pelätty lakipaketti voi alkaa määrittää, kuinka asumme, elämme ja yritämme. <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/noin-800-sivua-ja-400-eri-pykala-tama-pelatty-lakipaketti-voi-alkaa-maarittaa-kuinka-asumme-elamme-ja-yritamme/0cd09639-fee7-454c-a7f1-fdd4a5a081e5> [Viitattu 8.2.2022]
- Korhonen, M-R., Pitkänen, K. & Niemistö, J. 2018. Selvitys orgaanisen jätteen kaatopaikkakiellon vaikutuksista. Suomen ympäristö 3/2018.
- Kotilainen, H. 2017. Sideaineen ja työtavan vaikutus pilaristabiloinnissa. HAMK opinnäytetyö.
- Liikennevirasto 2018. Liikenneviraston ohjeita 17/2018. Syvästabiloinnin suunnittelu. ISSN 1798-6648. Saatavilla osoitteesta https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-17_syvastabiloinnin_suunnittelu_web.pdf [Viitattu 21.4.2022]
- Lipasto 2019. LIPASTO yksikköpäästötietokanta. <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/index.htm> [Viitattu 10.3.2022]
- Motiva 2022. CO₂-päästökertoimet. Saatavilla osoitteesta https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiansaasto_suomessa/co2-paastokertoimet [Viitattu 10.3.2022]
- Myhre ym. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf [Viitattu 21.4.2022]
- Paatema, M. & Kangas, H. 2003. Syvästabiloinnin pitkäaikaiset seuranta tutkimukset. Helsingin kaupunki, kinteistövirasto, Geotekninen osasto 87/2003. <https://www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu87.pdf> [Viitattu 1.6.2022]

- PEFCR 2018. Product Environmental Footprint Category Rules Guidance 2018. Version 6.3 – May 2018. https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3.pdf [Viitattu 6.6.2022].
- Ruokamo, E., Savolainen, H., Seppälä, J., Sironen, S., Räisänen, M., Auvinen, A-P. & Antikainen, R. 2021. Kiertotalous vähähiilisyiden edistäjänä ja luonnon monimuotoisuuden turvaajana. Ympäristöministeriön julkaisu 6/2021.
- Turun kaupunginhallitus 2018. Turun Satama Oy:n esitys meriläjityksestä luopumisesta. Kaupunginhallitus § 363/2018. Saatavilla osoitteesta <https://ah.turku.fi/kh/2018/1002021x/3778934.htm> [Viitattu 21.4.2022]
- Understanding Cement 2022. <https://www.understanding-cement.com/carbonation.html> [Viitattu 22.5.2022]
- Valtioneuvosto 2021. Uusi suunta – Ehdotus kiertotalouden strategiseksi ohjelmaksi. Valtioneuvoston julkaisu 1/2021.
- van Oss, H.G. & Padovani, A.C. 2003. Cement manufacture and the environment. Part II. Environmental challenges and opportunities. *Journal of Industrial Ecology* 7(1): 93-126.
- Verohallinto 2022. <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/jatevero/> [Viitattu 4.3.2022]
- Wahlstöm M., Laine-Ylijoki J., Kaartinen T. & Merta E. 2015. Energiatuotannon tuhkien, jätteenpolton tuhkan ja betonimurskeen jäteluokitus - menettely kriittisten vaaraominaisuuksien tutkimuksessa. VTT, FINHAZ-projektiraportti. VTT-R-05485-15.
- Wang, S., Wang, W. & Yang, H. 2018. Comparison of Product Carbon Footprint Protocols: Case Study on Medium-Density Fiberboard in China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2018, 15, 2060; doi:10.3390/ijerph15102060
- WRI 2022. Greenhouse gas protocol standards. <https://www.ghgprotocol.org/standards> [Viitattu 6.6.2022].
- Xi ym. 2016. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nature Geoscience* 9: 880-883. DOI: 10.1038/NGEO2840.
- YIT 2022. Stabiloinnilla heikosti kantavat maa-aineet saadaan hyötykäyttöön. <https://www.yit.fi/infrapalvelut/maarakennus/stabilointi> [Viitattu 3.1.2022]
- Yle 2019. Muovin lyhyt elämä. Ylen uutinen 11.11.2019. <https://yle.fi/uutiset/3-11062711> [Viitattu 11.1.2022]
- YM 2017. Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa. <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta> [Viitattu 22.5.2022]

Liite

Liite 1. Uusiomateriaalien valmistus ja käyttö Suomen kansantaloudessa – katsaus ENVIMAT-mallin hyödyntämis-mahdollisuuksiin

Tausta

ENVIMAT-malli on niin sanottu ympäristölaajennettu panos-tuotosmalli (EE-IO, Environmentally Extended Input-Output Model) ja sitä voidaan käyttää Suomen luonnosta otettujen ja Suomeen tuotujen materiaalien käsittelystä aiheutuvien ympäristövaikutuksien analyysissä.

