

Juha-Matti Kokkonen

# VÄHÄHIILINEN KIVIAINESTUOTANTO

Diplomityö  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Tarkastaja: Pauli Kolisoja  
Tarkastaja: Pirjo Kuula  
Kesäkuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Juha-Matti Kokkonen: Vähähiilinen kiviainestuantanto  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikka  
Kesäkuu 2024

Ilmastonmuutoksen myötä vähähiilisyys ja hiilineutraalisuus ovat maailmanlaajuisesti ajankohdaisia teemoja. Ilmastomuutoksen hillitsemiseksi asetetut kansalliset tavoitteet ja EU:n ilmastolaki ohjaavat valtioita ja yrityksiä kehittämään uusia vähähiilisiä ja hiilineutraaleja ratkaisuja. Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Kiviaineksen tuotantoprosessissa syntyy hiilidioksidi- ja lähipäästöjä, joista suurin osa syntyy tuotannon murskaus- ja kuljetusvaiheissa. Hiilidioksidi- ja lähipäästöjä voidaan vähentää käyttämällä uusiutuvalla energialla tuotettua sähköä ja uusiutuvia polttoaineita. Hiilineutraalisuus voidaan saavuttaa hiilikompensointioiden avulla vähähiilisissä tuotteissa.

Diplomityön tavoitteena oli selvittää vähähiilisen kalliomurskeen tuotannon päästöt ja verrata päästöjä fossiililla polttoaineella tuotetun kalliomurskeen päästöihin. Tutkimuksen tavoitteena oli myös verrata murskeen kuljetuksista aiheutuneita päästöjä uusiutuvan ja fossiilisen polttoaineen välillä.

Diplomityön kirjallisessa osassa esiteltiin kirjallisuuteen perustuen kansallisia ilmastopäästöjen vähentämistavoitteita, kalliomurskeen tuotantoprosesseja, kalliomurskauksen energiankulutusta ja kalliomurskauksen energianlähteitä. Diplomityön kokeellisessa osassa tutkittiin vähähiilisen ja fossiilisen kiviainestuantannon päästöjä. Vähähiilisessä tuotannossa polttoaineena käytettiin Neste MY uusiutuva polttoöljyä ja fossiilisessa tuotannossa fossiilista polttoöljyä. Molemmat tuotannot toteutettiin samalla Destian kiviainestuantantopaikalla. Tuotantoprosessissa louhe syötettiin kaivinkoneella ja murskeen läjittäminen toteutettiin pyöräkuormaajalla. Tuotetusta kalliomurskeesta selvitettiin lajitekohtaiset hiilidioksidi- ja lähipäästöt tuotettua kiviainestonnia kohden laskennallisesti työkoneiden moottoreiden päästöluokitukseen ja polttoaineen kulutukseen perustuen. Päästölaskentatulosten pohjalta tehtiin laskelmia hiilineutraalin kiviaineksen tuottamiseksi tarvittavista toimenpiteistä.

Tutkimuksissa ilmeni, että vähähiilisen murskeen valmistuksessa syntyi noin 92 % pienemmät hiilidioksidipäästöt kuin fossiilisen murskeen valmistuksessa. Lähipäästöt olivat myös pienemmät vähähiilisessä tuotannossa, sillä typen oksideja muodostui noin 35 % vähemmän ja muita lähipäästöjä noin 30 % vähemmän kuin fossiilisessa tuotannossa. Kokeellisessa osassa ilmeni, että työkoneet kuluttivat uusiutuvaa polttoöljyä noin 3 % enemmän kuin fossiilista polttoöljyä. Murskeen kuljettamiselle hiilidioksidipäästöt perävaunullisella kuorma-autolla olivat uusiutuvalla diesellillä 2,9 grammaa kiviainestonnikilometriä kohden, kun taas fossiilisella diesellillä vastaava päästö oli 27,8 grammaa. Pelkällä kuorma-autolla hiilidioksidipäästöt olivat noin 37 % suuremmat kuljettua kiviainestonnikilometriä kohden. Hiilineutraalin kiviaineksen tuottamiseksi tehtiin laskentaa istutettavien kuusi taimien määrästä molemmista tuotannoista. Laskentatuloksien perusteella vähähiilisestä tuotannosta olisi mahdollista tehdä hiilineutraalia istuttamalla yksi kuusen taimi 5464 tuotettua kiviainestonnia kohden, mikäli kuusen taimien annetaan kasvaa vähintään 60 vuotta. Fossiilista polttoöljyä käytettäessä tulisi istuttaa yksi kuusen taimi 457 tuotettua kiviainestonnia kohden.

Tutkimustulosten perusteella jatkotutkimuksina olisi tärkeää tehdä päästömittauksia vähähiiliselle ja fossiiliselle kalliomurskeen tuotannolle. Erityisesti typen oksidipäästöjä olisi tärkeää mitata, sillä kyseiset päästöt olivat merkittäviä molemmissa tuotannoissa. Päästömittaukset toisivat myös varmuutta laskennallisesti määritetyille päästöarvioille. Haastetta diplomityöhön toi aggregaatin hyötysuhteen arvioiminen, sillä murskausprosessissa energiaa kuluu muun muassa lämmön tuottamiseen ja kitkan voittamiseen. Olisi tärkeää tutkia kiviainestuantannoissa käytettävien aggregaattien hyötysuhteita, jotta aggregaatin hyötysuhteelle saisi luotua vakioarvot.

Diplomityö oli osa Destian vähähiilisten tuotteiden tutkimusta, jossa selvitetään vähähiilisten tuotteiden päästöjä ja niiden kompensointia. Diplomityön tutkimustulosten perusteella on mahdollista tuottaa vähähiilinen murske Destia Oy:lle.

Avainsanat: Vähähiilinen murske, uusiutuva polttoöljy, Neste MY, hiilineutraali, hiilidioksidi, lähipäästöt, kalliomurskaus, vähähiilinen tuotanto, fossiilinen tuotanto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla

# ABSTRACT

Juha-Matti Kokkonen: Low carbon aggregate production  
Master's thesis  
Tampere University  
Civil Engineering  
June 2024

---

Due to climate change, low carbon and carbon neutrality are topical themes worldwide. Countries and European Union have set national goals for combating the climate change. National goals and European Union's climate law guide countries and companies to create new low carbon and carbon neutral solutions. Finland's goal is to be carbon neutral by 2035. Aggregate production process creates emissions of carbon dioxides (CO<sub>2</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), carbon monoxides (CO), hydrocarbons (HC) and particulate matter (PM). Most of these emissions are formed in crushing process and transport. Emissions can be reduced by using renewable fuels or electricity which is produced by renewable energy. Carbon neutrality can be achieved with carbon offset in low carbon products.

The goal of this thesis was to find out the emissions of low carbon aggregate production and compare the low carbon production's emissions to emissions of fossil aggregate production. The aim of this study was also to compare the emissions caused by the transportation of aggregates between renewable and fossil diesel.

The literature review of this thesis presents reduction goals of national climate emissions, aggregate crushing process, the energy consumption of aggregate production and its energy sources. In the experimental part of the thesis the emissions were calculated using data from low carbon and fossil aggregate production on a Destia production site. Neste My renewable fuel oil was used as a fuel in low carbon aggregate production. In fossil aggregate production the fuel was fossil fuel oil. In production process, the rock was fed with an excavator and the storage was done with a wheel loader. The emissions of produced aggregates were calculated with different fraction of aggregate. The emission measure is grams per tons of produced aggregates. The emissions calculations are based on emission classifications of the engines and fuel consumption. With results of carbon dioxides emissions, is possible to measure the carbon offsets for carbon neutral aggregate.

The research showed that in low carbon aggregate production the carbon dioxide emissions were approximately 92 % lower than in fossil aggregate production. Also other emissions were lower also in low carbon aggregate production. NO<sub>x</sub> emissions were formed approximately 35 % less and CO-, HC- and PM emission were formed about 30 % less than in fossil aggregate production. It appeared that excavator and wheel loader consumed renewable fuel oil about 3 % more compared to fossil fuel oil. Carbon dioxide emissions are 2,9 grams per aggregate ton of kilometer for transporting aggregates with renewable diesel and with fossil diesel the carbon dioxide emissions are 27,8 grams per aggregate ton of kilometer if the transportations are done by trailer truck. The carbon dioxide emissions per aggregate ton of kilometer are approximately 37 % higher if the transportation is done by truck. To produce carbon neutral aggregate, a calculation of planted spruce sapling was made for both productions. Based on the calculation results, it would be possible to make the low carbon production to carbon neutral by planting one spruce sapling for every 5464 produced per ton of aggregate if the spruce saplings are allowed to grow for at least 60 years. To produce carbon neutral aggregate from fossil aggregate, it required to plant one spruce sapling for every 457 tons of aggregate produced.

Based on the research results, it would be important to do emissions measurements for low carbon and fossil aggregate production for further research. Especially measuring the nitrogen oxides emissions is important because those emissions were significant in both productions. Emission measurements would bring certainty for computationally determined emissions. The challenge for this thesis was the evaluating the efficiency of the generator. It would be important to measure the generator's efficiency in aggregate production.

The thesis was part of Destia's low carbon product research, which investigates emissions of low carbon products and their carbon offsets. Based on the research results of this thesis, it could be possible to productize carbon aggregate.

Keywords: Low carbon aggregate, renewable fuel oil, Neste MY, carbon neutral, carbon dioxides, aggregate production, low carbon aggregate production, fossil aggregate production, carbon offset

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

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Destia Oy:lle kesän 2023 ja kesän 2024 välisenä aikana.

Kiitän professori Pauli Kolisojaa ja projektipäällikköä Pirjo Kuulaa Tampereen yliopistolta työn tarkastamisesta ja ohjaamisesta sekä ympäristöpäällikkö Tiina Ullgrenia Destia Oy:stä opastuksesta ja avusta.

Lisäksi kiitän Kone-Kostamo Oy:n edustajaa Johan Kostamoa työn kokeellisen osuuden tiedonannosta ja kiitän myös Neste Oy:n edustajaa Kari Brandernia työn opastuksesta Neste MY polttoaineen osalta. Kiitän myös Destia Oy:n muuta henkilökuntaa opastuksesta, neuvoista ja työhön osallistumisesta.

Haluan kiittää myös perhettäni ja ystäviäni tuesta ja kannustuksesta opiskeluvuosieni aikana.

Kuopiossa 20.6.2024

Juha-Matti Kokkonen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. ILMASTOPÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMISTAVOITTEET .....	3
2.1 Tavoitteiden vaiheistus .....	3
2.2 Lainsäädäntö .....	6
2.3 Hiilikompensaatio .....	6
3. KALLIOMURSKKEEN TUOTANTO .....	9
3.1 Kalliokiviaines ja sen tuotantoprosessi .....	9
3.2 Murskauslaitos ja sen kalusto .....	13
3.2.1 Murskauslaitoksen kokoonpano .....	13
3.2.2 Murskaimet .....	15
3.2.3 Seulat .....	20
3.2.4 Muut työkoneet .....	21
3.3 Energiankulutus murskauksessa .....	23
4. KIVIAINESTUOTANNON ENERGIALÄHTEET .....	27
4.1 Dieselpolttoaineet .....	27
4.1.1 Kevyt polttoöljy .....	27
4.1.2 Biodiesel .....	28
4.1.3 Vetykäsitelty kasvisöljy (HVO) .....	30
4.2 Sähköverkkoon liitetty tuotanto .....	32
5. AINEISTOT JA MENETELMÄT .....	34
5.1 Työkoneiden päästötiedot .....	34
5.2 Tapaustutkimusten kohteet .....	36
5.3 Vähähiilinen tuotanto .....	40
5.3.1 Lähtöarvot .....	40
5.3.2 Päästökertoimet .....	44
5.4 Fossiilinen tuotanto .....	47
5.4.1 Lähtöarvot .....	47
5.4.2 Päästökertoimet .....	51
5.5 Kuljetus .....	52
5.5.1 Lähtötiedot .....	52
5.5.2 Päästökertoimet .....	53
5.6 Yhteenveto päästölaskentamenetelmistä .....	54
5.6.1 Kiviainestuotannon päästölaskentamenetelmä .....	54
5.6.2 Kuljetuksen päästölaskentamenetelmä .....	59
6. KIVIAINESTUOTANNON JA KULJETUKSEN PÄÄSTÖT .....	63
6.1 Vähähiilinen tuotannon päästöt ja hiilikompensaatio .....	63
6.1.1 Päästöt .....	63
6.1.2 Hiilikompensaatio .....	67
6.2 Fossiilinen tuotannon päästöt ja hiilikompensaatio .....	68
6.2.1 Päästöt .....	68
6.2.2 Hiilikompensaatio .....	71

6.3	Kuljetus.....	73
6.3.1	Fossiilisen kuljetuksen päästöt.....	73
6.3.2	Vähähiilisen kuljetuksen päästöt .....	75
6.3.3	Hiilikompensaatio.....	78
7.	TULOSTEN ANALYSOINTI JA VERTAILU .....	84
7.1	Tuotantotapojen päästövertailu.....	84
7.2	Kustannusten vertailu .....	88
7.3	Kuljetuspäästöjen vertailu .....	88
7.4	Hiilikompensaatiolaskelmien tulokset.....	91
7.4.1	Kiviainestuotantojen hiilikompensaatio.....	91
7.4.2	Kuljetuksien hiilikompensaatio .....	92
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	95
	LÄHTEET .....	98
	LIITE A: FOSSIILISEN KULJETUKSEN PÄÄSTÖT .....	107
	LIITE B: VÄHÄHIILISEN KULJETUKSEN PÄÄSTÖT .....	108



# LYHENTEET JA MERKINNÄT

CO <sub>2</sub> -ekv	Hiilidioksidiekvivalentti on suure, joka kuvaa ihmisten tuottamien kasvihuonekaasujen ilmastovaikutusta
NECP	Tulee sanoista: "National Energy and Climate Plans" eli Kansallinen energia- ja ilmastosuunnitelma
PM <sub>2,5</sub>	Pienhiukkaset, joiden läpimitta on enintään 2,5 mikrometriä
PM <sub>10</sub>	Pienhiukkaset, joiden läpimitta on enintään 10 mikrometriä
PN	Pienhiukkaset määrän mukaan
NH <sub>3</sub>	Ammoniakki
SO <sub>x</sub>	Rikin oksideja
NMVOG	Tulee sanoista: "Non-methane volatile organic compound" eli ei metaania haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöt
NO <sub>x</sub>	Typpioksidit
HC	Hiilivedyt
THC	Tulee sanoista "Total Hydro Carbon" eli kokonaishiilivedyt
g/hp-hr	Grammaa hevosvoimatuntia kohden

# 1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen myötä vähähiilisyys ja hiilineutraalisuus ovat maailmanlaajuisesti ajankohtaisia teemoja. Noin 80 % päästöistä, jotka lisäävät ilmaston lämpenemistä, ovat peräisin energiatuotannosta ja liikenteestä. Energia- ja liikennepolitiikka ovatkin avainasemassa ilmastonmuutoksen torjunnassa. Suomessa rakennetun ympäristön osuus energiankäytöstä mukaan lukien liikenne ovat noin 60 % ja päästöistä 55 % (RT 2023). Suomessa on linjattu tavoite, jossa Suomi tavoittelee hiilineutraalisuutta vuoteen 2035 mennessä. (Valtioneuvosto 2022) Tavoitteen saavuttamiseksi valtio on valmistellut suunnitelmia ja sopimuksia ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Valtion ja elinkeinoelämän välillä on valmisteilla Green Deal-sopimuksia. Green Deal-sopimusten avulla vauhditetaan yhteiskunnan siirtymistä kiertotalouden mukaiseen toimintaan, jossa esimerkiksi yritykset ja kunnat sitoutuvat luomaan uusia vähähiilisiä ja hiilineutraaleja ratkaisuja. (Ympäristöministeriö 2023 c)

Kiviaineksien tarve on Suomessa suuri. Kiviaineksia käytetään keskimäärin 100 miljoonaa tonnia vuodessa (Infra ry 2021). Suurta käyttöä selittää se, että etäisyydet ovat pitkiä ja maan routimisen takia vaaditaan paksuja maanteiden, katujen, ratojen ja pihojen rakennekerroksia. Kiviainesalan hiilidioksidipäästöt koostuvat pääsääntöisesti murskaus- ja kuljetusvaiheen päästöistä. Päästöjä voidaan vähentää uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön ja uusiutuvien polttoaineiden avulla. Tuotetulle kiviainekselle voidaan tarpeen mukaan tehdä hiilikompensaatiolaskelmia, joiden avulla arvioidaan tarvittava istutettavan puuston määrää kiviainestuotannon hiilidioksidipäästöjen mukaan. Hiilikompensatiolla tarkoitetaan toimia, joiden tarkoituksena on vähentää, kumota tai sitoa itseaiheutettuja päästöjä. Kompensaatiolaskelmien avulla saadaan hyvä arvio istutettavasta puustosta, jos kiviaineksesta halutaan hiilineutraalia.

Tämän diplomityön aiheena on vähähiilinen kiviainestuotanto. Työn tavoitteena on laskea Destian vähähiilisen kiviainestuotannon päästöt ja luoda edellytyksiä vähähiilisen kalliomurskeen myyntijärjestelmälle. Lisäksi työssä tehdään kompensointilaskelmia ja vertailua fossiilisen kiviainestuotannon päästöihin. Päästölaskennassa ei huomioida louhinnan päästöjä. Tavoitteena on diplomityön selvitysten ja laskelmien pohjalta tuotteistaa vähähiilinen murske Destia Oy:lle.

Tutkimuksen tarkoituksena on vastata seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Kuinka paljon kalliomurskeen tuotannosta syntyy päästöjä ja millä keinoilla tuotannosta voidaan tehdä vähähiilistä?
2. Kuinka paljon eri ratkaisut vaikuttavat vähähiilisen murskeen ja perinteisen murskeen päästöihin?

3. Mitä toimenpiteitä hiilineutraalin kiviaineksen valmistaminen edellyttäisi?
4. Mitä pohjatietoa vähähiilisen kalliomurskeen myynnille tarvitaan?

Diplomityön kirjallisuusselvityksessä perehdytään hiilineutraalisuustavoitteisiin, kiviainestuotantoon ja vähähiilisiin ratkaisuihin. Työn kokeellisessa osassa selvitetään vähähiilisen ja fossiilisen kiviainestuotannon päästöt. Uusiutuvana polttoaineena murskauslaitoksessa ja työkoneissa käytetään Neste MY uusiutuvaa polttoöljyä. Neste MY uusiutuvalla polttoöljyllä on noin 90 % pienempi hiilijalanjälki fossiiliseen polttoöljyyn verrattuna, sillä Neste MY polttoöljy on valmistettu kokonaan jäte- ja tähderaaka-aineista (Neste 2023a).

## 2. ILMASTOPÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMISTAVOITTEET

### 2.1 Tavoitteiden vaiheistus

Ensimmäiset kansainväliset sopimukset toimista ilmastonmuutoksen torjumiseksi on tehty vuonna 1994. Suomi on osapuolena yli sadassa kansainvälisessä ympäristösopimuksessa, joista merkittävin on Pariisin ilmastopimus. (Ympäristöministeriö 2023a) Suomi on sitoutunut Pariisin ilmastopimukseen vuonna 2015. Pariisin ilmastopimuksen mukaan maapallon keskilämpötilan kohoaminen pyritään pitämään 1,5 °C alapuolella suhteessa esiteolliseen aikaan. Lämpötilatavoitteen lisäksi tavoitteena on vahvistaa sopimuksen osapuolten ilmastokestävyyttä ja suunnata rahoitusvirrat kohti vähäpäästöistä toimintaa. Pariisin ilmastopimuksen keskeisin elementti on osapuolten velvollisuus raportoida UNFCCC:n viranomaisille. UNFCCC eli "United Nations Framework Convention on Climate Change" on YK:n ilmastosuojelun puitesopimus. Raportit tunnetaan nimellä NDCs. NDC tulee sanoista "Nationally determined contributions", jolla tarkoitetaan kansallisesti määrättyjä tavoitteita. NDC-raportit lähetetään joka viides vuosi YK:n ilmastosuojelun puitesopimuksen viranomaisille. NDC raporteissa esitetään päästövähennystavoitteet ja suunnitellut ilmastotoimet. (United Nations Climate Change 2023) Taulukossa 1 on esitetty EU:n asettamat enimmäispäästömäärätavoitteet Suomelle. Taulukossa 1 on esitetty lisäksi Suomen vuoden 2021 päästömäärät. Enimmäispäästömäärätavoitteet ovat esitetty vuosille 2020–2029 ja vuodesta 2030 eteenpäin. Vuosille 2020 – 2029 enimmäispäästömäärällä tarkoitetaan sitä, että jokaiselle vuodelle välillä 2020-2029 on asetettu taulukon 1 mukainen päästömäärätavoite (EU 2023).

**Taulukko 1.** EU:n asettamat enimmäispäästömäärätavoitteet Suomelle ja vuoden 2021 päästömäärä Suomen osalta (European Environment Agency 2023; EU 2023).

EU:n asettamat enimmäispäästömäärät Suomelle ja vuoden 2021 päästömäärä Suomen osalta			
Päästöt	Päästömäärätavoite 2020-2029 [Gg]	Päästömäärätavoite 2030- [Gg]	Vuoden 2021 päästömäärä [Gg]
SO <sub>2</sub>	49	46,2	23
NO <sub>x</sub>	135,2	110,24	105
NM VOC	96,2	76,96	83
NH <sub>3</sub>	32	32	31
PM <sub>2,5</sub>	18,2	17,16	14

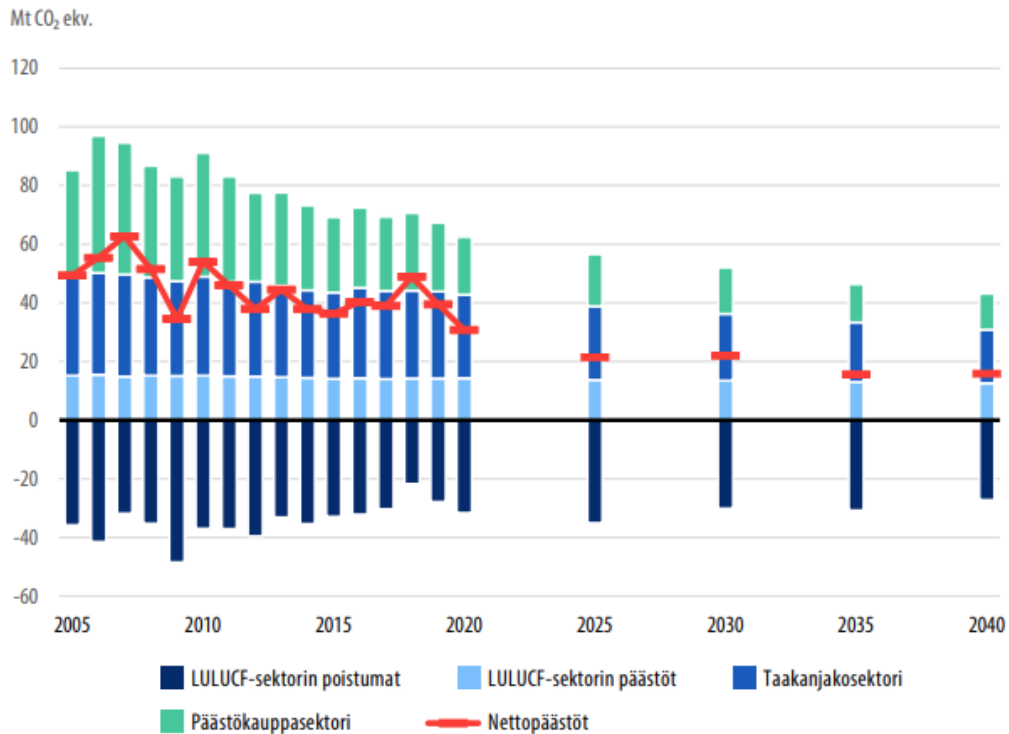
Taulukosta 1 havaitaan, että Suomi on pysynyt ainakin vuonna 2021 vuosille 2020-2029 päästömäärätavoitteiden raja-arvojen sisällä. EU tavoittelee hiilineutraalisuutta vuodelle 2050, jolloin ei enää aiheuteta kasvihuonekaasujen nettopäästöjä. Nettopäästöillä tarkoitetaan päästöjen ja poistumien erotusta. Poistumilla tarkoitetaan hiilinielujen ilmasta poistamaa kasvihuonekaasujen määrää (Hiilineutraalisuomi 2021). EU:n vihreän

kehityksen ohjelmassa on asetettu kullekin jäsenvaltiolle maakohtaiset sitovat ilmastotavoitteet vuodelle 2030 ja päästöpolku vuosille 2021–2030. Suomelle asetettu vuoden 2030 päästövähennystavoite on 39 % vuoden 2005 tasoon verrattuna. Taakanjakosektorilta päästövähennykset ovat 50 % (Ympäristöministeriö 2023b). Taakanjakosektoriin kuuluvat työkoneet, liikenne, rakennusten erillislämmitys, maatalous, jätehuolto ja F-kaasut. F-kaasut ovat fluorattuja kasvihuonekaasuja, joita käytetään esimerkiksi jäähdytys-, ilmastointi-, ja lämpöpumppulaitteistossa (Ympäristö 2023). Taakanjakosektorin päästöt ovat yli puolet EU:n päästöistä (Ympäristöministeriö 2023b). Kuvassa 1 on esitetty EU:n kasvihuonekaasupäästöjen kehitys. (Valtioneuvosto 2022, s. 14–18)



**Kuva 1.** EU:n päästökehitys (Euroopan parlamentti 2022).

Suomen päästötavoite on kunniahimoisempi kuin EU:n päästötavoite, sillä Suomi tavoittelee hiilineutraalisuutta vuoteen 2035 mennessä. Tällöin kasvihuonekaasujen ja hiilinielujen tulee olla samalla tasolla ja siitä eteenpäin nielujen tulee olla päästöjä suuremmat. Enimmäispäästömäärätavoite vuodelle 2035 on 16,4 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub>-ekv. (Valtioneuvosto 2022, s.118) CO<sub>2</sub>-ekv on kasvihuonekaasupäästöjen yhteismitta, jonka avulla voidaan laskea yhteen eri kasvihuonekaasujen päästöjen vaikutusta kasvihuoneilmaston voimistumiseen (MTK). Kuvassa 2 on esitetty Suomen toteutuneet CO<sub>2</sub>-ekv ja poistumat 2005 – 2020 ja päästöpolku vuoteen 2040 asti.



**Kuva 2.** Suomen toteutuneet CO<sub>2</sub>-ekv ja poistumat 2005 – 2020 ja päästöpolku vuoteen 2040 (Valtioneuvosto 2022, s.118).

Kuvan 2 LULUCF-sektorilla tarkoitetaan maankäyttösektoria, joka kattaa maaperän, puiden, kasvien, biomassan ja puutavaran käytön. LULUCF sektori on nettonielu, jolla tarkoitetaan, että sektori sitoo päästöjä enemmän kuin se aiheuttaa niitä. Päästökaupasektorilla tarkoitetaan lentoliikenteen ja teollisuus- ja energiatuotantolaitosten päästöjä. (Valtioneuvosto 2022, s. 120 - 123)

Destia Oyj:n tavoite on olla hiilineutraali omien päästöjen osalta vuoteen 2030 mennessä sekä ilmastopositiivinen vuoteen 2035 mennessä. Lisäksi tavoitteena on vähentää kolmansien osapuolten epäsuoria päästöjä 30 % vuoden 2020 tasoon verrattuna; epäsuoria päästöjä ovat muun muassa polttoaineiden kulutuksesta ja asfaltin tuotannosta syntyvät kasvihuonepäästöt. Päästöjen vähentämiseksi keskeisiä toimenpiteitä ovat uusiutuvien polttoaineiden käyttäminen sekä sähkökäyttöisen kaluston lisääminen. (Destia 2023 a)

Destia on onnistunut vuoden 2022 päästövähennystavoitteessa. Tavoitteena oli vähentää Destia sisäisiä päästöjä 12,5 % ja toteutuneet päästövähennykset olivat noin 28 % (Destia 2023b). Destian päästövähennykset oli laskettu toteutettujen projektien päästöjen mukaan prosentuaalisesti verrattuna edellisen vuoden projektien päästöihin

Päästöjen vähentämisen ohella Destian toiminnassa korostuvat vähähiilisten ratkaisujen kehittäminen, kiertotalous ja biodiversiteetti. Destialla on kehitetty toimintamalleja, joilla

voidaan tuottaa vähähiilistä kiviainesta, betonia, terästä ja muovia. Kiertotaloutta edistetään tehostamalla mineraalisten materiaalien sekä rakennusmateriaalien ja -aineiden uudelleenkäyttöä ja kierrätystä. Biodiversiteettiä ylläpidetään hyvin suunnitelluilla toimenpiteillä sekä maisemoinnilla. Suunnitteluvaiheessa voidaan jo pohtia uusien elinympäristöjen luomista ja siten luonnon monimuotoisuuden vahvistamista. Lisäksi suojellut ja luontoarvoiltaan tärkeät alueet jätetään toiminnan ulkopuolelle. (Destia 2023a)

## **2.2 Lainsäädäntö**

Suomen päästötavoitteet on määritelty EU:n ja Suomen ilmastolaissa (609/2015). Päästötavoitteiden lisäksi laissa on määritelty päästöpolkuja, ilmastopolitikan suunnittelua ja päästöjen seuranta. Lakien tavoitteena on kansallisin toimin vähentää ihmisen aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä ilmakehään, hillitä ilmastomuutosta ja sopeutua ilmastomuutokseen (Ympäristöministeriö 2022). EU:n ilmastolaki on osa Euroopan vihreän kehityksen ohjelmaa. (Eurooppaneuvosto 2023)

Vuonna 2021 EU:n ilmastotavoitteesta tuli lainvoimainen, kun parlamentti ja neuvosto hyväksyivät EU:n ilmastolain. Siinä nostettiin vuoden 2030 päästövähennystavoitetta 40 prosentista vähintään 55 prosenttiin vuoden 1990 päästötasoon verrattuna. Ilmastolain myötä EU päivittää vanhaa lainsäädäntöään. EU valmistelee Fit for 55-lakipakettia, jonka tarkoituksena on tarkistaa ja päivittää lainsäädäntöä sekä ottaa uusia ohjelmia käyttöön. Lakipaketilla varmistetaan EU:n päästötön kehityssuunta. EU:n Fit for 55- ilmastopaketti sisältää myös ehdotuksen, joka koskee uusiutuvien energialähteitä koskevan direktiivin tarkistamista. Ehdotuksessa energialähteiden yhdistelmissä uusiutuvan energian osuus nostetaan 32 prosentista vähintään 40 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä. (Eurooppaneuvosto 2023)

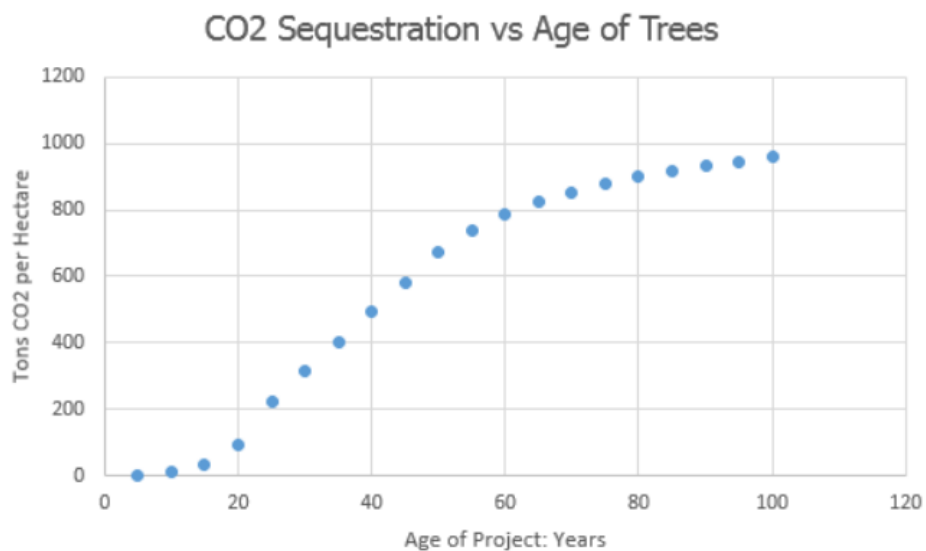
Suomen ilmastolaki täyttää EU:n ilmastolain ja uuden Fit for 55-lakipaketin vaatimukset ja ehdotukset. Suomen ilmastolaki sisältää kokonaispäästöpolut vuosille 2030 ja 2040, joissa päästöt verrataan vuoden 1990 tasoon. Vuodelle 2030 päästötavoite on vähentää päästöjä 60 % ja vuodelle 2040 vähintään 80 % (Valtioneuvosto 2022, s. 71). Suomi on ilmoittanut vuoden 2019 NECP-suunnitelmassa, että uusiutuvan energian osuus on 51 prosenttia vuoteen 2030 mennessä (Ympäristöministeriö 2022). Uusiutuvien energianlähteiden käyttö energian loppukulutuksesta on tällä hetkellä Suomessa yli 40 % (Työ ja elinkeinoministeriö 2023).

## **2.3 Hiilikompensaatio**

Hiilikompensaatiolla tarkoitetaan toimia, joilla vähennetään tai sidotaan ilmakehästä itseaiheutettuja kasvihuonekaasupäästöjä. Yleisemmin hiilikompensaatio on rahoitusta

uusiutuvan energian käyttöön tai puiden istuttamiseen. Suomessa on tarjolla monia toimijoita, joiden avulla voi hyvittää aiheutettuja päästöjä päästömaksua vastaan. Ilmailualalla tunnetuksi on tullut vapaaehtoinen päästökompensaatiomaksu, jolla voi kompensoida oman päästösuuden lentomatkustamisestaan. (Finnair 2022) Kompensaatiotoimien määrittämiseen tarvitaan oikeanlainen kompensatiolaskentaperiaate hiilen sitoutumiselle tai vähentämiselle.

