

RAAHEN SATAMAN  
VÄHÄHIILISEN INFRARAKENTAMISEN  
KEHITTÄMINEN

Krekilä Netta

Opinnäytetyö

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus  
Insinööri (AMK)

2025

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
Insinööri

---

<b>Tekijä</b>	Netta Krekilä	<b>Vuosi</b>	2025
<b>Ohjaaja(t)</b>	Ari Romakkaniemi		
<b>Toimeksiantaja</b>	Raahen Satama Oy		
<b>Työn nimi</b>	Raahen Sataman vähähiilisen infrarakentamisen kehittäminen		
<b>Sivu- ja liitesivumäärä</b>	34		

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, kuinka uusiomateriaalit soveltuvat satamainfran päällysrakenteisiin. Tavoitteena oli tutkia, täyttävätkö uusiomateriaalit satamarakenteilta vaadittavat tekniset ominaisuudet ja voidaanko niiden avulla saavuttaa pienemmät kustannukset ja hiilidioksidipäästöt verrattuna perinteiseen kalliomurskeeseen.

Tietoperusta sisälsi vähähiilisen infrarakentamisen perusteet, uusiomateriaalien tekniset ominaisuudet, elinkaaritarkastelun sekä hiilijalanjäljen arvioinnin menetelmät. Työssä hyödynnettiin Raahen sataman pohjatutkimusaineistoa ja infra-alan asiantuntijatietoja. Laskennassa käytettiin Odemarkin menetelmää kantavuuden arviointiin sekä CO<sub>2</sub>data-pohjaista lhku-laskentapalvelua päästö- ja kustannustietojen määrittämiseen.

Tulosten perusteella kaikki tarkastellut uusiomateriaalit (LD-masuunihiekka, masuunikuonamurske ja betonimurske) täyttivät kantavuusvaatimukset. LD-masuunihiekka osoittautui teknisesti suorituskykyisimmäksi, masuunikuonamurske hyväksi kompromissiksi ja betonimurske kustannustehokkaaksi vaihtoehdoksi. Työ osoittaa, että uusiomateriaalien käyttö mahdollistaa vähähiilisen satamarakentamisen ilman teknisiä kompromisseja. Tuloksia voidaan hyödyntää sataman tulevissa suunnittelu- ja kilpailutusratkaisuissa.

Avainsanat

Infrarakentaminen, kierrätysmateriaalit, kantavuus, hiilijalanjälki

Study Programme in Civil  
Engineering  
Bachelor of Science

---

<b>Author</b>	Netta Krekilä	<b>Vuosi</b>	2025
<b>Supervisor</b>	Ari Romakkaniemi		
<b>Commissioned by</b>	Port Of Raahe		
<b>Subject of thesis</b>	Development of Low-Carbon Infrastructure Construction at the Port of Raahe		
<b>Number of pages</b>	34		

---

The purpose of this thesis study was to examine the suitability of various recycled materials for use in port infrastructure structures. The aim was to investigate whether these materials meet the technical requirements of port structures and whether they can offer lower construction costs and carbon dioxide emissions compared to traditional crushed rock.

The theoretical background included the principles of low-carbon infrastructure construction, the technical properties of recycled materials, life cycle assessment, and carbon footprint evaluation methods. The study utilized geotechnical data from the Port of Raahe and expert knowledge from the infrastructure sector. Structural capacity was assessed using the Odemark method, and emissions and cost data were calculated using the CO2data-based Ihku calculation service.

The results showed that all evaluated recycled materials (LD slag sand, blast furnace slag aggregate, and recycled concrete) met the structural capacity requirements. LD slag sand provided the highest technical performance, blast furnace slag aggregate proved to be a good compromise between capacity, emissions, and costs, and recycled concrete was found to be the most cost-effective option. The study demonstrates that low-carbon port construction is feasible without technical compromises. The findings can be utilized in the planning and procurement decisions of future port infrastructure projects.

**Keywords**                      Infrastructure building, recycled materials,  
bearing capacity, carbon footprint

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	5
2 RAAHEN SATAMA OY .....	6
2.1 Kestävä kehitys .....	7
3 INFRARAKENTAMISEN HIILIJALANJÄLKI .....	8
3.1 Julkiset hankinnat .....	9
4 UUSIOMATERIAALIT .....	11
4.1 Masuunikuonatuotteet, masuunihiekka ja teräskuona .....	12
4.2 LD-masuunihiekka (LD-MaHk) .....	13
4.3 Masuunimurske (MaKuM).....	15
4.4 Betonimurske (BeM).....	15
4.5 Tekninen yhteenveto materiaaleista .....	20
5 SATAMAN GEOTEKNISET OMINAISUUDET.....	21
6 LASKENTAMENETELMÄ.....	24
6.1 Kantavuuslaskenta .....	24
6.2 Päästö- ja kustannuslaskenta.....	24
7 TULOKSET.....	27
7.1 Kantavuustarkastelu .....	28
7.2 Kustannusvaikutukset.....	28
7.3 Hiilijalanjälki .....	29
8 POHDINTA.....	30
LÄHTEET.....	33

## 1 JOHDANTO

Onko infrarakentamisen neitseellisille luonnonvaroilta olemassa vähähiilisempiä vaihtoehtoja ja täyttävätkö ne kauppamerenkulun satamassa vaadittavat geotekniset ominaisuudet? Satama-alueiden kantavuusvaatimukset ovat poikkeuksellisen korkeat, mikä korostaa rakenteiden pitkäaikaista ja luotettavaa elinkaarta. Alueiden infran huolellisella suunnittelulla on keskeinen merkitys sataman toiminnallisuuden, turvallisuuden ja logistisen suorituskyvyn varmistamisessa, niin nyt kuin tulevaisuudessakin.

Enenevässä määrin myös vähähiilinen infrarakentaminen korostuu, jolloin hankkeiden hiilijalanjälki on integroitava osaksi suunnitteluprosessia, kokonaisvaltaisesti taloudelliset, tekniset ja ympäristölliset vaikutukset huomioiden. Uusiomateriaaleilla on potentiaalia edistää kustannustehokkaasti infrahankkeiden vähähiilistä toteutusta ja tukea kiertotalouden periaatteiden hyödyntämistä säästämällä neitseellisiä luonnonvaroja.

Infrarakentamisen hiilijalanjäljen osalta haasteisiin haetaan ratkaisua vertailemalla kolmea vaihtoehtoista uusiomateriaalirakennetta perinteiseen kalliomurskeeseen päällysrakenteen materiaaliratkaisuina. Mitoitetut rakenteet on toteutettu vastaamaan Raahen Lapaluodon sataman osassa vaadittavia teknisiä ominaisuuksia. Työstä on rajattu pois putki- ja johtoverkostot, kuivatus sekä muut suunnittelussa mahdollisesti huomioon otettavat seikat. Vertailu rajoittuu pelkästään valittuihin uusiomateriaaleihin ominaisuuksiensa ja laskennoista saatuihin tuloksiin. Uusiomateriaalien valinta perustuu niiden teknisiin ominaisuuksiin ja saatavuuteen lähialueilta, sillä pitkät kuljetusmatkat kumoaisivat materiaaleista saadut ympäristöhyödyt. Työn tuloksena Raahen Satama Oy:lle avautuu uusia mahdollisuuksia hiilijalanjäljen tiedostamiseen, hallintaan ja vastuullisen rakentamisen edistämiseen tulevaisuudessa.

## 2 RAAHEN SATAMA OY

Raahen Satama on tavaraliikennemääriltään yksi Suomen suurimmista satamista. Satama koostuu kolmesta satamanosasta: SSAB:n terästehtaan satamasta ja Raahen Satama Oy:n hallinnoimista Lapaluodon- ja syväsataman osista vesialueineen. Ympäri vuotinen noin 600 aluksen vuosittainen liikenne käsittää sahatavaraa, kontteja, terästä, raaka-aineita, irtolasteja sekä projektikuljetuksia. Satamaan johtaa 10 metrin kulkusyvyydellä oleva väylä ja satama-alue jakautuu useisiin laitureihin, joilla on erilaisia käyttötarkoituksia sekä syväyksiä. (Raahen Satama 2025.)

- Syväsatamassa on 2 laituria sekä RoRo- ramppi, kulkusyvyys on 10 metriä.
- SSAB:n satamassa on 6 laituria, kulkusyvyys on 7,8–8 metriä.
- Lapaluodossa on 3 laituria, kulkusyvyys on 8 metriä. Lisäksi hinaaja- sekä odotuslaituri. (Raahen Satama 2025.)

Lapaluodon sataman infrastruktuuri käsittää tällä hetkellä yli 30 000 m<sup>2</sup> katettua varastotilaa sekä yli 30 hehtaaria kenttäalueita. Rakentamatonta aluetta Lapaluodossa on jäljellä noin 7 hehtaaria, josta lähes puolet on täysin luonnontilassa. Tulevaisuuden saneerauskohteita on noin 8 hehtaarin kenttäalueen hulevesiverkosto sekä mahdollisesti LL1 laituri. Suurimmat tulevaisuuden rakennushankkeet painottuvat tällä hetkellä Raahen sataman syväsatamaan ja sen kehittämiseen. Rakenteilla oleva SL3 laituri on tarkoitus valmistua vuonna 2026. Raskasnostolaituri mahdollistaa merituulivoimakomponenttien operoinnin tulevaisuudessa. Raahen Satama Oy on saanut myös ympäristöluvan syväsataman viereisen läjitysalueen rakentamiselle, kääntöympyrän laajentamiselle, sekä LL1-laiturin jatkeelle. LL1-laiturin jatketta lukuun ottamatta hankkeet on suunniteltu toteuttaa ennen vuotta 2030.