ENVIMAT-mallin lähtökohtana on kansantalouden tilipito käyttö- ja tarjontatauluineen. ENVIMAT-mallin ytimeen kuuluvat Suomen kansantalouden monetaariset panos-tuotostaulukot, jotka perustuvat Tilastokeskuksen yksityiskohtaisiin tarjonta- ja käyttötaulukoihin. Mallin viimeisin päivitys on vuodelta 2015 ja päivitys vuoteen 2019 on käynnissä SYKEssä. ENVIMAT-mallin rakenne sisältää tuote x toimiala -matriisin, jossa on 148 toimialaa ja 229 tuoteryhmää. Toimialaluokitus perustuu TOL 2008 luokitukseen ja tuoteluokitus CPA2008 luokitukseen, jossa tuotteet on luokiteltu päätuottajatoimialan mukaan. Toimialaluokitukseen on tehty joitakin muunnoksia, jotka koskevat esimerkiksi sähkö-, kaasu- ja lämpöhuoltoa.

Tarjonta- ja käyttötauluissa tuotteet ovat riveillä ja toimialat sarakkeilla. Tarjontataulu kuvaa, kuinka paljon rahamääräisesti eri tuotteita kukin toimiala on tuottanut. Tarjontataulussa tuonti on omana sarakkeenaan ja sisältämät tiedot kertovat, kuinka paljon kutakin tuotetta on tuotu rahamääräisesti ulkomailta. Tuontimaita ei ole eritelty, vaan tuonti edustaa koko Suomen ulkopuolista muuta maailmaa yhtenä summattietona. Käyttötaulu kuvaa kunkin toimialan käyttämiä panoksia eli että paljonko toimialat ovat käyttäneet eri tuotteita rahamääräisesti oman tuotannon panoksinaan. Tämä tarkoittaa välituotekäyttöä, joka on ollut välttämätön, että toimialat ovat kyenneet tuottamaan tarjoamansa tuotteet. Lisäksi käyttötaulu sisältää tuotteiden loppukäytön kotitalouksissa ja muut loppukäytön kategoriat: voittoa tavoittelemattomien yhteisöjen ja julkisyhteisöjen kulutusmenot, kiinteän pääoman bruttomuodostus, varastojen muutokset sekä vienti tuotteittain. Kuten tuonti, myös vienti on yhtenä ”muu maailma” summattietona tuotteittain. Tuonnin käyttö -taulu kuvaa tuotteiden käytön eri toimialoilla ja sen rakenne vastaa käyttötaulun rakennetta. Tuonnin käyttö on siis osa käyttöä ja käyttötaulu sisältää sekä kotimaassa tuotettujen että muualta maailmasta tuotujen tuotteiden käytön.

ENVIMAT-malli perustuu matriisilaskentaan, jonka elementit kuvataan tässä lyhyesti. Toimialojen välituotekäyttö kuvataan panoskerroinmatriisissa A, jonka sarakkeilla näkyy, kuinka paljon kukin toimiala on käyttänyt eri välituotteita yhden euron tuotosyksikön valmistusta kohti. Panoskerroinmatriisi A perustuu kotimaisten tuotteiden panos-tuotostauluun. Ns. Leontiefin käänteismatriisi (I-A)-1 on ENVIMAT-mallin keskeinen osa tuotteiden elinkaaristen kokonaisvaikutusten laskennassa. Käänteismatriisin kukin sarake kertoo, kuinka paljon vastaavan toimialan tuotosyksikön valmistamiseen on kulunut välittömästi ja välillisesti kotimaisten toimialojen tuottamia tuotteita.