Puiden istuttaminen hiilikompensaationa on hyvin yleinen ratkaisu yritysten hiilikompensoinneissa. Puun massasta noin puolet on hiiltä (Puuinfo 2020; UPM 2024). Esimerkiksi 800 kg kuusessa on 400 kg hiiltä. Puun hiilensidonta on tehokkainta 20–60 vuoden ikäisenä, kuten kuvassa 3 on nähtävissä (SWEL 2024).



**Kuva 3.** Hiilidioksidin sidonta puun elinkaaren aikana (SWEL 2024).

Hiilikompensaatioiden laskentaperiaatteen avulla saadaan arvioitua istutettavan taimikon määrää. Taulukossa 2 on esitetty laskentaperiaatteen oletusarvot ja vakiot. Taulukossa 2 esitetty hiilensidonta on laskettu edustamaan puita, jotka kasvavat Suomessa hyvässä kasvuympäristössä. Hiilen määrät 80-vuotiaassa ja 100-vuotisissa kuusissa perustuvat Luonnonvarakeskuksen arvioihin. Hiilen määrä 60-vuotiaassa kuusessa on arvioitu kuvan 3 avulla. (SWEL 2024; Luonnonvarakeskus 2022)



**Taulukko 2.** Hiilikompensaatiolaskentaperiaatteen oletusarvot ja vakiot (Luonnonvarakeskus 2022; Repola J. 2009).

Istutettava lajite	Kuusi
Hiilidioksidin ja hiilen moolimassojen suhde	$\frac{44 \text{ g/mol}}{12 \text{ g/mol}} = 3,666 \approx 3,67$
Hiilen määrä 60-vuotiaassa kuusessa	300 kg
Hiilen määrä 80-vuotiaassa kuusessa	400 kg
Hiilen määrä 100-vuotiaassa kuusessa	500 kg

Hiilikompensaatiolaskelmia tehdään istutettaville kuusen taimille, jotka kasvavat 60-vuotiaiksi, 80-vuotiaiksi tai 100-vuotiaiksi. Suomessa kuusitalousmetsien päätehakkuut toteutetaan silloin, kun puuston ikä on 60–120 vuotta (Koskinen 2023). Alla on esitetty kompensaatiolaskentaperiaate.

$$\text{Istutettavat taimet [kpl]} = \frac{\text{Sidottava hiilidioksimäärä [kg]}}{\text{Yhden kuusen hiilenmäärä [kg]} \cdot 3,67} \quad (1)$$

Hiilensidonta on tehokasta kuusella ja männyllä, sillä kyseiset puulajit voivat kasvaa isoiksi ja elää satoja vuosia (Koskinen 2023). Hiilen sidontaa tapahtuu vain elävässä puussa ja on voimakkainta puun kasvaessa. Puun sitoman hiilidioksidin määrä vähenee puun kasvun loppuessa. Puun luontaisen kuoleman jälkeen puu alkaa lahoamaan ja sen sitoma hiili vapautuu vähitellen ilmakehään. Puiden sitoman hiilen määrään vaikuttaa myös puiden kasvuympäristö. Karussa maaperässä puut eivät sido taulukon 2 mukaisia hiilensidontamääriä, sillä puut eivät kasva yhtä nopeasti kuin ravinteikkaassa ympäristössä. Myös lyhyempi kasvukausi hidastaa puiden kasvua ja hiilensidontanopeutta. (UPM 2023)

## 3. KALLIOMURSKEEN TUOTANTO

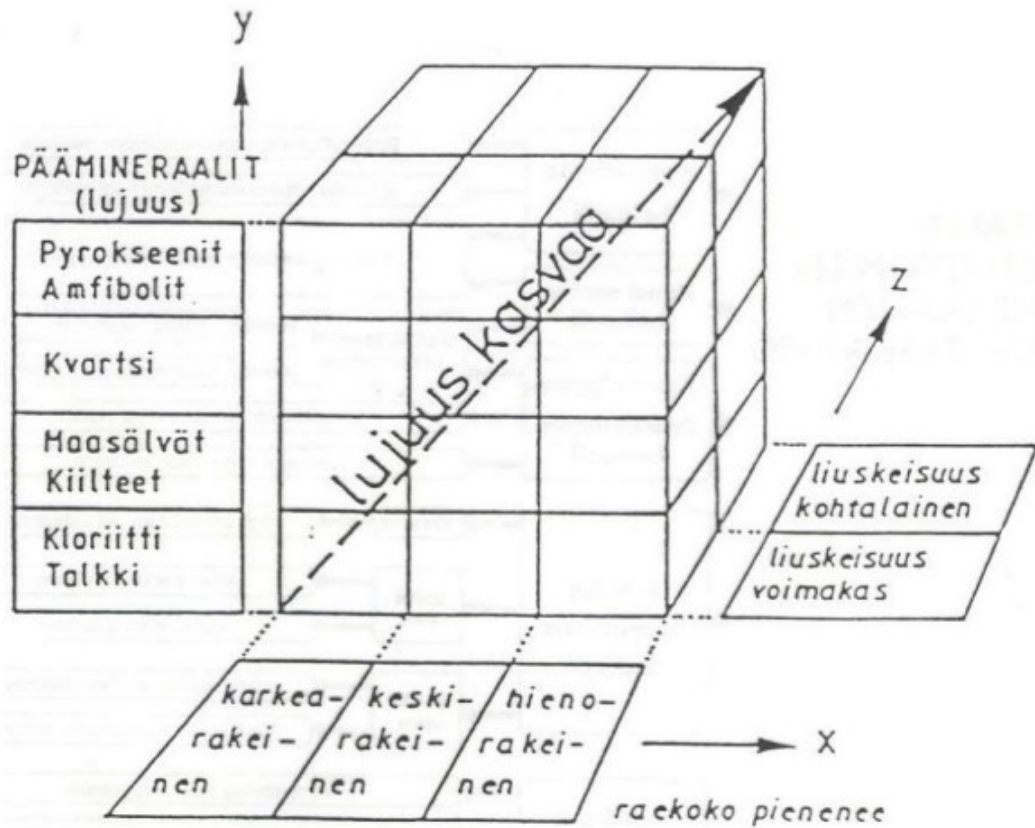
### 3.1 Kalliokiviaines ja sen tuotantoprosessi

Kiviainekset ovat maailman käytetyin rakennusmateriaalien raaka-aine. Kiviaineksia ovat muun muassa sora, hiekka, kalliomurske ja sepeli. Kiviaineksia käytetään laajasti infra- ja talorakentamiseen, kuten esimerkiksi talojen, teiden ja ratojen rakentamiseen sekä kunnossapitoon. Kiviaineksia käytetään Suomessa keskimäärin 100 miljoonaa tonnia vuodessa (Infra ry 2021). Kalliomurskeen osuus käytetyistä kiviaineksista on ollut jopa 60 % (Suomen Kansallinen Geologian Komitea 2019).

Muuhun Eurooppaan verrattuna Suomessa on paljon kiviainestuotantopaikkoja, mutta tuotantopaikkakohtaiset kiviainesten ottomäärät ovat huomattavasti pienempiä. Euroopassa kiviainestuotantopaikkoja on noin 26 000, joista noin 3500 eli 13 % sijaitsee Suomessa (UEPG Aggregates Europe 2023; Aggregates business 2012). Suomen osuus kiviaineksen ottomäärästä on kuitenkin vain noin 2,3 % (Infra ry 2021; Sweco 2023).

Suomen peruskallio kuuluu Fennosarmatian peruskalliolohkoon, joka on yksi maailman vanhimmista kallioperistä. Kallioperän laatu vaihtelee runsaasti. Kallioperä koostuu eri kivilajeista ja rakenteellisesti rikkonaisista kallioista, heikkousvyöhykkeistä ja rakoilusta. Rikkonaisella kalliolla tarkoitetaan tiheän rakoilun heikentämää kalliota, jossa esiintyy rapautumaa. Kallion heikkousvyöhykkeitä ovat rikkonaisen ja löyhän kallion muodostumat. Tiheä rakoilu heikentää huomattavasti kallion rakennusteknisiä ominaisuuksia ja tekee louhinnasta vaikeampaa. Tiheän rakoilun yhteydessä on usein havaittu rapautumista, joka heikentää kiven teknisiä lujuusominaisuuksia. (Maanmittauslaitos 2020)

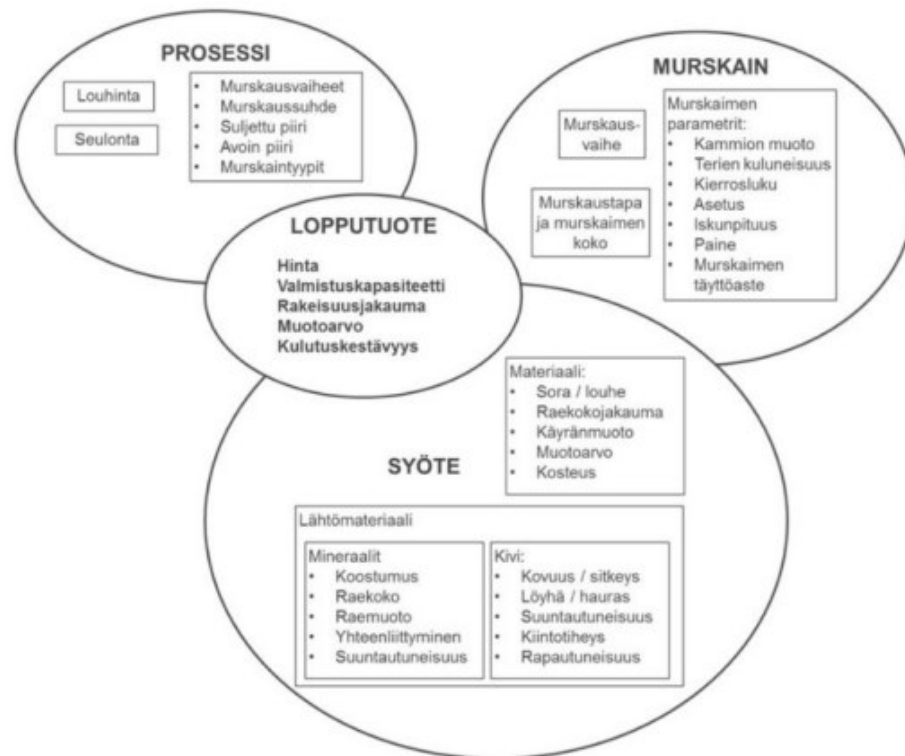
Kivilajien tekniseen lujuuteen vaikuttavat mineraalien raekoko, mineraalikoostumus ja suuntautuneisuus. Niissä kiviaineksissa, joissa mineraalien raekoko on pieni, on parempi lujuus. Tämä johtuu siitä, että pienempirakeisemmat mineraalit liittyvät tiukemmin yhteen kuin suurempirakeisemmat mineraalit. Murskauskaluston energiankulutus on suurempaa silloin, kun murskattavalla kivellä on korkea lujuus. Kuvassa 4 on esitetty kivilajin lujuuteen vaikuttavat tekijät. (Ruuskanen 2006, s. 236)



**Kuva 4.** Kivilajin lujuuteen vaikuttavat tekijät (Ruuskanen 2006, s. 236).

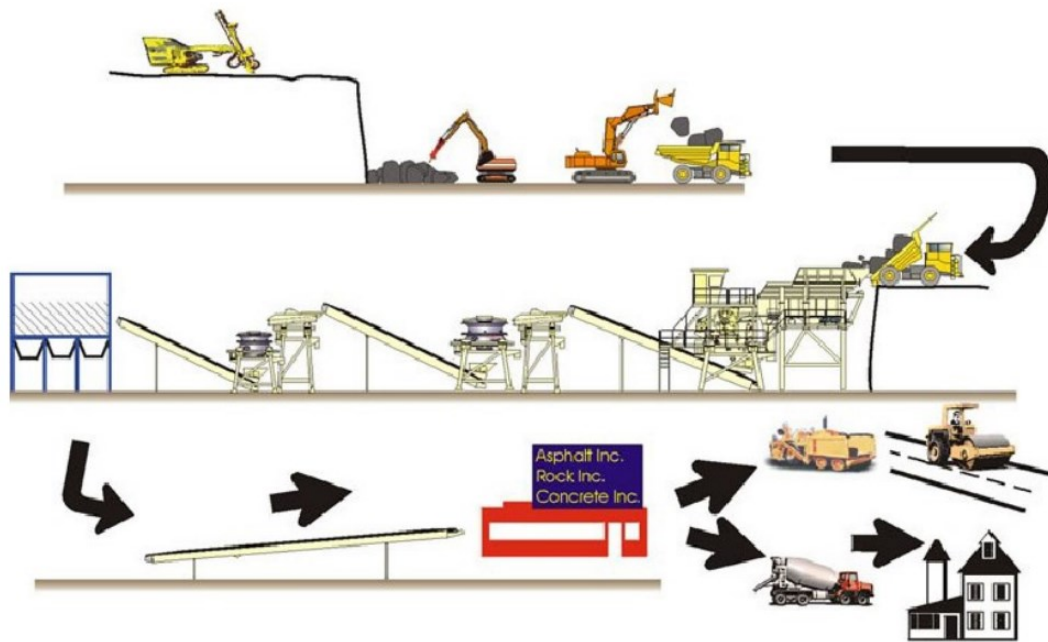
Kiviaineksen lujuutta kuvataan välillisesti joko iskun- tai hiovan kulutuksen kestoa kuvaavilla menetelmillä, kuten Los Angeles-, micro-Deval- ja kuulamylytesteillä, koska kalliomurskeen lujuutta ei voida kuvata puristus- tai vetolujuusmäärittelyillä (Kuula 2015). Los Angeles testeissä tutkitaan kiviaineksen iskunkestävyyttä. Micro-Deval- ja kuulamylytesteissä tutkitaan kiviaineksen kulutuskestävyyttä. Kuulamylytestillä testataan ensisijaisesti asfalttikiviaineksen nastarengaskulutuskestävyyttä. Kyseisten testien arvot kertovat kiviaineksen prosentuaalisesta hienontumisesta, eli mitä pienempi arvo on, sitä parempi kulutus- tai iskunkestävyys kiviaineksella on. Los Angeles tulokset ilmoitetaan LA-luokkana. Micro-Deval-arvot ilmoitetaan  $M_{DE}$  luokkana ja kuulamylyarvot  $A_N$  - luokkana. (SFS-EN 1097-1, s. 5-6; SFS-EN 1097-2 s. 5-6; SFS-EN 1097-9, s. 5-6)

Kiviainestuotteen laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat tuotantoprosessi, murskain ja syöte, jotka vaikuttavat yhdessä lopputuotteen ominaisuuksiin, hintaan ja valmistuskapasiteettiin. Kuvassa 5 on kuvattu kiviainestuotteen laatuun vaikuttavat tekijät.



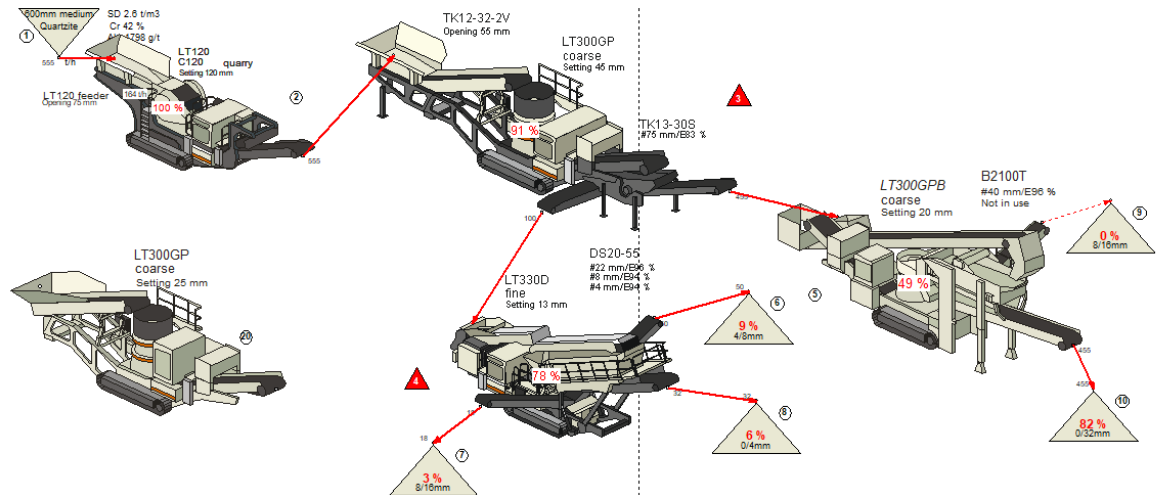
**Kuva 5.** Kiviainestuotteen ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät (Ruuskanen 1999).

Kalliomurskeen tuotantoprosessi koostuu louhinnasta, murskauksesta ja seulonnasta. Louhinnassa kallio räjäytetään. Yleinen käytetty räjähdysaine on kemiitti, joka on emulsiöräjähdysaine. Kemiitin asennusta varten on irrotettavaan kallioon porattava reikiä. Porauksessa täytyy huomioida reiän oikea syvyys, suunta ja etäisyys muihin reikiin. Alkupanoksena käytetään yleensä dynamiittia, joka räjäyttää kemiitin. Yleisesti räjäytyksessä täytyy huomioida monia eri tekijöitä, kuten räjäytyksen suunta, suoja-alueet ja räjähdysaineen määrät. Lisäksi räjäytyksessä tulisi muistaa käyttää maltillisesti räjähdysaineita, sillä liiallisen räjähdysaineen käyttö louhinnassa voi aiheuttaa liikaa mikrohalkeamia kiviainekseen (Peltonen 1986, s.22). Mikrohalkeamien liiallinen määrä heikentää kalliomurskeen laatua. Räjäytyksen jälkeen suuret lohkareet rikotaan sopivamman kokoiseksi, jotta lohkareet voidaan murskata esimurskaimella. Lohkareiden rikotuksessa käytetään yleisemmin kaivinkoneeseen kiinnitettyä hydraulista iskuvasaraa. Kuvassa 6 on esitetty kalliomurskeen tuotantoprosessi periaatekuvana kalliokiviaineksestä käyttökohteeseen.



**Kuva 6.** Kalliomurskeen tuotantoprosessi periaatekuvana kalliokiviaineksesta käyttökohteeseen (Suomen Betoniyhdistys ry 2018).

Murskauksessa kiviaines murskataan haluttuun raekokoon. Kiviaineksen raekoko ( $d/D$ ) määräytyy alemman seulakoon ( $d$ ) ja ylemmän seulakoon ( $D$ ) avulla. Haluttuja lajitteita voivat olla esimerkiksi KaM 0/32, KaM 8/16 ja KaM 32/64. Murskausvaihe jaetaan kolmeen kokonaisuuteen: esimurskaukseen, välimurskaukseen ja jälkimurskaukseen. Esimurskauksessa kiviaineksen raekokoa pienennetään, jotta kiviainesta voidaan kuljettaa kuljetushinnalla ja murskata välimurskaimella. Välimurskauksessa kiviaines voidaan murskata jo haluttuun rakeisuuteen. Välimurskausvaihetta voidaan tarpeen mukaan toistaa useampaa kertaa, että saadaan tuotettua haluttu tuote. Välimurskauksen tuotteet ovat yleensä karkeita murskelaatuja, joita käytetään esimerkiksi teiden pohjamateriaaleina. Jälkimurskaus toteutetaan, jos kiviaineksesta halutaan pienirakeisempaa tai paremman muotoista. Kiviaineksen muoto-ominaisuuksia kuvaa litteysluku. Mitä suurempi on litteysluvun arvo, sitä enemmän kiviaineksessa on litteitä rakeita. Esimerkiksi asfalttikiviainestuotannossa on tarkoituksena tuottaa kuutiomaisia kiviaineksia, sillä litteät kiviainekset murtuvat helpommin kuin kuutiomaiset kiviainekset. Keskipakomurskaimen avulla voidaan tuottaa raemuodoltaan kuutiomaisempia kiviaineksia, jotka sopivat esimerkiksi asfalttiin. Jälkimurskauksesta käytetään myös nimitystä hienomurskaus. (Metso 2023) Kuvassa 7 on esitetty kalliomurskauksen vaiheet.



**Kuva 7. Kalliomurskauksen vaiheet (Metso 2024).**

Seulontaa tapahtuu väli- ja jälkimurskauksen yhteydessä. Murskaimeen voi olla yhdistetty seula tai seula voi olla erillisenä laitteena. Seulojen asetukset määräävät kiviaineksen rakeisuuden. Seulat toimivat parhaiten, kun syöttö on tasaista, sillä kiviainekset lajittuvat materiaalimatoiksi seuloille. Tasainen syöttö tarkoittaa sitä, että materiaalia tuodaan esimurskaukseen tasaisesti. Tasainen syötön ansiosta murskaimet ja seulat tuottavat tehokkaasti hyvälaatuista kiviainesta. Väli- ja jälkimurskauksessa murskaimet toimivat energiatehokkaasti, kun murskaimet ovat täynnä kiviaineksia. Kiviainekset osuvat toisiinsa ennen varsinaista murskausta, jolloin kiviaineksen raekoko pienenee luontaisesti. Epätasainen syöte aiheuttaa murskauslaitokselle lisäkustannuksia, sillä murskaus ja seulonta hidastuvat merkittävästi ja murskaimet kuluvat epätasaisesti. (Sandvik 2023; Metso 2023)

## 3.2 Murskauslaitos ja sen kalusto

### 3.2.1 Murskauslaitoksen kokoonpano

Murskauslaitoksen kokoonpano on aina tapauskohtainen. Murskauslaitos sisältää erilaisia murskaimia, kuljettimia ja erikokoisia seuloja. Murskaimet ja seulat voivat olla kiinteitä tai siirrettäviä. Suomessa suosituimpia murskain- ja seulontamalleja ovat siirrettävät mobiilmurskaimet ja seulat. Kalusto on joko pyöräalusteinen tai tela-alusteinen. Siirrettävä murskauslaitos koostuu pääosin samanlaisista murskaimista ja seuloista kuin kiinteät murskauslaitokset. Suorituskyky on molemmissa lähes samanlainen. Kiinteät murskauslaitokset ovat suosittuja kaivosteollisuudessa ja Euroopan kiviainestuotantopaikoilla, joissa on suuret tuotantomäärät. (Metso 2023)

Suomessa yleisiä murskaimia ovat leuka-, kara-, kartio-, iskupalkki- tai keskipakomurskaimet. Kaikilla murskaintyypeillä pienennetään kiviaineksien kokoa. Poikkeuksena on keskipakomurskain, jolla parannetaan kiven rakeisuuden lisäksi kiven muoto-ominaisuuksia. Keskipakomurskaimesta käytetään myös nimitystä "kubisaattori" (Kone-Kostamo 2020). Murskaimet ovat varustettu mallista riippuen täryseuloilla ja kuljettimilla. Kuljettimien ansiosta kiviainekset saadaan ohjattua jatkokäsittelyyn. Murskaimia on mahdollista saada pöly- ja melusuojatuna. Pöly- ja melusuojatut murskauslaitokset sopivat hyvin esimerkiksi kaupunkiympäristöön. Pienten ottomäärien takia pyöräalustaiset ja tela-alustaiset murskauslaitteet voi tarvittaessa laittaa kokoon, siirtää ja pystyttää uudelleen toisella työmaalla. Pyöräalustaiset murskauslaitokset eivät liiku yhtä joustavasti kuin tela-alustaiset murskainlaitokset. Tela-alustaiset murskaus- ja seulontalaitteet liikkuvat paremmin esimerkiksi kaivannoissa ja epätasaisessa maastossa, mikä voi lisätä kiviainestuotannon tehokkuutta. Työmaalla nopeat siirrot ja urakkapaikalta toiselle vähentävät tehokkaasti kuljetusten päästöjä. (Metso 2023) Kuvassa 8 on esitetty pyöräalustainen murskauslaitos.



**Kuva 8.** Kallionmurskauslaitos Destian työmaalla.

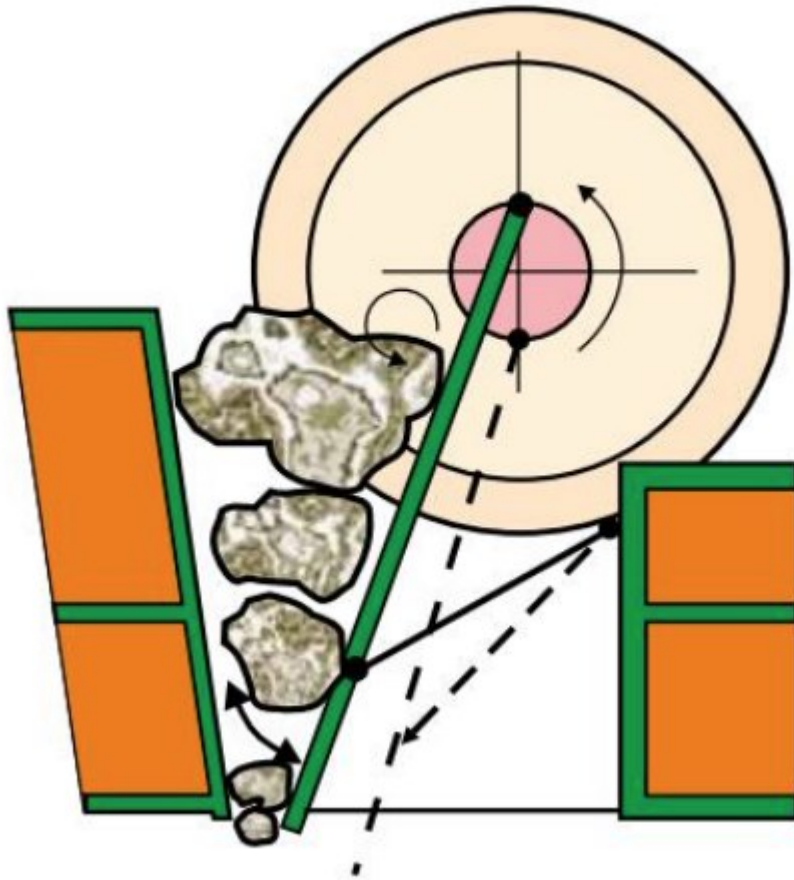
Murskauslaitoksissa energialähteenä ovat polttoöljyllä toimivat aggregaatit tai polttomoottorit. Murskauslaitos voi toimia myös kokonaan sähköllä, jolloin koneet ovat akkukäyttöisiä ja murskauskalusto on yhdistetty sähköverkkoon (Sandvik 2023).

### 3.2.2 Murskaimet

Kiviainestuotannossa murskaimet jaotellaan joko esi-, väli- tai jälkimurskaimiin. Sama murskain voi toimia sekä esi- että välimurskaimena ja myös jälkimurskaimena. Murskaimet jaetaan kahteen osaan niiden toimintaperiaatteen mukaan, puristusvoimaan perustuvat murskaimet ja iskumurskaimet. Puristusvoimalla toimivia murskaimia ovat esimerkiksi leuka-, valssi-, kartio- ja karamurskaimet. Iskumurskaimet toimivat nimensä mukaisesti iskuvoimalla. Iskumurskaimia ovat esimerkiksi vasaramurskaimet ja iskupalkkimurskaimet. (Berrocal 2014, s. 21 – 24) Kalliomurskauksessa käytetään usein leuka-, kara-, iskupalkki-, kartio- ja keskipakomurskaimia. Murskaimien lisäksi kalliomurskauksen käytetään apuna pyöräkoneita ja kaivinkoneita.

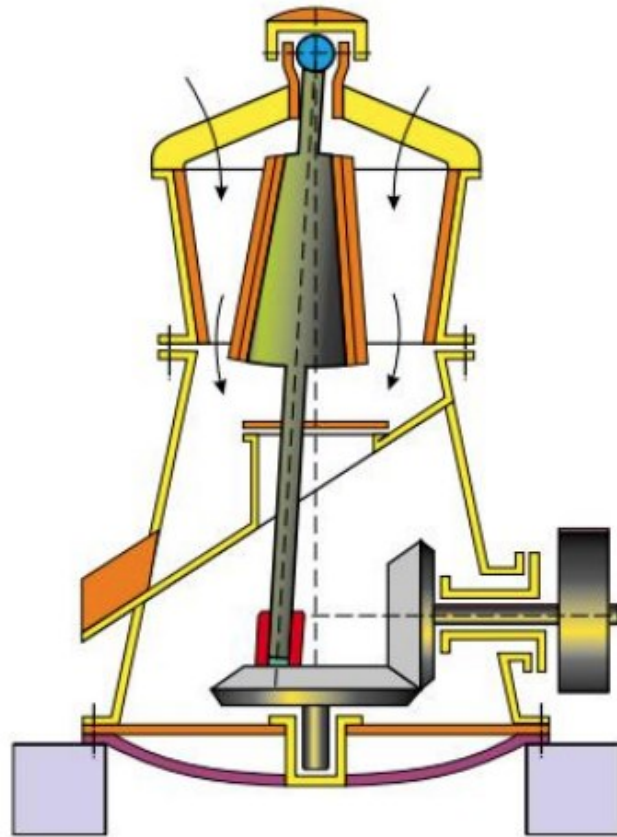
Leukamurskaimia käytetään runsaasti esimurskauksessa, sillä leukamurskain pienentää materiaalin sen kokoiseksi, että se voidaan siirtää kuljettimella seuraavaan murskausvaiheeseen. Toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen, sillä leukamurskaimen leuka puristaa kiven ja muun aineksen pienemmäksi. Leukamurskaimet soveltuvat myös hyvin sellaisille kiviaineksille, joilla on korkea lujuus. Leukamurskaimia on kahta eri tyyppiä: yksipalkkinen tai kaksipalkkinen leukamurskain. Yksipalkkisen leukamurskaimen päällä on epäkeskoakseli. Puristuksen aiheuttaa akselin pyörintä yhdessä työninlaatan kanssa. Kaksipalkkisessa murskaimessa on nimensä mukaisesti kaksi akselia ja kaksi työninlaattaa. Yksipalkkinen leukamurskain mahdollistaa suuremman leuan kapasiteetin verrattuna samankokoiseen kaksipalkkiseen leukaan. Tämä johtuu leuan liikkeistä, joka aiheuttaa puristusta sekä materiaalin tulo- että poistokohdassa. Leukamurskaimen käyttö esimurskauksessa on melko yleistä, sillä murskaimeen mahtuu suuria lohkareita. Suuri syöttöaukko esimurskaimessa vähentää lohkareiden pienentämistarvetta. (Metso 2023) Leukamurskaimen käytössä tulisi muistaa se, jos pölynsidonnassa käytetään kastelua, niin kastelu tulee toteuttaa leukamurskausvaiheen jälkeen koska kostea syöte hidastaa leukamurskaimen toimintaa merkittävästi (Sandvik 2023). Leukamurskain voi myös tukkeutua, jos syöte sisältää paljon kosteaa hienoainesta. Kuvassa 9 on esitetty yksipalkkinen leukamurskain.





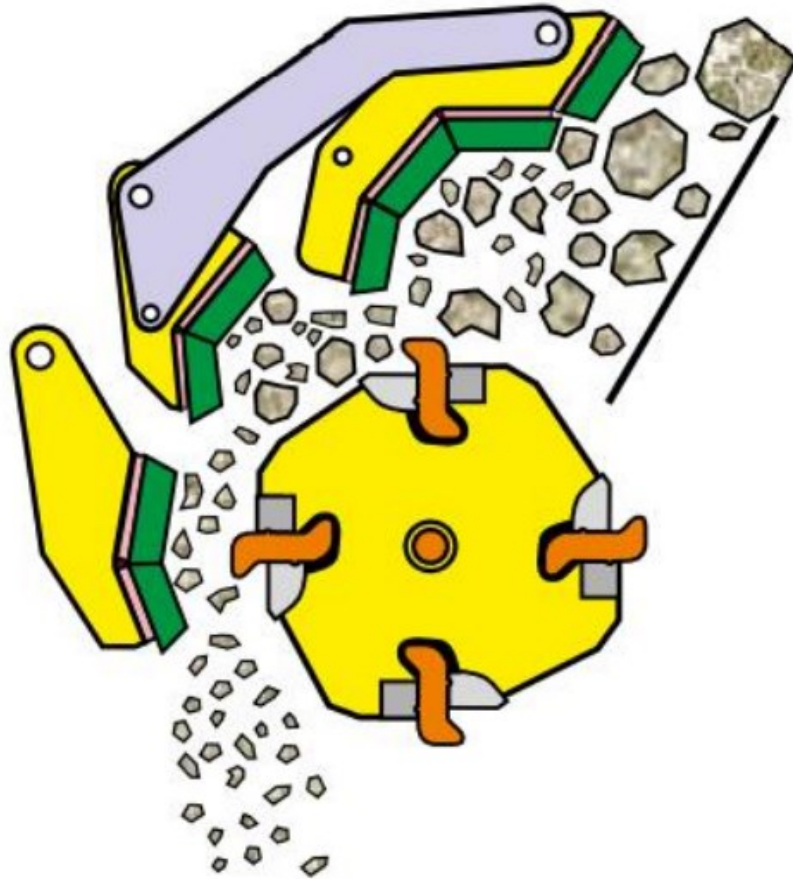
**Kuva 9.** Yksipalkkinen leukamurskain (Berrocal 2014, s.24).

Esimurskaimena voidaan käyttää karamurskaimia. Käytännössä karamurskainta käytetään esimurskaimena ainoastaan suurissa kaivoksissa. Esikaramurskaimilla on suuri kapasiteetti, joka soveltuu suurille massoille. Kiviainestuotannossa karamurskain soveltuu välimurskaukseen. Karamurskaimen kapasiteetti on suuri, koska sen pyöreä poistoaukko on mitoitettu väljäksi. Syöttöaukko on vaan pienempi verrattuna leukamurskaimeen. Karamurskain koostuu oskilloivasta akselista eli heiluvasta akselista, murskauskammioista, ulkoisesta kiinteästä osasta ja värähtelevän akselin asennelmaan kiinnitetystä sisäisestä osasta. Murskaus perustuu kammiota ympäröivien kulutusosien välissä tapahtuvaan jatkuvaan puristukseen. Karamurskaimien käytössä suositellaan tehokasta syöttöä, sillä murskattava materiaali aiheuttaa lisäpuristusta täydessä kammiossa (Berrocal 2014, s.21). Näin karamurskaimen käyttö on energia- ja kustannustehokasta. Karamurskaimet ovat yleensä varustettu hydraulisella asetuksensäätöjärjestelmällä, jolla voidaan säädellä kiviaineksen raekokoa. (Metso 2023) Kuvassa 10 on esitetty karamurskain.