## 2.1 Kestävä kehitys

Satama-alueen infran rakentaminen sekä kunnossapito vaativat merkittäviä resursseja ja erikoisosaamista, minkä vuoksi suunnittelu on strategisessa asemassa, jotta satama pystyy vastaamaan myös tulevaisuuden logistisiin vaatimuksiin kestävällä ja ympäristötietoisella tavalla. Vaikka satamayhtiö ei ole toistaiseksi määrittänyt toiminnalleen virallisia ja tiukkoja päästövähennystavoitteita, missiona on olla edesauttamassa Suomen hiilineutraaliustavoitteita vuodelle 2035.

Huomattavimmat viime vuosien puhtaan siirtymän ratkaisut ovat olleet mm. ensimmäinen aurinkosähköjärjestelmä, sataman hallinnoiman infran siirtyminen kokonaan led-valaistukseen sekä Lapaluodon satamanosan talvikunnossapidon toteutuminen uusiutuvilla poltto- ja voiteluaineilla. Merkittävimmät päästö- sekä kustannussäästöt ovat kuitenkin saavutettavissa infrastruktuurin kunnossapidon ennakkoinnilla. Lisäksi Raahen satama on toiminut logistisena solmukohtana yli puolelle Suomen maatuulivoimalan komponenteille, joka osaltaan vahvistaa yhtiön suuntaa kohti puhdasta siirtymää.

Kiertotaloutta satamassa on edistetty jo kauan ennen vuosituhannen vaihtumista hyödyntämällä uusiomateriaaleja infrarakentamisessa. Rakennushankkeita suunnitellaan laajasti vertailemalla vaihtoehtoisia ratkaisuja sekä kartoittamalla tietoja rakentamisen pohjatiedoista ja tulevaisuuden tarpeista. Hankkeiden aikana tai yllättävän saneerauksen sattuessa kaivuutöissä on pyritty kartoittamaan kohde ja sen ympäristö niin, että auki kaivuuta voidaan tulevaisuudessa välttää mahdollisimman pitkään esimerkiksi lisäämällä kaivantoihin ylimääräisiä suoja-putkia. Satamainfran kunnossapitoa ja suunnittelua tukee myös 3D-pohjainen Gisgro-järjestelmä, joka toimii sataman digitaalisena kaksosena. Järjestelmä tarjoaa laajat mahdollisuudet infran hallinnan ja suunnittelun elinkaariajatteluun sekä resurssien optimointiin.

### 3 INFRARAKENTAMISEN HIILIJALANJÄLKI

Suomi on asettanut tavoitteekseen olla hiilineutraali viimeistään vuonna 2035 ja hiilinegatiivinen vuonna 2040, joiden saavuttaminen vaatii merkittäviä toimenpiteitä ja askelia myös infrarakentamisessa. Infrarakentamisen hiilijalanjälki syntyy rakennusmateriaaleista, kuljetuksista, ja työmaatoiminnoista. Toistaiseksi infrarakentamiselle ei ole vielä asetettu lakisääteisiä velvoitteita hiilijalanjäljen arvioimiseksi, mutta esimerkiksi 1.1.2025 voimaan tullut uusi rakentamislaki 2023/751 edellyttää vähähiiliseen rakentamiseen, joka ottaa myös osaltaan kantaa infrarakentamiseen. (Väylävirasto 2023, 7–17.)

”Rakentamisen on hillittävä ilmastonmuutosta perustamalla elinkaariominaisuuksiltaan kestäviin ja taloudellisiin, energiatehokkaisiin, sosiaalisesti ja ekologisesti toimiviin sekä kiertotaloutta edistäviin ratkaisuihin”. (Rakentamislaki 2023/751 2:5.3 §).

Rakennuspaikasta ja rakennuksesta tulee antaa hiilijalan ja hiilikädenjäljen arviointi koko näiden elinkaaren ajalle. Arvio käsittää rakennusmateriaalien valmistuksen, kuljetuksen, työmaan toiminnot, rakennuksen käyttämisen aikana tapahtuvat rakennusmateriaalien vaihdot, rakennuksen käyttämän energian, purkutyöt kuljetuksineen käsittelystä loppusijoitukseen sekä mahdollisesti syntyneet ilmastohyödyt. Ilmastaselvityksen lisäksi rakentamislaki 2023/751 velvoittaa myös, että rakennus- ja purkulupaprosessien sekä purkamisilmoituksen yhteydessä tulee antaa rakennusjäte- tai purkumateriaaliselvitys, jossa arvioidaan hankkeiden aikana syntyvien purku- tai jätemateriaalien määrät. Hankkeiden valmistuttua arviointiselvitys tulee päivittää vastaamaan toteutuneita tietoja rakentamislain 2023/751 edellyttämällä tavalla. Jos kuitenkin hankkeen purkumateriaalin määrä on vähäinen selvitystä ei tarvitse antaa. Kuitenkin sellaisessa hankkeessa, jossa syntyy pois kuljetettavia maa- tai kiviaineksia, tulee antaa selvitys massatiedoista. Arviointitietojen tulee perustua rakentamislain 2023/751 mukaan yleisesti hyväksytyyn yhtenäisen menetelmän perusteella määritettyihin tai kansallisen päästötietokannan tietoihin. (Rakentamislaki 2023/751.)

Ympäristöministeriön toimeksiannosta on saatavilla Suomen ympäristökeskuksen vuonna 2021 kehittämä ja ylläpitämä kansallinen CO2data-päästötietokanta (jatkossa C02data), josta on saatavilla päästötietoa talon- sekä infrarakentamiseen. Tietokannan tarkoituksena on koota yhteen paikkaan luotettavaa ja puolueetonta tietoa, joka mahdollistaa niin infrarakentamisen kuin rakennusten elinkaaren aikaisten ilmastovaikutusten suunnittelua ja laskentaa, sekä edistää siten vähähiilistä rakentamista. Päästötietokannan hyödyntämistä ja tarkempia tietoja infrarakentamisen osalta tarkastellaan luvussa 6. (Väylävirasto 2023, 7–17.)

### 3.1 Julkiset hankinnat

Raahen Satama Oy, Raahen kaupungin omistama satamayhtiö, kuuluu erityisalojen hankintalain soveltamisalaan ja sen on noudatettava sekä julkisia että erityisalojen hankintoja koskevia lakeja. Hankintalaki (2016/1397) eli Laki julkisista hankinnoista ja käyttöoikeussopimuksista on laki, jota sovelletaan julkisyhteisöjen tekemiin tavara-, palvelu- ja rakennusurakkahankintoihin sekä käyttöoikeussopimuksiin. Erityisalojen hankintalaki (2016/1398) eli Laki vesi- ja energiahuollon, liikenteen ja postipalvelujen alalla toimivien yksiköiden hankinnoista on puolestaan laki toimialoille, jotka harjoittavat laissa erikseen määriteltyjä erityisaloja, johon myös Raahen Satama Oy kuuluu satamanpitäjänä. Tämä tarkoittaa, että satamayhtiön hankinnat, jotka liittyvät sataman rakennuksiin, laitteisiin, palveluihin tai muuhun infrastruktuuriin, ovat erityisalojen hankintalain piirissä. Molempien lakien periaatteena on julkisten varojen tehokas käyttö läpinäkyvästi, avoimuus sekä tarjoajien tasapuolinen kohtelu. Erityisalojen hankintalaki (2016/1398) on osaltaan joustavampi ja lain keskeisenä erona on huomattavasti korkeammat EU-kynnysarvot. Hankintayksikön tulee kilpailuttaa hankintansa EU:n laajuisesti, mikäli seuraavat kynnysarvot ylittyvät. (Laki 2016/1397; Laki 2016/1398; Julkisten hankintojen neuvontayksikkö 2023.)

- tavara- ja palveluhankinnat sekä suunnittelukilpailu 414 000 euroa
- Erityisalojen hankintalain liitteen C mukaiset sosiaali- ja terveyspalveluhankinnat ja muut erityiset palveluhankinnat 1 000 000 euroa
- rakennusurakat 5 186 000 euroa
- käyttöoikeussopimukset 5 186 000 euroa (Laki 2016/1398)

Suomen kulutusperäisestä hiilijalanjäljestä julkisten hankintojen osuus kattaa noin viidenneksen. Rakentaminen, rakennetun ympäristön ylläpito ja energiankäyttö aiheuttavat lähes puolet tästä hiilijalanjäljestä. Erityisesti maa- ja vesirakentaminen kuluttaa runsaasti neitseellisiä luonnonvaroja. Julkisella sektorilla on velvollisuus toimia suunnannäyttäjänä kestävien ratkaisujen käyttöönotossa. Julkiset hankinnat ovatkin merkittävä keino edistää Suomen hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamista. Hankintalait mahdollistavat ympäristönäkökohtien käyttämisen tarjouskilpailuissa, mutta eivät toistaiseksi velvoita siihen. Tarjouspyyntöjen laatimisessa voi käyttää apuna KEINO-kriteeripankkia, mistä löytyy hiilineutraalius- ja ympäristötavoitteiden sisällyttämiseen käytettäviä kriteereitä ja niille asetettavia vertailuperusteita. (Julkisten hankintojen neuvontayksikkö 2023; Ympäristöhallinnon verkkopalvelu 2024.)

#### 4 UUSIOMATERIAALIT

Uusiomaanrakentamisen UUMA-foorumi linjaa, että Suomessa käytetään rakentamiseen vuosittain yli 100 miljoonaa tonnia kiviaineksia, josta neitseellisten kiviainesten osuus on jopa 70–80 prosenttia. Neitseellisten luonnonvarojen säästäminen tuleville sukupolville edellyttääkin infrarakentamisessa panostamaan uusiomateriaalien käyttöön, jota on saatavilla teollisuuden sivutuotteista, purku- sekä kierrätystoiminnasta ja ylijäämänä syntyvistä maa-aineksista. Uusiomateriaalien käyttö ei ole uusi ilmiö. Kierrätysmateriaalien käyttämisestä infrarakentamisessa löytyy Tielaitoksen ja Tiehallinnon ohjeita jo 1900-luvulta lähtien. Käyttökohteita uusiomateriaaleille on esimerkiksi teollisuusalueiden rakenteet, pengerrykset, meluvallit ja tierakenteet. Materiaalien käyttöä ohjaa useat erilaiset asetukset ja lainsäädännöt, jotka tulee rakennushankkeeseen ryhtyvän sekä suunnittelijan ottaa huomioon ennen työn aloittamista. Uusiomateriaalien käytöllä pyritään korvaamaan neitseellisiä kiviaineksia samalla edistäen kiertotaloutta. (Uma 2024; Väylävirasto 2022a, 8–22.)