Tuonnin panoskerroinmatriisi M muodostetaan vastaavalla tavalla kuin panoskerroinmatriisi A, ja matriisi M(I-A)-1 ilmaisee, kuinka paljon eri tuontituotteita on käytetty välittömästi tai välillisesti kunkin kotimaisen toimialan tuotosyksikköön. Tuonnin panoskerroinmatriisi M, jonka muoto on tuontituote x toimiala, muodostetaan toimialojen välituotekäyttöön menevistä tuontituotteista.

Materiaalivirrat ENVIMAT-mallissa

ENVIMAT-mallin materiaalivirtatiedot noudattavat materiaalivirtatilinpidoissa käytettyjä käsitteitä ja mittaustapoja. Talouden aiheuttamat materiaalivirrat koostuvat kotimaan luonnosta otetuista materiaalmääristä ja tuontituotteiden valmistuksessa ulkomailla käytetyistä materiaalmääristä. Materiaalivirrat jaetaan tilinpidoissa kahteen ryhmään: käytetty otto ja käyttämätön otto. Käytetty otto

pitää sisällään ne luonnonvarat, jotka on paitsi otettu niin myös tosiasiallisesti käytetty taloudessa. Käyttämätön otto puolestaan tarkoittaa luonnonvaroja, joita otetaan, mutta joita ei käytetä. Esimerkiksi kaivannaisten otossa syntyy maa- ja kiviaineksia, joita ei käytetä jalostuksen raaka-aineena. Käytetyn oton ja käyttämättömän oton summa muodostaa talouden luonnonvarojen kokonaiskäytön (TMR, Total Material Requirement).

Suorat materiaalipanokset ovat talouden käyttöön otettuja fyysismittaisia materiaalinmääriä. Niitä ovat kotimaan luonnosta saatavat maatalouden kasvituotteet, kalastuksessa ja metsästyksessä pyydytetyt luonnonkalat ja riista, puu, nostettu turve, metallimalmit, muiden mineraalien hyötykivi, sora ja murske sekä rakentamisen muu maa-aines. Piilovirtoja ovat luonnonaineet, joita siirretään ja muunnetaan suorien panosten käyttöönoton yhteydessä, mutta joita ei oteta talouden käyttöön. Sellaisia ovat metsätalouden käyttämättä jäävät hakkuutähteet, mineraalien kaivun yhteydessä muodostuva hyödyntämättä jäävä maa-aines ja sivukivi, rakennustoiminnan yhteydessä syntyvät kaivetut ja käyttämättä jäävät maa-ainekset sekä pelloilta kulkeutuva erodoitunut maa-aines.

On syytä huomata, että tämä materiaalivirta-aineisto sisältää ainoastaan ensiomateriaalit eikä uusiomateriaaleja. Toisin sanoen nykymuotoinen ENVIMAT-malli ei sisällä uusiomateriaalien fyysismittaisia materiaalinmääriä.

Tuonnin suorat materiaalipanokset pitävät sisällään ulkomailta tulevien tavaroiden sisältämät materiaalit ja suomalaisten ulkomailla kuluttamat tavarat. Tuontituotteiden piilovirrat sisältävät kaikki ne luonnonaineet, jotka on käytetty tuontituotteiden valmistukseen ulkomailla, mutta jotka eivät ole osa varsinaisen tuontituotteen massaa. Tuonti- ja vientituotteiden ainemääriin on lisätty kaikkien niiden luonnosta otettavien raaka-aineiden massat, joita tuotteiden valmistusketjuissa on tarvittu. Malli sisältää siten ns. raaka-aine-ekvivalentit ainevirrat.

Energiankulutus ENVIMAT-mallissa

Materiaalivirtojen lisäksi ENVIMAT-malli sisältää tiedot kotimaisesta energiankulutuksesta toimialoittain ja kotitalouksissa. Niiden suoraan kuluttama energia on kuvattu 62 polttoaine- ja muun energialajin (etenkin ostosähkö, -lämpö ja -höyry) luokituksella, joka noudattaa Tilastokeskuksen polttoaineluokitusta. Kullekin polttoaineelle ja energialajille on määritelty päästökerroin eli että kuinka paljon hiilidioksidiekvivalentteja tietyn polttoaine- tai energiamäärän käytöstä aiheutuu.