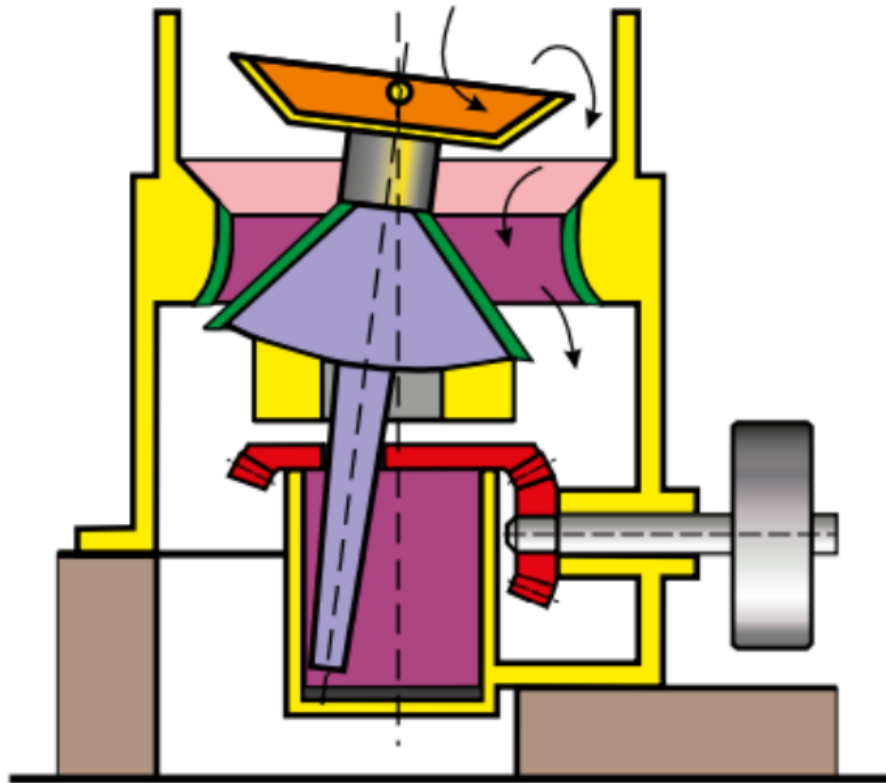
**Kuva 10.** Karamurskain (Berrocal 2014, s.21).

Iskupalkkimurskaimia käytetään esi- väli- tai jälkimurskauksessa. Esimurskauksessa esi-iskupalkkimurskaimella on suuri kapasiteetti. Se on suunniteltu siten, että se voi ottaa suurikokoista syötettä. Esi-iskupalkkimurskaimia käytetään yleensä pehmeämmissä ja keskikovissa kiviaineksissa. Iskupalkkimurskaimet ovat käytössä yleisesti kiviainestuo- tannossa, kaivoksilla ja kierrätysmurskauksissa. (Hakapää ja Lappalainen 2021, s.203) Iskupalkkimurskaimet ovat vaaka-akselisia murskaimia. Murskettava kiviaines tulee murskaimen yläosasta. Murskaimen toiminta perustuu roottoreihin kiinnitettyjen iskuva- saroiden tai iskupalkkien toimintaan. Iskuvasarat tai -palkit osuvat murskattavaan ainek- seen niiden pyöriessä. Iskuvasaroiden ja -palkkien toiminnan lisäksi murskausta tapah- tuu kiviainepartikkelien välillä, koska kiviainekset sinkoutuvat toisiansa vasten pyörimis- liikkeen ansiosta. (Berrocal 2014, s. 14) Kuvassa 11 on esitetty iskupalkkimurskain.



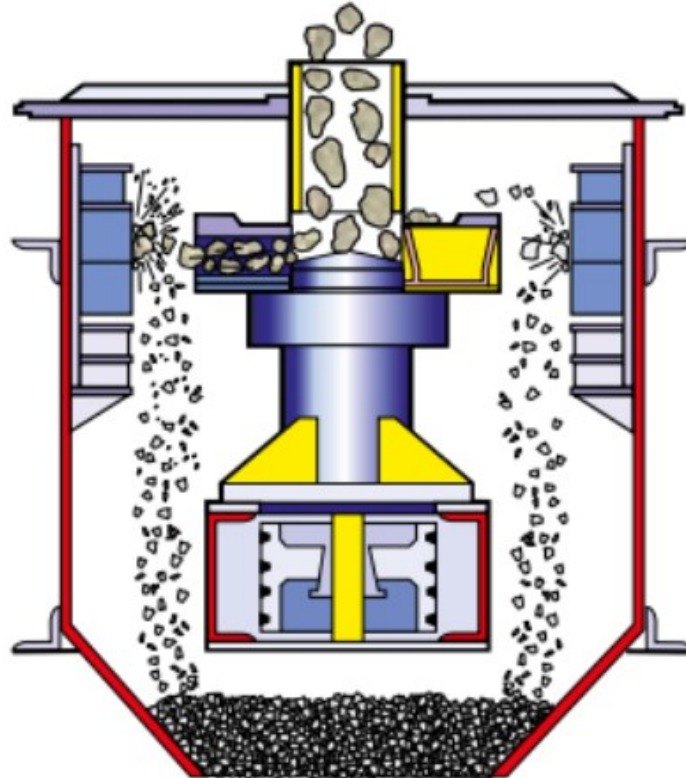
**Kuva 11.** Iskupalkkimurskain (Berrocal 2014, s. 22).

Kartiomurskaimia käytetään yleisemmin väli- ja jälkimurskauksissa, koska kartiomurskaimella on hyvä kapasiteetti ja se on käytöltään edullinen. Syötettävän materiaalin tulee olla riittävän pientä, että kartiomurskain voi pienentää sen. Kartiomurskaimen toimintaperiaate on hyvin samankaltainen kuin karamurskaimella. Murskattava materiaali syötetään ylhäältä päin. Murskaus perustuu pyörivään epäkeskoakseliin, jota pyöritetään hammaskehän ja vetopyörän avulla. Murskattava materiaali hajoaa pienemmäksi sisäosan ja murskauskammion kulutusosien välissä tapahtuvassa puristuksessa ja pyörimisliikkeessä. Kartiomurskain koostuu samoista osista kuin karamurskain: heiluvasta akselista, murskauskammion kulutusosien välissä tapahtuvassa puristuksessa ja pyörimisliikkeessä. Kartiomurskain koostuu samoista osista kuin karamurskain: heiluvasta akselista, murskauskammion kulutusosien välissä tapahtuvassa puristuksessa ja pyörimisliikkeessä. Kartiomurskaimen hienonnussuhde on 3/1 ja 5/1 väliltä. Suhde vastaa leukamurskaimen hienonnussuhdetta (Balasubramanian 2017, s. 9). Hienonnussuhde on syötteen ja tuotteen raekokojen välinen suhde. (Hakapää ja Lappalainen 2011 s. 202) Kartiomurskain on esitetty kuvassa 12.



**Kuva 12.** Kartiomurskain (Berrocal 2014 s.22).

Keskipakomurskain toimii jälkimurskauksessa kiviaineksen viimeistelijänä. Keskipakomurskainta käytetään erityisesti silloin, kun kiviaineksestä halutaan paremman muotoista. Varsinkin asfalttikiviaineksen tuotannossa vaaditaan hyviä muoto-ominaisuuksia, jolloin keskipakomurskaimen käyttö voi olla tarpeen jälkimurskaimena. Keskimurskaimessa toiminta perustuu iskuun, joka hajottaa kiviaineksen pienemmäksi tai paremman muotoisemmaksi. Kiviainekset murskautuvat tai muotoutuvat osuessaan kovalla nopeudella ulkovaippaan. Kivet muotoutuvat myös siinä, kun ne osuvat toisiinsa. Keskipakomurskaimessa materiaali sinkoaa kovalla nopeudella roottorin keskeltä olevista reunan aukoista. Murskaimen pääakseli on asennettu pystyasentoon. (Berrocal, 2014, s. 23) Kuvassa 13 on esitetty keskipakomurskain.



**Kuva 13.** Keskipakomurskain (Berrocal 2014, s. 23).

Mobiilimurskainlaitoksien ja kiinteiden murskainlaitoksien toimintaan varten tarvitaan useita kuljettimia, jotta murskauslaitos toimii. Joissain murskainmalleissa on valmiiksi rakennettu kuljettimia mutta useasti murskaustoiminta vaatii erillisiä kuljettimia. Kiviaines-tuotannossa hihnakuljettimet ovat suosittuja, koska kuljetettavaa materiaalia voidaan lastata ja purkaa kuljettimen toimiessa.

### 3.2.3 Seulat

Murskauksen lopputuotteet lajitellaan raekoon mukaan eri prosessivaiheisiin sijoitettujen seulojen avulla. Seuloilla karsitaan myös murskaimelle liian suuret kappaleet tai hienoaines pois murskausprosessin parantamiseksi. Murskaustoiminnassa käytetään kahdenlaisia seuloja joko staattisia tai dynaamisia. Staattisen seula koostuu vierekkäistä staattisista tangoista, jotka muodostavat säleikön. Staattisella seulalla erotellaan liian suuret tai liian pienet kiviainekset pois. Staattista seulaa käytetään esimerkiksi silloin, kun halutaan erotella hieno kiviaines karkeasta ennen murskausta tai erotella karkea aines ennen hienon kiviaineksen seulaa. Dynaaminen seula koostuu tärisevästä tai värähtelevästä säleiköstä. (Hakapää ja Lappalainen 2011, s. 204) Kuvassa 14 on esitetty dynaaminen mobiiliseula.



**Kuva 14.** Dynaaminen mobiiliseula (Rotator 2023).

Dynaamisesta seulasta käytetään yleisemmin nimitystä täryseula tai tärysäleikkö. Seulan seulantaso voi olla kalteva kulmassa, vaakatasossa tai useammassa tasossa. Dynaamisen seulan värähtely aiheutetaan joko mekaanisesti tai moottorin avulla. Dynaamisen seulan värähtelyssä pitää muistaa noudattaa valmistajan ilmoittamaan kierrosluku- ja suositusta, sillä liian suuri kierrosluku voi aiheuttaa seulan resonointia, jos värähtelyn taajuus on seulan ominaisvärähtelyn tasolla. Resonointi voi aiheuttaa seulalle vaurioita ja seulan toiminnan heikentymistä. Kiviainestuotannossa käytetyistä seuloista noin 90 % on dynaamisia seuloja. (Sandvik 2023)

### 3.2.4 Muut työkoneet

Pyöräkuormaaja on nelipyöräinen kone, jota käytetään maan tai muun irtonaisen tavarantoimen siirrossa. Useimmat käytössä olevista pyöräkuormaajista ovat runko-ohjattavia. Tämä tarkoittaa sitä, että renkaat eivät käänny vaan keskeltä akseloitu runko kääntyy. Pyöräkuormaajat ovat erittäin käytetty konetyyppi maarakentamisessa ja kiviainestuotannossa. Kuvassa 15 on esitetty pyöräkuormaaja.



**Kuva 15.** Pyöräkuormaaja Destian kalliokiviainestuantopaikalla.

Kiviainestuantannossa kaivinkone voi toimia erilaisissa tehtävissä, kuten esimerkiksi louheen syöttämisessä esimurskaimelle tai isompien lohkareiden rikotuksessa (Kuva 16). Kuvassa 16 on esitetty kaivinkone, johon on kiinnitetty hydraulinen iskuvasara.



**Kuva 16.** Kaivinkone, johon kiinnitetty hydraulinen iskuvasara (Kivirock-lehti 2019).

Isojen kivien rikotus toteutetaan kuvan 16 mukaisella tavalla. Iskuvaralla saadaan rikottua kivet sopivamman kokoiseksi esimurskaimelle.

### 3.3 Energiankulutus murskauksessa

Kalliomurskauksen tuotantoprosessi on laajasti energiaa ja kalustoa kuluttava prosessi. Murskauksen tehokkuuteen ja energiankulutukseen vaikuttavat raaka-aineen lujuus, murskattavien lohkareiden koko ja murskauskaluston kunto. Energiaa kuluu lämmön muodostumiseen ja laitteiston aiheuttamaan kitkan voittamiseen. Murskauksen hienonnutusprosessit ovat myös paljon energiaa kuluttavia. Tuotetun ja lastatun kalliomurskeen energian kokonaiskulutus on keskimäärin noin 6 kWh/t (Suomen ympäristö 2010). Owen on arvioinut energian jakautuvan murskauksessa seuraavasti (Coulson & Richardson 2002, s. 102):

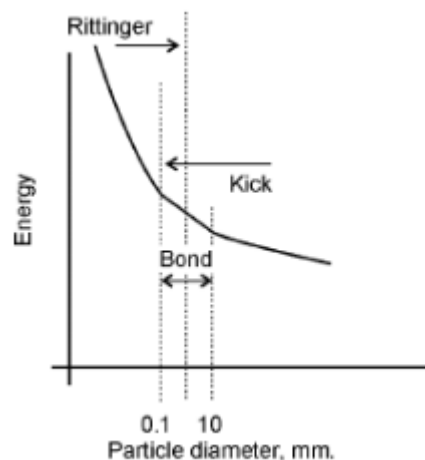
1. Hiukkasten elastiseen muodonmuutokseen ennen murtumista
2. Joustamattomaan muodonmuutokseen, joka johtaa raekoon pienenemiseen
3. Murskauslaitteiston elastiseen vääristymiseen
4. Hiukkasten väliseen kitkaan sekä hiukkasten ja koneen väliseen kitkaan
5. Meluun, lämpöön ja tärinään
6. Kitkahäviöön murskaimessa



Owen on arvioinut, että ainoastaan noin 10 % kokonaisenergiasta on hyödyllisesti hyödynnetty murskauslaitoksessa. (Coulson & Richardson 2002, s. 102) Murskauslaitoksissa tarvittava energia tuotetaan useasti aggregaatin avulla (Sandvik 2023). Aggregaatin hyötysuhdearviot ovat väliltä 0,16-0,4 kirjallisuuteen perustuen (Savonia 2011; General Power 2024).

Murskauskaluston valinta on tärkeässä roolissa energiatehokkuuden takia. Energiankulutukseen voidaan vaikuttaa murskaimien määrällä. Murskaimen kyvyllä murskata syöte entistä pienempään kokoon on merkitystä tarvittavien murskaimien määrään. Energiankulutukseen vaikuttaa myös syöttöaukon suuruus ja haluttu lopputuote. Suurempi syöttöaukko mahdollistaa suurempien lohokareiden murskauksen esimurskauksessa. Kallion lujuus täytyy huomioida murskaimien valinnassa, sillä korkea lujuuden omaava kallio vaatii tehokkaita ja siihen soveltuvia murskaimia. Haluttu lopputuote vaikuttaa myös kaluston valintaan. (Sandvik 2023)

Kiven murskaukseen vaadittavaa energiaa on mahdotonta arvioida tarkasti, mutta on olemassa kolme empiiristä arviointimenettelyä, joiden avulla voi arvioida kiven murskaukseen vaadittavaa energiaa, esimerkiksi Rittingerin, Kickin ja Bondin arviointimenettelyt. Arviointimenettelyissä on määritelty kolme eri laskentamenetelmää, joilla saadaan arvioitua kiven murskaukseen vaadittavaa energiaa. Arviointimenettelyt soveltuvat eri raekoon kiviaineksille. Kick -arviointimenettely soveltuu parhaiten karkean kiviaineksen murskaukseen, kun taas Rittingerin ja Bondin arviointimenettelyt soveltuvat hienomman kiviaineksen murskaukseen. Kuvassa 17 on esitetty Rittingerin, Kickin ja Bondin arviointimenettelyjen suhde murskaukseen vaadittavan energian ja murskattavan kiviaineksen raekoon välillä. (Coulson & Richardson 2002, s 100)



**Kuva 17.** Bond-, Rittinger-, ja Kick -arviointimenettelyjen suhde murskattavan kiviaineksen ja sen raekoon välillä (Holdich 2002, s. 115).

Kuvassa 17 on havaittavissa, että kiviainekseen murskaukseen vaaditaan sitä enemmän energiaa mitä pienempää kiviainesta murskataan. Kalliomurskauksessa murskattavan aineksen raekoko on kuvan 16 mukaan Kick -arviointimenettelyn puolella, sillä murskattava materiaali kalliomurskauksessa on yleensä yli 10 mm kokoista. Kick -arviointimenettely perustuu kaavaan 2 ja sillä voidaan arvioida tietyn lajitteen tuotannon energiankulutusta. (Considine 1974; Coulson & Richardson 2002, s 100)

$$E_k = K_k \sigma_p \cdot \ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right), \text{ josta} \quad (2)$$

$$E_k = \text{Energian kulutus} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{t}}\right]$$

$$K_k = \text{Kickin materiaalivakio} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{MPa}\cdot\text{t}}\right]$$

$$\sigma_p = \text{tutkittavan materiaalin puristuslujuus} [\text{MPa}]$$

$$x_1 = \text{syötemateriaalin raekoko} [\text{m}]$$

$$x_2 = \text{lopputuotteen raekoko} [\text{m}]$$

Kaava ottaa ainoastaan huomioon sen, että kuinka paljon energiaa vaaditaan syötemateriaalin raekoon pienentämisestä lopputuotteen raekooksi. Kaavaa voidaan hyödyntää esimerkiksi murskaimen energiankulutuksen määrittämisessä (Gupta & Yan 2006, s.65-67). Kick -arviointimenettelyssä oletetaan, että tarvittava energia on suoraan verrannollinen syötemateriaalin raekoon ja lopputuotteen raekoon suhteeseen. Tämä tarkoittaa sitä, että tietyn materiaalmäärän murskaamiseen esimerkiksi 50 millimetristä 25 millimetrin kokoon tarvittava energia on sama kuin 12 millimetrin materiaalikoon pienentäminen 6 millimetriin. Kick -arviointimenettely ei ota huomioon aggregaatin hyötysuhdetta eikä murskauslaitoksen kuljettimien tai ylimääräisen seulontakaluston energiankulutuksia. Kick -arviointimenettely perustuu Rittingerin arviointimenettelyyn, joka on esitelty ensimmäisen kerran vuonna 1860. (Considine 1974; Coulson & Richardson 2002, s. 100)

Taulukossa 3 on esitetty eri lajitteiden tuotannon energiankulutuksia. Lajitteiden Los Angeles -arvot ovat 30 ja 35 välillä. Esimerkkienergiankulutukset on laskettu Metson kehittämän laskentaohjelmiston Brunon avulla. Taulukon 3 energiankulutukset kuvastavat niitä energiankulutuksia, jotka on hyödynnetty hyödyllisesti murskauslaitoksessa. (Metso 2024)

**Taulukko 3.** Erilaisten kiviainestuotteiden murskauksen energiankulutus 1000 käyttötuntia kohden (Metso 2024).

Arvioitu energiankulutus kalliomurskauksessa 1000 käyttötuntia kohden			
Esimerkki 1		Esimerkki 2	
Tuotetut lajitteet	KaM 0/90 mm KaM 0/11 mm	Tuotetut lajitteet	KaM 0/4 mm KaM 4/8 mm KaM 8/16 mm KaM 0/31 mm
Los Angeles -arvojen vaihteluus	30-35		30-35
Murskaimet tai seulat järjestyksessä	Energia [kWh]	Murskaimet tai seulat	Energia [kWh]
Seula (B16-44-2V)	NA	Kuljetin (B13-32-V)	NA
Leukamurskain (C125) ja rikotin (MB352)	131563	Leukamurskain (C125) ja rikotin (MB352)	140800
Karamurskain (GP300S)	46764	Karamurskain (GP300S)	71895
Seula (A132L)	NA	Seula (A132L)	NA
Kartiomurskain(G1315)	NA	Karamurskain (GP550)	232652
Seula (A132L)	NA	Seula (A132L)	NA
		Seula (B2100T)	9738
<b>Energiankulutus [kWh/t]</b>	<b>0,55</b>	<b>Energiankulutus [kWh/t]</b>	<b>1,28</b>

Taulukosta 3 huomataan, että energiankulutus on suurempaa mitä pienirakeisempaa kiviainesta tuotetaan. Ensimmäisessä murskausesimerkissä, jossa tuotettiin KaM 0/90 mm ja 0/11 mm, energiankulutus oli 0,55 kWh/t. Toisessa murskausesimerkissä, jossa tuotettiin KaM 0/4 mm, KaM 4/8 mm, KaM 8/16 mm ja KaM 0/31 mm kiviainestuotteita, energiankulutus oli 1,28.

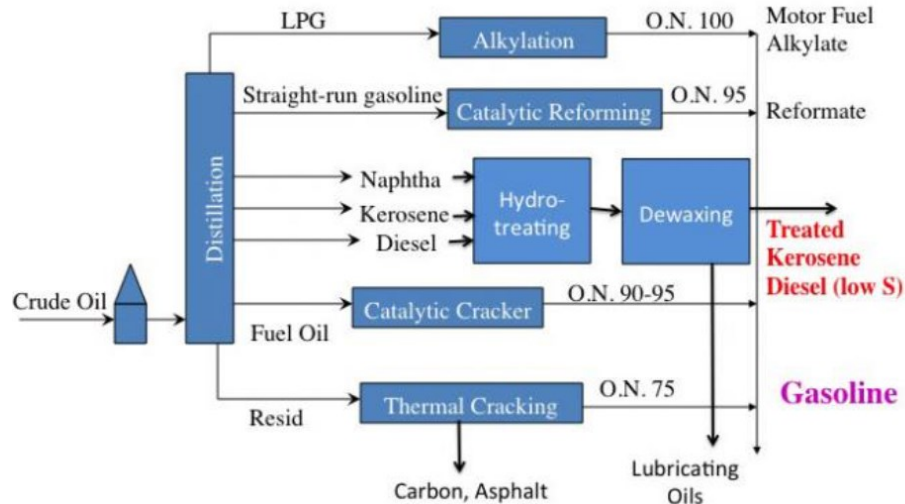
## 4. KIVIAINESTUOTANNON ENERGIALÄHTEET

### 4.1 Dieselpolttoaineet

#### 4.1.1 Kevyt polttoöljy

Polttoöljy on raakaöljyn jalostustuote. Polttoöljyt jaetaan kevyisiin polttoöljyihin ja raskaisiin polttoöljyihin. Suomessa käytetään kevyttä polttoöljyä niin työkoneissa kuin lämmityslaitteistossakin. Lämmityslaitteistossa käytetään lämmitysöljyä ja työkoneissa moottoripolttoöljyä. Raskasta polttoöljyä käytetään vähemmän ja sitä käytetään lähinnä laivoissa ja suurissa lämpövoimaloissa. Työkoneiden dieselmootoreihin tarkoitettu moottoripolttoöljy on kevyemmin verotettu kuin diesel, minkä vuoksi polttoöljyä ei saa käyttää tieliikenteessä. Kevyttä polttoöljyä on saatavilla sekä kesä- että talvilaatuksena. Kesäläätuinen polttoöljy kestää pakkasta noin -8 asteen verran ja talvilaatu voi kestää jopa -40 astetta (Neste 2023b). Kevyt polttoöljy on ominaisuuksiltaan samanlaista kuin diesel ja sitä on saatavilla myös rikittömänä. Kevyt polttoöljy sisältää punaista väriainetta, josta tunnistaa, että kyseessä on polttoöljy. Punainen väriaine värjää myös polttonestejärjestelmää voimakkaasti. Kevyen polttoöljyn laatuvaatimukset ovat standardoitu kansallisella standardilla SFS 5968 (SFS 5968, s. 5).

Murskauslaitoksen tarvitsema energia tuotetaan polttomootoreilla tai energialähteenä on aggregaatilla tuotettava sähkövirta. Kiviainestuotannossa kevyt polttoöljy on ollut vuosien ajan suosittu energialähde. Porvoossa toimii Nesteen omistama öljynjalostamo, joka tuottaa raakaöljystä muun muassa kevyttä polttoöljyä. Porvoon öljynjalostamolla tuotetaan kevyen polttoöljyn lisäksi esimerkiksi vähärikkisiä ja uusiutuvia polttoaineita. (Neste 2024a) Kuvassa 18 on esitetty raakaöljystä valmistettävien tuotteiden valmistusprosessi.



**Kuva 18.** Raakaöljystä valmistettavien tuotteiden valmistusprosessi (Harold H. Schobert 2002, s.20).

Suomen raakaöljyn alkuperämaa on nykyään pääosin Norja (Ulkoministeriö 2023). Vuonna 2021 raakaöljyn pääasiallinen alkuperämaa oli Venäjä, jopa 79,6 % raakaöljystä oli peräisin Venäjältä. Vuoden 2022 lopulla Venäjän osuus raakaöljystä oli 13,9 % ja Norjan osuus 70,4 %. Venäjän raakaöljyn korvaaminen norjalaisella raakaöljyllä johtuu Venäjän aloittamasta hyökkäyssodasta Ukrainassa. EU on asettanut Venäjän vastaisia pakotteita, joissa esimerkiksi kielletään meriteitse toimitettavan raakaöljyn ja tiettyjen öljytuotteiden ostoa, vientiä tai siirtoa Venäjältä EU:hun. EU:n rajoitukset vähentävät noin 90 % Venäjältä Eurooppaan tuodusta öljystä. (Eurooppa neuvosto 2024; Tulli 2023)

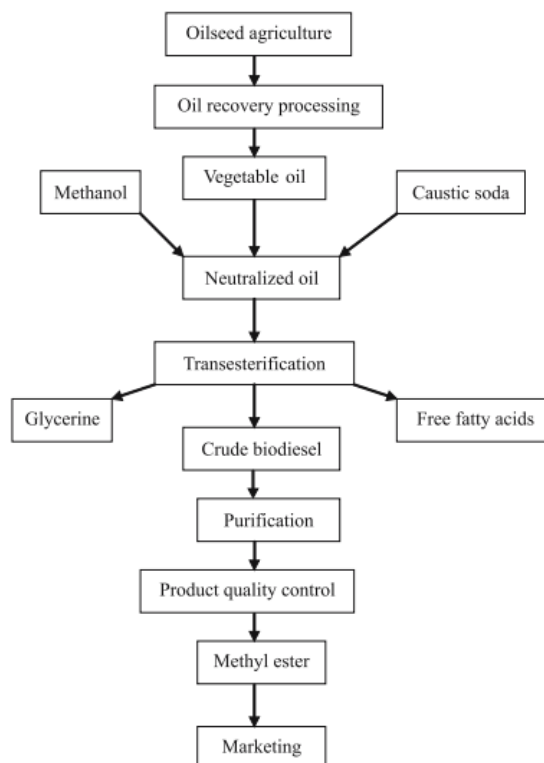
#### 4.1.2 Biodiesel

Biodieseliä valmistetaan uusiutuvista luonnon raaka-aineista, kuten esimerkiksi rypsiä, vehnää, kierrätysöljystä ja palmuöljystä. Biodieselillä tarkoitetaan kaikkia dieseliä vastaavia setaanilukuisia eloperäisiä polttoaineita. Biodiesel voi olla valmistettu hyvin erilaisista raaka-aineista. Markkinoilla yleisimmät biodieselit ovat FAME (Fatty Acid Methyl Ester) ja RME (Rapeseed Methyl Ester). FAME:lla tarkoitetaan rasvahapon metyyliesteriä ja RME:llä tarkoitetaan rypsimetyyliesteriä. Biodieselit eroavat kemialliselta koostumukselta niin fossiilisesta kuin uusiutuvasta dieselistä. Uusiutuva diesel on yksi vetykäsitellyn kasviöljyn tuotteista. Biodiesel on biohajoava, myrkytön ja rikitön polttoaine. Biodieselin pakokaasupäästöt ovat pienemmät kuin bensiinillä, ja samalla sen käyttö vähentää fossiilisten polttoaineiden tarvetta. Biodieselin kylmäominaisuudet ovat riippuvaisia käytetyistä raaka-aineista. Suomessa yleisemmin käytetään RME biodieseliä. Biodiese-

liä saa käyttää dieseltuotteissa enintään 7 % pitoisuuksina. Biodieselin käytöllä on havaittu korkeampia typen oksidipäästöjä ja moottorin suurempaa kulumista. (Neste 2023d; Ayhan Demirbas 2008, s 116-141)

FAME on biopohjainen diesel. FAME-biodieselin kansainvälinen standardi on EN 14214. FAME-tyyppisissä polttoaineissa esteripitoisuuden kuuluu olla standardin EN 14214 mukaan 96,5 massaprosenttia. (SFS-EN 14214 2019, s.1) FAME-biodieselin sekoittaminen diesel tuotteeseen heikentää seoksen pitkäaikaiskestävyyttä (Neste 2023d). FAME pohjaisessa biodieselissä energiapitoisuus on 9,2 kWh/litra (Motiva 2024).

Rypsiöljystä valmistettua biodieseliä kutsutaan RME:ksi. RME-biodieseliä on mahdollista käyttää dieselmooottoreissa normaalisti. RME:n biodieselin käytöllä on ollut haasteita vanhempien polttoaineputkien tiivisteissä, jotka ovat haurastuneet vähitellen biodieseliä käytettäessä. Ongelma on korjautunut, kun luonnonkumista valmistetut tiivisteet on vaihdettu muovisiksi. (Keith Addison 1999) Kuvassa 19 on esitetty biodieselin valmistusprosessi.



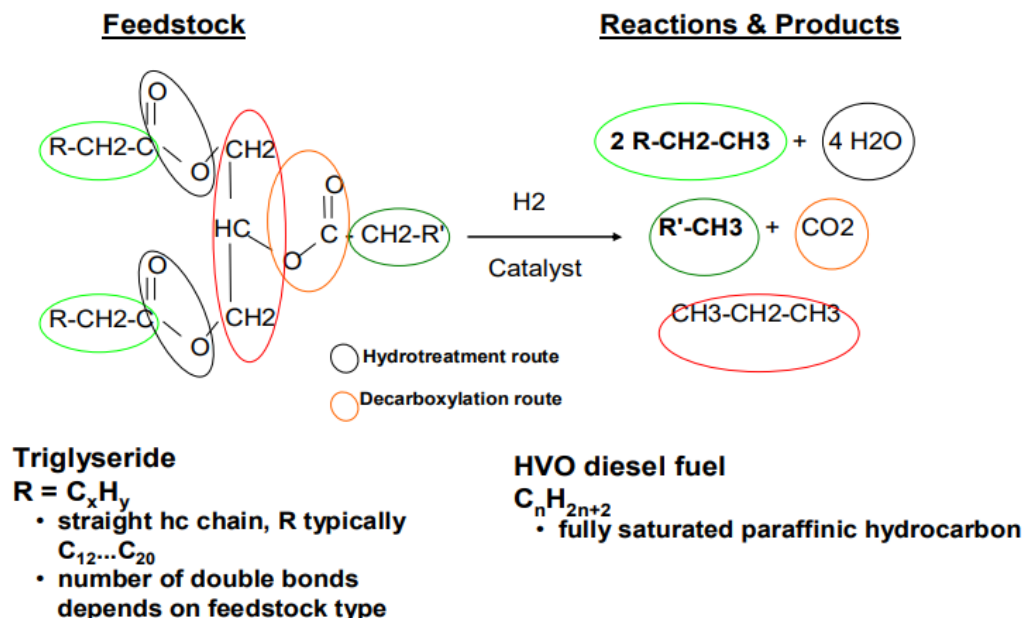
**Kuva 19.** Biodieselin valmistusprosessi (Ayhan Demirbas 2008, s.162).

Biodieseliä kohtaan on ollut maailmalla kritiikkiä, sillä biodieseliä valmistetaan muun muassa palmuöljystä. Palmuöljyä tuotetaan esimerkiksi paljon Malesiassa ja Indonesiassa, jossa sademetsiä on kaadettu palmuöljytuotannon takia. (WWF, s.21-57) Biodieselin

muita ongelmia dieselpolttoaineisiin verrattuna ovat sen pienempi energiapitoisuus, korkeammat typen oksidien päästöt ja moottorin suurempi kuluminen (Ayhan Demirbas 2008, s 158-159).

### 4.1.3 Vetykäsitelty kasvisöljy (HVO)

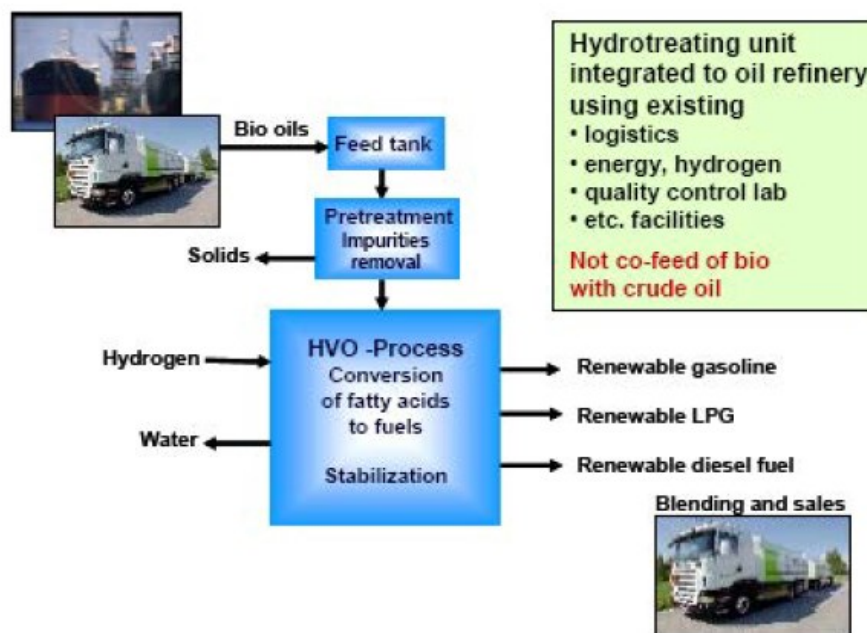
HVO on vetykäsiteltyä kasviöljyä. HVO tulee sanoista "Hydrotreated Vegetable Oil" HVO:n tuotteita ovat uusiutuva diesel tai polttoöljy, joita voidaan käyttää kiviainestuotannon energialähteenä. Molemmissa tuotteissa on samat ominaisuudet, uusiutuva polttoöljy on ainoastaan kevyemmin verotettu ja siihen on lisätty väriainetta. Kyseiset tuotteet sopivat kaikkiin dieselmootoreille. HVO-polttoainetta voidaan käyttää sellaisenaan olemassa olevaan tankkausinfrastruktuurissa ja olemassa olevissa ajoneuvoissa ilman haitallisia vaikutuksia polttoaineen, jakelun, moottoreihin, pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteisiin tai pakokaasupäästöihin. HVO:ta voidaan sekoittaa fossiiliseen dieseliin kaikissa sekoitussuhteissa (Neste 2023d). HVO:ta valmistetaan jäte- ja tähderaaka-aineista, jonka ansiosta sen palaminen on puhtaampaa ja sen käytöllä on pienemmät kasvihuonekaasupäästöt. HVO:n käytöllä on jopa 90 % pienemmät hiilidioksidipäästöt polttoaineen koko elinkaaren aikana fossiiliseen dieseliin tai polttoöljyyn verrattuna. (Neste 2023a) Kuvassa 20 on esitetty kemiallisten kaavojen avulla HVO:n muodostuminen.