Päästölaskentaa varten uusiomateriaalien päästötiedot tulee selvittää. Materiaaleille pohjautuvat päästökertoimet jakautuvat syntytapansa mukaan seuraavasti:

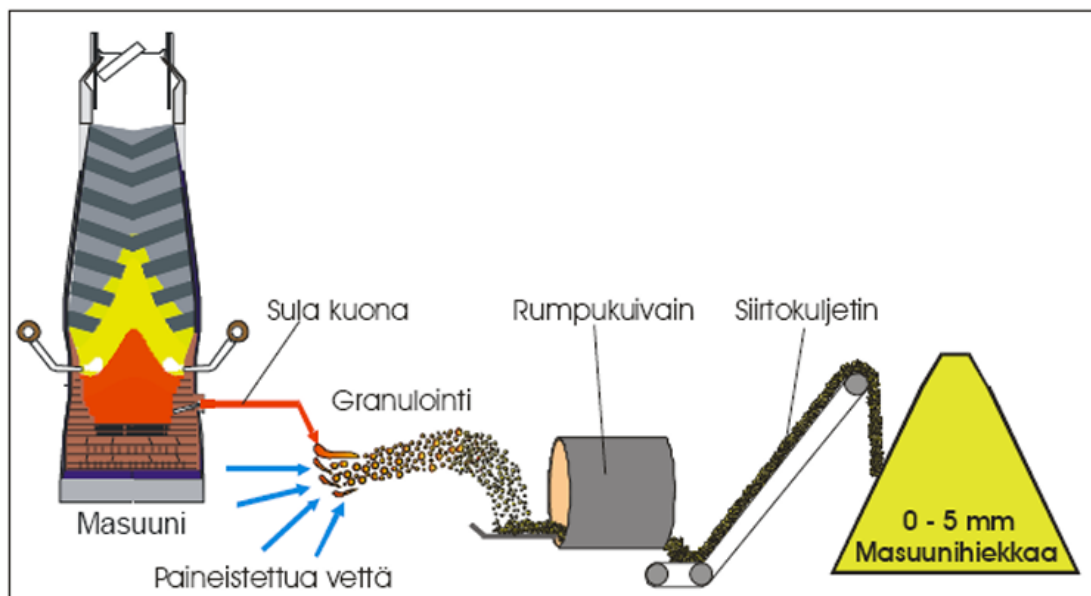
- Materiaalien soveltuessa käytettäväksi sellaisenaan.
- Materiaalien käsittelystä syntyneet päästöt.
- Materiaalien syntyessä sivutuotteena, päätuotteen valmistuksen päästöt.

Uusiomateriaalien käytöllä infrarakentamisessa on mahdollista saada aikaan merkittäviä päästövähennyksiä neitseellisiin materiaaleihin verrattuna. (Väylävirasto 2023, 20.)

#### 4.1 Masuunikuonat tuotteet, masuunihiekka ja teräskuona

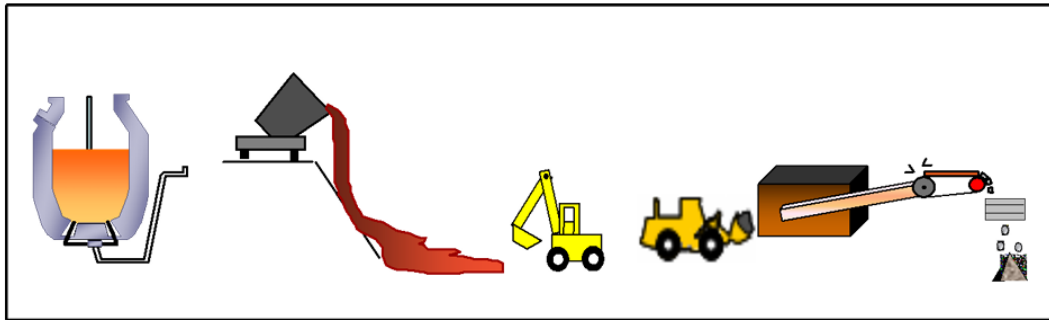
Raahessa sijaitseva SSAB Europe Oy:n terästehdas on yksi Suomen suurimmista teollisuuslaitoksista, jonka päätuotteita ovat kuumavalssatut levyt sekä ke-latuotteet. Teräksen- ja raudanvalmistuksen sivutuotteena syntyy erilaisia kuonia, joita jalostamalla on saatu laadukkaita uusiomateriaalituotteita maanrakentamisen tarpeisiin. Kuonatuote rakenteilla on hyvät kantavuus- ja lämmöneristyskyky ominaisuudet. Tuotteita on tutkittu laboratorioissa, niillä on tehty koerakenteita ja tuotteiden ympäristö- sekä maanrakennusominaisuudet on varmistettu käytännön kohteissa lukemattomia kertoja. Kuonatuotteita voi käyttää muun muassa si-deaineina betonille sekä stabilointeihin ja laajasti erilaisissa infrarakentamisen kohteissa korvaamassa neitseellisiä luonnonvaroja. (SSAB Europe Oy, Merox 2016, 3.)

Masuunihiekka (MaHk) valmistuu kuvion 1. mukaisesti granuloimalla eli vesijähdyttämällä sulaa masuunikuonaa. Raekooltaan se on 0–5 mm huokoinen hydra-toituvaa materiaali ja se sopii maarakentamiseen sellaisenaan. (SSAB Europe Oy, Merox 2016, 4.)



Kuvio 1. Masuunihiekan suoragranulointiprosessi (SSAB Europe Oy, Merox 2016, 4)

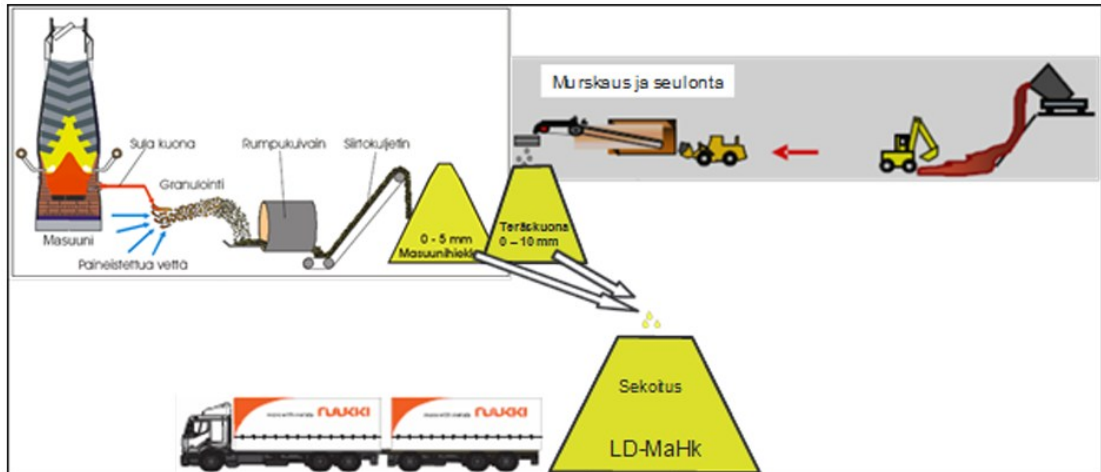
Teräskuona (LD) valmistuu kuvion 2 mukaisesti kun raakaraudan hiilipitoisuutta lasketaan konvertterissa puhaltamalla happea sulaan rautaan, jonka jälkeen se kuljetetaan siirtosenkoilla ilmajähdytyspaikalle odottamaan murskaamista. Teräskuonassa oleva vapaan kalsiumoksidin (CaO) ja magnesiumoksidin (MgO) hydratoitumisreaktio aiheuttaa paisumista, jonka vuoksi teräskuonan annetaan vanhentua kasoissa mahdollisimman pitkään ennen jatkokäyttöä. (SSAB Europe Oy, Merox 2016, 5–7.)



Kuvio 2. Teräskuonan valmistusprosessi Raahen tehtaalla (SSAB Europe Oy, Merox 2016, 5)

#### 4.2 LD-masuunihiekka (LD-MaHk)

Raahen SSAB Europe Oy:n tehdas tuottaa vuosittain masuunihiekkaa (MaHk) 420 000–440 000 tonnia ja teräskuonaa (LD) noin 140 000–150 000 tonnia. Masuunihiekkaa (MaHk) ja teräskuonaa (LD) prosessoimalla kuvion 3. mukaisesti syntyy LD-masuunihiekkaa (LD-MaHk), jota on saatavilla seossuhteissa 10/90, 30/70 ja 50/50. (SSAB Europe Oy, Merox 2016, 3–5.)



Kuvio 3. Masuunihiekan ja teräskuonan sekoitusprosessi Raahen tehtaalla (SSAB Europe Oy, Merox 2016, 4)

Tuote on ominaisuuksiltaan luonnonkiviaineksia vastaava tuote, joka mahdollistaa neitseellisten kiviainesten korvaamisen rakenteissa. Hyvien lämmöneristys- ja kantavuusominaisuuksien, sekä pienen kapillaarisuuden ansiosta LD-masuunihiekalla rakennettavan rakenteen kerrospaksuutta voi pienentää, jolloin leikattavien massojen määrä vähenee. (SSAB Europe Oy, Merox 2016, 3–21.)