Useilla toimialoilla on omaa sähkön, kaukolämmön ja höyryn tuotantoa. Niiden tuottamiseen käytetyt polttoaineet sisältyvät toimialan polttoaineiden kulutukseen. Lisäksi ne ostavat sähköä, lämpöä ja höyryä päätoimiselta sähkön ja lämmön tuotannolta. Näiden toimialakohtaisten tietojen avulla ENVIMAT-mallilla tuotetaan tuotekohtaisia päästökertoimia, jotka kuvaavat päästettyjen hiilidioksidiekvivalenttikilojen määriä suhteessa tuotteen rahamääräiseen arvoon (kg CO₂-eq/€). Toisin sanoen, kun tuotetta X on valmistettu yhden euron arvosta, kuinka paljon suorista ja välillisiä kasvihuonekaasupäästöjä tai vaikkapa veden käyttöä siitä on aiheutunut.

Seppälän ym. (2009) mukaan Suomen luonnonvarojen kokonaiskäyttö, TMR, oli 562 miljoonaa tonnia (Mt) vuonna 2002 ja 586 Mt vuonna 2005. Tuonnin osuus luonnonvarojen kokonaiskäytöstä oli yli puolet. Suomen luonnosta otetut suorat panokset olivat 192 Mt vuonna 2002 ja 207 Mt vuonna 2005. Piilovirtoineen kotimaisten luonnonvarojen käyttö oli 258 Mt vuonna 2002 ja 274 Mt vuonna 2005. Vuonna 2015 Suomen luonnonvarojen kokonaiskäyttö oli 637 miljoonaa tonnia (Savolainen ja Nissinen 2015). Suomen luonnosta otetut suorat materiaalipanokset olivat 170 Mt ja piilovirrat 73 Mt ja käyttämättömän oton sisältävä tuonnin luonnonvarojen kokonaiskäyttö oli 394 Mt eli 62 % kokonaiskäytöstä.

Suurin yksittäinen materiaalityyppi oli sora ja murske, jonka osuus kotimaan suorista panoksista oli noin puolet ja kotimaisten luonnonvarojen kokonaiskäytöstä runsaan kolmanneksen sekä 2005 että 2015. Puun osuus kotimaan suorista panoksista oli 20 - 25 % vuosina 2005 ja 2015 samoin kuin puun osuus piilovirtoineen kotimaan luonnonvarojen kokonaiskäytöstä.

Uusiomateriaalien tarkastelumahdollisuuksista ENVIMATissa

ENVIMAT-malli ei ole toistaiseksi sisältänyt erillisiä jätteiden tarjonta- ja käyttötauluja, joissa kuvattaisiin yksityiskohtaisesti toimialakohtainen jätteiden synty ja hyödyntäminen. Sen sijaan malli sisältää toimialan materiaalien kierrätys (383) ja seuraavat tuotenimikkeet: paperi, kartonki- ja pahvijäte; metalliromu; kuona ja hehkuhile ja muut raudan tai teräksen valmistuksessa syntyvät jätteet; metallipitoiset tuhkat; muut jätteet; sahanpuru, polttohake ja muu puujäte; sekä elintarviketeollisuudessa (toimialat 101-11) syntyviä jätteitä tai sivutuotteita, joita hyödynnetään esimerkiksi rehujen valmistuksessa: raa'at eläimenosat, syötäväksi kelpaamattomat; lihasta valmistetut ihmisravinnoksi kelpaamattomat hienot tai karkeat jauhot ja pelletit sekä eläinrasvan sulatusjätteet; kalasta, äyriäisistä, nilviäisistä tai muista vedessä elävistä selkärangattomista tai merileivistä valmistetut hienot tai karkeat jauhot ja rakeet, ihmisravinnoksi soveltumattomat; rankki ja muut panimo- ja polttimejätteet. Mallin lähtökohdana siis on, että jätemateriaalit ”ilmestyvät” systeemiin vasta materiaalien kierrättäjien tarjoamina tuotteina, joita sitten hyödyntävät esimerkiksi metallien jalostajat ja paperi- ja kartonkituotteiden valmistajat. Lisäksi joitakin jätetuotteita tuodaan. Huomionarvoista on lisäksi se, että tällä tavoin rakennettu malli huomioi ainoastaan ne jätevirrat, joilla on positiivinen rahamääräinen arvo. Siten malli jättäisi huomiotta esimerkiksi jätteenä hyödynnettävän betonimurskeen, josta sen käyttäjä ei tyypillisesti maksa murskeen valmistajalle, siinäkin tilanteessa, että malli sisältäisi betonijätteestä valmistetun murskeen erillisenä tuotteena.