**Kuva 20.** HVO:n muodostuminen (VTT 2011, s.27).

HVO:ta valmistetaan rasvahappojen vetykäsittelyn avulla. HVO:n valmistaminen eroaa huomattavasti fossiilisista raaka-aineista, sillä HVO:n raaka-aineet koostuvat happea sisältävistä rasvoista ja öljyistä. Katalyyttisessä prosessissa happiatomit poistetaan vedyn avulla (Neste 2023e). Vetykäsittely tekee polttoaineesta kirkkaan ja rikittömän polttoaineen, jolla on korkea setaaniluku. Setaaniluku on polttoaineen syttymisherkyttä ilmaiseva luku. Bensiinissä setaanilukua vastaa oktaaniluku. Korkea setaaniluku tarkoittaa, että polttoaine syttyy moottorissa nopeasti ruiskuttamisen jälkeen. Polttoaine syttyy hitaasti, jos setaaniluku on matala. Matala setaaniluku myös kuormittaa moottoria ja aiheuttaa ylimääräisiä päästöjä. HVO:n kemiallinen koostumus on samanlainen kuin fossiilisella dieselillä tai polttoöljyllä. (VTT 2011, s. 26-27)

HVO:n valmistamisessa hyödynnetään melko uutta teknologiaa. Esimerkiksi Neste valmistaa HVO:ta oman NExBTL-teknologian avulla, jonka avulla uusiutuvista rasvoista ja öljyistä valmistuu tehokkaita polttoaineita. Yhtiö on lanseerannut uusiutuvat polttoainetuotteet nimellä Neste MY. Neste MY tuotteet eivät sisällä biodieseliä (Neste 2023a). NExBTL-prosessissa valmistuu myös uusiutuvaa bensiiniä ja propaania. (Neste 2023e) Kuvassa 21 on esitetty NExBTL-prosessi ja sen lopputuotteet.



**Kuva 21.** NExBTL-prosessi HVO:lle (VTT 2011, s.27).

NexBTL- prosessi yhdistää hapenpoiston rasvahapoista vetykäsittelyn ja isomeroinnin kautta haarautuneiden parafiinien eli hiilivetyjen muodostamiseksi. Isomerointia käytetään tuotteen kylmäominaisuuksien säätämiseen. Isomeroinnin jälkeen tuote koostuu n- ja isoparafiinien seoksesta. NExBTL-prosessi tuottaa myös pienen määrän biobensiiniä



ja bionestekaasua. Prosessissa on huomattu, että biobensiinin osuus nousee ja dieselin saanto laskee, jos kylmäominaisuuksiin panostetaan liikaa. NExBTL-prosessin diesel-polttoaineella on tavallista parempi suorituskyky, kun taas bensiinivirta ei tuota vastavaa laatuetua. NExBTL-prosessia ohjataan, siten että diesel saanto on maksimillista. Uusiutuvaa dieseliä voi käyttää sellaisenaan tai sitä voi sekoittaa fossiiliseen dieseliin missä tahansa sekoitussuhteessa. (VTT 2011, s. 26)

Nesteen NExBTL täyttää SFS-EN 15940 vaatimukset, koska HVO on 100 % hiilivety-polttoaine (SFS-EN 15940, s. 10). HVO täyttää myös useimpien dieselpolttoainestandardien ja spesifikaatioiden vaatimukset. HVO:n tiheys on tyypillisesti noin 780 kg/m<sup>3</sup>. Neste MY uusiutuvalla dieselillä on hieman pienempi tiheys verrattuna perinteiseen dieseliin. Pienempi tiheys lisää Neste MY dieselin kulutusta verrattuna perinteisen dieselin kulutukseen, jotta polttomoottori tuottaisi saman energian. Tavallisen dieselpolttoaineen ja 30 % HVO:n sekoitus täyttää kaikki SFS-EN590-vaatimukset. Minimitiheys SFS-EN590-vaatimuksessa on luokkaa 800–820 kg/m<sup>3</sup>. (SFS-EN590, s. 10; VTT 2011, s. 29)

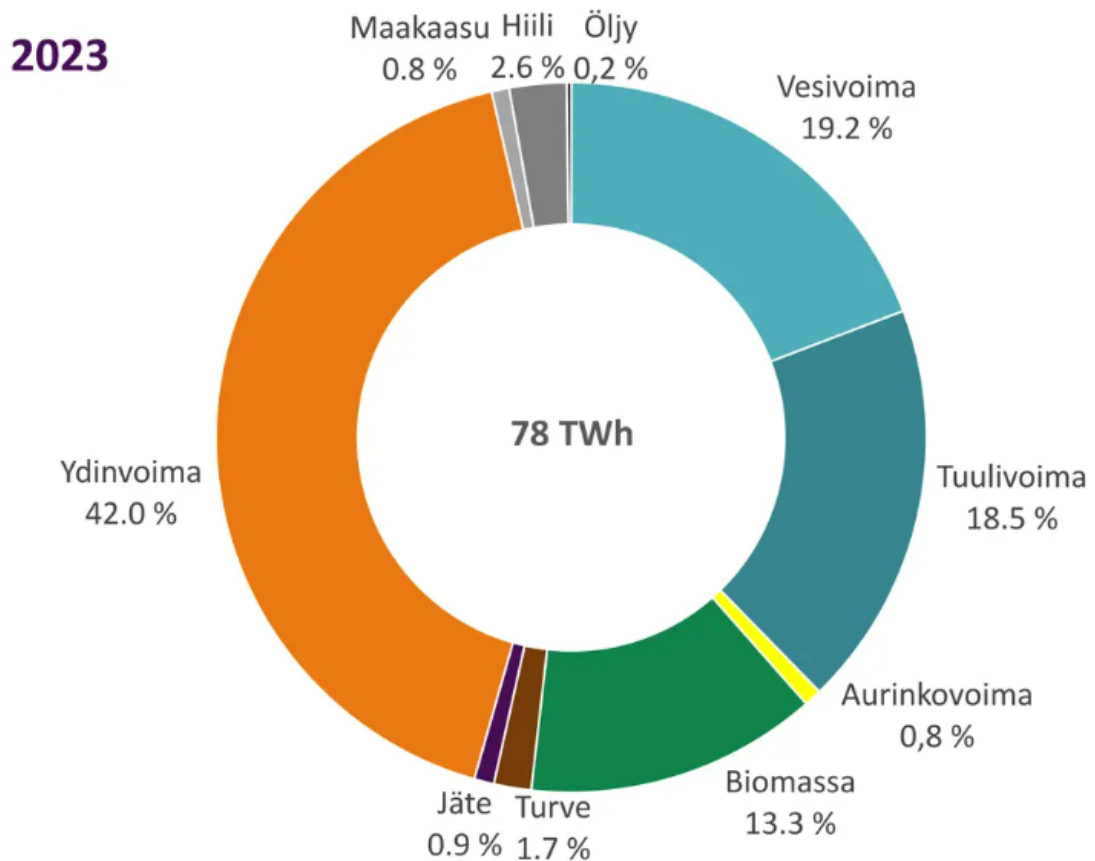
## 4.2 Sähköverkkoon liitetty tuotanto

Murskausta ja seulontaa voi toteuttaa kokonaan sähköisesti. Useissa murskainmalleissa on jo saatavilla sähkökäyttöinen hybridi, jossa dieselmoottorin yhteydessä toimii sähkömoottorille virtaa tuottava generaattori. Kyseisen mallin voi liittää suoraan valtakunnan sähköverkkoon, jolloin tuotanto tapahtuu kokonaan sähkökäytöllä. Ulkoiseen sähköverkkoon liitetty murskaus- ja seulontakalusto on hiljainen ja ympäristöystävällinen tuotantovaihtoehto. Jos sähkökäyttöistä murskaus- ja seulontakalustoa ei voi liittää ulkoiseen sähköliittymään, voi murskausta ja seulontaa toteuttaa myös ulkoisella dieselillä toimivalla aggregaatilla, joka antaa sähkövirtaa sähkömoottorille. Sähköä voi tuottaa hybridimalleissa sisäisen dieselmoottorin avulla, joka tuottaa sähkövirtaa sähkömoottorille. Tällaisilla dieselsähkökäytöllä on havaittu polttoainesäästöjä, sillä moottori on pyörinyt tasaisesti alhaisilla kierrosluvuilla. (Metso 2016)

Sähköverkkoon liitetyissä tuotannossa on mahdollisuus uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämiseen, sillä jos murskaus ja seulonta toteutetaan fossiilittomasti tuotetun sähkön avulla. Tuotannossa käytettävät muut työkoneet, kuten kaivinkoneet ja pyöräkuormaajat voivat olla tarpeen mukaan akkukäyttöisiä, jolloin koko tuotannon käytönaikaiset päästöt ovat nolla. (Sandvik 2023)

Suomessa uusiutuvan sähkön kokonaiskulutus on ollut nousussa viime vuosina. Vuoden 2021 Suomen uusiutuvien energialähteiden osuus loppukulutuksesta on ollut 42 % (Tilastokeskus 2022b). Uusiutuvan sähkön osuus kokonaistuotannosta on lisääntynyt

myös, sillä kokonaistuotannosta vuonna 2022 on ollut yli puolet uusiutuvasti tuotettua sähköä, noin 53,2 %. (Tilastokeskus 2022a) Hiilidioksidivapaan sähkön osuus kokonaistuotannosta oli vuonna 2022 noin 89 %. (Energiateollisuus 2024). Koko EU:n alueelta noin 40 % kokonaissähkötuotannosta on peräisin uusiutuvista lähteistä (Eurooppa neuvosto 2022). Kuvassa 22 on esitetty sähkön alkuperä Suomessa vuonna 2023.



**Kuva 22.** Sähkön alkuperä Suomessa vuonna 2023 (Energiateollisuus 2024).

Kuvassa 22 huomataan, että hiilidioksidivapaan sähkön osuus on noussut vuoden 2022 tasosta, sillä hiilidioksidivapaan sähkön osuus vuonna 2023 on yli 94 %. Uusiutuvan sähkön osuus on laskenut hieman vuoden 2022 tasosta, koska uusiutuvan sähkön osuus on 52 % vuonna 2023. (Energiateollisuus 2024) Hiilidioksidivapaan sähkön osuutta on nostanut viime vuoden aikana lisääntynyt ydinvoiman ja tuulivoiman tuotanto.

## 5. AINEISTOT JA MENETELMÄT

### 5.1 Työkoneiden päästötiedot

Kalliomurskauksen päästöt syntyvät polttoöljyn palamisreaktiosta siltä osin kuin ei käytetä sähköä murskauksessa. Merkittävin kasvihuonekaasu on hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ), jota vapautuu murskauskaluston ja työkoneiden käytöstä. Hiilidioksidi kasvihuonekaasuna lisää ilmaston lämpenemistä, sillä kasvihuonekaasut absorboivat ilmakehässä ollessaan suuren osan maan pinnalta lähtevästä lämpösäteilystä aiheuttaen kasvihuoneilmion (Sitra 2023). Muita päästöjä, joita vapautuu polttoöljyn palamisreaktiossa ovat hiilimonoksidi (CO), hiilivedyt (HC), typen oksidit ( $\text{NO}_x$ ), hiukkaspäästöt joko massan mukaan (PM) tai määrän mukaan (PN). Edellä mainituista päästöistä käytetään nimitystä lähipäästöt. Lähipäästöt vaikuttavat voimakkaasti ilmanlaatuun ja osa niistä toimii epäsuorina kasvihuonekaasuina. Epäsuorat kasvihuonekaasut ovat kaasuja, jotka vaikuttavat epäsuorasti kasvihuoneilmion voimistumiseen. (Tilastokeskus 2023)

Hiilimonoksidia syntyy aina hiilipohjaisten polttoaineiden palamisreaktiossa. Hiilimonoksidista käytetään nimitystä häkä. Häkää syntyy epätäydellisessä palamisessa, jossa happea on käytettävissä liian vähän. Murskauslaitoksissa häkää syntyy polttoöljyn palamisreaktiossa, jossa joko lämpötila on liian alhainen täydelliselle palamiselle tai polttokammiossa on liian vähän happea.

Polttoöljy kuuluu hiilivetyihin. Ilmakehässä hiilivedyt reagoivat lämpösäteilyn vaikutuksesta typen oksidien kanssa, jolloin muodostuu kasvihuonekaasua otsonia. Typen oksidit ovat typen ja hapen muodostamia yhdisteitä. Polttoöljyn palamisessa vapautuu pääasiassa typpimonoksidia, joka hapettuu ilmassa otsonin vaikutuksesta kasvihuonekaasuksi typpidioksidiksi. (Ilmatieteenlaitos 2023a)

Hiukkaspäästöjä vapautuu polttoöljyn palamisreaktioissa, jossa sen päästömääriä voidaan hallita moottoreiden hiukkassuodattimien avulla. Hiukkaset jaotellaan niiden halkaisijan mukaan. Enintään 10 mikrometriin ( $\text{PM}_{10}$ ), ja halkaisijaltaan 2,5 mikrometriin tai pienempiin ( $\text{PM}_{2,5}$ ), Hiukkaspäästöjä ilmoitetaan myös määrän mukaan (PN). (Ilmatieteenlaitos 2023b)

Lähipäästöjen määrään voidaan vaikuttaa työkoneiden moottorityypeillä, joille on määritelty erilaisia Euro-päästöluokkia moottoritehon ja polttoaineen mukaan. Euro-päästöluokat ovat määritelty EU:ssa niin sanotuilla Euro-säädöksillä, jotka ovat ajoneuvo-, polttoaine- tai moottoritehokohtaisia. Europäästöluokkia on yhteensä 7, joista käytetään nimitystä "STAGE". Työkoneiden dieselmoottoreiden päästöihin alettiin kiinnittää huomiota vuonna 1998, kun voimaan astui Stage I -päästömääräys. Päästörajoituksilla rajoitettiin

ensisijaisesti typen oksideja ja pienhiukkasten päästöjä. Viimeisissä määräyksissä rajoitetaan häkä-, hiilivety- ja ammoniakkipäästöjä. Pienhiukkasten määrää ja massaa rajoitettiin myös. (DieselNet 2021b)

Moottorin päästöluokka kertoo sen, että mikä raja-arvo on asetettu moottorista vapautuneelle lähipäästölle. Päästöluokka riippuu moottorin lähipäästöjä rajoittavista suodattimista. DPF-hiukkassuodatin ja SCR-katalysaattori karsivat lähipäästöjä tehokkaasti. DPF-hiukkassuodatin puhdistaa pakokaasuista pienhiukkasia tehokkaasti. DPF tulee sanoista "Diesel Particulate Filter". SCR-katalysaattorin avulla vähennetään typen oksideja. SCR tulee sanoista "Selective Catalytic Reduction", joka tarkoittaa selektiivistä katalyyttistä pelkistämistä. Katalysaattori pelkistää typen oksidit vedeksi ja typeksi. SCR-tekniikalla voi vähentää jopa 90 % palamisprosessissa syntyviä typen oksideja. SCR-tekniikka vaatii moottorin SCR-järjestelmän lisäksi reagenssiliuosta, jota valmistetaan esimerkiksi ureasta ja kemiallisesti puhdistetusta vedestä. Taulukossa 4 on esitetty Stage IIIB ja Stage IV päästöluokkavaatimukset liikkuville työkoneille, joiden teho on välillä 130 – 560 kW. (DieselNet 2021b; Yara Suomi 2023; Yara Suomi 2024)

**Taulukko 4.** Stage IIIB ja Stage IV päästöluokkavaatimukset 130-560 kW tehoisille työkoneille (muokattu lähteestä DieselNet 2021b).

Stage IIIB, työkoneet, 130 kW ≤ P ≤ 560 kW			
NO <sub>x</sub> [g/kWh]	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	PM [g/kWh]
2,0	3,5	0,19	0,025
Stage IV, työkoneet, 130 kW ≤ P ≤ 560 kW			
NO <sub>x</sub> [g/kWh]	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	PM [g/kWh]
0,4	3,5	0,19	0,025

Taulukon 4 päästöluokkia käytetään kiviainestuotantojen päästöjen määrittämisessä. Taulukossa 5 on esitetty Euro V ja VI päästöluokat raskaalle kuljetuskalustolle, jossa polttoaineena on diesel.

**Taulukko 5.** Euro V ja VI päästöluokat raskaan kuljetuskaluston diesel käyttöisille moottoreille (muokattu lähteestä DieselNet 2021a).

Euro V			
NO <sub>x</sub> [g/kWh]	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	PM [g/kWh]
2,0	1,5	0,46	0,02
Euro VI			
NO <sub>x</sub> [g/kWh]	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	PM [g/kWh]
0,4	1,5	0,13	0,01

Taulukon 5 päästöluokkia käytetään kiviaineksen kuljetuksen päästölaskennassa. Kuljetuksen päästölaskennat ovat arvioita, joissa päästöt riippuvat matkasta, päästöluokasta ja polttoaineen keskimääräisestä kulutuksesta. Taulukon 4 ja 5 päästöluokkien yksikkö on g/kWh. Päästöluokkien yksikkö on riippuvainen moottorin hyötysuhteesta, sillä lähipäästöjen massat määritetään moottorin aiheuttaman liike-energian ja potentiaalienergian suhteen. Liike- ja potentiaalienergian summa on mekaaninen energia. Moottoreiden hyötysuhteilla on siten päästölaskennassa suuri vaikutus, sillä energiaa kuluu laajasti muun muassa lämmön muodostumiseen ja laitteiston aiheuttaman kitkan voittamiseen. (DieselNet 2024)

## 5.2 Tapaustutkimusten kohteet

Diplomityön kokeellisessa osassa esitellään kaksi eri tapausta, joissa käsitellään vähähiilisen ja fossiilisen kiviainestuotannon päästöjä. Kiviainestuotantojen polttoaineina käytettiin Neste MY uusiutuva polttoöljyä ja fossiilista polttoöljyä. Kiviainestuotannot toteutettiin samalla Destian kiviainestuotantopaikalla Kirkkonummella kesällä 2023. Tuotannoista lasketaan hiilidioksidi- ja lähipäästöt. Päästölaskelmien avulla on mahdollista tehdä päästövertailua fossiilisen ja vähähiilisen tuotannon välillä. Fossiilinen tuotanto on vertailukelpoinen vähähiilisen tuotannon kanssa, sillä tuotantojen kalusto ja murskattavan aineksen alkuperä ovat samat. Vähähiilisen tuotannon tavoitteena oli tuottaa asiakkaalla vähähiilistä mursketta, jonka hiilijalanjälki ja lähipäästöt ovat pieniä. Nesteen mukaan Neste MY:n uusiutuvan polttoöljyn käytöllä on noin 90 % pienemmät päästöt kuin fossiilisen polttoaineen käytöllä (Neste 2023a).

Hiilidioksidipäästöille tehdään hiilikompensointilaskelmia, joiden avulla määritetään kiviainestuotannon päästövaikutuksia vastaava istutettavien kuusi taimien määrä molemmille tapauksille.

Tuotannon lajitekohtaisten energiakulutuksien määrittämisessä käytetään apuna kappaaleessa 3.3 esitettyä Kick -arviointimenettelyä. Kick -arviointimenettelyn kaavassa on termi, jossa on Kick -vakio ja materiaalin puristuslujuus. Kyseinen termi pysyy vakiona sekä vähähiilisessä että fossiilisessa tuotannossa, sillä murskauksessa oletetaan, että kiviaineksen laatu ei vaihtelee. Termin määrittämiseksi selvitetään ensimmäisenä tuotannoissa käytettyjen polttoaineiden energiasisällöt kaavan 3 ja 4 avulla (Nylund, N.-O., Söderena, P., & Pettinen, R. 2020, s. 18; Neste 2020 s. 52). Kaavoissa 3 ja 4 käytetään muunnoskerrointa 0,278 kWh/MJ, jotta polttoaineiden energiasisällön yksikkönä on kWh/l.

$$E_{\text{Neste MY, polttoöljy}} = 34,04 \text{ MJ/l} \cdot 0,278 \text{ kWh/MJ} = 9,46 \text{ kWh/l} \quad (3)$$

$$E_{f,\text{polttoöljy}} = 36,0 \text{ MJ/l} \cdot 0,278 \text{ kWh/MJ} = 10,0 \text{ kWh/l} \quad (4)$$

Määritetään seuraavaksi koko tuotannon aggregaatin energiankulutus tuotettua kiviainestonnia kohden kaavan 5 avulla. Vähähiilisen tuotannon aggregaatti kulutti 5401,2 l uusiutuvaa polttoöljyä ja fossiilisen tuotannon aggregaatti kulutti 19045,9 l kevyttä polttoöljyä. Polttoaineiden energiasisältöjen avulla saadaan määriteltyä aggregaatin kuluttama kokonaisenergiamäärä.

$$E_k = \frac{(A_{p,v} \cdot E_{p,v} + A_{p,f} \cdot E_{p,f}) \cdot M_k}{T_{v,f}} = \frac{5401,2 \text{ [l]} \cdot 9,46 \text{ kWh/l} + 19045,9 \text{ [l]} \cdot 10 \text{ kWh/l}}{44211,6 \text{ t}} = 5,46 \text{ kWh/t, jossa} \quad (5)$$

$E_k$  = Energiankulutus [kWh/t]

$A_{p,v}$  = Aggregaatin polttoainemäärän kulutus vähähiilisessä tuotannossa [l]

$A_{p,f}$  = Aggregaatin polttoainemäärän kulutus fossiilisessa tuotannossa [l]

$T_{v,f}$  = Vähähiilisen ja fossiilisen tuotannon tuotetut kiviainekset [t]

$E_{p,v}$  = Uusiutuvan polttoöljyn energiasisältö [kWh/l]

$E_{p,f}$  = Fossiilisen polttoöljyn energiasisältö [kWh/l]

Kaavan 5 tuloksen avulla määritetään vakiotermi kaavan 6 avulla, jossa syötemateriaalin raekoko on 0,6 m ( $x_1$ ) ja lopputuotteen pienin raekoko on 0,006 m ( $x_2$ ).

$$K_k \cdot \sigma_p = E_k / \ln \left( \frac{x_1}{x_2} \right) = \frac{5,46 \text{ kWh/t}}{\ln \left( \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} \right)} = 1,19 \text{ kWh/t, josta} \quad (6)$$

$E_k$  = Energiankulutus [kWh/t]

$K_k$  = Kick materiaalivakio [kWh/MPa·t]

$\sigma_p$  = Tutkittavan materiaalin puristuslujuus [MPa]

$x_1$  = syötemateriaalin raekoko [m]

$x_2$  = lopputuotteen raekoko [m]

Molemmissa tuotannoissa murskauslaitoksen tarvitsema energia tuotettiin aggregaatin avulla. Kick -arviointimenettely ei ota huomioon aggregaatin hyötysuhdetta, jolloin hyötysuhteelle on tehtävä herkkyytarkastelu. Aggregaatin hyötysuhteelle on olemassa monia erilaisia arvioita. Kappaleessa 3.3 on esitetty, että noin 10 % kokonaisenergiasta hyödynnetään hyödyllisesti murskauslaitoksessa ja aggregaatin hyötysuhdearvot vaihtelevat 0,16 - 0,4 välillä. Herkkyytarkastelun perusteella käytetään aggregaatin hyötysuhteena pienintä arvoa, joka on löydettävissä kirjallisuuteen perustuen. Kokeellisen osan tuotantojen aggregaatin hyötysuhteena käytetään siis arvoa 0,16. Hyötysuhdetta

0,10 ei käytetä, sillä aggregaatille ei ole määritelty niin pientä hyötysuhdearviota kirjallisuuden perustuen (Coulson & Richardson 2002, s.102; General Power 2024; Savonia 2011). Työkoneiden moottoreiden hyötysuhteena käytetään sen sijaan hyötysuhdetta 0,35 (S.N Hossain & S. Bari 2014). Taulukossa 6 on esitetty murskauslaitoksen kokoonpano ja tuotantotiedot.

**Taulukko 6. Murskauslaitoksen kokoonpano ja tuotantotiedot (CAT 2020).**

Tapaus	Vähähiilinen tuotanto	Fossiilinen tuotanto
Kiviainestuotantopaikka	Destian Kirkkonummen kiviainestuotantopaikka	
Energialähde	Uusiutuva polttoöljy	Fossiilinen kevyt polttoöljy
Murskauksessa käytetty aggregaatti (malli, teho ja päästöluokka)	Aggregaatti (CAT 18, 750 kW (Non-Certified Emissions))	
Työkoneet (malli, teho ja päästöluokka)	Kaivinkone (Hitachi 520 LCH-5, 270 kW Stage IIIB) Pyöräkuormaaja (CAT 980M, 313 kW ja Stage IV)	
Tuotetut kiviainekset [t]	12 705,1	31506,5
Tuotetut kiviainekset yhteensä [t]	44211,6	
Polttoaineen kokonaiskulutus, aggregaatti + työkoneet [l]	9848,0	29752,0
Keskimääräinen polttoaineen kulutus tuotettua kiviainestonna kohden [l/t]	0,78	0,94
Aggregaatin kokonaiskulutus [l]	5401,2	19045,9
Työkoneiden kokonaiskulutus [l]	4446,8	10706,1
Työkoneen hyötysuhde	0,35	
Aggregaatin hyötysuhde	0,16	
Kivilaji	Hieno-Keskirakeinen Granodioriitti	
Kiviaineksen Los-Angeles arvojen vaihtelevuus	26-34 (Luokat LA <sub>30</sub> ja LA <sub>35</sub> )	
Vakiotermi: Kickin vakio ja materiaalin puristuslujuus ( $K_k \cdot \sigma_p$ ) [kWh/t]	1,19	

Murskauslaitoksen urakoitsija ja kokoonpano olivat samat tuotannoissa. Murskauksessa käytettiin tela-alustaista murskaus- ja seulontalaitteistoa, joissa murskaimina ja seuloina käytettiin Metson leukamurskainta, Metson karamurskaimia ja Metson tela-alustaista



seulaa. Esimurskaimena käytettiin leukamurskainta, joka pienensi kiviaineksen rakeisuuden sopivaksi välimurskaukseen. Välimurskauksessa karamurskain murskasi kiviaineksen ja lajitteli sen seulan läpi. Kiviaines eteni jälkimurskaukseen, jossa toinen karamurskain murskasi kiviaineksen haluttuun raekokoon. Jälkimurskausta toistettiin tarpeen mukaan. Lopuksi seula seulo murskatut kivet haluttuihin raekokofraktioihin. Murskauslaitoksen käyttöenergia tuotettiin CAT 18 aggregaatin avulla. Murskauslaitoksen lisäksi tuotannoissa oli käytössä Hitachin kaivinkone louheen syöttäjänä ja CAT pyöräkuormaaja murskeen läjittäjänä. Tuotannoista ei tehty päästömittauksia vaan päästöt määritetään laskennallisesti. Päästölaskenta toteutetaan moottoreiden päästöluokitusten, käytetyn polttoaineen ja energiakulutuksen avulla. Päästölaskennassa huomioidaan aggregaatin ja työkoneiden hyötysuhteet, sillä moottoreiden päästöluokat ovat riippuvaisia mekaanisesta energiasta (CAT 2020, s. 2; DieselNet 2024). Tuotannoissa ei ole käytetty SCR-tekniikan vaatimaa reagenssiliuosta.

Kuljetuksen päästölaskennan tarkoituksena oli tuottaa erilaisia arvioita päästöistä. Päästöihin vaikuttavia tekijöitä ovat päästöluokka, keskimääräinen polttoaineen kulutus ja kuljettu matka. Kuljetuksen päästölaskennat eivät perustu todellisiin tuloksiin kuten vähähiilisen ja fossiilisen tuotantojen tulokset. Kiviaineksen kuljetuspäästöille tehdään myös hiilikompensointilaskelmia.

## **5.3 Vähähiilinen tuotanto**

### **5.3.1 Lähtöarvot**

Vähähiilinen tuotanto toteutettiin välillä 26.6.2023-30.6.2023. Tuotannossa murskattiin Neste MY polttoöljyllä 12 705,1 t, johon Neste MY polttoöljyä kului 9848 l. Tuotannossa ei seurattu polttoaineen kulutusta päiväkohtaisesti. Urakoitsija arvioi työkoneiden kulutuksen olevan yhteensä 0,35 litraa tuotettua kiviainestonnia kohden. Työkoneiden osuus polttoaineen kokonaiskulutuksesta on silloin 45,2 % ja aggregaatin osuus 54,8 %. Urakoitsija arvioi työkoneiden polttoainekulutukset jakautuvan tasaisesti pyöräkuormaajan ja kaivinkoneen kesken. Tuotannon lajitteet ja niiden tuotantomäärät on esitetty taulukossa 7.

**Taulukko 7. Vähähiilisen tuotannon lajitteet ja tuotantomäärät.**

Vähähiilinen tuotanto	Lajitteet					
Päivämäärä	KaM 0/6 mm	KaM 6/16 mm	KaM 0/16 mm	KaM 0/32 mm	KaM 0/90 mm	Yhteensä
26.6.2023	482,7	659,9	378,8			1521,4
27.6.2023				2770,4		2770,4
28.6.2023					2967,3	2967,3
29.6.2023					2921,1	2921,1
30.6.2023					2524,9	2524,9
Yhteensä:	482,7	659,9	378,8	2770,4	8413,3	<b>12705,1</b>

Vähähiilisessä tuotannossa tuotettiin enimmäkseen KaM 0/90 mm, sillä sen osuus kokonaistuotantomäärästä oli noin 66 %. Urakoitsija havaitsi vähähiilisessä tuotannossa, että työkoneet kuluttivat Neste MY polttoöljyä 3 % enemmän kuin kevyttä polttoöljyä. Tämä tukee VTT:n raporttia, jossa todettiin myös suurempia kulutuksia Neste MY dieselillä. VTT:n raportissa havaittiin jopa 3,5 % suurempia kulutuksia Neste MY dieselin osalta verrattuna fossiiliseen dieseliin (VTT 2011, s. 50).

Murskauksen energiankulutusta arvioidaan kaavan 7 avulla. 6/16 mm kalliomurskeen tuotannon energiankulutuksessa käytetään 0/6 mm ja 0/16 mm kalliomurskeiden tuotantojen energiakulutuksien keskiarvoa.

$$E_{ktes} = K_k \cdot \sigma_p \cdot \ln \left( \frac{x_1}{x_2} \right), \text{ jossa} \quad (7)$$

$E_{ktes}$  = Murskauksen energiankulutus [kWh/t]

$K_k \cdot \sigma_p = 1,19$  kWh/t,

0/6 mm:  $x_1=0,6$  m ja  $x_2=0,006$  m,

0/16 mm:  $x_1=0,6$  m ja  $x_2=0,016$  m,

0/32 mm:  $x_1=0,6$  m ja  $x_2=0,032$  m ja

0/90 mm:  $x_1=0,6$  m ja  $x_2=0,09$  m

Kaavassa 7  $x_1$  on murskaimeen tulevan alkusyötteen raekoko ja  $x_2$  on lopputuotteen koko. Alkusyötteen ja lopputuotteet raekoot perustuvat murskauslaitoksen murskauksen ja seulonnan asetuksiin. Alkusyötteen oletus on kaikille lajitteille 600 mm. Taulukossa 8 on kaavan 7 avulla määritetyt murskauksen energiankulutukset lajitekohtaisesti.

**Taulukko 8.** Murskauksen energiankulutus lajitekohtaisesti (kaava 7).

	KaM 0/6 mm	KaM 6/16 mm	KaM 0/16 mm	KaM 0/32 mm	KaM 0/90 mm
Energiankulutus lajitteittain [kWh/t]	5,46	4,88	4,30	3,48	2,25

Taulukon 8 energiankulutukset ovat Kick -kaavan avulla arvioituja murskauksen energiankulutuksia eri lajitteiden tuotannossa. Taulukon 8 energiankulutukset skaalataan siten, lajitteiden energiankulutukset vastaavat aggregaatin kuluttamaa kokonaisenergiankulutusta. Määritetään ensimmäisenä kaavan 8 avulla skaalaukseen tarvittava kokonaisenergiankulutus.

$$\text{Vähähiilisen tuotannon aggregaatin kokonaisenergiakulutus [kWh]} = 5401,2 \text{ l} \cdot 9,46 \text{ kWh/l} = 51095,5 \text{ kWh} \quad (8)$$

Vähähiilisessä tuotannossa aggregaatin kokonaisenergiakulutus oli 51 095,5 kWh. Määritetään sen ja taulukon 8 avulla aggregaatin kerroin ( $A_k$ ), jolla suoritetaan skaalaus jokaiselle taulukon 8 mukaiselle energiankulutukselle. Aggregaatin kerroin ( $A_k$ ) määritetään kaavan 9 avulla. Kaavassa 9 on mukana jokaisen lajitteen tuotettu kiviainestonni määrä, sillä taulukon 8 energiankulutuksien yksikkönä on kWh/t.

$$A_k = \frac{5,46 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \cdot 482,7 \text{ t} + 4,88 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \cdot 659,9 \text{ t} + 4,30 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \cdot 378,8 \text{ t} + 3,48 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \cdot 2770,4 \text{ t} + 2,25 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \cdot 8413,3 \text{ t}}{51\,095,5 \text{ kWh}} = 0,71 \quad (9)$$

Aggregaatin kerroin ( $A_k$ ) on vähähiilisessä tuotannossa 0,71. Lasketaan seuraavaksi kaavan 10 avulla kokonaisenergiankulutukset lajitteittain. Kokonaisenergiankulutuksissa on mukana myös murskeen kuljettimiin, tyhjäkäyntiin, lämpöön, ääneen, ja kitkan voittamiseen kuluvat energiat.

$$A_{g,k} = \frac{E_m \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \right]}{A_k}, \text{ joista} \quad (10)$$

$A_{g,k}$  = Aggregaatin kokonaisenergiakulutus

$E_m$  = Energiakulutus murskauksessa

$A_k$  = Aggregaatin kerroin

Taulukossa 9 on esitetty aggregaatin lajitekohtaiset energiankulutukset vähähiilisessä tuotannossa.