LD-masuunihiekan sitoutuminen tapahtuu hydratoitumisreaktion johdosta hitaasti, jolloin rakennekerrosten rakentamisen jälkeen ei ole mahdollista saavuttaa heti vaatimustenmukaisia kantavuuksia. 2–10 kuukauden sitoutumisajan jälkeen luonnon murskeeseen verrattuna LD-masuunihiekkarakenteen kerrosmoduuliarvo on kasvanut 2–5 kertaiseksi. LD-masuunihiekan hydratoitumisreaktio tapahtuu rakeiden pinnalla, jolloin rakeen pinnan rikkoutuessa hydratoituminen käynnistyy uudelleen ja rakenne korjaa itsensä mahdollisuuksien mukaan. Sitoutunut LD-masuunihiekka kovettuu niin, että irrottamiseen vaaditaan jopa hydraulista iskuvasaraa. Talvirakentamisen aikana on kiinnitettävä erityisesti huomiota, LD-masuunihiekka ei saa olla jäinen eikä siihen saa sekoittaa lunta tai jäätä. Mikäli pohjamaa on päässyt jäätymään, rakenne tulee tehdä vasta roudan sulamisen jälkeen. (Tiehallinto 2007, 38-40; SSAB Europe Oy, Merox 2016, 35.)

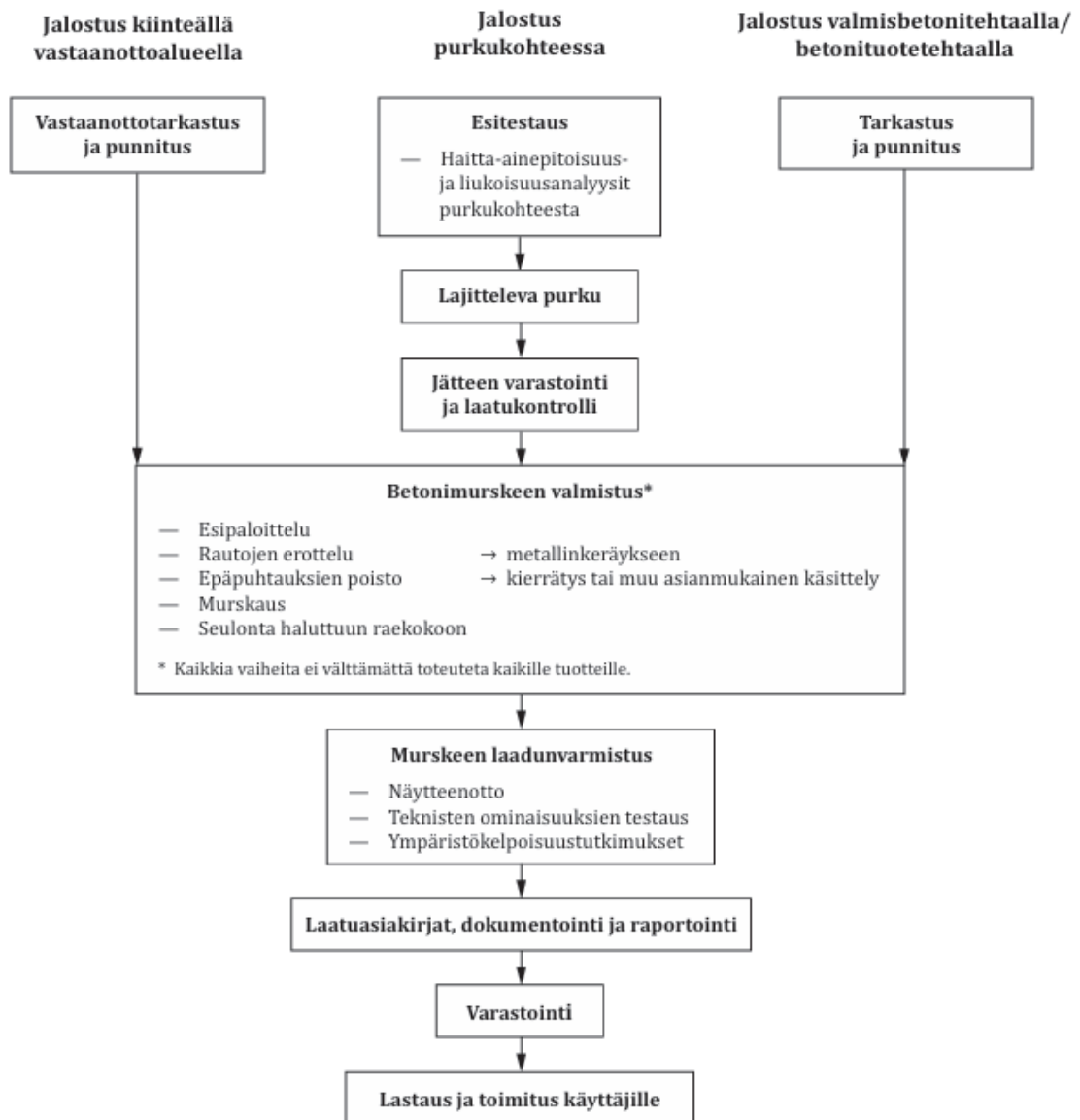
### 4.3 Masuunikuonamurske (MaKuM)

Masuunikuonamurske (MaKuM) valmistuu ilmajähdyttämällä, jossa sula masuunikuona kuljetetaan siirtosenkoilla kuonapenkkaan jäähtymään. Ilmajähdytetyt kuonakappaleet murskataan ja seulotaan valittuun raekokoon. LD-masuunihiekan tapaan masuunikuonamurskeen ominaisuudet ovat samanlaisia. Luonnonkiviaineksia vastaavalla tuotteella on hyvät lämmöneristys- ja kantavuusominaisuudet. Materiaalin sitoutuminen hydraulisesti on hidasta ja kestää jopa vuosia, jonka takia rakentamisen päätyttyä ei ole saavutettavissa vaatimusten mukaista kantavuutta heti. Sitoutunut masuunikuonamurske kivetty masuunihiekan tapaan kovaksi, jolloin auki kaivaminen on vaikeaa. kerrospaksuuden ollessa yhden metrin on rakenteesta mahdollista saada lähes routimaton. (Tielaitos 1998.)

CE-merkittyä masuunimursketta ei tällä hetkellä tehdä SSAB:n Raahen tehtaalla. SSAB:n tehtaalta Ruotsin Luulajasta tuodaan kuitenkin Raahen CE-merkittyä masuunimursketta 0- 125 mm maa- ja tierakentamiseen vuosittain noin 30 000 tonnia. Masuunimursketta on kuitenkin mahdollista saada laivatoimituksena Raahen, kun toimitukseen on varattu riittävästi aikaa. (SSAB Europe Oy, Recycling 2025.)

### 4.4 Betonimurske (BeM)

Suomen rakennus- ja purkutyömailla sekä betoniteollisuudessa muodostuu betonijätettä vuosittain jopa 2,5 miljoonaa tonnia. Materiaali syntyy pulveroimalla ja murskaamalla esimerkiksi rakennuksista, silloista, betonielementeistä tai maanvaraisista laatoista. Betonimurskeen valmistusprosessia voi tarkastella kuviosta 4. Betonimurske luokitellaan jätteeksi sen tullessa purku- tai rakennustyömaalta tai betoniteollisuudessa syntyneistä betonijätteistä. (Väylävirasto 2022b, 6–9.)



Kuvio 4. Betonimurskeen valmistusprosessi (SFS 5884:2022)

Betonimurske soveltuu maanrakentamiseen korvaamaan neitseellisiä maa-aineksia, mikäli se täyttää MARA-asetuksen (Valtioneuvoston asetuksessa eräiden jätteiden hyödyntämisestä maanrakentamisessa 2017/843) tai ympäristöluvan määräysten mukaiset haitta-aineiden ja epäpuhtauksien laadunvalvontanäytteet. MARA-asetuksessa ympäristökelpoisuudelle on koottu betonimurskeen käytön edellytykset. MARA-asetuksen vaatimusten täytyessä toiminnalle ei tarvitse hakea ympäristölupaa. Betonimurskeen käyttökohteen haltijalta edellytetään kuitenkin MARA-asetuksen mukaista rekisteröinti-ilmoitusta ELY-keskukselle niin rakenteeseen hyödyntämisen kuin välivarastointiin. Välivarastointi on mahdollista

aloittaa kuukautta ennen betonimurskeen hyödyntämistä tai vuotta aikaisemmin, jos materiaalin varastointi tapahtuu suojattuna. Suojaus ei kuitenkaan aina ole välttämätöntä, mikäli betonimurske ei huuhtoudu merkittävästi hulevesien mukana tai pölyäminen on vähäistä. Rekisteröinti-ilmoituksesta tulee löytyä kuvion 5. mukaiset tiedot. Ilmoituksen Rakentamisen päätyttyä tulee antaa selvitys betonimurskeen hyödyntämisen toteutumisesta. (Väylävirasto 2022b, 6–9.)

- 1) hyödyntämispaikan ja väliaikaiseen varastointiin tarkoitettujen paikan haltijan nimi ja yhteystiedot sekä laskutusosoite;
- 2) tiedot hyödyntämispaikan sijainnista koordinaatteineen merkittynä asemapiirrokseseen tai karttaan, johon rakenne on rajattu, sekä sen läheisyydessä sijaitsevista pohjavesialueista ja niiden luokista sekä vedenottoaikoista ja vesistöistä;
- 3) tiedot hyödyntämispaikan käyttötarkoituksesta ja maarakentamista koskevasta 2 §:n 1 momentissa tarkoitettusta suunnitelmasta, luvasta tai ilmoituksesta taikka kunnan rakennusjärjestyksestä;
- 4) jätteen luovuttajan nimi ja yhteystiedot;
- 5) jätteen nimike ja selvitys jätteen sisältämien haitallisten aineiden liukoisuuksista, pitoisuuksista ja muista ominaisuuksista liitteen 2 mukaisesti sekä näiden tietojen tuottamiseen liittyvä laadunhallintaraportti;
- 6) tiedot jätteen luovuttajan liitteen 3 mukaisesta laadunvarmistusjärjestelmästä;
- 7) selvitys jätteen määrästä;
- 8) selvitys jätettä sisältävästä rakenteesta periaatepoikkileikkauksineen, jätteen teknisestä kelpoisuudesta kohteessa, peittämiseen tai päällystämiseen käytettävästä materiaalista, varastoinnista ja muusta toiminnasta hyödyntämispaikalla sekä näihin liittyvistä tarpeellisista ympäristönsuojelutoimista;
- 9) ajankohta, jolloin hyödyntäminen maarakentamisen aikana alkaa ja päättyy.