Tällaisenaan ENVIMAT-mallin lähtöaineisto on siis riittämätön tarkasteluihin, joiden tarkoituksena olisi tuottaa tietoa esimerkiksi jätteiden synnystä toimialoittain ja kotitalouksissa, jätteiden hyödyntämisen volyymeistä eri uusiomateriaalien valmistuksessa, valmistettujen uusiomateriaalien materiaalikohtaisista volyymeistä sekä valmistuksesta aiheutuvista päästöistä ja luonnonvarojen käytöstä.

Uusiomateriaalit ja niiden valmistuksen ympäristövaikutukset kansantalouden tasolla

CircVol 2-hankkeen eräänä tehtävänä oli arvioida, millaisia lähtötietoja tarvittaisiin ja miten olisi menetelmällisesti mahdollista arvioida uusiomateriaalien laajemman käytön vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin kansantalouden tasolla. Tarkastelun lähtökohdaksi oli määritelty ENVIMAT-mallin soveltaminen ja sen kehitystarpeet.

Optimaalisessa tilanteessa ENVIMAT sisältäisi kattavat jätteaineistot eli jätteen syntyä vastaavan tarjontataulun ja jätteen keräystä ja prosessointia vastaavan käyttötaulun ja edelleen prosessoitujen jätteiden tarjonta- ja käyttötaulut. Tätä kautta jätteaineistot olisivat mahdollisesti kytkettävissä rahamääräisiin tarjonta- ja käyttötauluihin. Lisäksi tuotenimikkeisiin sisältyisivät oleelliset uusiomateriaalit. Lisäksi toimialaluokituksessa eriteltäisiin uusiomateriaaleja valmistavat toimialat, jolloin päästöjen laskenta olisi mahdollista valmistettua tuotetonna kohti. Tämä mahdollistaisi vertailun ensiö- ja uusiomateriaalien välillä. Malli on ytimeltään talouden malli ja esimerkiksi välituotekäyttö perustuu rahamääräisiin summiin. Ensiö- ja uusiomateriaalien hinnoittelu on usein toisistaan poikkeavaa. Esimerkiksi uusiomuoviraaka-aineet ovat pääsääntöisesti ensiömuoviraaka-aineita halvempia (Valve ym. 2022). Monien jätteiden, kuten tuhkien tai betonimurskeiden, rahamääräinen arvo on nolla tai hyvin alhainen ja näiden materiaalien prosessointi ja hyödyntäminen perustuvat tyypillisesti käsittelijöiden perimiin ns. porttimaksuihin. Jätteenkierrätyksen päätymismenettelyn kautta näiden materiaalien tuotteistaminen mahdollistuu ja on mahdollista, että joillekin tuotestatuksen saaneille materiaaleille, kuten betonimurskeille, muodostuu tulevaisuudessa rahamääräinen arvo markkinoilla. Tällöin ne tulevat myös näkyviin Tilastokeskuksen koostamissa rahamääräisissä tarjonta- ja käyttötauluissa.

Taulukossa L1 on esitelty luonnos uusiomateriaalituotteista ja niitä jalostavista toimialoista. Taulukon L1 tarkoituksena on myös kuvata erilaisten uusiomateriaalien erilaisia arvoketjuja. Osaa materiaaleista käytetään uusien tuotteiden raaka-aineena (taulukon yläosan materiaalit) ja osaa taas

prosessoinnin jälkeen sellaisenaan (taulukon alaosan materiaalit). Joitakin materiaaleja käytetään molemmilla tavoin.

Esimerkiksi sementin valmistuksessa käytetään lukuisia jätemateriaaleja ensiomateriaalien, kuten kalkkikiven, lisäksi. Samoin uusiolannoitteiden raaka-aineet ovat usein peräisin suoraan jätteen tuottajilta ilman välivaiheen keräys- tai prosessointivaiheita. Metall- ja muovijätteiden arvooverkot puolestaan ovat monivaiheisempia. Esimerkiksi autopurkamot käsittelevät vastaanottamansa käytöstä poistetut ajoneuvot ja toimittavat erottamansa metallijätteen edelleen perusmetalliteollisuuden toimijoille, jotka hyödyntävät jätteet prosessinsa raaka-aineena. Muovijätteiden mekaaninen kierrätys koostuu useista eri vaiheista (Fjäder ym. 2022) ja arvooverkossa on useita eri toimijoita: esimerkiksi kuluttajilta erilliskerättyjen muovipakkausten keräämisestä vastaava toimija; muovijätteiden kierrätyksestä ja uusiomuoviraaka-aineiden valmistuksesta vastaava toimija; ja uusiomuoviraaka-ainetta muovituotteiden valmistuksessa käyttävä toimija.