**Taulukon 9.** Laskennalliset määritetyt aggregaatin lajitekohtaiset energiankulutukset vähähiilisessä tuotannossa.

Laskennalliset määritetyt lajitekohtaiset energiankulutukset					
	KaM 0/6 mm	KaM 6/16 mm	KaM 0/16 mm	KaM 0/32 mm	KaM 0/90 mm
Laskennallinen kokonaisenergiankulutus [kWh/t]	7,74	6,92	6,09	4,93	3,19
Mekaanisen energiankulutus (hyötysuhde: 0,16) [kWh/t]	1,24	1,11	0,97	0,79	0,51

Taulukossa 9 on määritetty lisäksi aggregaatin hyötysuhteella mekaanisen energiankulutus lajitekohtaisesti. Lajitekohtaisen polttoainemäärän ja mekaanisen energiankulutuksien avulla on mahdollista laskea päästöt jokaiselle tuotetulle lajitteelle erikseen. Kokonaisenergiämäärässä ovat mukana mekaaninen energia ja muu energia. Mekaaninen energia on moottorin liike-energiaa. Liike-energia on murskaukseen, seulontaan, kuljettimeen ja tyhjäkäyntiin kulunut energia. Lisäksi energiamuotoja ovat tuotannossa syntyneet lämpöenergia ja kitkan voittamiseen kulunut energia. Moottoreiden hyötysuhteiden ansiosta saadaan määriteltyä aggregaatin ja työkoneiden mekaaniset energiamäärät.

Mekaanisten energiamäärien ja lähipäästökertoimien avulla määritetään lähipäästömäärät. Hiilidioksidipäästöt määritetään hiilidioksidikertoimen ja lajitekohtaisten polttoainekulutuksien avulla. Taulukossa 10 on koottu päästölaskentaan tarvittavat tiedot. Taulukossa 10 on laskettu lajitekohtaisten kokonaisenergiakulutuksien avulla polttoaineen kulutukset, sillä Neste MY uusiutuvan polttoöljyn energiasisältö on 9,46 kWh/l.

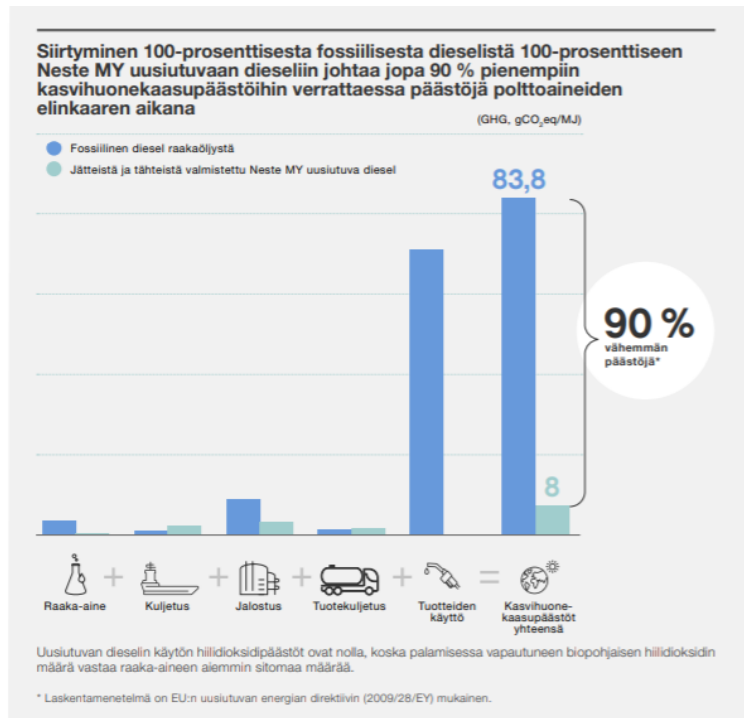
**Taulukko 10.** Vähähiilisen tuotannon päästölaskentaan tarvittavat lähtötiedot.

Aggregaatin ja työkoneiden lajitekohtainen polttoaineen määrä ja energian kulutus						
	KaM 0-6 mm	KaM 6-16 mm	KaM 0-16 mm	KaM 0-32 mm	KaM 0-90 mm	Yhteensä:
Aggregaatin polttoainemäärä [l]	395,0	482,6	244,0	1443,1	2836,5	5401,2
Työkoneiden polttoainemäärä [l]	168,9	231,0 l	132,6 l	969,6 l	2944,7 l	4446,8
Aggregaatti + työkoneiden polttoainemäärä [l]	564,0	713,5	376,6	2412,8	5781,2	<b>9848,0</b>
Aggregaatin kokonaiskulutus [kWh], hyötysuhde: 0,16	597,9	730,4	369,3	2184,3	4293,3	8175,3
Työkoneen kokonaiskulutus, hyötysuhde 0,35 [kWh]	279,7	382,4	219,5	1605,2	4874,9	7361,7

Taulukossa 10 on tarkistettu, että kokonaispolttoainemäärä täsmää urakoitsijan ilmoittaman kokonaispolttoaineenkulutuksen kanssa.

### 5.3.2 Päästökertoimet

Vähähiilisen tuotannon polttoaineena käytettiin kesälaatuista Neste MY uusiutuvaa polttoöljyä. Hiilidioksidipäästökerroin määritetään polttoaineen kuljetuksen, jalostuksen, tuotekuljetusten ja vuodenajan mukaan. Lähipäästökertoimiin vaikuttavat moottorin EU:n päästoluokkavaatimus, polttoaine tai moottorin valmistajan ilmoittamat lähipäästöt. Neste MY uusiutuva polttoöljy on rikitön, jolloin rikkipäästöjä ei tarvitse määrittää. (Neste 2023c) Kuvassa 23 on esitetty fossiilisen dieselin ja Neste MY uusiutuvan dieselin hiilidioksidipäästöjen vertailua koko tuotteen elinkaaren aikana.



**Kuva 23.** Fossiilisen dieselin ja Neste MY uusiutuvan polttoöljyn hiilidioksidipäästöjen vertailua koko tuotteen elinkaaren aikana (Neste 2023f).

Kuvasta 23 huomataan, että Neste MY uusiutuvan polttoöljyn käytön hiilidioksidipäästöt ovat nolla, sillä palamisessa vapautuneen hiilidioksidin määrä vastaa raaka-aineen aiemmin sitomaa hiilen määrää. Suurin osa Neste MY uusiutuvan polttoöljyn elinkaaren aikaisista päästöistä syntyy siis tuotteen valmistuksesta ja kuljetuksista, joista muodostuu hiilidioksidipäästökerroin. Taulukossa 11 on esitetty vähähiilisen tuotannon hiilidioksidipäästökerroin. Neste Oy on muodostanut hiilidioksidipäästökertoimen kesällä 2023.

**Taulukko 11.** Neste MY polttoöljyn hiilidioksidipäästökerroin.

Neste MY polttoöljy (kesälaatu)	Päästökerroin [gCO <sub>2</sub> /l]
CO <sub>2</sub>	260

Hiilidioksidipäästökerroin riippuu käytetystä polttoaineesta. Vähähiilisen tuotannon lähipäästökertoimet muodostetaan sen sijaan moottorin valmistajan ilmoitettujen päästöjen, Europäästöluokan ja VTT tutkimuksien pohjalta. VTT:n tutkimuksissa ilmoitetaan, kuinka monta prosenttia vähemmän lähipäästöjä on uusiutuvan dieselin käytöllä kuin fossiilisella dieselillä. VTT tutkimuksien pohjalta luodut lähipäästövähennykset uusiutuvalla dieselille ovat verrattavissa uusiutuvaan polttoöljyyn, sillä molemmat polttoaineet ovat kemiallisesti samanlaisia. (Neste 2020, s.8) Taulukossa 12 on esitetty lähipäästövähennykset, kun käytetään uusiutuvaa polttoöljyä.

**Taulukko 12.** Lähipäästövähennykset Neste MY uusiutuvalla polttoöljylle (Neste 2023f; VTT 2011, s.74-76).

Lähipäästöt	Keskimääräinen lähipäästövähennys [%]
NO <sub>x</sub>	-9
CO	-24
HC	-30
PM	-33

Lähipäästövähennykset tehdään taulukon 12 mukaisesti kappaleen 5.3.3 päästölaskennassa. Päästövähennys tehdään prosentuaalisena vähennyksenä. Prosentuaaliset vähennykset tehdään fossiilisille lähipäästökertoimille. Vähähiilisen murskauksen energia tuotettiin CAT 18 aggregaatin avulla, jossa ei ollut päästöluokkavaatimuksia. Murskauksen lähipäästökerroin ilmoitetaan yksikössä g/kWh. Aggregaatin valmistajan päästökertoimet on ilmoitettu g/hp-hr, jolloin päästökertoimille tehdään yksikkömuunnos. Hp-hr yksikkö on hevosvoimatunti, joka vastaa 0,746 kWh. Taulukossa 13 on esitetty aggregaatin valmistajan mukaiset fossiilisen polttoöljyn lähipäästökertoimet, joihin on tehty yksikkömuunnoslaskelma.

**Taulukko 13.** Aggregaatin lähipäästökertoimet, joissa yksikkömuunnoslaskelma (muokattu lähteestä CAT 2020, s. 2).

Lähipäästöt	Päästökertoimen muodostaminen	Päästökerroin [g/kWh]
NO <sub>x</sub>	5,5 g/hp-hr / (0,746 kWh / hp-hr)	7,37
CO	0,1 g/hp-hr / (0,746 kWh / hp-hr)	0,13
HC	0 g/kWh	0
PM	0 g/kWh	0

Tuotannossa käytettiin kahta työkonetta, Hitachi 520 LCH-5 kaivinkonetta ja CAT 980 M pyöräkuormaajaa. Kaivinkoneen moottori täytti Stage IIIB päästöluokkavaatimukset ja pyöräkuormaaja Stage IV päästöluokkavaatimukset. Taulukossa 14 on esitetty työkonien lähipäästökertoimet fossiiliselle polttoöljylle. Taulukon 14 tiedot on muodostettu taulukon 4 avulla.

**Taulukko 14.** Lähipäästökertoimet työkoneille (DieselNet 2021b).

Lähipäästö	Kaivinkone (Hitachi 520 LCH-5) [g/kWh]	Pyöräkuormaaja (CAT 980M) [g/kWh]
NO <sub>x</sub>	2,0	0,4
CO	3,5	3,5
HC	0,19	0,19
PM	0,025	0,025

Taulukon 14 lähipäästökertoimet ovat molemmissa työkoneissa lähes samat. Ainoastaan typen oksidien suhteen pyöräkuormaajan päästökerroin on pienempi kuin kaivinkoneen. Taulukon 13 ja 14 lähipäästökertoimille tehdään taulukon 12 mukainen prosentuaalinen lähipäästövähennys. Taulukossa 15 on esitetty vähähiilisen tuotannon lähipäästökertoimet, jossa on huomioitu Neste MY:n polttoöljyn käyttö.

**Taulukko 15.** Vähähiilisen tuotannon lähipäästökertoimet.

Lähipäästö	Kaivinkone (Hitachi 520 LCH-5) [g/kWh]	Pyöräkuormaaja (CAT 980M) [g/kWh]	Aggregaatti (CAT 18) [g/kWh]
NO <sub>x</sub>	1,82	0,36	6,71
CO	2,66	2,66	0,10
HC	0,13	0,13	0
PM	0,02	0,02	0

Taulukon 11 ja 15 mukaisilla päästökertoimilla määritetään päästömäärät vähähiiliselle tuotannolle. Lähipäästökertoimien Neste MY vähennys on esitetty prosentuaalisena vähennyksenä, jolloin lähipäästölaskelmat ovat realistiset vähähiiliselle tuotannolle. Päästölaskennassa huomioitavaa on se, että hiilidioksidin päästökerroin on yksikössä gCO<sub>2</sub>/l ja lähipäästökertoimet g/kWh.

## 5.4 Fossiilinen tuotanto

### 5.4.1 Lähtöarvot

Fossiilinen tuotanto toteutettiin välillä 26.6.2023-30.6.2023. Fossiilisessa tuotannossa murskattiin Nesteen fossiilisella polttoöljyllä 31 506,5 t. Polttoöljyä kului yhteensä 29 752



I. Fossiilisessa tuotannossa työkoneiden polttoaineen kulutus oli 0,34 litraa tuotettua kiviainestonnia kohden, jolloin työkoneiden osuus tuotannon kokonaispolttoainemäärästä oli 36 % ja aggregaatin osuus 64 %. Urakoitsija arvioi, että työkoneiden polttoaineiden osuus jakautui tasaisesti kaivinkoneen ja pyöräkuormaajan kesken. Fossiilisen tuotannon lajitteet ja niiden tuotantomäärät on esitetty taulukossa 16.

**Taulukko 16. Fossiilisen tuotannon lajitteet ja niiden tuotantomäärät.**

Fossiilinen tuotanto	Lajitteet					
	KaM 0/6 mm	KaM 6/16 mm	KaM 16/32 mm	KaM 0/150 mm	KaM 0/16 mm	Yhteensä
29.5.2023	154,0	212,3	858,0		616,8	1841,1
31.5.2023	34,3	75,7	234,5		196,6	541,1
1.6.2023	138,3	210,2	874,0		620,5	1842,9
2.6.2023	147,8	201,9	722,7		579,8	1652,1
5.6.2023	151,7	198,0	694,0		493,8	1537,4
6.6.2023	217,2	284,8	986,9		829,3	2318,1
7.6.2023	242,2	327,4	1042,6		707,6	2319,7
8.6.2023	271,9	394,4	1113,5		835,2	2615,0
9.6.2023				2671,7		2671,7
12.6.2023	179,9	252,9	733,1		503,5	1669,4
13.6.2023	276,8	297,1	963,5		617,5	2154,9
14.6.2023	153,4	282,3	594,7		560,9	1591,3
15.6.2023	71,2	124,0	309,5		233,1	737,8
16.6.2023	121,7	186,7	631,7		378,4	1318,5
19.6.2023	244,9	457,8			389,4	1092,1
20.6.2023	396,9	631,7			517,3	1545,9
21.6.2023	311,1	551,3			336,8	1199,2
22.6.2023	346,7	511,8			356,8	1215,3
3.7.2023				1643,1		1643,1
Yhteensä [t]:	3459,9	5200,1	9758,6	4314,8	8773,2	<b>31506,5</b>

Fossiilisessa tuotannossa tuotettiin enimmäkseen pienirakeisia kiviainestuotteita. Suurirakeista KaM 0/150 mm tuotettiin noin 14 % fossiilisen tuotannon kokonaistuotantomäärästä.

Vähähiilisessä tuotannossa arvioitiin Kick -kaavan avulla murskauksen energiankulutuksia seuraaville lajitteille: KaM 0/6, KaM 6/16 mm ja KaM 0/16 mm. Fossiilisessa tuotannossa tuotettiin myös edellä mainittuja lajitteita, jolloin Kick -kaavan avulla arvioidut murskauksen energiankulutukset pysyvät samoina, sillä murskauslaitoksen kokoonpano ja asetukset ovat samat fossiilisessa tuotannossa. Murskattava louhe oli myös leuka-murskaimelle saman kokoista ja kallion laatu oletetaan pysyvän samana. Fossiilisessa tuotannossa tuotettiin lisäksi KaM 16/32 mm ja KaM 0/150 mm lajitteita. Arvioidaan kaavan 11 avulla kyseisten lajitteiden murskauksen energiankulutuksia. Lajitteen 16/32 energiankulutuksen arvioimisessa käytetään 0/16 mm ja 0/32 mm energiakulutuksien keskiarvoa.

$$E_{ktes} = K_k \cdot \sigma_p \cdot \ln \left( \frac{x_1}{x_2} \right), \text{ josta} \quad (11)$$

$E_{ktes}$  = Murskauksen energiankulutus [kWh/t]

$$K_k \cdot \sigma_p = 1,19 \text{ kWh/t}$$

$$0/6 \text{ mm: } x_1 = 0,6 \text{ m ja } x_2 = 0,006 \text{ m}$$

$$0/16 \text{ mm: } x_1 = 0,6 \text{ m ja } x_2 = 0,016 \text{ m}$$

$$0/32 \text{ mm: } x_1 = 0,6 \text{ m ja } x_2 = 0,032 \text{ m}$$

$$0/150 \text{ mm: } x_1 = 0,6 \text{ m ja } x_2 = 0,150 \text{ m}$$

Taulukossa 17 on kaavan 11 avulla arvioidut murskauksen energiankulutukset lajitekohtaisesti fossiiliselle tuotannolle.

**Taulukko 17.** Murskauksen energiankulutus lajitekohtaisesti (Kaava 11).

	KaM 0/6 mm	KaM 6/16 mm	KaM 0/16 mm	KaM 16/32 mm	KaM 0/150 mm
Energiankulutus lajitteittain [kWh/t]	5,46	4,88	4,30	3,89	1,64

Taulukon 17 energiankulutuksille toteutetaan samantapainen skaalaus kuin vähähiilisen tuotannon arvioiduille murskauksen energiankulutuksille. Määritetään ensimmäisenä kaavan 12 avulla skaalaukseen tarvittava aggregaatin kokonaisenergiankulutus.

$$\begin{aligned} \text{Fossiilisen tuotannon aggregaatin kokonaisenergiakulutus [kWh]} &= 19045,9 \text{ l} \cdot 10 \text{ kWh/l} \\ &= 190\,459 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (12)$$

Fossiilisessa tuotannossa aggregaatti kulutti kokonaisuudessaan 190 459 kWh. Määritetään seuraavaksi aggregaatin kerroin ( $A_k$ ) kaavan 13 avulla.

$$A_k = \frac{5,46 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \cdot 3459,9 \text{ t} + 4,88 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \cdot 5200,1 \text{ t} + 3,89 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \cdot 9758,6 \text{ t} + 1,64 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \cdot 4314,8 \text{ t} + 4,30 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \cdot 8773,2 \text{ t}}{190\,459 \text{ kWh}} = 0,67 \quad (13)$$

Fossiilisen tuotannon aggregaatin kerroin ( $A_k$ ) on 0,67. Aggregaatin kertoimen ( $A_k$ ) avulla skaalataan taulukon 17 murskauksen energiankulutukset siten, että lajitteiden energiankulutukset vastaavat kokonaisuudessaan fossiilisen tuotannon kokonaisenergiankulutusta. Lasketaan lajitteiden kokonaisenergiankulutukset vähähiilisen tuotannon lähtötiedot kappaleessa 5.3.1 esitetyn kaavan 10 avulla.

Taulukossa 18 on esitetty aggregaatin lajitekohtaiset kokonaisenergiankulutukset fossiilisessa tuotannossa. Lisäksi taulukossa 18 on esitetty mekaanisen energiankulutus lajitekohtaisesti.

**Taulukko 18.** Laskennalliset määritetyt lajitekohtaiset energiankulutukset fossiilisessa tuotannossa.

Laskennalliset määritetyt lajitekohtaiset energiankulutukset					
	KaM 0/6 mm	KaM 6/16 mm	KaM 0/16 mm	KaM 16/32 mm	KaM 0/150 mm
Laskennallinen kokonaisenergiankulutus [kWh/t]	8,19	7,32	6,45	5,83	2,47
Energiankulutus (hyötysuhde: 0,16) [kWh/t]	1,31	1,17	1,03	0,93	0,40

Taulukkoon 19 on laskettu tarvittavat lähtötiedot fossiilisen tuotannon päästölaskentaan varten. Taulukossa 19 on esitetty myös polttoaineen kulutukset lajitekohtaisesti, sillä kevyen polttoöljyn energiasisältö on 10 kWh/t.

**Taulukko 19.** Fossiilisen tuotannon päästölaskentaan tarvittavat lähtötiedot.

Aggregaatin ja työkoneiden lajitekohtainen polttoaineen määrä ja energian kulutus						
	KaM 0-6 mm	KaM 6-16 mm	KaM 0-16 mm	KaM 16-32 mm	KaM 0-150 mm	Yhteensä
Aggregaatin polttoainemäärä [l]	2833,6	3805,3	5654,8	5688,5	1063,8	19045,9
Työkoneiden polttoainemäärä [l]	1175,7	1767,0	2981,1	3316,0	1466,2	10705,9
Aggregaatti + työkoneiden polttoainemäärä [l]	4009,2	5572,3	8636,0	9004,4	2530	<b>29752</b>
Aggregaatin mekaanisen energiankulutus [kWh], hyötysuhde: 0,16	4533,7	6088,5	9047,7	9101,5	1702,0	30473,5
Työkoneen mekaanisen energiankulutus, hyötysuhde 0,35 [kWh]	2057,4	3092,2	5217,0	5802,9	2565,8	18735,3

Taulukossa 19 on tarkistettu, että kokonaispolttoainemäärä 29 752 l täsmää urakoitsijan ilmoittaman kokonaispolttoainemäärän kanssa.

## 5.4.2 Päästökertoimet

Fossiilisen tuotannon polttoaineena käytettiin fossiilista kevyttä polttoöljyä. Hiilidioksidipäästökerroin on valmistajan ilmoittama. Lähipäästökertoimiin vaikuttavat moottorin EU:n päästoluokkavaatimus, polttoaine ja moottorin valmistajan ilmoittamat lähipäästöt. Fossiilisessa tuotannossa käytetty polttoöljy on rikitöntä, eli rikkipäästöjä ei tarvitse määrittää. Taulukossa 20 on esitetty fossiilisen tuotannon hiilidioksidipäästökerroin.

**Taulukko 20.** Fossiilisen tuotannon hiilidioksidipäästökerroin.

Polttoöljy (kesälaatu)	Päästökerroin [gCO <sub>2</sub> /l]
CO <sub>2</sub>	2550

Fossiilisen tuotannon lähipäästökertoimet muodostetaan moottorin valmistajan päästoluokituksen perusteella. Fossiilisen tuotannon lähipäästökertoimille ei tehdä päästövä-

hennyksiä vähähiilisen tuotannon tapaan, sillä moottoreiden valmistajan mukaiset päästöluokitukset on luotu fossiilisille polttoaineille. Taulukossa 21 on esitetty fossiilisen tuotannon lähipäästökertoimet.

**Taulukko 21.** Fossiilisen tuotannon lähipäästökertoimet.

Lähipäästö	Päästökerroin: Kaivinkone (Hitachi 520 LCH-5) [g/kWh]	Päästökerroin: Pyöräkuormaaja (CAT 980M) [g/kWh]	Päästökerroin: Aggregaatti (CAT 18) [g/kWh]
NO <sub>x</sub>	2,0	0,4	7,37
CO	3,5	3,5	0,13
HC	0,19	0,19	0
PM	0,025	0,025	0

Fossiilisen tuotannon päästölaskenta toteutetaan taulukkojen 20 ja 21 mukaisilla päästökertoimilla. Fossiilisen tuotannon päästökertoimet ovat suuremmat kuin vähähiilisessä tuotannossa, sillä polttoaineen alkuperä on fossiilinen.

## 5.5 Kuljetus

### 5.5.1 Lähtötiedot

Kuljetuksen päästölaskenta toteutetaan yleisesti kiviainesten kuljettamiseen käytetyille ajoneuvoille, kuten perävaunulliselle kuorma-autolle ja yksittäiselle kuorma-autolle. Perävaunullisen kuorma-auton kuormasta käytetään nimitystä ”kasettikuorma” ja kuorma-auton kuormasta käytetään nimitystä ”nuppikuorma”. Päästölaskennassa määritetään kuljetusta matkasta aiheutuneet hiilidioksidi- ja lähipäästöt. Päästölaskennassa huomioidaan moottorin päästöluokitus, käytetty polttoaine, kuorman paino ja keskimääräinen kulutus. Polttoaineen kulutukseen vaikuttaa voimakkaasti esimerkiksi kuormien paino. Päästölaskennassa arvioidut kuormien painot vastaavat suurusluokaltaan noin kiviainek-sien kuljetuksien kuormia. Päästölaskennassa huomioidaan lisäksi ajoneuvon paluumat-kasta aiheutuneet päästöt, jolloin ajoneuvolla ei ole kuormaa. Paluumatka oletetaan ajet-tavan ilman kuormaa. Päästölaskennassa käytettävät lähtöarvot on esitetty taulukossa 22. Kokeellisen osan vähähiilisen tuotannon työkonella havaittiin, että uusiutuvan polttoöljyn kulutus oli 3 % suurempi kuin kevyen polttoöljyn kulutus. Taulukossa 22 on huomioitu uusiutuvan dieselin korkeampi kulutus, sillä uusiutuva diesel on koostumukseltaan uusiutuvaa polttoöljyä.

**Taulukko 22.** Lähtötiedot kuljetuksen päästölaskennalle (Volvo Truck Corporation 2018, s. 3; S.N Hossain & S. Bari 2014, Destia 2024).

Lähtötiedot	Kuorma-auto	Perävaunullinen kuorma-auto
Polttoaine	Diesel ja Uusiutuva diesel	
Diesel energiasäلتö [kWh/l]	10	
Uusiutuva diesel energiasäلتö [kWh/l]	9,46	
Maksimikuorma [t]	22	45
Yhteispaino maksimikuorman kanssa [t]	32	65
Menomatka [km]	5,15,30	
Dieselin keskimääräinen kulutus, tyhjänä [l/km]	0,28	0,30
Uusiutuvan dieselin keskimääräinen kulutus, tyhjänä [l/km]	0,28	0,30
Dieselin keskimääräinen kulutus, kuorman kanssa [l/100 km]	0,38	0,49
Uusiutuvan dieselin keskimääräinen kulutus, kuorman kanssa [l/km]	0,39	0,51
Dieselmoottorin hyötysuhde	0,35	

Taulukossa 22 on esitetty kiviaineksen kuljetuksen päästölaskentaan tarvittavat lähtötiedot. Keskimääräiset polttoaineen kulutukset ovat peräisin Volvon teettämästä päästöraportista, jossa on arvioitu kuorma-auton ja perävaunullisen kuorma-auton polttoaineen kulutusta sekä tyhjänä että täyden kuorman kanssa. Lisäksi keskimääräisiä kulutuksia on arvioitu myös Destia Oy:n toimesta. Päästölaskennassa polttoaineen kulutuksen yksikkö on litraa/km. (Volvo Truck Corporation 2018, s.3; Destia 2024)

### 5.5.2 Päästökertoimet

Päästölaskennassa käytetään Euro-päästoluokituksen mukaisia lähipäästoluokkia dieselpolttoainetta käyttäville kuorma-autoille. Dieselin hiilidioksidipäästökerroin on sama

kuin fossiilisella polttoöljyllä eli 2,55 kgCO<sub>2</sub>/l. Lähipäästölaskennassa käytetään päästöluokkia Euro V ja Euro VI (DieselNet 2021a). Taulukossa 23 on esitetty kuorma-auton lähipäästökertoimet, kun polttoaineena on diesel.

**Taulukko 23.** Kuorma-auton lähipäästökertoimet dieselille (DieselNet 2021a).

Päästöluokka	Euro V	Euro VI
NO <sub>x</sub> [g/kWh]	2,0	0,4
CO [g/kWh]	1,5	1,5
HC [g/kWh]	0,46	0,13
PM [g/kWh]	0,02	0,01

Kuljetuksesta aiheutuneita päästöjä arvioidaan dieselille ja uusiutuvalla dieselille. Käytetään uusiutuvan dieselin päästökertoimena samaa arvoa kuin vähähiilisen tuotannon päästölaskennassa. Uusiutuvan dieselin päästökertoimena käytetään arvoa 260 gCO<sub>2</sub>/l. Kappaleessa 5.3.2 taulukossa 12 on esitetty lähipäästövähennykset, kun käytetään Neste MY polttoöljyä. Käytetään taulukon 12 lähipäästövähennyksiä kun määritellään kuljetuksesta aiheutuneita lähipäästöjä uusiutuvan dieselin käytön osalta. Taulukossa 24 on esitetty lähipäästökertoimet, kun käytetään uusiutuvaa dieseliä. Taulukkoon 24 on tehty uusiutuvan dieselin käytöstä johtuvat lähipäästövähennykset.

**Taulukko 24.** Kuorma-auton lähipäästökertoimet uusiutuvalla dieselille.

Päästöluokka	Euro V	Euro VI
NO <sub>x</sub> [g/kWh]	1,82	0,36
CO [g/kWh]	1,14	1,14
HC [g/kWh]	0,32	0,09
PM [g/kWh]	0,01	0,01

Kuljetuksien lähipäästöjen määrittämiseen käytetään taulukoiden 23 ja 24 lähipäästökertoimia. Hiilidioksidipäästökertoimina käytetään dieselille 2,55 kgCO<sub>2</sub>/l ja uusiutuvalla dieselille 260 gCO<sub>2</sub>/l. Taulukon 23 ja 24 päästökertoimet ovat moottorin hyötysuhteesta riippuvaisia niin kuin ei-liikenne käyttöisten työkoneneiden päästöluokat (DieselNet 2024).

## 5.6 Yhteenveto päästölaskentamenetelmistä

### 5.6.1 Kiviainestuotannon päästölaskentamenetelmä

Kiviainestuotantojen päästölaskenta toteutetaan käytetyn polttoaineen ja moottoreiden päästöluokitusten mukaan. Hiilidioksidipäästöjen laskenta on riippuvainen kulutetusta polttoaineen määrästä, kun taas lähipäästöjen laskenta on riippuvainen mekaanisen

energiankulutuksesta. Esitetään seuraavaksi kiviainestuotannon päästölaskentamenetelmä tiivistettynä:

1. Lajitekohtaista päästötarkastelua varten määritetään Kick-kaavan avulla murskauksen energiankulutusarvio jokaiselle tuotetulle lajitteelle.
2. Energiankulutusarvioiden avulla määritetään aggregaatin kertoimet ( $A_k$ ) tuotannoille. Aggregaatin kertoimien ( $A_k$ ) avulla saadaan selvitettyä lajitekohtaiset kokonaisenergiankulutukset tuotannoille.
3. Lajitekohtaisten kokonaisenergiankulutuksien avulla määritetään lajitekohtaiset polttoaineen kulutukset polttoaineen energiasisällön avulla.
4. Polttoaineiden kulutuksien avulla määritetään lajitekohtaiset hiilidioksidipäästöt.
5. Lähipäästölaskentaa varten määritetään aggregaatin hyötysuhteeksi 0,16.
6. Aggregaatin hyötysuhteen avulla muutettiin lajitekohtaiset kokonaisenergiankulutukset mekaanisen energiankulutuksiksi, joiden avulla määritetään lajitekohtaisesti lähipäästöt.
7. Työkoneiden hiilidioksidipäästöt määritetään työkoneiden polttoaineen kulutuksen mukaan.
8. Työkoneiden lähipäästöt määritetään dieselmoottorin käyttämän mekaanisen energian mukaan. Mekaanisen energian määrittämisessä on käytetty dieselmoottorin hyötysuhdetta 0,35.

Edellä mainittu päästölaskentamenetelmä antaa päästöarvioita jokaiselle tuotetulle lajitteelle. Lajitekohtaista päästötarkastelua arvioidaan työssä Kick -kaavan avulla, jossa määritettiin murskauksen energiankulutusarvioita tietyn kiviaineslajitteen tuotannossa. Kick -kaava antaa ainoastaan karkean arvion murskauksen energiankulutuksesta. Kick -kaava ei ota huomioon murskauslaitoksen kuljettimia tai aggregaatin hyötysuhteita. (Coulson & Richardson 2002, s 100)

Lajitekohtaisten polttoaineen kulutuksien selvittämiseksi täytyy Kick-kaavan avulla määritetyille murskauksien energiankulutusarvioille tehdä muunnos, jossa huomioidaan tuotannon kokonaisenergiankulutus. Muunnoksen toteuttamiseksi määritettiin tuotantokohteisesti aggregaatin kerroin, jolla skaalattiin Kick-kaavan avulla saadut energiankulutukset vastaamaan tuotannon kokonaisenergiankulutusta. Lajitekohtaiset kokonaisenergiankulutukset vastaavat siten yhteenlaskettuna aggregaatin kokonaisenergiankulutusta. Skaalauksen jälkeen lajitekohtaisissa kokonaisenergiankulutuksissa otetaan huomioon aggregaatin hyötysuhde. Hyötysuhteen ansiosta saadaan määritettyä aggregaatin tuottama mekaaninen energia lajitekohtaisesti.

Työkoneen polttoaineen kulutus oli vähähiilisessä tuotannossa 0,35 l/t ja fossiilisessa tuotannossa noin 0,34 l/t. Työkoneiden polttoaineiden kulutukset olivat urakoitsijan tiedottamat. Työkoneiden moottoreiden hyötysuhteiden avulla saatiin määritettyä mekaanisen energian määrät. Taulukossa 25 on esitetty kiviainestuotannon päästölaskennan lähtöarvot.