Kuvio 5. MARA-ilmoituksen sisältö. (Valtioneuvoston asetus 2017/843)

Mikäli betonimurskeen hyödyntämisessä ei voi soveltaa MARA-asetusta esimerkiksi sijainnin ollessa 1- tai 2- luokan pohjavesialueilla, tulee hakea ympäristölupa. Jos hyödynnettävä määrä ylittää 50 000 tonnia vuodessa luvan käsittelee aluehallintovirasto ja alittavalta määrältä kunnan ympäristösuojeluviranomainen. (Väylävirasto 2022b.)

Betonimurskeella tulee olla aina CE-merkintä, mikäli se vaihtaa omistajaa ja käyttö tapahtuu muualla kuin hankkeesta sadussa kohteessa. CE-merkintää ei ole mahdollista saada yli 90 mm murskeelle. Betonimurskeet on jaoteltu ryhmittäin. Ryhmittelyssä a-kirjain viittaa EEJ-asetukseen, jolloin jätestatus on päättynyt ja materiaalia voi käyttää asetuksen mukaiset velvoitteet huomioituna. (Väylävirasto 2022b, 6–13.)

- BeM I (a/b), betoniteollisuus käyttämätön betonijäte
- BeM II (a ja b), betoniteollisuus, rakennus- tai purkutyömaa
- BeM III, betoniteollisuus, rakennus- tai purkutyömaa
- BeM IV, betoniteollisuus, rakennus- tai purkutyömaa

Betonimurskerakenteen suunnittelu ei poikkea neitseellisten materiaalien suunnittelusta. Rakentaminen puolestaan vastaa luonnonmateriaaleja, mikäli betonimurskeen hienoaines pääsee liettymään työskentely aiheuttaa sotkua. Pölyämistä taas on syytä hillitä kastelemalla kuivaan aikaan. Lujittumisen takia betonimurskeen auki kaivaminen on raskaampaa, mutta ei kuitenkaan vaadi erikoiskalustoa. Taulukosta 1 voi tarkastella yhteenvetoa betonimurskeen menettelytarpeista. (Väylävirasto 2022b.)

	<b>MARA-asetus (Ilmoitusmenettely)</b>	<b>EEJ-asetus (Ei enää jätettä)</b>	<b>Ympäristölupa (Lupamenettely)</b>
<b>Materiaali</b>	Betonimurske täyttää MARA:n ympäristöraja-arvot	CE-merkitty betonimurske	Kaikenlainen lupaehtojen mukainen betonimurske
<b>Käyttökohde</b>	Väylä- ja kenttärakenteet, teollisuus- ja varastorakenteiden pohjat	Vapaa käyttö maarakentamisessa (satamat, kentät, rakennuspohjat jne.)	Kaikki kohteet mahdollisia (esim. vedenalaiset täytöt)
<b>Enimmäis-kerrosvahvuus</b>	Max. 1,5 m jätemateriaali kerroksien yhteisvahvuus	Ei rajoituksia	Ei rajoituksia (lupaehtoja voi asettaa viranomainen)
<b>Vähimmäis-kerrosvahvuus</b>	Ei asetettu	Ei asetettu	Ei asetettu (lupaehtoja voi asettaa viranomainen)
<b>Peittämisvaatimus</b>	Asfaltti TAI $\geq 10$ cm puhdasta maa-/kiviainesta	Ei pakollinen	Lupaehtojen mukainen
<b>Pohjavesialue käyttö</b>	Kielletty	Mahdollista (ympäristövaatimukset)	Harkinnan varaista
<b>Pohjaveden etäisyys</b>	Vähintään 1 m väli betonimurskekerroksen alimasta korkeudesta pohjaveden enimmäiskorkeuteen	Ei asetettu (ympäristövaatimukset)	Lupaehtojen mukainen (yleensä vähintään 1–2 m)
<b>Etäisyysvaatimus</b>	Min. 30 m etäisyys vesistö tai kaivo (pl. merivesialue)	Ei asetettu	Lupaehtojen mukainen
<b>CE-merkintä</b>	Kyllä (materiaali kaupallista / ei omaa)	Kyllä	Ei (laatu osoitettava hyväksyttäväksi)
<b>Laatuvaatimus (ympäristö)</b>	Raja-arvot MARA-asetuksen mukaisesti	Tiukempi kuin MARA	Lupaehtojen mukainen
<b>Laadunvalvonta</b>	Testattava ja analysoitava ympäristökelpoisuus ennen käyttöä	Jatkuva laadunvalvonta (testit + sertifiointi)	Lupaehtojen mukainen
<b>Materiaalin käyttömäärät</b>	Ei rajoitusta	Rajaton käyttö	Yli 50 000 t/vuosi, Aluehallintovirasto. Alle 50 000 t/vuosi kunnan ympäristöviranomaisen
<b>Ilmoitus- / lupatarve</b>	MARA-ilmoitus ELY-keskukselle	Ei ilmoitusta	Ympäristölupa haettava
<b>Työnaikainen käsittely</b>	Voi aiheuttaa ärsytystä hengitysteissä ja limakalvoilla (pölynsidonta)	Normaali kivipöly (pölynsidonta)	Voi aiheuttaa ärsytystä hengitysteissä ja limakalvoilla (pölynsidonta)
<b>Emäksisyys / korrosio</b>	Voi vaikuttaa metallirakenteisiin. Ei suositella kosketuksessa polyesteri materiaaleja (suodatinkangas, geotekstiili, geolujite)	Voi vaikuttaa metallirakenteisiin	Lupaehtojen mukainen, voi vaikuttaa metallirakenteisiin

Taulukko 1. Yhteenveto betonimurskeen menettelytarpeista (Valtioneuvoston asetus 2017/843)

## 4.5 Tekninen yhteenveto materiaaleista

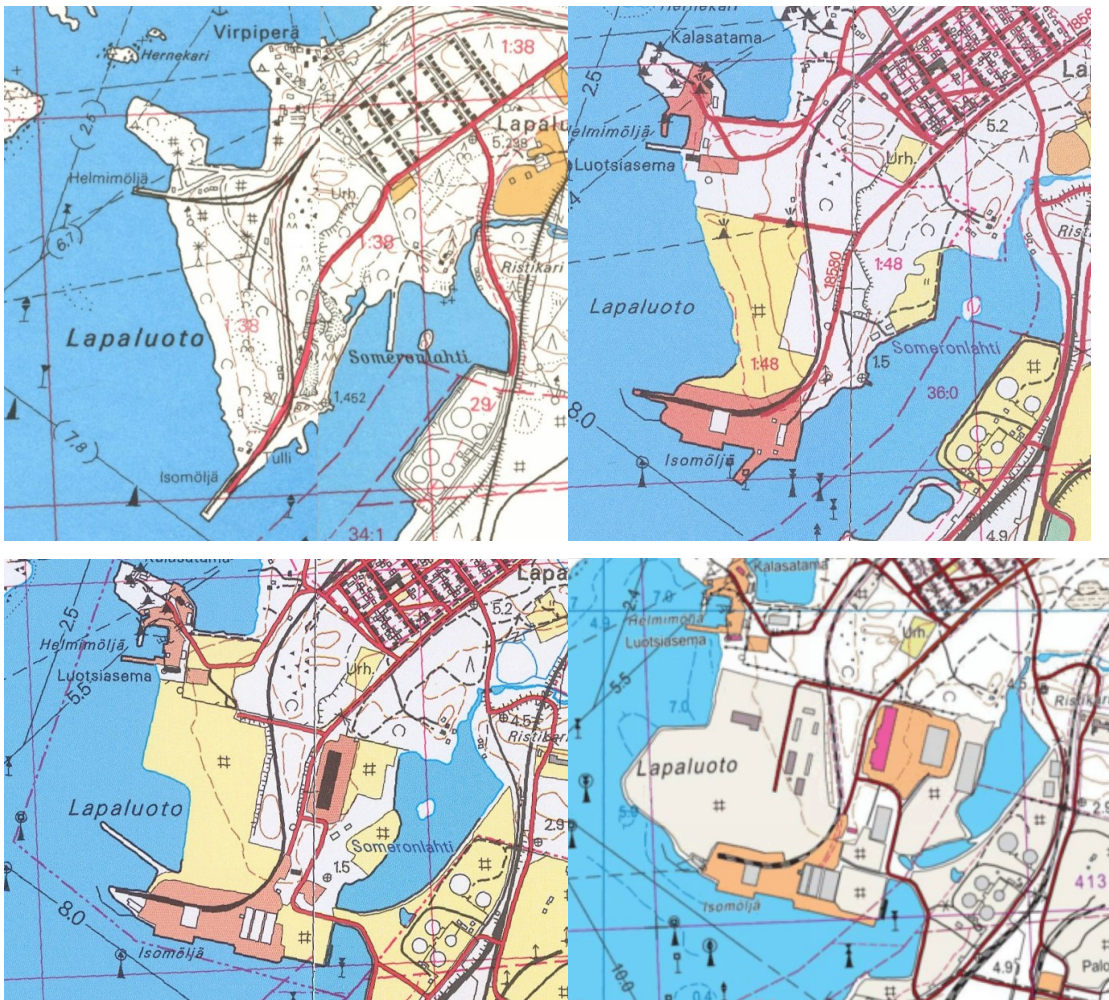
Yhteenvetona taulukkoon 2. on koottu LD-masuunihiekan, masuunikuonamurskeen ja betonimurskeen teknisiä ominaisuuksia Tielaitoksen, Tiehallinnon, sekä SSAB Europe Oy:n materiaaleista vuosilta 1998-2022. Taulukon 2. pohjalta uusiomateriaalit ovat monilta osin selvästi parempia maarakennusominaisuuksiltaan kuin perinteinen kalliomurske. Erityisesti kantavuusominaisuudet ovat huomattavasti korkeammat, LD-masuunihiekalla jopa 600 MPa, kun taas kalliomurskeilla arvo on tyypillisesti 200–280 MPa. Kaikki tarkastellut uusiomateriaalit tarjoavat kilpailukykyisen vaihtoehdon perinteisesti käytetyille neitseellisille luonnonmateriaaleille infrarakentamisessa.