Toimialat ovat osin tätä tarkoitusta varten tarkennettuja. Esimerkiksi materiaalien kierrätyksen toimiala on sekä voimassa olevan toimialaluokituksen (TOL2008) mukainen että nykyisessä ENVIMAT-mallissa käytössä oleva. Toimiala kuitenkin sisältää kaikki materiaalit, jolloin uusiomateriaalikohtaisten tarkasteluiden tekeminen ei ole mahdollista. Käytännössä toiminta on kuitenkin melko eriytynyttä – yksittäisillä toimipaikoilla käsitellään tai valmistetaan yleensä vain tiettyä materiaalivirtaa ja myös jätteiden erilliskeräysjärjestelmät toimivat pääsääntöisesti siten, että erilaiset materiaalit pyritään pitämään erillään. Niinpä taulukkoon L1 on eritelty 7 materiaalin kierrätyksen alatoimialaa havainnollistamaan sekä laskennallisia tarpeita että mahdollisuuksia tehdä materiaalikohtaista mallinnusta ENVIMAT-mallin avulla.

Fyysisten materiaalivirtojen lisäksi tarvitaan tietoja uusiomateriaalien valmistuksen eli jätteiden prosessoinnin aiheuttamasta luonnonvarojen, kuten veden ja polttoaineiden, käytöstä sekä siitä aiheutuviesta erilaisista päästöistä. Kun oleelliset uusiomateriaalit on tunnistettu ja määritelty, kootaan toimipaikka- ja yritys kohtaista tietoa yllä mainittujen tietojen lisäksi tietoja käytettyjen raaka-aineiden ja valmistettujen uusiomateriaalien määristä. Taulukko L2 havainnollistaa vaadittavien toimipaikka- tai yritys kohtaisten tietojen sisältöjä.

Näiden tietojen saatavuutta arvioitiin CircVol 2-hankkeessa ja osoittautui, että tietoja olisi varsin kattavasti saatavissa erilaisille uusiomateriaaleille tietolähteistä, joita Salminen ym. (2018) ja Weckström ym. (2020) ja Hurskainen ym. (2021) ovat käyttäneet vesi-, jätevesi- ja uusiomateriaalitilinpidon tarjonta- ja käyttötaulukojen koostamiseen. Keskeisiä tietolähteitä ovat ympäristöluvut ja niiden valvontajärjestelmä (YLVA) sekä yritysten omat raportit ja erilaiset selvitykset sekä toiminnanharjoittajien luottamuksellisesti antamat tiedot. Nämä numeeriset aineistot voidaan laskea yhteen toimialoittain ja materiaalikohtaisesti, jolloin niiden pohjalta voidaan laskea materiaalikohtaisia tunnuslukuja, kuten energian tai veden käyttö ja kasvihuonekaasupäästöt per valmistettu tuotetonni. Tässä kuvattu aineisto muodostaisi otoksen, joka ei kata kaikkea uusiomateriaalien valmistusta Suomessa. Otoksen perusteella voitaisiin kuitenkin laskea uusiomateriaalien valmistuksen päästöt ja luonnonvarojen käyttö (valittujen muuttujien osalta) hyödyntämällä Hurskaisen ym. (2021) julkaisemia lukuja eri uusiomateriaalien valmistusmääristä Suomessa.

Edellä ehdotettiin ENVIMAT-malliin rakennetta, jossa muodostettaisiin uusia alatoimialoja uusiomateriaalien valmistukseen siten, että mallinnusta olisi mahdollista tehdä uusiomateriaalikohtaisesti. Tämän ratkaisun eräänä lisähyötynä olisi, että siinä voitaisiin huomioida sekä uusio- että ensiomateriaalien käyttö tietyn toimialan välituotekäytössä. Esimerkiksi muovituotteiden valmistuksessa on tyypillistä, että uusiomuoviraaka-aine muodostaa osan muovituotteen valmistukseen käytetystä muoviraaka-aineesta. Kiertotalouteen liittyvien tarkasteluiden näkökulmasta olisikin välttämätöntä voida tarkastella uusio- ja ensiomateriaalien käyttöä ja käyttöosuuksia mallinnuksen keinoin. Tällä on merkitystä esimerkiksi taloudellisten ohjauskeinojen kohdentamisen tai vaikutusten arvioinnissa.