**Taulukko 25.** Kiviainestuotannon päästölaskennan lähtöarvot (Kappale 5.2; Kappale 5.3; Kappale 5.4).

<b>Kiviainestuotannon päästölaskennan lähtöarvot</b>	
<b>Murskauksen energiankulutusarvio (Kick-kaava):</b>	
KaM 0/6 mm: 5,46 kWh/t	
KaM 6/16 mm: 4,88 kWh/t	
KaM 0/16 mm: 4,30 kWh/t	
KaM 16/32 mm: 3,81 kWh/t	
KaM 0/32 mm: 3,48 kWh/t	
KaM 0/90 mm: 2,25 kWh/t	
KaM 0/150 mm: 1,64 kWh/t	
<b>Vähähiilinen tuotanto</b>	<b>Fossiilinen tuotanto</b>
<b>Aggregaatin kokonaisenergiankulutus (Aggregaatin kerroin 0,71)</b>	<b>Aggregaatin kokonaisenergiankulutus (Aggregaatin kerroin 0,67)</b>
KaM 0/6 mm: 7,74 kWh/t	KaM 0/6 mm: 8,19 kWh/t
KaM 6/16 mm: 6,92 kWh/t	KaM 6/16 mm: 7,32 kWh/t
KaM 0/16 mm: 6,09 kWh/t	KaM 0/16 mm: 6,45 kWh/t
KaM 0/32 mm: 4,93 kWh/t	KaM 16/32 mm: 5,83 kWh/t
KaM 0/90 mm: 3,19 kWh/t	KaM 0/150 mm: 2,47 kWh/t
<b>Aggregaatin mekaanisen energiankulutus (olet. hyötysuhde: 0,16)</b>	<b>Aggregaatin mekaanisen energiankulutus (olet. hyötysuhde: 0,16)</b>
KaM 0/6 mm: 1,24 kWh/t	KaM 0/6 mm: 1,31 kWh/t
KaM 6/16 mm: 1,11 kWh/t	KaM 6/16 mm: 1,17 kWh/t
KaM 0/16 mm: 0,97 kWh/t	KaM 0/16 mm: 1,03 kWh/t
KaM 0/32 mm: 0,79 kWh/t	KaM 16/32 mm: 0,93 kWh/t
KaM 0/90 mm: 0,51 kWh/t	KaM 0/150 mm: 0,40 kWh/t
<b>Päästökertoimet</b>	
<b>Aggregaatti</b>	
CO <sub>2</sub> : 260 g/l	CO <sub>2</sub> : 2550 g/l
NO <sub>x</sub> : 6,7 g/kWh	NO <sub>x</sub> : 7,37 g/kWh
CO: 0,1 g/kWh	CO: 0,13 g/kWh
HC: 0 g/kWh	HC: 0 g/kWh
PM: 0 g/kWh	PM: 0 g/kWh
<b>Pyöräkuormaaja</b>	
CO <sub>2</sub> : 260 g/l	CO <sub>2</sub> : 2550 g/l
NO <sub>x</sub> : 0,36 g/kWh	NO <sub>x</sub> : 0,4 g/kWh
CO: 2,66 g/kWh	CO: 3,5 g/kWh
HC: 0,13 g/kWh	HC: 0,19 g/kWh
PM: 0,017 g/kWh	PM: 0,025 g/kWh
<b>Kaivinkone</b>	
CO <sub>2</sub> : 260 g/l	CO <sub>2</sub> : 2550 g/l
NO <sub>x</sub> : 1,82 g/kWh	NO <sub>x</sub> : 2,0 g/kWh
CO: 2,66 g/kWh	CO: 3,5 g/kWh
HC: 0,13 g/kWh	HC: 0,19 g/kWh
PM: 0,017 g/kWh	PM: 0,025 g/kWh

Taulukosta 25 havaitaan, että fossiilisen tuotannon aggregaatilla energiankulutus oli suurempaa kuin vähähiilisen tuotannon aggregaatilla, mikä johtui erilaisesta tuotejakaumasta. Taulukon 25 lajitekohtaisilla energiankulutuksilla ja päästökertoimilla saadaan arvioitua laskennallisesti aggregaatin, pyöräkuormaajan ja kaivinkoneen päästöjä. Taulukossa 25 ei ole esitetty lajitekohtaisia mekaanisen energian määriä tai polttoainemääriä. Taulukossa 26 on esitetty molempien tapausten laskentaan tarvittavat polttoainemäärät ja aggregaatin tuottamat mekaanisen energian määrät lajitteittain.

**Taulukko 26.** Vähähiilisen ja fossiilisen tuotannon polttoainemäärät ja mekaanisen energian määrät.

Vähähiilisen tuotannon aggregaatin ja työkoneiden lajitekohtaiset polttoaineen ja mekaanisen energian kulutusmäärät						
Lajitteet	KaM 0-6 mm	KaM 6-16 mm	KaM 0-16 mm	KaM 0-32 mm	KaM 0-90 mm	Yhteensä:
Aggregaatti [l]	395,0	482,6	244,0	1443,1	2836,5	5401,2
Työkoneiden polttoainemäärät [l]	169,0	231,0	132,6	969,6	2944,6	4446,8
Aggregaatin mek. energian määrä (Hyötysuhde: 0,16) [kWh]	597,9	730,4	369,3	2184,3	4293,3	8175,3
Työkoneen mek. energian määrä (Hyötysuhde: 0,35) [kWh]	279,7	382,4	219,5	1605,2	4874,9	7361,7
Fossiilisen tuotannon aggregaatin ja työkoneiden lajitekohtaiset polttoaineen ja mekaanisen energian kulutusmäärät						
Lajitteet	KaM 0-6 mm	KaM 6-16 mm	KaM 0-16 mm	KaM 16-32 mm	KaM 0-150 mm	Yhteensä
Aggregaatin polttoainemäärä [l]	2833,6	3805,3	5654,8	5688,5	1063,8	19045,9
Työkoneiden polttoainemäärä [l]	1175,7	1767,0	2981,1	3316,0	1466,2	10705,9
Aggregaatin mek. energian määrä (Hyötysuhde: 0,16) [kWh]	4533,7	6088,5	9047,7	9101,5	1702,0	30473,5
Työkoneen mek. energian määrä (Hyötysuhde: 0,35) [kWh]	2057,4	3092,2	5217,0	5802,9	2565,8	18735,3

Taulukoiden 25 ja 26 avulla määritetään kiviainestuotantojen päästöt. Kiviainestuotannon hiilidioksidipäästöt lasketaan kaavan 14 avulla ja lähipäästöt (NO<sub>x</sub>, CO, HC, PM) lasketaan kaavan 15 avulla.

$$\text{CO}_2\text{-päästö määrä [t]} = (\text{CO}_2\text{-kerroin [gCO}_2\text{/l]} \cdot \text{Polttoainemäärä [l]}) / 1\,000\,000 \quad (14)$$

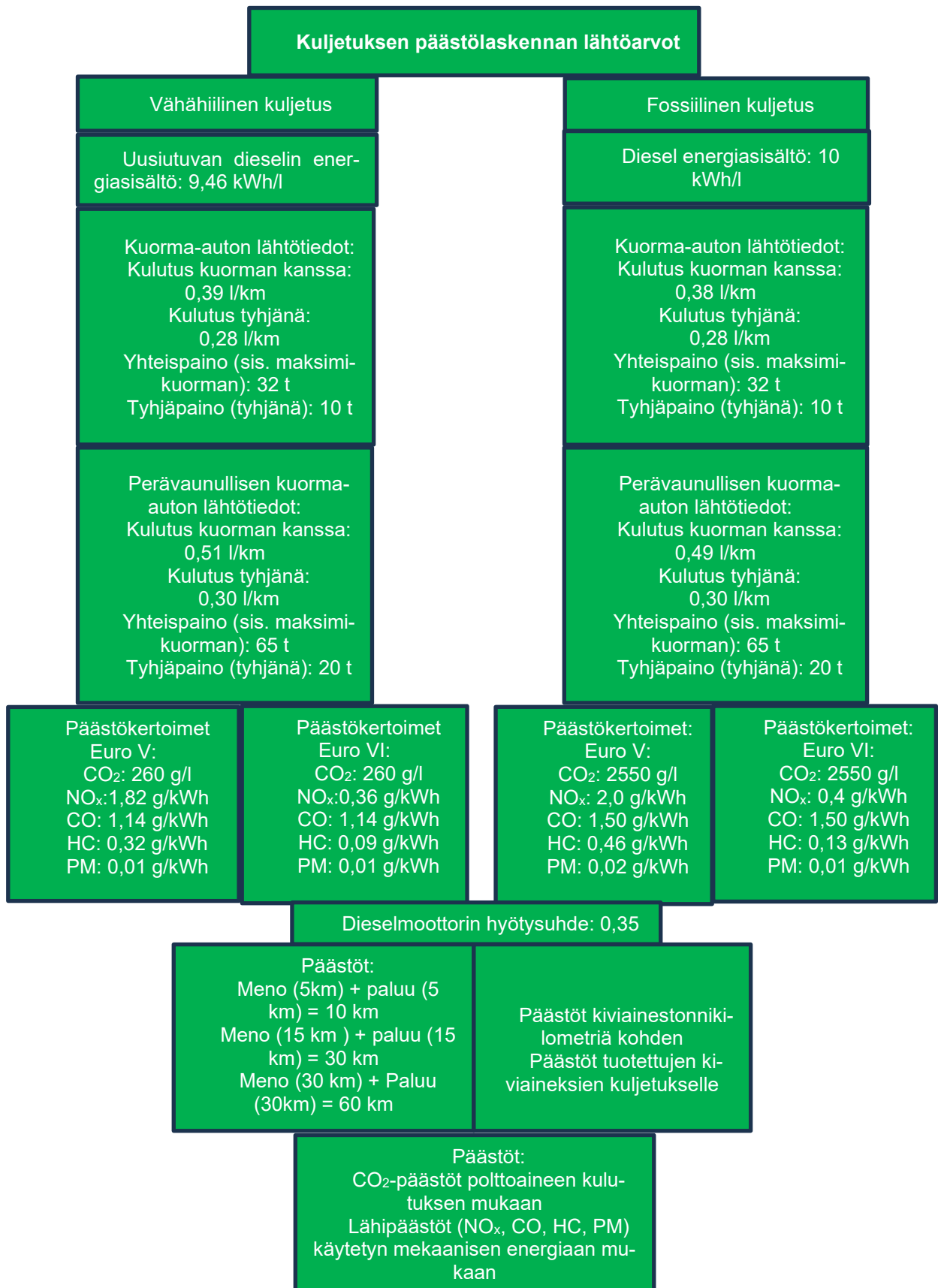
$$\begin{aligned} \text{Lähipäästö määrä [t]} = & (\text{Aggregaatin lähipäästökerroin [g/kWh]} \cdot \text{Aggregaatin mekaanisen} \\ & \text{energian määrä [kWh]} + \text{Kaivinkoneen lähipäästökerroin [g/kWh]} \cdot \text{Työkoneen mekaani-} \\ & \text{sen energian määrä [kWh]} + \text{Pyöräkuormaajan lähipäästökerroin [g/kWh]} \cdot \text{Työkoneen} \\ & \text{mekaanisen energian määrä [kWh]}) / 1\,000\,000 \end{aligned} \quad (15)$$

Kiviainestuotannon päästölaskenta toteutetaan kappaleen 5.6 esitetyllä laskentaperiaatteella ja sen kootulla laskenta-aineistolla. Kyseisellä päästölaskennalla saadaan arvioitua eri polttoaineilla tuotetun murskeen päästöjä ja lajitekohtaisia päästöjä tuotettua kiviainestonnia kohden.

## 5.6.2 Kuljetuksen päästölaskentamenetelmä

Kuljetuksen päästölaskenta tehdään sekä kuorma-autolle että perävaunullisille kuorma-autoille, joilla on Euro V ja Euro VI päästöluokitellut moottorit. Päästöjä määritellään 10 km, 30 km ja 60 km kaksisuuntaisille matkoille. Kuljetuksesta käsitellään kaksi eri tapusta, joissa toisessa on käytössä diesel ja toisessa uusiutuva diesel. Kuljetuksista käytetään nimityksiä fossiilinen kuljetus (diesel polttoaineena) ja vähähiilinen kuljetus (uusiutuva diesel polttoaineena). Päästöjä tarkastellaan kokeellisen osan tuotettujen kiviaineksien kuljetuksille ja kiviainestonnikilometriä kohden. Vähähiilisen kuljetuksen päästöluokille on tehty samanlaiset päästövähennykset kuin vähähiilisen tuotannon päästökertoimille. Kuljetuksen päästölaskennan lähtöarvot on esitetty kaaviossa 1.

**Kaavio 1.** Fossiilisen ja vähähiilisen kuljetuksen päästölaskennan lähtöarvot (Kappale 5.5).



Kiviainesten kuljettamisen päästöt lasketaan kaavion 1 mukaisilla lähtöarvoilla. Esitetään seuraavaksi kuljetuksen päästölaskentaan tarvittavat kaavat. Kuljetuksen kaksisuuntaisen matkan hiilidioksidipäästöt lasketaan kaavan 16 avulla.

$$\text{CO}_2\text{-päästöt [g]} = \text{CO}_2\text{-päästökerroin [g/l]} \cdot (\text{Keskimääräinen polttoaineenkulutus, kuorman kanssa [l/km]} \cdot \text{Menomatka [km]} + \text{Keskimääräinen polttoaineenkulutus, tyhjänä [l/km]} \cdot \text{Paluumatka [km]}) \quad (16)$$

Kuljetuksen kaksisuuntaisen matkan lähipäästöt (NO<sub>x</sub>, CO, HC, PM) lasketaan kaavan 17 avulla.

$$\text{Lähipäästöt [g]} = \text{Lähipäästökerroin [g/kWh]} \cdot \text{Diesel energiasisältö [kWh/l]} \cdot \text{Dieselmoottorin hyötysuhde} \cdot \text{Keskimääräinen polttoaineenkulutus, kuorman kanssa [l/km]} \cdot \text{Menomatka [km]} + \text{Lähipäästökerroin [g/kWh]} \cdot \text{Diesel energiasisältö [kWh/l]} \cdot \text{Dieselmoottorin hyötysuhde} \cdot \text{Keskimääräinen polttoaineenkulutus, tyhjänä [l/km]} \cdot \text{Paluumatka [km]} \quad (17)$$

Kaavan 16 ja 17 avulla määritetään kiviaineksien kuljetuksien päästöt 10 km, 30 km ja 60 km kaksisuuntaisille matkoille. Päästöt esitetään lisäksi kuljettua kilometriä kohden täyden kuorman kanssa ja kiviainestonnikilometriä kohden.

Hiilidioksidipäästöt kiviainestonnikilometriä kohden lasketaan kaavan 18 avulla.

$$\text{CO}_2\text{-päästöt [g/t-km]} = (\text{CO}_2\text{-päästökerroin [g/l]} \cdot \text{Keskimääräinen polttoaineenkulutus, kuorman kanssa [l/km]}) / \text{Maksimikuorma [t]} \quad (18)$$

Lähipäästöt kiviainestonnikilometriä kohden lasketaan kaavan 19 avulla.

$$\text{Lähipäästöt [g/t-km]} = (\text{Lähipäästökerroin [g/kWh]} \cdot \text{Diesel energiasisältö [kWh/l]} \cdot \text{Dieselmoottorin hyötysuhde} \cdot \text{Keskimääräinen polttoaineenkulutus, kuorman kanssa [l/km]}) / \text{Maksimikuorma [t]} \quad (19)$$

Hiilidioksidipäästöt kilometriä kohden lasketaan kaavan 20 avulla.

$$\text{CO}_2\text{-päästöt [g/km]} = (\text{CO}_2\text{-päästökerroin [g/l]} \cdot \text{Keskimääräinen polttoaineenkulutus, kuorman kanssa [l/km]}) \quad (20)$$

Määritetään kuormauskerrat kokeellisen osan tuotetuille kiviaineksille. Kuorma-auton ja perävaunullisen kuorma-auton maksimikuormat ovat 22 t ja 45 t (Destia 2024). Taulukossa 27 on esitetty kuormauskerrat tuotetuille kiviaineksille. Kuormauskerrat on laskettu tuotantomäärän ja kuljetettavan määrän suhteena.

**Taulukko 27.** Kuormauskerrat tuotetuille kiviaineksille.

<b>Kuormauskerrat (Tuotantomäärän ja kuljetettavan määrän suhteena)</b>			
Vähähiilinen tuotanto (12701,1 t)		Fossiilinen tuotanto (31506,5 t)	
Kuorma-auto	Perävaunullinen kuorma-auto	Kuorma-auto	Perävaunullinen kuorma-auto
578 kpl	283 kpl	1433 kpl	701 kpl

Vähähiilisen tuotannon kiviaineksille (12 705,1 t) vaaditaan 578 kuorma-autollista tai 283 perävaunullista kuorma-autollista kuormaa. Fossiilisen tuotannon kiviaineksille (31 506,5 t) vaaditaan 1433 kuorma-autollista tai 701 perävaunullista kuormaa.

## 6. KIVIAINESTUOTANNON JA KULJETUKSEN PÄÄSTÖT

### 6.1 Vähähiilinen tuotannon päästöt ja hiilikompensaatio

#### 6.1.1 Päästöt

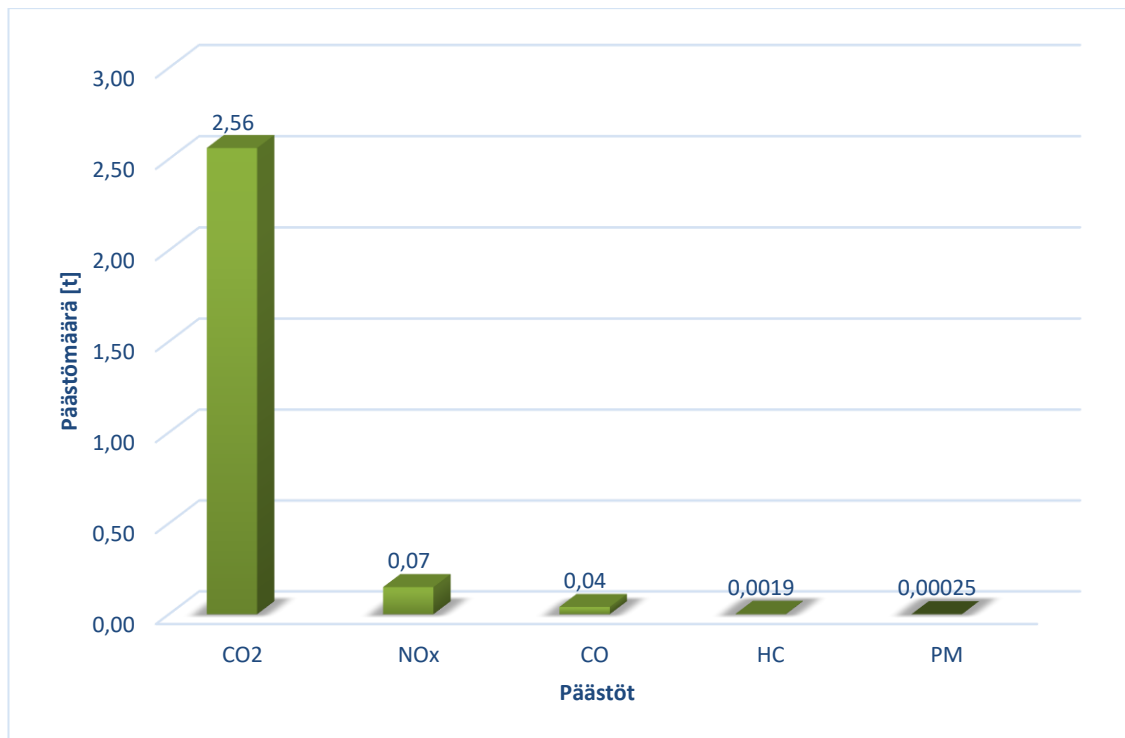
Vähähiilisen tuotannon päästöt koostuvat hiilidioksidi-, typenoksidi-, häkä-, hiilivety- ja pienhiukkaspäästöistä. Kokonaispäästömaarien yksikkö on tonni [t] eli 1000 kg. Tuotettua kiviainestonnia kohden päästö määrät ilmoitetaan grammoissa. Taulukossa 28 on esitetty vähähiilisen tuotannon päästölaskelmat. Päästöt on laskettu kappaleessa 5.6.1 esitetyn päästölaskentamenetelmän avulla.

**Taulukko 28.** Vähähiilisen tuotannon kokonaispäästöt.

Päästöt [t]	KaM 0/6 mm	KaM 6/16 mm	KaM 0/16 mm	KaM 0/32 mm	KaM 0/90 mm	Yhteensä [t]
CO <sub>2</sub>	0,15	0,19	0,10	0,63	1,50	2,56
NO <sub>x</sub>	0,01	0,01	0,03 · 10 <sup>-1</sup>	0,02	0,04	0,07
CO	0,02 · 10 <sup>-1</sup>	0,02 · 10 <sup>-1</sup>	0,01 · 10 <sup>-1</sup>	0,01	0,03	0,04
HC	1,00 · 10 <sup>-4</sup>	1,00 · 10 <sup>-4</sup>	1,00 · 10 <sup>-4</sup>	4,00 · 10 <sup>-4</sup>	13,00 · 10 <sup>-4</sup>	19,00 · 10 <sup>-4</sup>
PM	1,00 · 10 <sup>-5</sup>	1,00 · 10 <sup>-5</sup>	1,00 · 10 <sup>-5</sup>	5,00 · 10 <sup>-5</sup>	16,00 · 10 <sup>-5</sup>	25,00 · 10 <sup>-5</sup>

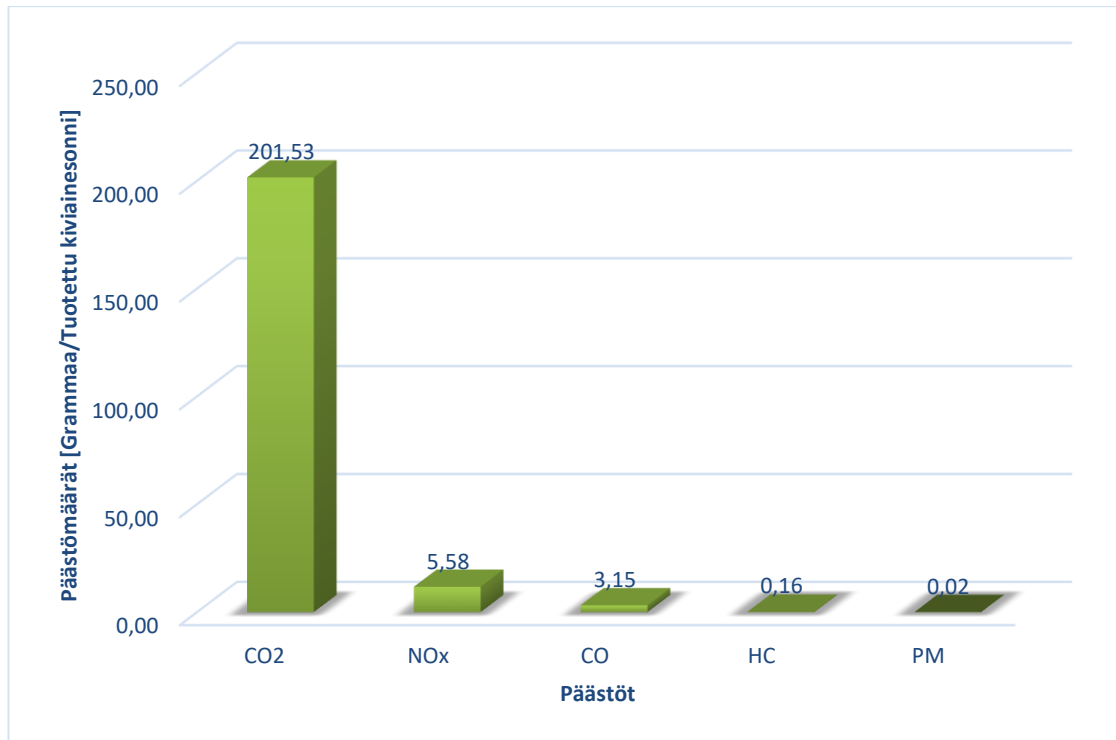
Vähähiilisessä tuotannossa hiilidioksidipäästöjä muodostui noin 2,56 t ja lähipäästöjä noin 0,1 t. Merkittävimmät lähipäästöt olivat typenoksidi- ja häkäpäästöt. Vähähiilisen tuotannon päästöt on eritelty lajitekohtaisesti taulukossa 28. Eniten päästöjä muodostui KaM 0/90 mm tuotannossa, sillä vähähiilisessä tuotannossa sitä tuotettiin eniten. Vähähiilisen tuotannon kokonaispäästöt on esitetty myös kuvassa 24.





**Kuva 24.** Vähähiilisen tuotannon kokonaispäästöt.

Kuvasta 24 huomataan selkeästi, että hiilidioksidipäästöt ovat määrällisesti merkittävin päästö verrattuna muihin päästöihin. Typenoksidipäästöt ovat seuraavaksi suurin päästö vähähiilisestä tuotannosta. Päästöjä tarkastellaan myös tuotannossa tuotettujen kiviainesten suhteen. Kuvassa 25 on esitetty vähähiilisen tuotannon päästöt tuotettua kiviainestonnia kohden.



**Kuva 25.** Vähähiilisen tuotannon päästöt tuotettua kiviainestonnia kohden.

Kiviainestonnia kohden hiilidioksidipäästöjä muodostui 202 grammaa, typenoksidipäästöjä 6 grammaa, hiilimonoksidipäästöjä 3 grammaa, hiilivety- ja hiukkaspäästöjä muodostui alle 1 gramma.

Vähähiilisen tuotannon päästöjä voidaan tarkastella lajitekohtaisesti, sillä kappaleessa 5.3.1 on määritelty laskennallisesti lajitekohtaisesti polttoaineen kulutusmäärät ja energiamäärät. Taulukossa 29 on esitetty lajitekohtaisesti päästömäärät tuotettua kiviainestonnia kohden.

**Taulukko 29.** Lajitekohtaiset päästöt tuotettua kiviainestonnia kohden.

Päästöt (Syöttö + Murskaus + Lastaus) [g/tuotettu tonni]	KaM 0/6 mm	KaM 6/16 mm	KaM 0/16 mm	KaM 0/32 mm	KaM 0/90 mm
	CO <sub>2</sub>	303,8	281,1	258,5	226,4
NO <sub>x</sub>	9,6	8,7	7,8	6,6	4,7
CO	3,2	3,2	3,2	3,2	3,1
HC	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
PM	$0,2 \cdot 10^{-1}$	$0,2 \cdot 10^{-1}$	$0,2 \cdot 10^{-1}$	$0,2 \cdot 10^{-1}$	$0,2 \cdot 10^{-1}$

Taulukosta 29 havaitaan, että hiilidioksidipäästöjä muodostui lajitteesta riippuen 179 – 304 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden. Typenoksidipäästöjä muodostui eri lajitteilla 5 – 10 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden. Hiilimonoksidipäästöjä muodostui kaikkien lajitteiden tuotannossa 3 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden. Hiilive-ty-päästöt olivat 0,2 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden ja hiukkaspäästöt olivat 0,02 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden kaikissa lajitteissa. Kuvassa 26 on esitetty hiilidioksidipäästöt lajitekohtaisesti.



**Kuva 26.** Vähähiilisen tuotannon hiilidioksidipäästöt [g] lajitekohtaisesti tuotettua kiviainestonna kohden.

Kuvasta 26 havaitaan, että korkeimmat hiilidioksidipäästöt tuotettua kiviainestonna kohden olivat KaM 0/6 mm tuotannossa ja matalimmat KaM 0/90 mm tuotannossa. KaM 0/6 mm hiilidioksidipäästöt tuotettua kiviainestonna kohden olivat 303,8 grammaa ja KaM 0/90 mm hiilidioksidipäästöt tuotettua kiviainestonna kohden olivat 178,7 grammaa.

## 6.1.2 Hiilikompensaatio

Vähähiilisen tuotannon hiilikompensaatiolaskelmien tarkoituksena on laskea tuotannosta aiheutuneiden hiilidioksidipäästöjen kompensoimiseksi tarvittava kuusen taimien määrä. Hiilikompensaatiomenetelmä on esitetty kappaleessa 2.3. Vähähiilisen tuotannon hiilidioksidipäästöjen kompensoinniksi esitetään hiilikompensoinnit vähähiiliselle tuotannolle, jossa olisi tuotettu kiviaineksia 100 000 t.

Lasketaan kaavan 21 avulla hiilidioksidipäästöt 100 000 t tuotannolle. Hiilidioksidipäästökertoimena käytetään kuvan 25 mukaista hiilidioksidipäästöä kiviainestonnakilometriä kohden. Esitetään kaavan 21 hiilidioksidipäästöt kilogrammoissa.

$$\text{CO}_2\text{-päästöt } 100\,000 \text{ t tuotannolle} = (201,53 \text{ [gCO}_2\text{/tuotettu tonni]} \cdot 100\,000 \text{ [t]}) =$$

$$20\,153\,000 \text{ g} = 20\,153 \text{ kg} \quad (21)$$

Lasketaan kappaleen 2.3 kaavan 1 avulla istutettavien kuusen taimien määrä, jossa kuusien annetaan kasvaa 60-vuotiaiksi, 80-vuotiaiksi ja 100-vuotiaiksi. Tulokset on esitetty taulukossa 30. Taulukossa 30 esitetään hiilikompensoinnit vähähiilisille tuotannoille, joissa on tuotettu kokeellisen osan verran kiviaineksia tai 100 000 t kiviaineksia.

**Taulukko 30.** Hiilikompensaatiolaskelmat vähähiiliselle tuotannolle.

Hiilikompensaatiolaskelmat istutettavalle kuusitaimikolle vähähiilisissä tuotannoissa			
	60 vuotta	80 vuotta	100 vuotta
12 701,1 t tuotannon CO <sub>2</sub> -päästöjen kompensointi [kpl]	2,3 kpl	1,7 kpl	1,4 kpl
100 000 t tuotannon CO <sub>2</sub> -päästöjen kompensointi	18,3 kpl	13,7 kpl	11,0 kpl
Kompensaatioarvo (Tuotantomäärä [t] / Kuusi [kpl])	5464 t/kpl	7486 t/kpl	9107 t/kpl

Taulukossa 30 vähähiilisen tuotannon (12 701,1 t) hiilidioksidipäästöjen kompensoinniksi vaaditaan kolme kuusentainta, jos kuusien annetaan kasvaa 60-vuotiaiksi. Mikäli kuusien annetaan kasvaa 80- ja 100-vuotiaiksi, kuusen taimia tulisi istuttaa kaksi.

Kuusen taimia tulee istuttaa 100 000 t tuotantoa kohden 19, jos taimien annetaan kasvaa 60-vuotiaiksi. 80-vuotiaiksi kasvavia taimia tulee istuttaa 14 ja 100-vuotiaaksi kasvavia taimia 11.

Taulukon 30 mukaan vähähiiliselle murskeelle voidaan esittää seuraavat kompensatioarvot:

- 60 vuotta kasvava kuusi: 1 istutettava taimi 5464 tuotettua kiviainestonna kohden
  - 80 vuotta kasvava kuusi: 1 istutettava taimi 7486 tuotettua kiviainestonna kohden
  - 100 vuotta kasvava kuusi: 1 istutettava taimi 9107 tuotettua kiviainestonna kohden
- Kompensatioarvot on laskettu tarkoilla arvoilla.

## 6.2 Fossiilinen tuotannon päästöt ja hiilikompensaatio

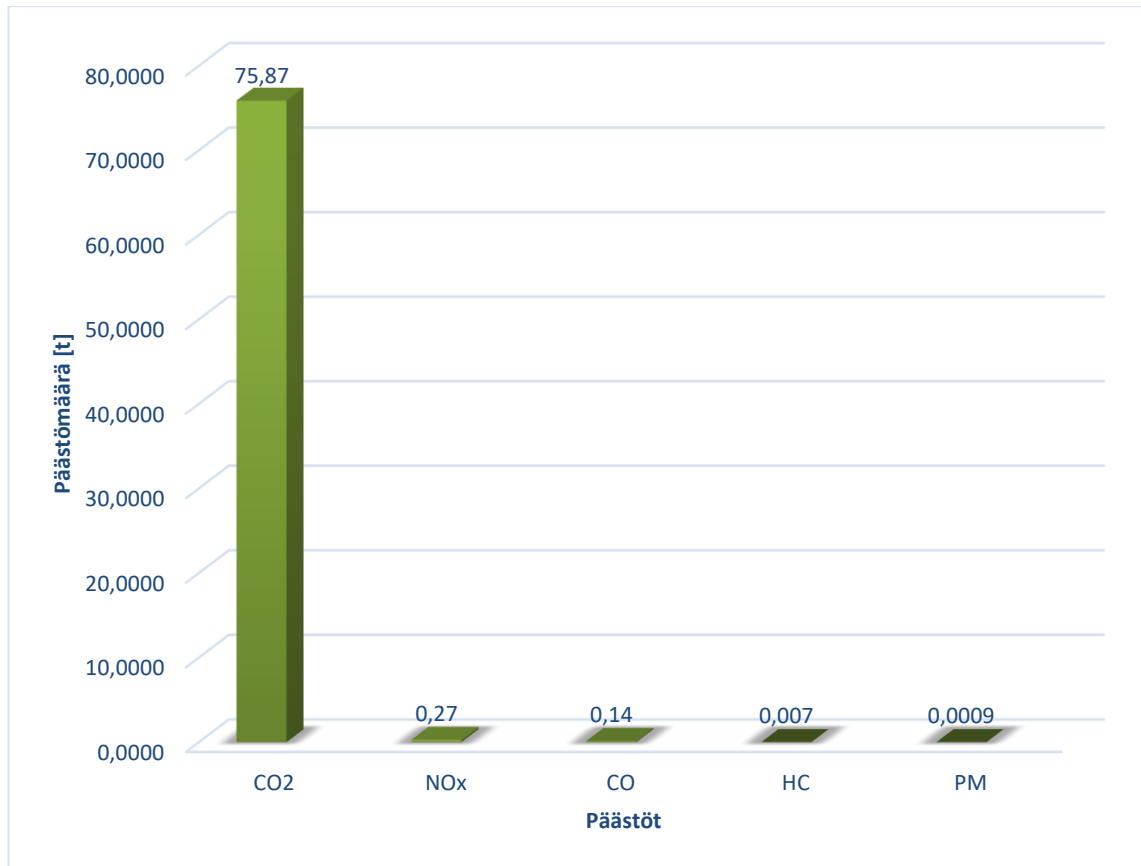
### 6.2.1 Päästöt

Fossiilisen tuotannon päästöt koostuvat vähähiilisen tuotannon tapaan hiilidioksidi-, typenoksidi-, häkä-, hiilivety- ja pienhiukkaspäästöistä. Päästömäärät esitetään sekä grammoina että tonneina. Päästöt on laskettu kappaleessa 5.6.1 esitetyn päästölaskentamenetelmän avulla. Taulukossa 31 on esitetty fossiilisen tuotannon kokonaispäästöt.