<b>Tekniset ominaisuudet</b>	<b>LD- Masuunihiekka LD-MaHk</b>	<b>Masuunikuonamurske MaKuM</b>	<b>Betonimurske BeM II</b>
<b>Rakeisuus</b>	0–8 mm	0–125	0–90 mm
<b>Luvanvaraisuus</b>	-	-	Ympäristölupa / MARA-asetus
<b>Lämmönjohtavuus</b>	0,35–0,75 W/mK	0,9 W/mK	1,5 W/mK
<b>Irtotiheys</b>	1.3–1.4 t/m <sup>3</sup>	1,35–1,45 t/m <sup>3</sup>	1,75–2 t/m <sup>3</sup>
<b>Vesipitoisuus</b>	10–15 %		8–14 %
<b>pH</b>	≥ 12 (emäksinen)	≥ 11 (emäksinen)	≥ 11 (emäksinen)
<b>Routivuus</b>	Routimaton	Routimaton	Routimaton
<b>E-moduuli</b>	600	430	500

Taulukko 2. Uusiomateriaalien tekniset ominaisuudet (Tielaitos 1998; Tiehallinto 2007; SSAB Europe Oy, Merox 2016; Väylävirasto 2022a)

## 5 SATAMAN GEOTEKNISET OMINAISUUDET

Lapaluodon sataman alueista lähes puolet on syntynyt vuosikymmenten aikana vesialueiden täytöistä. Kuviossa 5. sekä 6. on nähtävissä alueella tapahtunut muutos satama-alueen kasvaessa. Alueen täyttöjä on tehty muun muassa satama-altaan ruoppausmassoista, SSAB Europe Oy:n terästehtaan masuunikuonatuotteista sekä prosessipoisteesta, joka sisältää vapaata kalkkia keskimäärin 30%, jolloin rakenteiden paisumista voi tapahtua vuosienkin jälkeen. Tämän vuoksi pohjatutkimuksiin on syytä panostaa erityisesti suunniteltaessa uusia rakenteita.



Kuvio 5. Raahen satama, Lapaluoto vuosina 1979, 1997, 2007, 2012 (Vanhatkartat.fi)



Kuvio 6. Raahen satama, Lapaluoto vuonna 2024 (Gisgro)

Raahen Sataman alueille on tehty laajalti pohjatutkimuksia vuosien 2010–2021 aikana eri rakennushankkeita varten. Tutkimukset on käsittäneet kairauksia, maanäytteidenottoa, sekä levykuormituskokeita. Pohjatutkimusten lisäksi vuonna 2014 on teetetty konsulttityönä selvitys, jonka tarkoituksena oli kartoittaa sen aikaisten kenttäalueiden kunto ja kantavuustiedot mahdollisia saneerauksia, sekä tulevien kenttien suunnittelua ja rakentamista varten. Tavoitekantavuudeksi tutkimusten perusteella asetettiin E<sub>2</sub> 350MPa päällysteen päältä. Pohjatutkimuksista on koottu yhteenveto taulukkoon 3. (Raahen Satama Oy, Lapaluodon satama-alueen pohjatutkimukset 2010–2021.)

<b>Tutkimustieto</b>	<b>Tulos</b>
<b>Maanpinnan taso</b>	+1,5.....+3,3
<b>Maanpinnan täyttökerrosten paksuus</b>	4,0...6,0m Kerrosten tiiveydet löyhästä tiiviiseen
<b>Vesipitoisuus</b>	8...21%,
<b>Maaperän koostumus</b>	Kuonan ja/tai soraisen hiekkamoreenin ja/tai silttisen hiekkamoreenin seosta ja kuonamursketta
<b>Routivuus</b>	lievästi routivia, routivia
<b>Maaperän arvioitu kelpoisuusluokka</b>	H2, H3, H4
<b>Alusrakenneluokka</b>	E-F
<b>Routaturpoama t</b>	3, 6
<b>Sallittu routanousu</b>	50 mm
<b>Tavoitekantavuus E<sub>2</sub></b>	350 MPa

Taulukko 3. Yhteenvedoa pohjatutkimuksista (Raahen Satama Oy, Lapaluodon satama-alueen pohjatutkimukset 2010–2021)

## 6 LASKENTAMENETELMÄ

### 6.1 Kantavuuslaskenta

Päällysrakenteen mitoitukseen vaadittavat lähtötiedot ovat taulukosta 3, josta on valittu pohjatutkimuksista saatu heikoin tulos. Mitoitus on tehty RIL 234-2007 mukaisesti ja laskenta on suoritettu Odemarkin kantavuus kaavaa käyttäen.

Kantavuusmitoitus etenee määrittämällä ensin pohjarakenteelle kantavuus, jonka jälkeen mitoituksessa edetään kerroksittain kohti päällimmäistä kerrosta ja tavoiteltua kantavuutta. Mitoituksessa suunnittelijan on otettava huomioon erilaisia laatuvaatimuksia niin mitoitettaville kerroksille kuin käytettäville materiaaleille. (Liikennevirasto 2018, 43–44.)

### 6.2 Päästö- ja kustannuslaskenta

Päästö- sekä kustannuslaskennan osuus työstä on suoritettu infrarakentamisen Ihku-laskentapalvelussa. Ihku-palvelu on allianssina toteutettu infrahankkeiden laskentajärjestelmä. Palvelun tilaajina ovat olleet Väyläviraston lisäksi useat kaupungit. Allianssin palveluntuottajina puolestaan ovat olleet Ramboll Finland Oy, Arkance Systems Finland Oy, Mittaviiva Oy ja Solita Oy. Palvelu on tuotettu tarjoamaan suunnittelijoille sekä hankkeista vastaaville ajantasaista, luotettavaa ja läpinäkyvää tietoa infrarakentamisen kustannuksista. Laskentapalvelu on otettu tuotantokäyttöön vuonna 2021, jonka jälkeen sitä on kehitetty vaiheittain muun muassa vuoden 2023 lopussa laskentapalveluun julkaistiin päästölaskennan työkalu. (Ihku-Allianssi 2023.)

Ihku-palvelun päästötiedot pohjautuvat CO<sub>2</sub>datan tietosisältöön. Kustannukset taas perustuvat infra-alan ajantasaisiin sekä alan toimijoilta kerättyihin arvioihin. Ihku-laskentapalvelu laskee yksikköhinnan ja päästön valitulle materiaalille. Palvelimen päästölaskentaan on sisällytetty kaikki elinkaari vaiheet (A1-A3) materiaalien valmistus, sekä (A4-A5) rakentamisvaihe. Päästölaskentatyökalu on kuitenkin suhteellisen tuore, jonka vuoksi päästötietojen kattavuutta päivitetään sen mukaisesti, kun CO<sub>2</sub>data tarjoaa uusia päästötietoja. (Arkance 2025; Ihku-Allianssi 2023.)

CO<sub>2</sub>datasta on saatavilla infrarakentamisen GWP- ja hiilidioksidiekvivalenttiarvot. Palvelussa esitetty GWP-arvo kuvaa ihmisen aiheuttaman toiminnan ilmastovaikutuksia työkoneille, kuljetuksille ja erilaisille rakennusmateriaaleille. Kasvihuonekaasupäästöjen määrä kuvataan hiilijalanjälkenä, joka lasketaan koko infrarakenteen elinkaaren ajalta. Tulokset esitetään yksikössä hiilidioksidiekvivalenttia (kg CO<sub>2</sub>e), joka ottaa huomioon eri kasvihuonekaasujen vaikutukset yhteismitallisina suhteessa hiilidioksidiin. CO<sub>2</sub>data huomioi toistaiseksi ainoastaan fossiilisten päästöjen aiheuttamat GWP-vaikutukset. Kaikille materiaaleille ei kuitenkaan ole vielä saatavilla kotimaisesta lähteestä peräisin olevia arvoja, joten annettu arvo pohjautuu tyyppiltään tai valmistustavaltaan vastaavaan tuotteeseen. Laskelmissa käytettävät GWP-arvot löytyvät taulukosta 5. (CO<sub>2</sub>data 2024.)

<b>Kerros</b>	<b>GWP – fossil</b>	<b>Yksikkö</b>
Asfalttipäällyste, kulutuskerros AB16	0,045	CO <sub>2</sub> e kg/kg
Asfalttipäällyste, kantava kerros ABK22	0,047	CO <sub>2</sub> e kg/kg
Kalliomurske KaM 0–32, KaM 0–55, KaM 0–90	0,006	CO <sub>2</sub> e kg/kg
Suodatinhiekkä	0,004	CO <sub>2</sub> e kg/kg
LD-masuunihiekka LD-MaHk	0,006 <sup>(1)</sup>	CO <sub>2</sub> e kg/kg
Masuunikuonamurske MaKuM	0,006 <sup>(1)</sup>	CO <sub>2</sub> e kg/kg
Betonimurske BeM II	0,0046	CO <sub>2</sub> e kg/kg
→ työmaalla valmistettu	0	CO <sub>2</sub> e kg/kg

(1.) Päästö pohjautuu kivimurskeen valmistukseen.