Yksi huomioon otettava seikka on, että uusiomateriaaleja valmistavien toiminnanharjoittajien lukumäärä on varsin pieni Suomessa etenkin, kun tarkoituksena on tarkastella valmistuksen ympäristövaikutuksia materiaalikohtaisesti. Toinen oleellinen seikka on kuljetusten tarkastelu. ENVIMAT-malli sisältää tie-, rautatie- ja lentoliikenteen palvelut yhtenä tuotteenaan ja tiedot siitä, miten paljon eri toimialat käyttävät näitä palveluita rahamääräisesti omassa toiminnassaan. Näiden tietojen ja niiden suhteellisen merkityksen yksityiskohtaisempi tarkastelu on tarpeen, mikäli halutaan verrata esimerkiksi laitosmaisesti ja purkukiinteistöllä valmistetun betonimurskeen päästöjä. Näiden yksityiskohtaisten tarkasteluiden tekemisessä erilaiset kohdennetut elinkaariarviointipohjaiset laskennat voivat olla tarkoituksenmukaisempi vaihtoehto.

Taulukko L1. Esimerkkejä ensiöjätteistä ja niistä valmistetuista uusiomateriaaleista sekä toimialoista. Kullekin ensiöjäte-uusiomateriaali -parille on tunnistettu joko ensiöjätettä tuottava tai käsittelevä ja niitä uusiomateriaalien valmistuksessa käyttäviä toimialoja.

Ensiöjäte	Ensiöjätettä tuottava toimiala	Uusiomateriaali	Uusiomateriaalia valmistava toimiala
Lanta, ravinnepitoiset lietteet yms., tuhkat	014 Kotieläintalous 171 Massan, paperin, kartongin ja pahvin valmistus 35 Sähkö-, kaasu- ja lämpöhuolto 37 Jätevesien käsittely	Kierrätyslannoitteet	2015 Lannoitteiden valmistus
Metalliteollisuuden kuonat, kipsi, tuhkat yms.	171 Massan, paperin, kartongin ja pahvin valmistus 241 Raudan, teräksen ja rautaseosten valmistus 244 Värimetallien valmistus 35 Sähkö-, kaasu- ja lämpöhuolto	Sementti	2351 Sementin valmistus
Käytetyt renkaat ja muu kumijäte	381a Käytettyjen autonrenkaiden keräys 221 Kumituotteiden valmistus	Uusiokumileike, -rouhe, -granulaatti tms.	383b Kumijätteiden kierrätys
Rakentamisessa ja purkamissa syntyvät mineraaliset jätteet	2361 Betonituotteiden valmistus rakennustarkoituksiin 2363 Valmisbetonin valmistus 4311 Rakennusten ja rakennelmien purku	Betonimurske tai tiilimurske maa-, viher- ja talonrakentamiseen	383d Mineraalisten rakennusjätteiden kierrätys
Paperijätteet	381b Paperijätteiden keräys 4677a Paperijätteiden tukkukauppa	Uusiopaperi ml. pehmopaperituotteet	1712 Paperin, kartongin ja pahvin valmistus 1722 Paperisten hygieniä- ja taloustarvikkeiden valmistus
Pahvi- ja kartonkijätteet	381c Pahvi- ja kartonkijätteiden keräys 4677b Pahvi- ja kartonkijätteiden tukkukauppa	Uusiokartonki	1712 Paperin, kartongin ja pahvin valmistus
Öljy- ja voiteluainejätteet	381g Muiden jätteiden keräys	Uusioöljytuotteet, kuten uusiovoiteluaineet	192 Jalostettujen uusioöljytuotteiden valmistus
Muovijätteet	381d Muovijätteiden keräys	Uusiomuoviraaka-aine	383a Muovijätteiden mekaaninen kierrätys 222 Muovituotteiden valmistus
Lasijätteet	383e Lasijätteiden kierrätys	Vahtolasi, lasivilla	239 Mineraalisten rakennustuotteiden valmistus
Rakentamisessa ja purkamissa syntyvät mineraaliset jätteet	381f Muiden jätteiden keräys 383d Mineraalisten rakennusjätteiden kierrätys	Uusiobetonituotteet, uusiokipsituotteet	2361 Betonituotteiden valmistus rakennustarkoituksiin 2362 Kipsituotteiden valmistus rakennustarkoituksiin 2363 Valmisbetonin valmistus
Metallijätteet	381f Metallijätteiden keräys 4677c Metallijätteiden tukkukauppa	Rauta, teräs ja rautaseokset Värimetallit	241 Raudan teräksen ja rautaseosten valmistus 2441 Jalometallien valmistus 2442 Alumiinin valmistus 2443 Lyijyn, sinkin ja tinan valmistus 2444 Kuparin valmistus 245 Metallien valu