**Taulukko 31.** Fossiilisen tuotannon kokonaispäästöt.

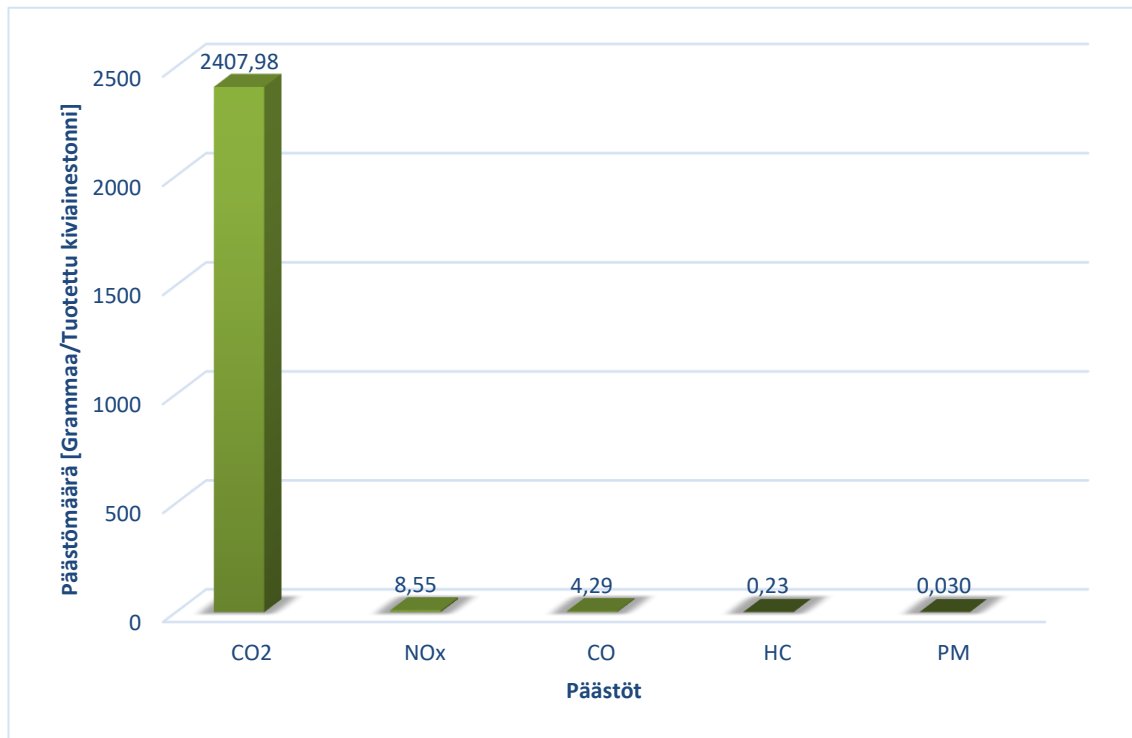
Päästöt (Syöttö + Murskaus + Lastaus)	KaM 0/6		KaM 6/16		KaM 0/16		KaM 16/32		KaM 0/150		Yhteensä [t]
	mm		mm		mm		mm		mm		
CO <sub>2</sub>	10,22		14,20		22,02		22,96		6,45		75,87
NO <sub>x</sub>	0,04		0,05		0,08		0,08		0,02		0,27
CO	0,02		0,02		0,04		0,04		0,02		0,14
HC	$8,00 \cdot 10^{-4}$		$12,00 \cdot 10^{-4}$		$20,00 \cdot 10^{-4}$		$22,00 \cdot 10^{-4}$		$10,00 \cdot 10^{-4}$		0,01
PM	$1,00 \cdot 10^{-4}$		$2,00 \cdot 10^{-4}$		$3,00 \cdot 10^{-4}$		$3,00 \cdot 10^{-4}$		$1,00 \cdot 10^{-4}$		$9,00 \cdot 10^{-4}$

Fossiilisen tuotannossa hiilidioksidipäästöjä muodostui 75,87 t ja lähipäästöjä muodostui noin 0,5 t. Merkittävimmät lähipäästöt muodostuivat typenoksidi- ja häkäpäästöistä niin kuin vähähiilisessä tuotannossa. Fossiilisen tuotannon päästöt on esitetty myös kuvassa 27.



**Kuva 27.** Fossiilisen tuotannon kokonaispäästöt.

Kuvasta 27 havaitaan, että fossiilisessa tuotannossa suurimmat päästöt olivat hiilidioksidipäästöt ja typenoksidipäästöt. Tarkastellaan päästöjä tuotettujen kiviainestonnien suhteen. Kuvassa 28 on esitetty fossiilisen tuotannon päästöt tuotettua kiviainestonnia kohden.



**Kuva 28.** Fossiilisen tuotannon päästöt tuotettua kiviainestonnia kohden.

Kiviainestonnia kohden hiilidioksidipäästöjä muodostui 2408 grammaa, typenoksidipäästöjä 9 grammaa, hiilimonoksidipäästöjä 4 grammaa, hiilivety- ja hiukkaspäästöjä muodostui alle 0,3 grammaa.

Fossiilisen tuotannon päästöjä tarkastellaan lajitekohtaisesti kappaleessa 5.4.1 on määriteltyjen lajitekohtaisten polttoaineen kulutus- ja energiamäärien perusteella. Taulukossa 32 on esitetty lajitekohtaisesti päästö määrät tuotettua kiviainestonnia kohden.

**Taulukko 32.** Lajitekohtaiset päästöt tuotettua kiviainestonnia kohden.

Päästöt (Syöttö+Murs- kaus+Lastaus) [g/tuotettu tonni]	Päästöt				
	KaM 0/6 mm	KaM 6/16 mm	KaM 0/16 mm	KaM 16/32 mm	KaM 0/150 mm
CO <sub>2</sub>	2954,9	2732,5	2510,1	2352,9	1495,2
NO <sub>x</sub>	11,1	10,1	9,0	8,3	4,3
CO	4,3	4,3	4,3	4,3	4,2
HC	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
PM	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

Taulukosta 32 havaitaan, että tuotettua kiviainestonna kohden eri lajiteilla muodostui hiilidioksidipäästöjä 1495 - 2955 grammaa ja typenoksidipäästöjä 4 - 11 grammaa. Hiilimonoksidipäästöjä muodostui kaikkien lajitteiden tuotannossa 4 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden. Hiilivetypäästöt olivat 0,2 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden ja hiukkaspäästöt olivat 0,03 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden kaikissa lajiteissa. Kuvassa 29 on esitetty hiilidioksidipäästöt lajitekohtaisesti.



**Kuva 29.** Fossiilisen tuotannon hiilidioksidipäästöt [g] lajitekohtaisesti tuotettua kiviainestonna kohden.

Kuvasta 29 havaitaan, että hiilidioksidipäästöt tuotettua kiviainestonna kohden olivat suurimmat KaM 0/6 mm tuotannossa ja matalimmat KaM 0/150 mm tuotannossa. KaM 0/6 mm hiilidioksidipäästöt tuotettua kiviainestonna kohden olivat noin 2955 grammaa ja KaM 0/150 mm tuotannossa 1495 grammaa.

## 6.2.2 Hiilikompensaatio

Fossiilisen tuotannon hiilikompensaatiolaskelmien tarkoituksena on laskea hiilidioksidipäästöjen kompensoimiseen tarvittava kuusi taimien määrä. Hiilikompensaatiomenetelmä on esitetty kappaleessa 2.3. Esitetään hiilikompensointilaskelmat fossiiliselle tuotannolle 100 000 t tuotettua kiviainesta kohti. Hiilidioksidipäästökertoimena käytetään kuvan 28 mukaista hiilidioksidipäästöä kiviainestonnikilometriä kohden. Lasketaan kaavan 22 avulla hiilidioksidipäästöt 100 000 t tuotannolle.



$$\text{CO}_2\text{-päästöt } 100\,000 \text{ t tuotannolle} = (2407,98 \text{ [gCO}_2\text{/tuotettu tonni]} \cdot 100\,000 \text{ [t]}) = 240\,798\,000 \text{ g} = 240\,798 \text{ kg} \quad (22)$$

Lasketaan kappaleen 2.3 kaavan 1 avulla istutettavien kuusi taimien määrä, jos kuusten annetaan kasvaa 60, 80 ja 100 vuotta. Kyseiset hiilikompensaatiolaskelmat on esitetty taulukossa 33. Taulukossa 33 esitetään tarvittavat hiilikompensoinnit tuotannolle, jossa on tuotettu fossiilisen kevyen polttoöljyn avulla 31 506,5 t tai 100 000 t kiviaineksia.

**Taulukko 33. Hiilikompensaatiolaskelmat fossiiliselle tuotannolle.**

<b>Hiilikompensaatiolaskelmat istutettavalle kuusi taimikolle fossiilisissa tuotannoissa</b>			
	60 vuotta	80 vuotta	100 vuotta
<b>31 506,5 t</b> tuotannon CO <sub>2</sub> -päästöjen kompensointi	68,9 kpl	51,7 kpl	41,3 kpl
<b>100 000 t</b> tuotannon CO <sub>2</sub> -päästöjen kompensointi	218,7 kpl	164,0 kpl	131,2 kpl
Kompensaatioarvo (Tuotantomäärä [t] / Kuusi [kpl])	457 t/kpl	610 t/kpl	762 t/kpl

Taulukossa 33 fossiilisen tuotannon (31 506,5 t) hiilidioksidipäästöjen kompensoinniksi tarvitaan 69 kpl 60 vuotta kasvavaa kuusentainta tai 52 kpl 80 vuotta kasvavaa kuusentainta tai 42 kpl 100 vuotta kasvavaa kuusentainta.

Kuusen taimia tulee istuttaa 100 000 t kohden 219, jos taimien annetaan kasvaa 60-vuotiaiksi. 80-vuotiaiksi kasvavia taimia tulee istuttaa 164 ja 100-vuotiaiksi kasvavia taimia 132.

Hiilikompensaatiolaskelmien perusteella voidaan määrittää fossiiliselle murskeelle seuraavanlaiset kompensatioarvot eri ikäisille kuusille:

- 60 vuotta kasvava kuusen taimi: 1 taimi 457 tuotettua kiviainestonna kohden
- 80 vuotta kasvava kuusen taimi: 1 taimi 610 tuotettua kiviainestonna kohden
- 100 vuotta kasvava kuusen taimi: 1 taimi 762 tuotettua kiviainestonna kohden

Kompensaatioarvot on laskettu tarkoilla arvoilla.

## 6.3 Kuljetus

### 6.3.1 Fossiilisen kuljetuksen päästöt

Fossiilisen kuljetuksen päästöt riippuvat kuljetusta matkasta, polttoaineesta ja moottorin Euro-luokasta. Menomatkan päästöt on laskettu täyden kiviaineskuorman kanssa. Paalumatkan päästöt on laskettu siten, että ajoneuvo palaa tyhjänä. Kuljetuksen päästölaskentamenetelmä on esitetty kappaleessa 5.6.2. Liitteessä A on esitetty fossiilisen kuljetuksen päästölaskentatulokset kaksisuuntaisille 10 km, 30 km ja 60 km matkoille. Taulukossa 34 on esitetty kuorma-auton ja perävaunullisen kuorma-auton päästöt kaksisuuntaiselle matkalle kilometriä kohden Euro V ja Euro VI päästöluokissa.

**Taulukko 34.** *Kuorma-auton ja perävaunullisen kuorma-auton päästöt kaksisuuntaiselle matkalle kilometriä kohden Euro V ja Euro VI päästöluokissa.*

Päästöluokka	Kuorma-auto		Perävaunullinen kuorma-auto	
	Euro V	Euro VI	Euro V	Euro VI
CO <sub>2</sub> [kg/km]	0,84		1,00	
NO <sub>x</sub> [g/km]	2,29	0,46	2,75	0,55
CO [g/km]	1,72	1,72	2,06	2,06
HC [g/km]	0,53	0,15	0,63	0,18
PM [g/km]	0,02	0,01	0,03	0,01

Taulukosta 34 havaitaan, että hiilidioksidipäästöt ovat kilometriä kohden kuorma-autolle noin 0,84 kg ja perävaunulliselle kuorma-autolle 1,00 kg. Esitetään kuljetuksesta aiheutuneet päästöt kilometriä kohden, jossa menomatka tapahtuu täyden kuorman kanssa. Kuorma-autolla täysi kuorma on 22 t ja perävaunullisella kuorma-autolla 45 t (Destia 2024). Taulukossa 35 on esitetty päästöt kilometriä kohden täyden kuorman kanssa.

**Taulukko 35.** *Kuljetuksen aiheuttamat päästöt kilometriä kohden täyden kuorman kanssa.*

Päästöluokka	Kuorma-auto		Perävaunullinen kuorma-auto	
	Euro V	Euro VI	Euro V	Euro VI
CO <sub>2</sub> [kg/km]	0,97		1,25	
NO <sub>x</sub> [g/km]	2,66	0,53	3,43	0,69
CO [g/km]	2,00	2,00	2,57	2,57
HC [g/km]	0,61	0,17	0,79	0,22
PM [g/km]	0,03	0,01	0,03	0,02

Taulukosta 35 havaitaan, että täydellä kuormalla hiilidioksidipäästöt kuorma-autolla ovat 0,97 kg ja perävaunullisella kuorma-autolla 1,25 kg kilometriä kohden. Taulukossa 36 on esitetty kuljetusmatkan päästöt kilometriä kohden tyhjänä.

**Taulukko 36.** Kuljetusmatkan päästöt kilometriä kohden tyhjänä.

Päästöluokka	Kuorma-auto		Perävaunullinen kuorma-auto	
	Euro V	Euro VI	Euro V	Euro VI
CO <sub>2</sub> [kg/km]	0,70		0,75	
NO <sub>x</sub> [g/km]	1,93	0,39	2,07	0,41
CO [g/km]	1,44	1,44	1,55	1,55
HC [g/km]	0,44	0,13	0,47	0,13
PM [g/km]	0,02	0,01	0,02	0,01

Taulukosta 36 havaitaan, että hiilidioksidipäästöt kilometriä kohden tyhjänä ovat kuorma-autolle 0,70 kg ja perävaunulliselle kuorma-autolle 0,75 kg kilometriä kohden.

Määritetään päästöjä kuorma-autolle ja perävaunulliselle kuorma-autolle kiviainestonnikielometriä kohden. Taulukossa 37 on esitetty kuljetusmatkan päästöt kiviainestonnikielometriä kohden.

**Taulukko 37.** Kuljetusmatkan päästöt kiviainestonnikielometriä kohden.

Päästöluokka	Kuorma-auto [g/t-km]		Perävaunullinen kuorma-auto [g/t-km]	
	Euro V	Euro VI	Euro V	Euro VI
CO <sub>2</sub>	44,05		27,77	
NO <sub>x</sub>	0,12	0,02	0,08	0,02
CO	0,09	0,09	0,06	0,06
HC	0,03	0,01	0,02	0,01
PM	0,12·10 <sup>-2</sup>	0,06·10 <sup>-2</sup>	0,08·10 <sup>-2</sup>	0,04·10 <sup>-2</sup>

Taulukosta 37 havaitaan, että hiilidioksidipäästöt kiviainestonnikielometriä kohden ovat kuorma-autolle 44 g ja perävaunulliselle kuorma-autolle 28 grammaa.

Lasketaan hiilidioksidipäästöt tuotannoissa tuotettujen kiviaineksien kuljetukselle. Kappaleessa 5.6.2 on esitetty kuinka monta kuorma-autollista tai perävaunullista kuorma-autollista kuormaa vaaditaan vähähiilisen ja fossiilisen kiviainestutannon kuljetuksille (Taulukko 27). Taulukossa 38 on esitetty hiilidioksidipäästöt tuotettujen kiviaineksien kuljetuksille, kun kuljetuksen polttoaineena on diesel. Taulukon 38 hiilidioksidipäästöjen las-

kennassa käytetään 10 km, 30 km ja 60 km pituisten menopaluumatkojen laskettuja hiilidioksidipäästöjä, jotka kerrotaan kiviainestuotantoa vastaavalla kuorma-auton tai perävaunullisen kuorma-auton kappalemäärällä, joka riittää kuljettamaan kokeellisen osan tuotetut kiviainekset kohteeseen (Liite A).

**Taulukko 38.** *Tuotettujen kiviaineksien kuljetuksesta aiheutuneet hiilidioksidipäästöt 10 km, 30 km ja 60 km menopaluumatkoilla, kun kuljetuksen polttoaineena käytetään dieseliä (Liite A, Kappale 5.6.2).*

CO <sub>2</sub> -päästöt [kg]	Tuotanto (12705,1 t)		Tuotanto (31 506,5 t)		Yhteensä (44 211,6 t):		
	Ajoneuvo (Kpl)	Kuorma-auto (578 kpl)	Perävaunullinen kuorma-auto (283 kpl)	Kuorma-auto (1433 kpl)	Perävaunullinen kuorma-auto (701 kpl)	Kuorma-auto (2010 kpl)	Perävaunullinen kuorma-auto (983 kpl)
10 km (menopaluu)		4823 kg	2826 kg	11 960 kg	7007 kg	16 783 kg	9833 kg
30 km (menopaluu)		14 469 kg	8476 kg	35 880 kg	21 021 kg	50 349 kg	29 497 kg
60 km (menopaluu)		28 937 kg	16 953 kg	71 759 kg	42 043 kg	100 696 kg	58 996 kg

Menopaluumatkassa on huomioitu se, että menomatalla on ollut täyskuorma sekä kuorma-autolla että perävaunullisella kuorma-autolla. Paluumatka on laskettu siten, että kuorma-auto ja perävaunullinen kuorma-auto palaavat tyhjänä. Taulukon 38 hiilidioksidipäästöt ovat noin 41 % pienemmät perävaunullisella kuorma-autolla kuin kuorma-autolla.

### 6.3.2 Vähähiilisen kuljetuksen päästöt

Vähähiilisen kuljetuksen päästöt riippuvat kuljetusta matkasta, polttoaineesta ja moottorin Euro-luokasta. Liitteessä B on esitetty vähähiilisen kuljetuksen päästölaskentatulokset kaksisuuntaisille 10 km, 30 km ja 60 km matkoille. Liitteessä B on esitetty lisäksi kaksisuuntaisten matkojen meno- että paluumatkan päästöt. Taulukossa 39 on esitetty kuorma-auton ja perävaunullisen kuorma-auton päästöt kaksisuuntaiselle matkalle kilometriä kohden Euro V ja Euro VI päästöluokissa.

**Taulukko 39.** Kuorma-auton ja perävaunullisen kuorma-auton päästöt kaksisuuntaiselle matkalle kilometriä kohden Euro V ja Euro VI päästöluokissa.

Päästöluokka	Kuorma-auto		Perävaunullinen kuorma-auto	
	Euro V	Euro VI	Euro V	Euro VI
CO <sub>2</sub> [kg/km]	0,09		0,11	
NO <sub>x</sub> [g/km]	2,03	0,41	2,44	0,49
CO [g/km]	1,27	1,27	1,53	1,53
HC [g/km]	0,36	0,10	0,43	0,12
PM [g/km]	0,01	0,01	0,02	0,01

Taulukosta 39 havaitaan, että hiilidioksidipäästöt kilometriä kohden kaksisuuntaiselle matkalle ovat kuorma-autolle 0,09 kg ja perävaunulliselle kuorma-autolle 0,11 kg. Esitetään kuljetuksesta aiheutuneet päästöt kilometriä kohden, jossa menomatka tapahtuu täyden kuorman kanssa. Taulukossa 40 on esitetty päästöt kilometriä kohden täyden kuorman kanssa.

**Taulukko 40.** Kuljetusmatkasta aiheutuneet päästöt kilometriä kohden täyden kuorman kanssa.

Päästöluokka	Kuorma-auto		Perävaunullinen kuorma-auto	
	Euro V	Euro VI	Euro V	Euro VI
CO <sub>2</sub> [kg/km]	0,10		0,13	
NO <sub>x</sub> [g/km]	2,36	0,47	3,04	0,61
CO [g/km]	1,48	1,48	1,91	1,91
HC [g/km]	0,42	0,12	0,54	0,15
PM [g/km]	0,02	0,01	0,02	0,01

Taulukosta 40 havaitaan, että hiilidioksidipäästöt ovat kuorma-autolla 0,10 kg ja perävaunullisella kuorma-autolla 0,13 kg kilometriä kohden. Esitetään paluumatkasta aiheutuneet päästöt kilometriä kohden taulukossa 41, jolloin kuorma-auto tai perävaunullinen kuorma-auto palaa tyhjänä.

**Taulukko 41.** Kuljetusmatkan päästöt kilometriä kohden tyhjänä.

Päästöluokka	Kuorma-auto		Perävaunullinen kuorma-auto	
	Euro V	Euro VI	Euro V	Euro VI
CO <sub>2</sub> [kg/km]	0,07		0,08	
NO <sub>x</sub> [g/km]	1,71	0,34	1,83	0,37
CO [g/km]	1,07	1,07	1,15	1,15
HC [g/km]	0,30	0,09	0,32	0,09
PM [g/km]	0,01	0,01	0,01	0,01

Taulukosta 41 havaitaan, että hiilidioksidipäästöt ovat kuorma-autolla 0,07 kg ja perävaunullisella kuorma-autolla 0,08 kg kilometriä kohden. Määritetään päästöjä kuorma-autolle ja perävaunulliselle kuorma-autolle kiviainestonnikielometriä kohden. Taulukossa 42 on esitetty kuljetusmatkan päästöt kiviainestonnikielometriä kohden.

**Taulukko 42.** Kuljetusmatkan päästöt kiviainestonnikielometriä kohden.

Kuljetusmatkan päästöt	Kuorma-auto [g/t-km]		Perävaunullinen kuorma-auto [g/t-km]	
	Euro V	Euro VI	Euro V	Euro VI
CO <sub>2</sub>	4,63		2,92	
NO <sub>x</sub>	0,11	0,02	0,07	0,01
CO	0,07	0,07	0,04	0,04
HC	0,02	0,01	0,01	0,03·10 <sup>-1</sup>
PM	0,08·10 <sup>-2</sup>	0,04·10 <sup>-2</sup>	0,05·10 <sup>-2</sup>	0,03·10 <sup>-2</sup>

Taulukon 42 havaitaan, että hiilidioksidipäästöt ovat kuorma-autolla 4,63 g ja perävaunullisella kuorma-autolla 2,92 grammaa kiviainestonnikielometriä kohden.

Lasketaan hiilidioksidipäästöt tuotannoissa tuotettujen kiviaineksien kuljetukselle. Kappaleessa 5.6.2 on esitetty kuinka monta kuorma-autollista tai perävaunullista kuorma-autollista kuormaa vaaditaan vähähiilisen, että fossiilisen tuotantojen kiviaineksien kuljetuksille (Taulukko 27). Taulukossa 43 on esitetty hiilidioksidipäästöt tuotettujen kiviaineksien kuljetuksille, kun kuljetuksen polttoaineena on uusiutuva diesel. Taulukon 43 hiilidioksidipäästöjen laskennassa käytetään 10 km, 30 km ja 60 km menopaluumatkojen laskettuja hiilidioksidipäästöjä, jotka kerrotaan kiviainestuotantoa vastaavalla kuorma-auton tai perävaunullisen kuorma-auton kappalemäärällä, joka riittää kuljettamaan kokeellisen osan tuotetut kiviainekset kohteeseen (Liite B).

**Taulukko 43.** Kokeellisessa osassa tuotettujen kiviaineksien kuljetuksesta aiheutuneet hiilidioksidipäästöt 10 km, 30 km ja 60 km menopaluumatkoilla, kun kuljetuksen polttoaineena käytetään uusiutuvaa dieseliä (Liite B; Kappale 5.6.2).

CO <sub>2</sub> -päästöt [kg]	Tuotanto (12705,1 t)		Tuotanto (31 506,5 t)		Yhteensä (44 211,6 t):		
	Ajoneuvo (Kpl)	Kuorma-auto (578 kpl)	Perävaunullinen kuorma-auto (283 kpl)	Kuorma-auto (1433 kpl)	Perävaunullinen kuorma-auto (701 kpl)	Kuorma-auto (2010 kpl)	Perävaunullinen kuorma-auto (983 kpl)
10 km (menopaluu)		507 kg	297 kg	1257 kg	737 kg	1764 kg	1034 kg
30 km (menopaluu)		1521 kg	891 kg	3771 kg	2210 kg	5292 kg	3101 kg
60 km (menopaluu)		3042 kg	1782 kg	7543 kg	4419 kg	10 585 kg	6201 kg

Hiilidioksidipäästöjä on laskettu 10 km, 30 km ja 60 km menopaluumatkoille. Menopaluumatkassa on huomioitu se, että menomatalla on ollut täyskuorma sekä kuorma-autolla että perävaunullisella kuorma-autolla. Paluumatka on laskettu siten, että kuorma-auton ja perävaunullinen kuorma-auto on palannut tyhjänä. Taulukon 43 hiilidioksidipäästöt ovat myös 41 % pienemmät perävaunullisella kuorma-autolla kuin kuorma-autolla niin kuin fossiilisessa kuljetuksessakin.

### 6.3.3 Hiilikompensaatio

Kuljetuksen hiilikompensoinnissa lasketaan molemmille kuljetustapauksille ne kilometrimäärät, joista syntyneet hiilidioksidipäästöt vastaavat 60-, 80- tai 100-vuotiaan kuusen sitoman hiilen määrää. Ensimmäisenä määritetään 60-, 80- ja 100-vuotiaan kuusen sitomat hiilidioksidimäärät. Kaavoissa 23, 24 ja 25 on esitetty 60-, 80- ja 100-vuotiaan kuusen sitoma hiilidioksidimäärä. Kaavojen 23, 24 ja 25 laskentamenetelmät perustuvat kappaleessa 2.6 esitettyyn hiilikompensaatioteoriaan.

$$\text{Hiilidioksidin määrä 60 v. kuusi [kg]} = 300 \text{ kg} \cdot 3,67 = 1101 \text{ kg} \quad (23)$$

$$\text{Hiilidioksidin määrä 80 v. kuusi [kg]} = 400 \text{ kg} \cdot 3,67 = 1468 \text{ kg} \quad (24)$$

$$\text{Hiilidioksidin määrä 100 v. kuusi [kg]} = 500 \text{ kg} \cdot 3,67 = 1835 \text{ kg} \quad (25)$$

Kiviaineksien kuljetuksessa polttoaineen kulutus on suurempaa täyden kuorman kanssa kuin ilman kuormaa. Hiilidioksidipäästöt ovat siten suurempia täyden kuorman kanssa.

Esitetään ne kilometrimäärät, jotka vastaavat 60-, 80- ja 100-vuotiaiden kuusien sitomaa hiilimäärää. Laskentaa toteutetaan kahden eri polttoaineen kulutuksen ja niiden keskiarvon välillä. Taulukossa 44 on esitetty kiviaineksien kuljetuksen kilometrimäärät, jotka vastaavat 60-vuotiaiden kuusten sitomaa hiilimäärää.

**Taulukko 44.** Kiviaineskuljetusten kilometrimäärät, jotka vastaavat 60-vuotiaiden kuusien sitomaa hiilimäärää (Kaavio 1).

Kiviaineskuljetuksen kilometrimäärät, jotka vastaavat 60-vuotiaiden kuusen sitomaa hiilimäärää			
Ajoneuvo, polttoaine	Kilometrimäärä kuorman kanssa	Kilometrimäärä tyhjänä	Keskimääräinen kilometrimäärä, keskimääräisen kulutuksen avulla
Kuorma-auto, diesel	$\frac{1101 \text{ kg}}{0,38 \text{ l/km} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = <b>1136 km</b>	$\frac{1101 \text{ kg}}{0,28 \text{ l/km} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = <b>1542 km</b>	$\frac{1101 \text{ kg}}{\frac{0,38 \text{ l/km} + 0,28 \text{ l/km}}{2} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = <b>1308 km</b>
Perävaunulinen kuorma-auto, diesel	$\frac{1101 \text{ kg}}{0,49 \text{ l/km} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = <b>881 km</b>	$\frac{1101 \text{ kg}}{0,30 \text{ l/km} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = <b>1439 km</b>	$\frac{1101 \text{ kg}}{\frac{0,49 \text{ l/km} + 0,30 \text{ l/km}}{2} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = <b>1093 km</b>
Kuorma-auto, uusiutuva diesel	$\frac{1101 \text{ kg}}{0,39 \text{ l/km} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = <b>10 858 km</b>	$\frac{1101 \text{ kg}}{0,28 \text{ l/km} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = <b>15124 km</b>	$\frac{1101 \text{ kg}}{\frac{0,39 \text{ l/km} + 0,28 \text{ l/km}}{2} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = <b>12 641 km</b>
Perävaunulinen kuorma-auto, uusiutuva diesel	$\frac{1101 \text{ kg}}{0,51 \text{ l/km} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = <b>8469 km</b>	$\frac{1101 \text{ kg}}{0,30 \text{ l/km} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = <b>14115 km</b>	$\frac{1101 \text{ kg}}{\frac{0,51 \text{ l/km} + 0,30 \text{ l/km}}{2} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = <b>10 456 km</b>

Taulukossa 45 on esitetty kiviaineksien kuljetuksen kilometrimäärät, jotka vastaavat 80-vuotiaiden kuusien sitomaa hiilimäärää.



**Taulukko 45.** Kiviainekuljetusten kilometrimäärät, jotka vastaavat 80-vuotiaiden kuusien sitomaa hiilimäärä (Kaavio 1).

Kiviainekuljetuksen kilometrimäärät, jotka vastaavat 80-vuotiaiden kuusen sitomaa hiilimäärää			
Ajoneuvo, polttoaine	Kilometrimäärä kuorman kanssa	Kilometrimäärä tyhjänä	Keskimääräinen kilometrimäärä, keskimääräisen kulutuksen avulla
Kuorma-auto, diesel	$\frac{1468 \text{ kg}}{0,38 \text{ l/km} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ =1515 km	$\frac{1468 \text{ kg}}{0,28 \text{ l/km} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = 2056 km	$\frac{1468 \text{ kg}}{\frac{0,38 \text{ l/km} + 0,28 \text{ l/km}}{2} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = 1745 km
Perävaunullinen kuorma-auto, diesel	$\frac{1468 \text{ kg}}{0,49 \text{ l/km} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = 1175 km	$\frac{1468 \text{ kg}}{0,30 \text{ l/km} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ =1919 km	$\frac{1468 \text{ kg}}{\frac{0,49 \text{ l/km} + 0,30 \text{ l/km}}{2} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = 1457 km
Kuorma-auto, uusiutuva diesel	$\frac{1468 \text{ kg}}{0,39 \text{ l/km} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ =14 477 km	$\frac{1468 \text{ kg}}{0,28 \text{ l/km} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = 20 165 km	$\frac{1468 \text{ kg}}{\frac{0,39 \text{ l/km} + 0,28 \text{ l/km}}{2} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ =16 854 km
Perävaunullinen kuorma-auto, uusiutuva diesel	$\frac{1468 \text{ kg}}{0,51 \text{ l/km} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = 11 071 km	$\frac{1468 \text{ kg}}{0,30 \text{ l/km} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = 18 821 km	$\frac{1468 \text{ kg}}{\frac{0,51 \text{ l/km} + 0,30 \text{ l/km}}{2} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ =13 941 km

Taulukossa 46 on esitetty kiviaineksien kuljetuksen kilometrimäärät, jotka vastaavat 100-vuotiaiden kuusien sitomaa hiilimäärää.

**Taulukko 46.** Kiviaineskuljetusten kilometrimäärät, jotka vastaavat 100-vuotiaiden kuusien sitomaa hiilimäärä (Kaavio 1).

Kiviaineskuljetuksen kilometrimäärät, jotka vastaavat 100- vuotiaiden kuusen sitomaa hiilimäärää			
Ajoneuvo, polttoaine	Kilometrimäärä kuorman kanssa	Kilometrimäärä ilman kuormaa	Keskimääräinen kilometrimäärä, keskimääräisen kulutuksen avulla
Kuorma-auto, diesel	$\frac{1835 \text{ kg}}{0,38 \text{ l/km} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = <b>1894 km</b>	$\frac{1835 \text{ kg}}{0,28 \text{ l/km} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = <b>2570 km</b>	$\frac{1835 \text{ kg}}{\frac{0,38 \text{ l/km} + 0,28 \text{ l/km}}{2} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = <b>2181 km</b>
Perävaunullinen kuorma-auto, diesel	$\frac{1835 \text{ kg}}{0,49 \text{ l/km} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = <b>1469 km</b>	$\frac{1835 \text{ kg}}{0,30 \text{ l/km} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = <b>2399 km</b>	$\frac{1835 \text{ kg}}{\frac{0,49 \text{ l/km} + 0,30 \text{ l/km}}{2} \cdot 2,55 \text{ kg/l}}$ = <b>1822 km</b>
Kuorma-auto, uusiutuva diesel	$\frac{1835 \text{ kg}}{0,39 \text{ l/km} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = <b>18 097 km</b>	$\frac{1835 \text{ kg}}{0,28 \text{ l/km} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = <b>25 206 km</b>	$\frac{1835 \text{ kg}}{\frac{0,39 \text{ l/km} + 0,28 \text{ l/km}}{2} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = <b>21 068 km</b>
Perävaunullinen kuorma-auto, uusiutuva diesel	$\frac{1835 \text{ kg}}{0,51 \text{ l/km} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = <b>13 839 km</b>	$\frac{1835 \text{ kg}}{0,30 \text{ l/km} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = <b>23 526 km</b>	$\frac{1835 \text{ kg}}{\frac{0,51 \text{ l/km} + 0,30 \text{ l/km}}{2} \cdot 0,26 \text{ kg/l}}$ = <b>17 426 km</b>

Kuljetuksessa käytettävällä polttoaineella on laskentatulosten perusteella merkitystä, sillä uusiutuvan dieselin käytöllä on huomattavasti suuremmat kilometrimäärät kuin perinteisen dieselillä.