Taulukko 4. Materiaalien päästötietoja (CO<sub>2</sub>data 2024)

CO<sub>2</sub>datassa masuunituotteiden päästöarvot pohjautuvat kivimurskeen valmistuksesta saatuihin GWP-arvoihin, koska tarkempaa tietoa ei ole toistaiseksi saatavilla. Kuitenkin SSAB Europe Oy:llä on CO<sub>2</sub>-päästölaskenta käynnissä yrityksen päätuotteille, jonka jälkeen laskenta suoritetaan sivu- ja kierrätystuotteena saataville masuunituotteille. (CO<sub>2</sub>data 2024; SSAB Europe Oy, Recycling 2025.)

Lähin saatavuus maa- ja kiviaineksille Raahen satamasta on vähintään 10–15 kilometrin päässä, joka osaltaan on merkittävä päästöjen aiheuttaja.

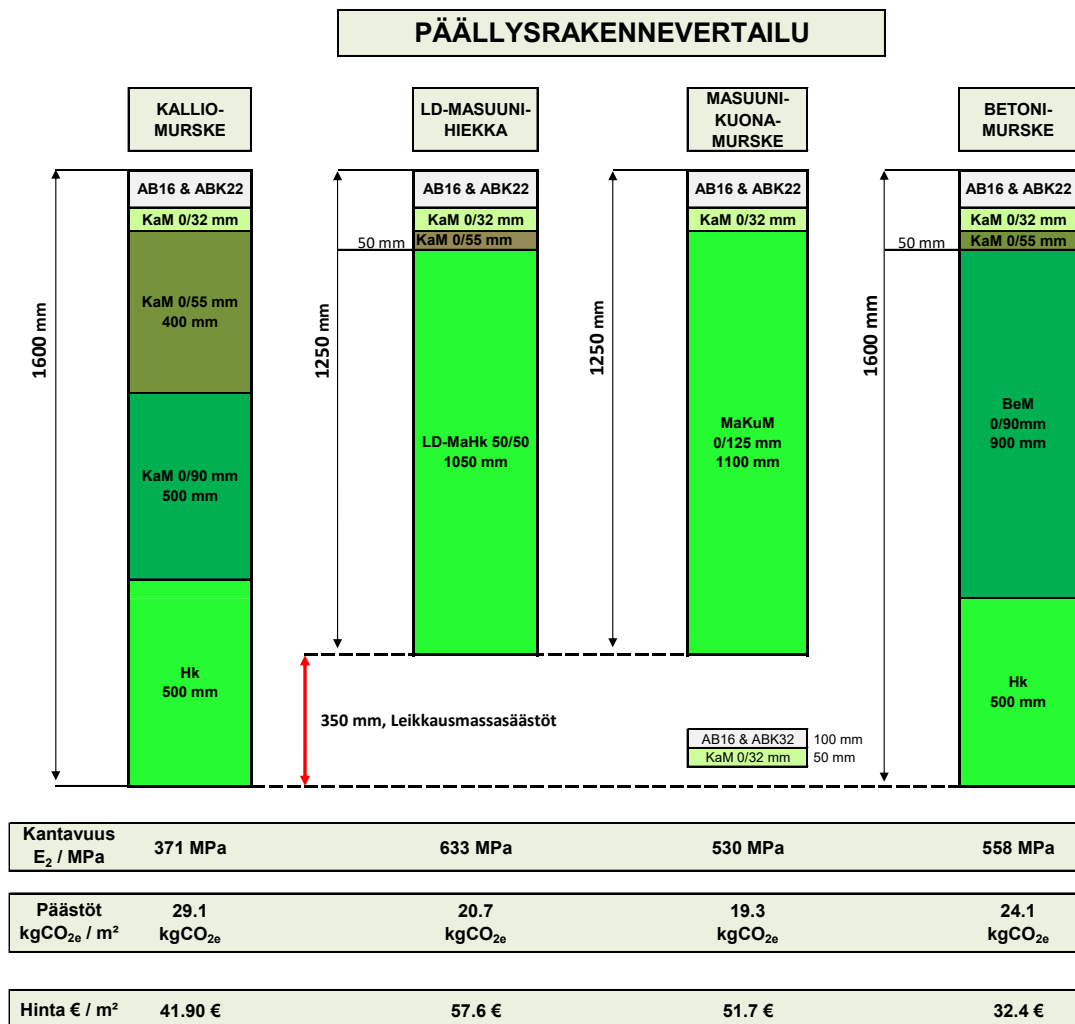
Raahen SSAB:n terästehdas sijaitsee Raahen sataman välittömässä läheisyydessä, jolloin masuunikuona materiaalien kuljetusmatkat ovat Lapaluodon satama-alueelle enimmillään 2,5 kilometriä. Satamasta asfalttiasemalle on matkaa noin 8 kilometriä.

Ihku laskentapalveluun on asetettu materiaalien kuljetusmatkat seuraavasti.

- Asfalttimassa, alle 15 kilometriä
- Kalliomurskeet, 15 kilometriä
- Hiekka, 15 kilometriä
- Betonimurske, 10 kilometriä
- Masuunikuonatuotteet, noin 10 kilometriä

## 7 TULOKSET

Vertailu käsitti neljä erilaista rakennevaihtoehtoa, joista yksi oli perinteinen neitseellinen luonnonvaroista saatu kalliomurskerakenne ja kolme muuta rakennetta koostuivat LD-masuunihiekka-, masuunikuonamurske- sekä betonimurskerakenteista, jotka kaikki ovat uusiomateriaaleja. Tässä luvussa esitetään opinnäytetyössä suoritettujen materiaalivertailun tulokset kantavuuden, kustannusten ja hiilijalanjäljen näkökulmista. Kuvioon 8. on koottu yhteen mitoituksista ja laskennasta saadut tulokset. Kuviosta on havaittavissa neljän eri päällysrakenteen rakennekerrokset materiaaleineen sekä paksuuksineen. Myös päällysrakenteen kokonaiskerrospaksuus ja leikkausmassojen säästö on osoitettu. Laskennalliset tulokset ovat yhteenvedona kunkin materiaalivaihtoehdon alla.



Kuvio 8. Laskelmien yhteenvedo

## 7.1 Kantavuustarkastelu

Päällysrakenteen mitoituksen laskenta suoritettiin Odemarkin kantavuus kaavalla sataman pohjatutkimus koosteiden pohjalta. Tavoitekantavuudeksi  $E_2$  oli määritetty luvun 5. mukaisesti 350MPa. Vertailutulokset osoittivat, että uusiomateriaaleilla saavutettava kantavuus  $E_2$  on huomattavasti parempi kuin perinteisellä kalliomurskeella.

- Pienimmän kantavuuden  $E_2$  saavutti kalliomurskerakenne 371MPa.
- Suurimman kantavuuden  $E_2$  saavutti LD-masuunihiekkarakenne 633MPa.

Masuunihiekan hydratoitumisreaktion ansiosta materiaalilla on mahdollisuus saavuttaa suuria kantavuuksia. Lisäksi masuunikuonatuotteiden lämmöneristysominaisuuksien vuoksi päällysrakenteelle riittävä kerrospaksuus on 1,25 metriä, kun taas betoni- ja kalliomurskerakenne vaihtoehdoille 1,6 metriä.

## 7.2 Kustannusvaikutukset

Kustannuslaskenta pohjautui kustannuksia arvioitiin pääasiassa materiaalien hankinnan ja kuljetusten osalta. Kallio- ja betonimurskerakenteiden suuremman leikkausmassamäärän vuoksi pois ajettavien massojen määrä kasvaa, mikä pidentää työmaan kestoa ja sitoo enemmän resursseja. Tämä puolestaan lisää sekä kustannuksia että päästöjä. Uusiomateriaalien käyttö osoittautui kustannustehokkaaksi erityisesti silloin, kun materiaalit olivat saatavilla lähellä rakennuskohdetta. Raahen sataman välittömässä läheisyydessä sijaitseva SSAB:n terästehtas mahdollistaa masuunikuonatuotteiden saatavuuden alueellisesti, mikä parantaa niiden kilpailukykyä.

- Edullisimmaksi osoittautui betonimurskerakenne 32.4 € / m<sup>2</sup>.
- Kalleimmaksi osoittautui LD-masuunihiekkarakenne 57.6 € / m<sup>2</sup>.

### 7.3 Hiilijalanjälki

Hiilijalanjäljen tarkastelu toteutettiin Ihku-laskentapalvelun avulla. Tulokset osoittavat, että uusiomateriaalien käytöllä on saavutettavissa merkittäviä päästövähennyksiä verrattuna perinteiseen kalliomurske ratkaisuun.

- Suurimmat päästöt osoittautuivat kalliomurskerakenteelle 29.1 kgCO<sub>2e</sub> / m<sup>2</sup>.
- Pienimmät päästöt osoittautuivat masuunikuonamurskerakenteelle 20.7 kgCO<sub>2e</sub> / m<sup>2</sup>.

Laskennan tuloksista tulee ottaa huomioon, ettei taulukoiden perusteella voi pelkästään arvioida esimerkiksi kenttäalueen rakentamisen kokonaiskustannusta tai -päästöjä, vaan arviot käsittävät pelkästään materiaalivaihtoehdon kuljetuksiin ja toteuttamisen valmiiksi rakenteeksi konetyönä. Arvioihin ei sisälly rakenteeseen jäävän infran eikä leikkaus- ja kaivantotöistä johtuvia kustannuksia tai päästöjä.

Päästöerot ovat yksikössä tarkasteltuna pieniä, mutta satama-alueella suurilla alueilla merkitys kasvaa huomattavasti. Esimerkkinä on koottu taulukkoon 5. kolmen hehtaarin (30 000m<sup>2</sup>) kenttäalueen päästö- ja kustannusvertailu eri päällysrakennevaihtoehdoille. Taulukosta on nähtävissä, että masuunituotteilla on saavutettavissa pienimmät päästöt. Betonimurske puolestaan on päästöiltään, että kustannuksiltaan tasapainoinen vaihtoehto.