Taulukko L2. Esimerkki yritys- ja toimipaikkakohtaisista tiedoista, joita on saatavissa eri uusiomateriaaleille niiden ympäristövaikutusten laskemiseksi.

Toimipaikka/yritys	Toimiala	Raaka-aine	Tuote	Sähkö	Lämpö	Höyry	Polttoaineen käyttö				Vesi	Jätevesi		
							kevyt PÖ	raskas PÖ	maakaasu	puuhake		P	N	
		tn	tn	MWh	MWh	MWh	tn	tn	m ³	tn	m ³	m ³	kg	kg
Betonimurske Oy	383d	Purkujäte	Betonimurske											
			Tiilimurske											
		Valmisbetoni-jäte	Betonimurske											
Valmisbetoni Oy	2363	Valmisbetoni-jäte	Betonimurske											
Uusiomuovi Oy	383a	Kotitalouksien erilliskerätty muovijäte	Uusiomuovi-raaka-aine											
		Kaupan erilliskerätty muovijäte	Uusiomuovi-raaka-aine											

Liitteen lähteet

- Fjäder, P., Korkalainen, M., Kauppi, S., Lehtiniemi, M., Salminen J., Selonen, S., Setälä, O., Sillanpää, M., Sorvari, J., Suikkanen, S., Talvitie, J. Turunen, T., Virkkunen, H., Ala-Ketola, U. 2022. Muovien haitalliset ympäristö- ja terveysvaikutukset. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 17/2022. ISSN 1796-1726 (verkkoj.)
- Hurskainen, P., Salminen, J., Balázs, A., Johansson, A., Kangas A., Karppinen, T., Laturi, J., Mäyrä, J., Pohjola, J., Savolainen, H., Tuominen, S., Vihervaara, P., Virkkunen, H. 2021. Novel methods for the accounting of forest ecosystems and circular materials (2019-FI-ENVECO). Methodological report / January 2021. European Statistics Action Grant (Environmental accounts and Ecosystem accounting)
- Nissinen A., Savolainen H. 2019. Julkisten hankintojen ja kotitalouksien kulutuksen hiilijalanjälki ja luonnonvarojen käyttö – ENVIMAT-mallinnuksen tuloksia. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 15/2019. ISSN 1796-1726 (verkkoj.).
- Salminen, J., Veiste, P., Koskiaho, J, Tikkanen, S. 2018. Improving data quality, applicability and transparency of national water accounts – A case study for Finland. *Water Resources and Economics* 24: 25-39.
<https://doi.org/10.1016/j.wre.2018.05.001>
- Seppälä, J., Mäenpää, I., Koskela, S., Mattila, T., Nissinen, A., Katajajuuri, J–M, Härmä, T., Korhonen, M-R, Saarinen, M., Virtanen, Y. 2009. Suomen kansantalouden materiaalivirtojen ympäristövaikutusten arviointi ENVIMAT-mallilla. *Suomen ympäristö 20/2009*, Suomen ympäristökeskus. ISSN 1796-1637. 2016.
- Valve, H., Rinne, P., Salminen J., Kautto, P. 2022. Muovijätteestä tuotteeksi: toimijoiden visiot uusiomuovimarkkinoiden kehittämisestä. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 2/2022. ISSN 1796-1726 <http://hdl.handle.net/10138/339305>
- Weckström M, Örmä V, Salminen J. (2020) An order of magnitude: How a detailed, real-data-based return flow analysis identified large discrepancies in modeled water consumption volumes for Finland. *Ecological Indicators* 119: 105835.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105835>

Ruoppausmassan stabilointi uusiosideaineilla
Hiilijalanjalan, lujuuden ja kustannusten tarkastelu Matalahden kenttäkokeessa

Suomen ympäristökeskus



ISBN 978-952-11-5504-8 (PDF)

ISSN 1796-1726 (verkköj.)