Rakenne	Päästöt (kgCO <sub>2e</sub> )	Kustannus (€)	€/kgCO <sub>2e</sub>
Kalliomurske	873 000 kgCO <sub>2e</sub>	1 257 000 €	1,44
LD-masuunihiekka	621 000 kgCO <sub>2e</sub>	1 728 000 €	2,78
Masuunimurske	579 000 kgCO <sub>2e</sub>	1 551 000 €	2,68
Betonimurske	723 000 kgCO <sub>2e</sub>	972 000 €	1,34

Taulukko 5. Kolmen hehtaarin kenttäalueen päästö- ja kustannusvertailu

## 8 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, kuinka eri uusiomateriaalit soveltuvat satamainfran päällysrakenteisiin ja minkälaisia vaikutuksia niillä on kantavuuden, kustannusten ja hiilijalanjäljen näkökulmista. Tulokset osoittavat, että kaikki tarkastellut uusiomateriaalit (LD-masuunihiekka, masuunikuonamurske ja betonimurske) tarjoavat vaihtoehtoja satamainfran vähäpäästöiseen rakentamiseen.

Uusiomateriaalien käyttö tarjoaa lähes yksinomaan positiivisia vaikutuksia perinteiseen kalliomurskeeseen verrattuna. LD-masuunihiekkarakenteella saavutettiin korkein  $E_2$ -kantavuus (633 MPa), mikä mahdollistaa raskaimmankin satamaoperaation. Masuunikuonamurskerakenne osoittautui hyväksi kompromissiksi kantavuuden, päästöjen ja kustannusten välillä.

Vaikka masuunikuonatuotteiden hankintakustannus on suurempi, niiden ominaisuudet mahdollistavat pidemmän käyttöiän, mikä alentaa elinkaarikustannuksia merkittävästi. Betonimurske puolestaan tarjoaa kustannustehokkaan vaihtoehdon. Käyttöä kuitenkin rajoittaa epäsäännöllinen saatavuus Raahen alueelta, sekä pitkäaikainen varastointi edellyttäisi ympäristölupia sekä suuria välivarastoalueita.

Materiaalin käyttöä satamassa on myös jokseenkin vieroksuttu ja MARA-ilmoitusta pidetty työläänä. Pohjautuuko vieroksuminen asenteellisiin syihin, betonimurskeella on kuitenkin potentiaalia saavuttaa isoja kantavuuksia kustannustehokkaasti edistäen kiertotaloutta. Näin ollen suosittelen betonimurskeen suunnitelmallista ja koeluonteista hyödyntämistä alustavasti esimerkiksi pysäköinti- tai vähäliikennöidyillä alueilla. Tällöin voitaisiin kerätä lisätietoa materiaalin soveltuvuudesta satamainfraan. Betonimurskeen saatavuuteen taas voisi löytyä ratkaisu paikallisilta toimijoilta, jotka käsittelevät betonimursketta ympäristöluvalla, olisiko heillä resursseja toimia tarvittaessa sataman välivarastona.

Päästölaskentatulokset osoittavat, että uusiomateriaalien avulla voidaan saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä. Työn luotettavuutta tukee se, että laskentatulokset pohjautuvat julkisiin tietokantoihin sekä infra-alan ohjeistuksiin. Lopullisia tulokset eivät kuitenkaan vielä ole, koska masuunituotteiden päästökertoimet pohjautuvat kivimurskeen valmistukseen. Työ tuotti kuitenkin suuntaa antavaa ja tärkeää pohjatietoa, joka tarjoaa tukea päätöksenteolle jatkossa. Suunnittelulla ja materiaalivalinnoilla voidaan ratkaista merkittävä osa infrahankkeiden aikana syntyvistä päästöistä. Konkreettiset lukemat osoittavat, että vähähiilinen infrarakentaminen on mahdollista ilman teknisiä kompromisseja.

Osaltaan Raahen Satama Oy edistäisi kokonaisvaltaisesti niin luonnonvarojen säästämistä, vähäpäästöistä infrarakentamista kuin kiertotaloutta sisällyttämällä ympäristönäkökohtien kriteereitä ja vertailuperusteita kilpailutuksiinsa. Satamialalla julkisen sektorin toimijana jo pelkästään sosiaalisessa mediassa ympäristökriteerien tuominen esiin voisi vaikuttaa tarjoajiin siten, että nämä suhtautuvat ympäristönäkökohtiin jatkossa tarkemmin. Hankkeiden suunnittelun rinnalle tulisi myös jatkossa ottaa päästölaskenta, jotta pohjatietoa saataisiin kerrytettyä lisää.

Jatkossa rakennushankkeiden toteuttamista tulisi viedä suuntaan, jossa se tapahtuu täysin uusiutuvilla poltto- ja voiteluaineilla. Satamaoperointi sekä infrarakentaminen on myös mahdollista toteuttaa päästöystävällisesti täysin sähköisillä koneilla. Jatkotutkimusaiheena voisi tarkastella sähköisten työkoneiden resursseja sekä käytön mahdollisuuksia satamassa. Sähkökäyttö vaatii latausinfrastruktuuria ja merkittäviä investointeja, jolloin hyötyjen tulisi selkeästi ylittää resurssitarpeet. Lisäksi olisi otettava huomioon huoltovarmuusseikat. Sähkökäyttöisten työkoneiden hankinta on merkittävä investointi, joka vaatii satamaoperaattorilta resursseja. minkälaisia päästöjä rakentaminen aiheuttaa, jotta voitaisiin arvioida, missä määrin täyssähköinen operointi kompensoisi nämä päästöt.

Yhteenvetona voidaan todeta, että uusiomateriaalien hyödyntäminen satamainfrassa on teknisesti, taloudellisesti ja ympäristöllisesti perusteltua. Vähähiilinen rakentaminen satamassa on mahdollista merkittävin päästövähennyksin, ja tämän työn tulokset tarjoavat konkreettista tietoa ja suosituksia vastuullisen infrarakentamisen edistämiseksi.

## LÄHTEET

Arkance 2025. Ihku-laskentapalvelu. Viitattu 3.5.2025 <https://tuki.arkance-systems.fi/hc/fi/categories/360002881919-Ihku-laskentapalvelu>

CO2data 2024. Viitattu 10.4.2025 <https://co2data.fi/infra/>

Ihku-Allianssi 2023. Viitattu 14.5.2025 <https://ihkuallianssi.fi/ihku-laskentapalvelun-paastolaskenta>

Julkisten hankintojen neuvontayksikkö 2023. Viitattu 13.5.2025 <https://www.hankinnat.fi>

Laki julkisista hankinnoista ja käyttöoikeussopimuksista 29.12.2016/1397. Viitattu 10.5.2025 <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2016/1397>

Laki vesi- ja energiahuollon, liikenteen ja postipalvelujen alalla toimivien yksiköiden hankinnoista ja käyttöoikeussopimuksista 29.12.2016/1398. Viitattu 13.5.2025 <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2016/1398>

Liikennevirasto 2018. Tierakenteen suunnittelu. Viitattu 7.5.2025 [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo\\_2018-38\\_tierakenteen\\_suunnittelu\\_web.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf)

Raahen Satama 2025. Viitattu 15.2.2025 <https://www.raahensatama.fi/>

Raahen Satama Oy. Lapaluodon satama-alueen pohjatutkimukset 2010–2021. Viitattu 10.12.2024. Raahen Satama Oy:n sisäiset asiakirjat.

Rakentamislaki 21.4.2023/751 Viitattu 3.5.2025 <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2023/751>

RIL 234-2007. Päällysrakenteen mitoitus. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL.

SFS 5884:2022. Betonimurskeen maa- ja viherrakennuskäytön laadunvalvontajärjestelmä. 3. painos. Suomen Standardoimisliitto SFS

SSAB Europe Oy, Merox 2016. Maa- ja tierakennustuotteet.

SSAB Europe Oy, Recycling 2025. Yksityinen sähköpostiviesti 28.4.2025. Viestin saaja: Netta Krekilä

Suomen vanhat kartat. Viitattu 10.12.2024 <https://vanhatkartat.fi/#14/64.66225/24.42855>

Tiehallinto 2007. Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa. Viitattu 19.12.2024 <https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Tiehallinto/pdf/2100041-v-07-sivutuoteohje.pdf>

Tielaitos 1998. Kappalekuonan ja masuunikuonamurskeen käyttö päällysrakennekerroksissa. Viitattu 19.12.2024 <https://www.doria.fi/bitstream/hadle/10024/138861/4062tie.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Uuma 2024. Mitä uusiomaarakentaminen on? Viitattu 13.5.2025 <https://uusiomaarakentaminen.fi/>

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 7.12.2017/843. Viitattu 3.4.2025 <https://finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskoelma/2017/843>

Väylävirasto 2022a. Uusiomateriaalien käyttö väylä rakentamisessa. Viitattu 27.2.2025 [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo\\_2022-20\\_uusiomateriaalien\\_kaytto\\_web.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-20_uusiomateriaalien_kaytto_web.pdf)

Väylävirasto 2022b. Betonijätteen käsittely ja käyttö väylähankkeissa. Viitattu 3.4.2025 [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo\\_2022-43\\_Betonijate\\_web.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-43_Betonijate_web.pdf)

Väylävirasto 2023. Infrarakentamisen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Viitattu 14.4.2025 [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo\\_2023-43\\_vahahiilisyyden\\_arviointimenetelma\\_web.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2023-43_vahahiilisyyden_arviointimenetelma_web.pdf)

Ympäristöhallinnon verkkopalvelu 2024. Kestävät julkiset hankinnat ja investoinnit. Viitattu 10.5.2025 <https://www.ymparisto.fi/fi/kestava-kierto-ja-biotalous/kestava-kulutus/kestavat-julkiset-hankinnat-ja-investoinnit#vahvista-osaamista>