Lasketaan hiilikompensoinnit tuotannoissa tuotettujen kiviaineksien kuljetukselle. Kappaleissa 6.3.1 ja 6.3.2 on esitetty kuljetuspäästöt 10 km, 30 km ja 60 km menopaluumatkoille. Lasketaan istutettavien 60-vuotiaaksi kasvavien taimien määrä. Laskenta perustuu kappaleen 2.6 esitettyyn hiilikompensaatioteoriaan. Taulukossa 47 esitetään fossiilisen kuljetuksen istutettavat kuusi taimet kappaleen 6.3.1 hiilidioksidipäästöille, kun kuljetuksen polttoaineena on diesel.

**Taulukko 47.** Fossiilisen kuljetuksen istutettavat kuusi taimet hiilidioksidipäästöjen kompensoinniksi.

CO <sub>2</sub> -päästöt [kg]	Tuotanto (12705,1 t)		Tuotanto (31 506,5 t)		Yhteensä (44 211,6 t):	
	Kuorma-auto (578 kpl)	Perävaunullinen kuorma-auto (283 kpl)	Kuorma-auto (1433 kpl)	Perävaunullinen kuorma-auto (701 kpl)	Kuorma-auto (2010 kpl)	Perävaunullinen kuorma-auto (983 kpl)
10 km (menopalu)	4,4	2,6	10,9	6,4	15,2	8,9
30 km (menopalu)	13,1	7,7	32,6	19,1	45,7	26,8
60 km (menopalu)	26,3	15,4	65,2	38,2	91,5	53,6

Taulukosta 47 havaitaan, että istutettavien kuusi taimien määrä on kuorma-autolla suurempi kuin perävaunullisella kuorma-autolla.

Taulukossa 48 esitetään vähähiilisen kuljetuksen päästöjen kompensoimiseksi istutettavien kuusi taimien määrä kappaleen 6.3.2 hiilidioksidipäästöille, kun kuljetuksen polttoaineena on uusiutuva diesel.

**Taulukko 48.** Vähähiilisen kuljetuksen istutettavat kuusi taimet hiilidioksidipäästöjen kompensoinniksi.

CO <sub>2</sub> -päästöt [kg]	Tuotanto (12705,1 t)		Tuotanto (31 506,5 t)		Yhteensä (44 211,6 t):	
	Kuorma-auto (578 kpl)	Perävaunullinen kuorma-auto (283 kpl)	Kuorma-auto (1433 kpl)	Perävaunullinen kuorma-auto (701 kpl)	Kuorma-auto (2010 kpl)	Perävaunullinen kuorma-auto (983 kpl)
10 km (menopalu)	0,5	0,3	1,1	0,7	1,6	0,9
30 km (menopalu)	1,4	0,8	3,4	2,0	4,8	2,8
60 km (menopalu)	2,8	1,6	6,9	4,0	9,6	5,6

Vähähiilisen kuljetuksen istutettavien kuusi taimien määrä on kuorma-autolla suurempi kuin perävaunullisella kuorma-autolla. Taulukoiden 47 ja 48 kuorma-auton korkeampi kuusen istutustarve johtuu kuorma-auton pienemmästä kuormasta, sillä päästölaskennassa perävaunullisen kuorma-auton maksimikuorman arvona käytettiin 45 t ja kuorma-autolla on 22 t. Taulukossa 49 esitetään kiviainestonnakilometrit istutettavaa taimea kohden fossiiliselle ja vähähiiliselle kuljetukselle.

**Taulukko 49.** Kiviainestonnakilometrit istutettavaa kuusen taimea kohden.

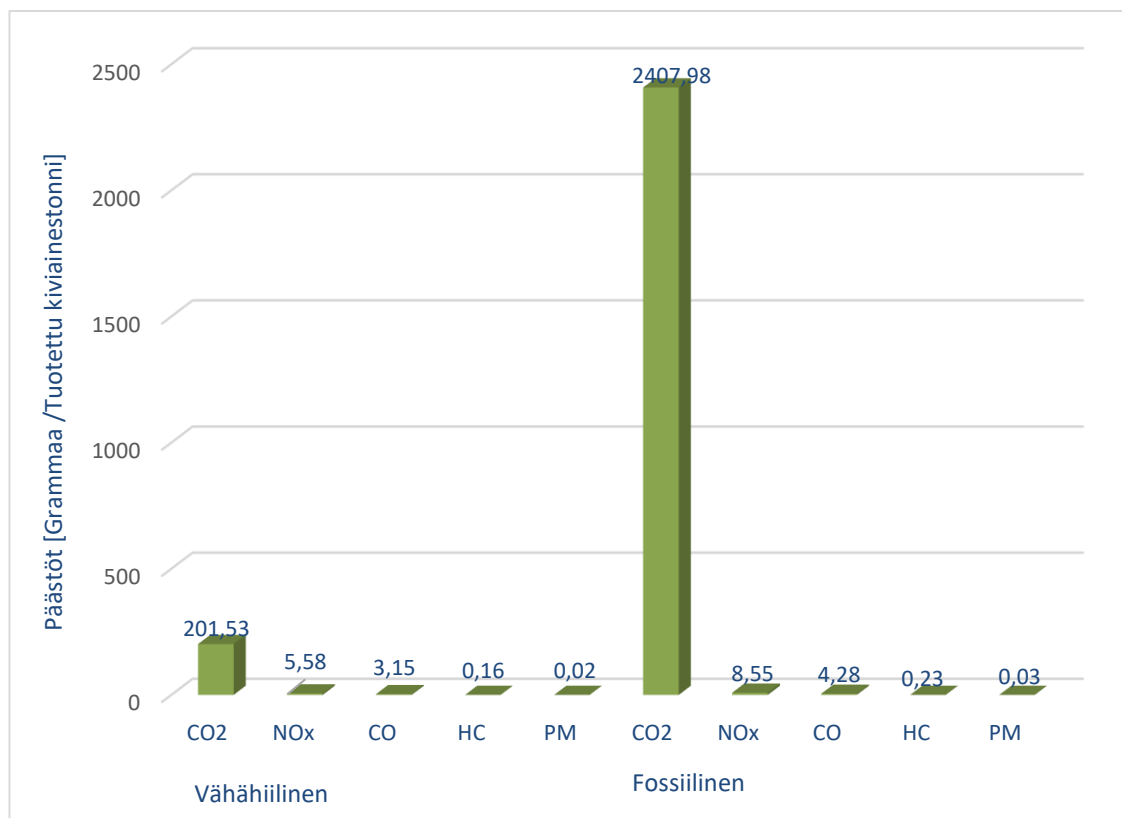
Istutettava taimi	Fossiilinen kuljetus		Vähähiilinen kuljetus	
	Kuorma-auto [t-km/taimi]	Perävaunullinen kuorma-auto [t-km/taimi]	Kuorma-auto [t-km/taimi]	Perävaunullinen kuorma-auto [t-km/taimi]
60-vuotias	25 023	39 604	239 348	379 655
80-vuotias	33 364	52 806	319 130	506 207
100-vuotias	41 705	66 007	398 913	632 759

Taulukon 49 kiviainestonnakilometrit kuusi taimea kohden on laskettu siten, että kunkin kuljetuksen hiilidioksidipäästöt kiviainestonnakilometriä kohden vastaavat yhtä 60-, 80- tai 100-vuotiaan kuusen sitomaa hiilen määrää.

## 7. TULOSTEN ANALYSOINTI JA VERTAILU

### 7.1 Tuotantotapojen päästövertailu

Vähähiilisen ja fossiilisen tuotannon välillä merkittävimmän eron tuotannon päästöihin aiheutti polttoaineen valinta. Uusiutuvalla polttoaineella päästöt ovat pienemmät, mutta uusiutuvaa polttoöljyä kului työkoneissa noin 3 % enemmän kuin fossiilista polttoöljyä. Kuvassa 30 on esitetty fossiilisen ja vähähiilisen tuotannon päästöt.



**Kuva 30.** Fossiilisen ja vähähiilisen tuotannon päästöt.

Kuvasta 30 havaitaan, että fossiilisen tuotannon hiilidioksidi- ja lähipäästöt ovat selvästi suurempia kuin vähähiilisen tuotannon hiilidioksidi- ja lähipäästöt. Fossiilisen tuotannon hiilidioksidipäästöt ovat 2408 grammaa tuotettua kiviainestonnia kohden ja vähähiilisen tuotannon hiilidioksidipäästöt ovat 202 grammaa tuotettua kiviainestonnia kohden. Tuotannot eivät ole täysin vertailukelpoisia, koska fossiilisessa tuotannossa tuotettiin enimmäkseen pienirakeisempia kiviainestuotteita kuin vähähiilisessä tuotannossa. Tämä vaikutti fossiilisen tuotannon polttoaineen suurempaan kulutukseen.

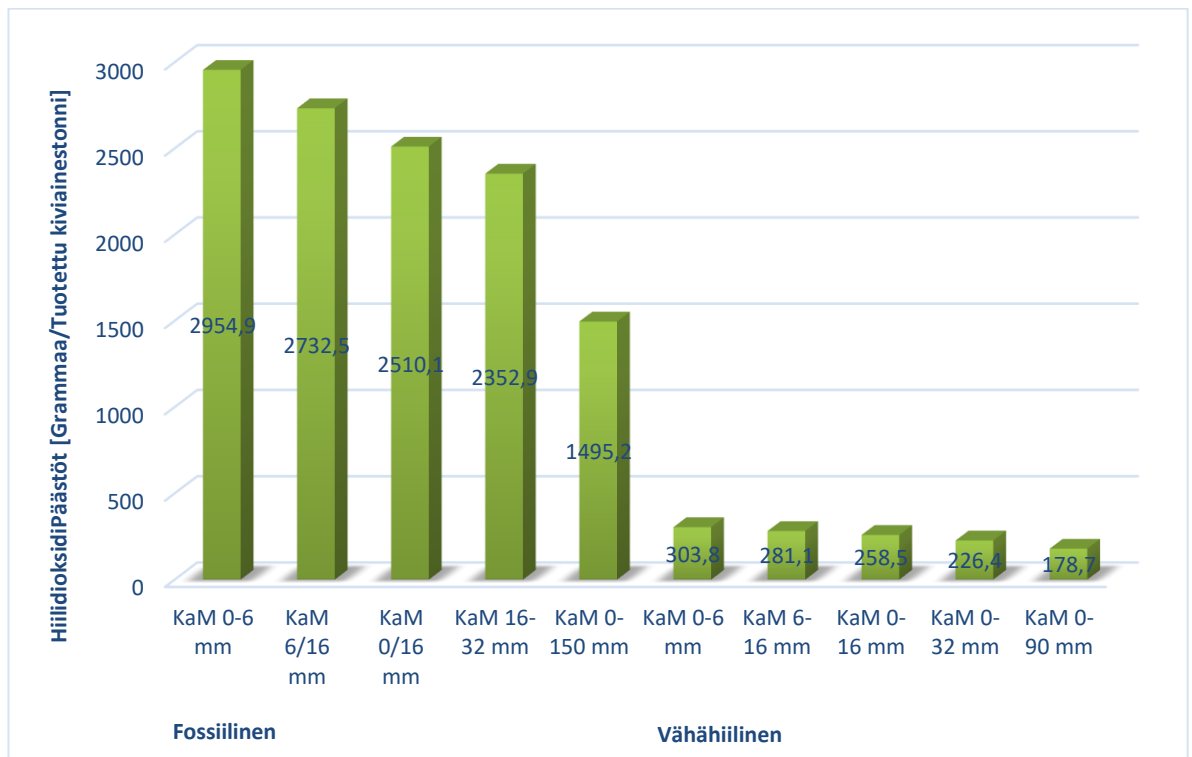
Määritetään seuraavaksi tuotannoissa muodostuneille päästöille prosentuaaliset erot. Taulukossa 50 on esitetty tuotantojen päästöjen prosentuaaliset päästöerot.

**Taulukko 50.** Tuotantojen päästöjen prosentuaaliset erot.

Päästöt	Prosentuaalinen ero [%] verrattuna fossiiliseen tuotannon päästöihin
CO <sub>2</sub>	91,6 %
NO <sub>x</sub>	34,7 %
CO	26,4 %
HC	30,4 %
PM	33,3 %

Taulukon 50 laskelmista havaitaan, että vähähiilisessä tuotannossa muodostui noin 92 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä (CO<sub>2</sub>) kuin fossiilisessa tuotannossa. Merkittäviä päästöeroja havaittiin lisäksi typenoksidipäästöissä (NO<sub>x</sub>). Typenoksidipäästöjä muodostui vähähiilisessä tuotannossa 35 % vähemmän. Lisäksi vähähiilisessä tuotannossa hiilimonoksidi- (CO), hiilivety- (HC) ja hiukkaspäästöjä (PM) muodostui noin 30 % vähemmän. Tuotantojen päästövertailussa suurimmat erot syntyivät siis hiilidioksidipäästöissä (CO<sub>2</sub>) ja typenoksidipäästöissä (NO<sub>x</sub>).

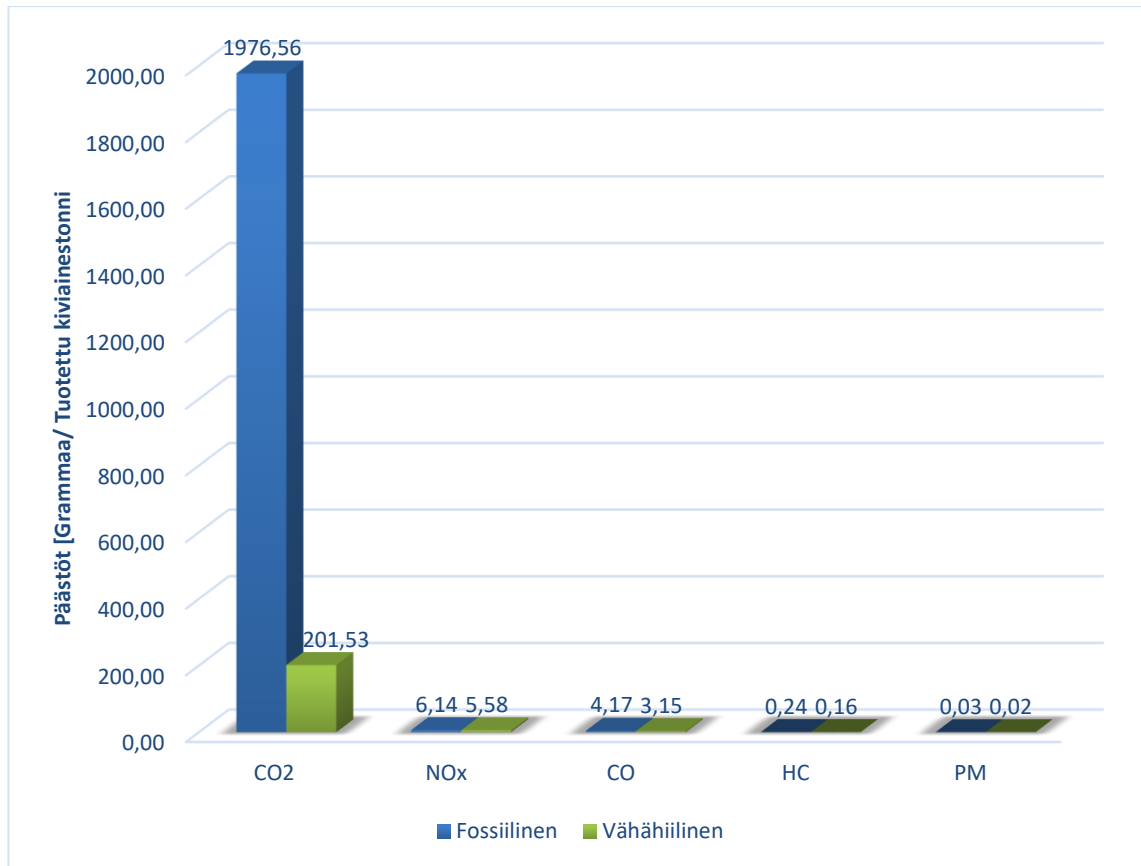
Tuotannoista tutkittiin lajitekohtaisia päästöjä murskauslaitoksen energiankulutuksen avulla. Tarkastellaan tuotantojen lajitekohtaisia hiilidioksidipäästöjä kuvan 31 avulla.

**Kuva 31.** Fossiilisen ja vähähiilisen tuotannon lajitekohtaiset hiilidioksidipäästöt.

Kuvasta 31 havaitaan, että suurimmat päästöt olivat fossiilisen KaM 0/6 mm tuotannossa, jossa hiilidioksidipäästöjä muodostui 2955 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden. Pienimmät päästöt olivat vähähiilisen KaM 0/90 mm tuotannossa, jossa hiilidioksidipäästöjä muodostui 179 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden. Kaikilla fossiilisen tuotannon lajitteilla oli suuremmat hiilidioksidipäästöt tuotettua kiviainestonna kohden verrattuna vähähiilisen tuotannon lajitteiden hiilidioksidipäästöihin.

Fossiilisen ja vähähiilisen kalliomurskeen tuotannoissa tuotettiin osittain samoja lajitteita. Molemmissa tuotannoissa tuotettiin KaM 0/6 mm, KaM 6/16 mm ja KaM 0/16 mm kalliomursketta. Vertaillaan seuraavaksi fossiilisen ja vähähiilisen tuotantojen muodostuneita päästöjä lajitekohtaisesti. Lajitekohtaisen hiilidioksidipäästötarkastelun perusteella vähähiilisen tuotannon lajitteilla KaM 0/6 mm, KaM 6/16 ja KaM 0/16 mm muodostui hiilidioksidipäästöjä noin 90 % vähemmän kuin fossiilisen tuotannon vastaavanlaisilla lajitteilla. Lajitekohtaisten typenoksidipäästöjen tarkastelussa havaittiin, että typenoksidipäästöjä muodostui samojen lajitteiden tuotannoissa 14 % vähemmän vähähiilisessä tuotannossa kuin fossiilisessa.

Tarkastellaan vähähiilisen tuotannon päästöjä siten, jos kyseinen tuotanto olisi toteutettu kevyen polttoöljyn avulla. Tuotantomäärät ja polttoaineen kulutus pysyvät samana tarkastelussa. Kuvassa 32 on esitetty vähähiilisen tuotannon hiilidioksidipäästöt, jos polttoaineen alkuperä on fossiilinen. Kuvassa 32 on myös esitetty alkuperäisen vähähiilisen tuotannon päästöt.



**Kuva 32.** Vähähiilisen tuotannon päästöt fossiilisena (esitetty sinisellä) ja alkuperäisen vähähiilisen päästöt (esitetty vihreällä).

Kuvasta 32 havaitaan, että vähähiilisen tuotannon hiilidioksidipäästöt fossiilisena ovat noin 1977 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden. Hiilidioksidipäästöt ovat kuvassa 32 pienemmät kuin kuvan 30 fossiilisen tuotannon hiilidioksidipäästöt. Tämä johtuu tapautuskimusten erilaisesta tuotejakaumasta. Typenoksidipäästöt ovat myös pienemmät kuvassa 32 kuin kuvan 30 fossiilisessa tuotannossa. Muissa lähipäästöissä ei ole havaittavissa merkittäviä eroa verrattuna kuvan 30 päästöihin. Kuvan 32 vähähiilisen tuotannon hiilidioksidipäästöt ovat noin 90 % pienemmät kuin kuvassa 32 esitetyn fossiilisen hiilidioksidipäästöt.

Tapautuskimusten erilaisiin päästömääriin vaikutti pääasiassa eri polttoaineen käyttö ja sen erilainen kulutus. Neste MY uusiutuva polttoöljy vähensi hiilidioksidipäästöjä merkittävästi taulukon 50 mukaan, jopa 92 %. Tämä ylittää Neste Oy:n ilmoittaman hypoteesin, jonka mukaan polttoaineen käytöllä on noin 90 % hiilijalanjäljen väheneminen verrattuna fossiiliseen. Hypoteesin ylitys johtui todennäköisesti vähähiilisen tuotannon erilaisesta tuotejakaumasta, koska pienirakeisemman kiviaineksen tuottaminen kuluttaa enemmän polttoainetta kuin suurirakeisemman kiviaineksen tuotanto. Lajitekohtaisessa päästöver-



tailussa hiilidioksidipäästöjen vähennys noudattaa kuitenkin Neste Oy:n ilmoittamaan hiilijalanvähennystä, sillä hiilidioksidipäästöjä muodostui noin 90 % vähemmän vähähiilisessä tuotannossa kuin fossiilisessa tuotannossa.

## 7.2 Kustannusten vertailu

Kalliomurskaukseen tuotannon kustannuksiin vaikuttavat monet eri tekijät, kuten murskauksen ja työkoneiden energialähde. Tuotannoissa kalusto pysyi samana. Ainoastaan tuotantotapoihin eroavaisuutta toi eri energialähteen käyttö. Vähähiilisessä tuotannossa käytettiin uusiutuvaa polttoöljyä, kun taas fossiilisessa tuotannossa kevyttä polttoöljyä.

Murskauksen ja työkoneiden polttoaineen valinta vaikutti voimakkaasti tuotantojen kustannuksiin, sillä vähähiilisessä tuotannossa käytetty Neste MY polttoöljy oli kalliimpaa kuin kevyt polttoöljy. Polttoöljyn hinta vaihtelee vuosittain ja myös kesä/talvi laadun osalta on myös havaittavissa hintaeroja. Tutkimuksien perusteella vähähiilisesti tuotettu kiviainestonni oli 0,20 euroa kalliimpaa kuin fossiilisesti tuotetun kiviainestonnin. Suurempiin kustannuksiin vähähiilisen kiviaineksen osalta vaikutti kalliimpi polttoaine ja polttoaineen suurempi kulutus suhteessa kevyen polttoöljyn kulutukseen fossiilisessa tuotannossa.

## 7.3 Kuljetuspäästöjen vertailu

Kuljetuspäästöjä selvitettiin uusiutuvaa ja fossiilista polttoainetta käyttäville kuorma-autolle ja perävaunulliselle kuorma-autolle. Päästölaskentaan tehtiin päästöluokille V ja VI. Päästöjä tarkasteltiin 10 km, 30 km ja 60 km menopaluumatkoille.

Fossiilisen kuljetuksen hiilidioksidipäästöt olivat suuremmat kuin vähähiilisen kuljetuksen päästöt. Kuorma-auton ja perävaunullisen kuorma-auton hiilidioksidipäästöissä oli myös eroavaisuuksia. Perävaunullisen kuorma-auton hiilidioksidipäästöt olivat suurempia yksittäisellä kuljetusmatkalla kuin kuorma-autolla. Fossiilisessa kuljetuksessa hiilidioksidipäästöjä kilometriä kohden muodostui täyden kuorman kanssa kuorma-autolla 0,97 kg ja perävaunullisella kuorma-autolla 1,25 kg. Vähähiilisessä kuljetuksessa hiilidioksidipäästöjä muodostui täyden kuorman kanssa kilometriä kohden kuorma-autolla 0,10 kg ja perävaunullisella kuorma-autolla 0,13 kg.

Päästölaskentaan tehtiin lisäksi tyhjälle kuorma-autolle ja perävaunulliselle kuorma-autolle. Paluumatkasta aiheutuneet päästöt on hyvä arvioida silloin, kun tilattu kiviainemäärä on isompi kuin yksi kuorma-autollinen tai yksi perävaunullinen kuorma-autollinen kiviaineksiä. Tyhjänä ajaminen aiheuttaa pienemmän polttoaineen kulutuksen kuin täy-

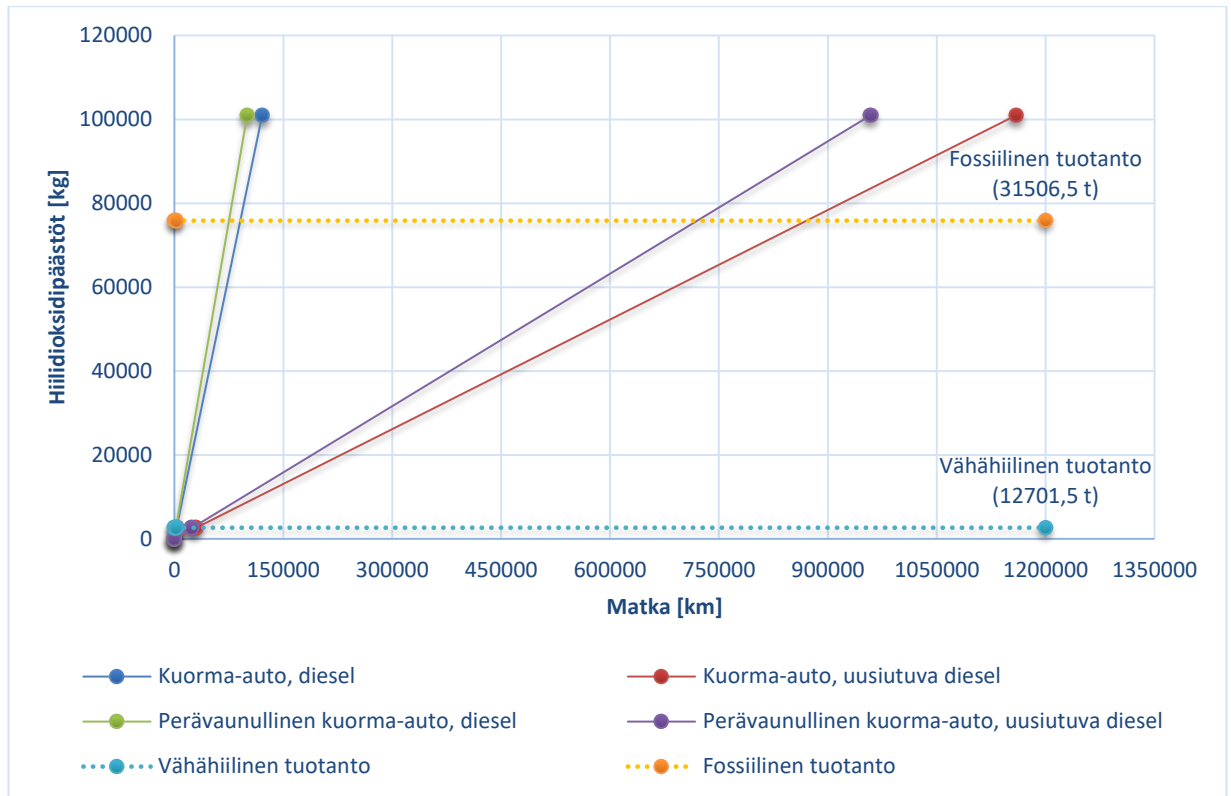
den kuorman kanssa ajaminen. Hiilidioksidipäästöjä kilometriä kohden muodostuu fossiilisessa kuljetuksessa ilman kuormaa kuorma-autolla 0,7 kg ja perävaunullisella kuorma-autolla 0,75 kg. Vähähiilisessä kuljetuksessa hiilidioksidipäästöjä muodostuu kilometriä kohden ilman kuormaa kuorma-autolla 0,07 kg ja perävaunullisella kuorma-autolla 0,08 kg. Taulukossa 51 on esitetty hiilidioksidipäästöt kuljettua kiviainestonnikiometriä kohden.

**Taulukko 51.** Kuljetuksen hiilidioksidipäästöt kuljettua kiviainestonnikiometriä kohden.

Ajoneuvo ja käytetty polttoaine	Hiilidioksidipäästöt kiviainestonnikiometriä kohden [g/t-km]
Kuorma-auto, diesel	44,0
Perävaunullinen kuorma-auto, diesel	27,8
Kuorma-auto, uusiutuva diesel	4,6
Perävaunullinen kuorma-auto, uusiutuva diesel	2,9

Taulukosta 51 havaitaan, että kuorma-autolla on korkeammat hiilidioksidipäästöt kiviainestonnikiometriä kohden kuin perävaunullisella kuorma-autolla. Korkeammat hiilidioksidipäästöt kiviainestonnikiometriä kohden johtuvat siitä, että kuorma-autoon mahtuu maksimissaan 22 t kiviaineksiä, kun taas perävaunulliseen kuorma-autoon mahtuu 45 t kiviaineksiä. Perävaunullisella kuorma-autolla muodostuu vähemmän päästöjä suuremman kuorman ansiosta kilometriä kohden. Uusiutuvan dieselin käytöllä on noin 90 % pienemmät hiilidioksidipäästöt kuin dieselillä taulukon 51 mukaan.

Kuljetuksen päästöjä laskettiin myös keskimääräisen polttoaineen kulutuksen avulla, jossa on otettu huomioon se, että kuorma-auto tai perävaunullinen kuorma-auto ajaa sekä tyhjänä että kuorman kanssa. Kuvassa 33 on esitetty kuljetuksen hiilidioksidipäästöt suhteessa kuljettuun matkaan. Kuvaan 33 on liitetty fossiilisen ja vähähiilisen tuotannon hiilidioksidimäärät katkoviivalla.



**Kuva 33.** Hiilidioksidipäästöt suhteessa kuljettuun matkaan.

Kuvassa 33 on esitetty katkoviivalla tuotantojen hiilidioksidipäästöt, jolloin nähdään ne kilometrimäärät, jotka vastaavat hiilidioksidipäästöiltään tuotannon hiilidioksidipäästöjä. Vähähiilisen tuotannon hiilidioksidipäästöjä muodostui 2060 kg ja fossiilisen tuotannon hiilidioksidipäästöjä 75867 kg. Vähähiilisen tuotannon hiilidioksidimääriä vastaavat kilometrimäärät dieselin käytön osalta ovat kuorma-autolle 3066 km ja perävaunulliselle kuorma-autolle 2046 km. Uusiutuvan dieselin osalta kilometrimäärät ovat kuorma-autolle 29 397 km ja peräkäräylliselle kuorma-autolle 24 316 km.

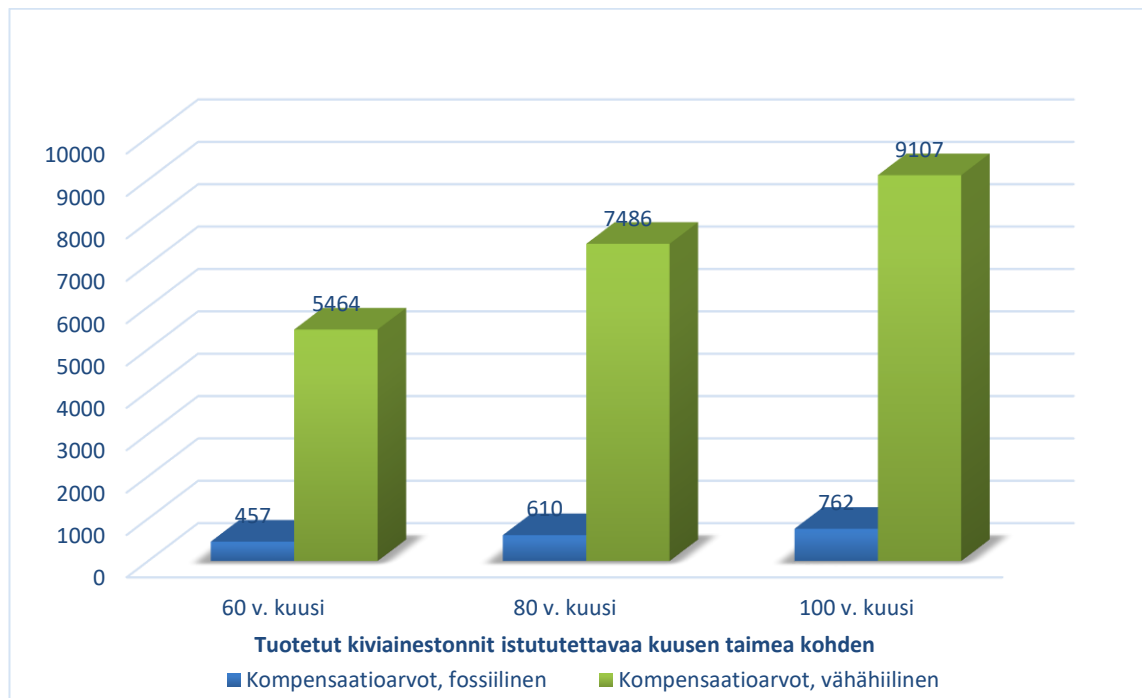
Fossiilisen tuotannon hiilidioksidipäästöjä vastaavat kilometrimäärät ovat dieselin osalta kuorma-autolle 120 916 km ja perävaunulliselle kuorma-autolle 100 253 km. Uusiutuvan dieselin osalta kilometrimäärät ovat kuorma-autolle 1 159 351 km ja peräkäräylliselle kuorma-autolle 958 970 km. Kuljetuksen päästöt ovat jopa fossiilisella polttoaineella aika marginaaliset suhteessa tuotannon päästöihin ja uusiutuvalla polttoaineella ajettaessa kuljetuksella ei ole oikeastaan mitään merkitystä suhteessa tuotannon päästöihin.

Kuljetuksen päästölaskentatulosten perusteella voidaan todeta, että uusiutuvalla dieselillä on noin 90 % pienempi hiilijalanjälki kuin dieselillä, joka on havaittavissa taulukon 51 tuloksissa. Vaikka kuorma-autolla muodostuu vähemmän päästöjä kilometriä kohden, perävaunullisella kuorma-autolla on kuitenkin pienemmät päästöt kiviainestonnikielometriä kohden.

## 7.4 Hiilikompensaatiolaskelmien tulokset

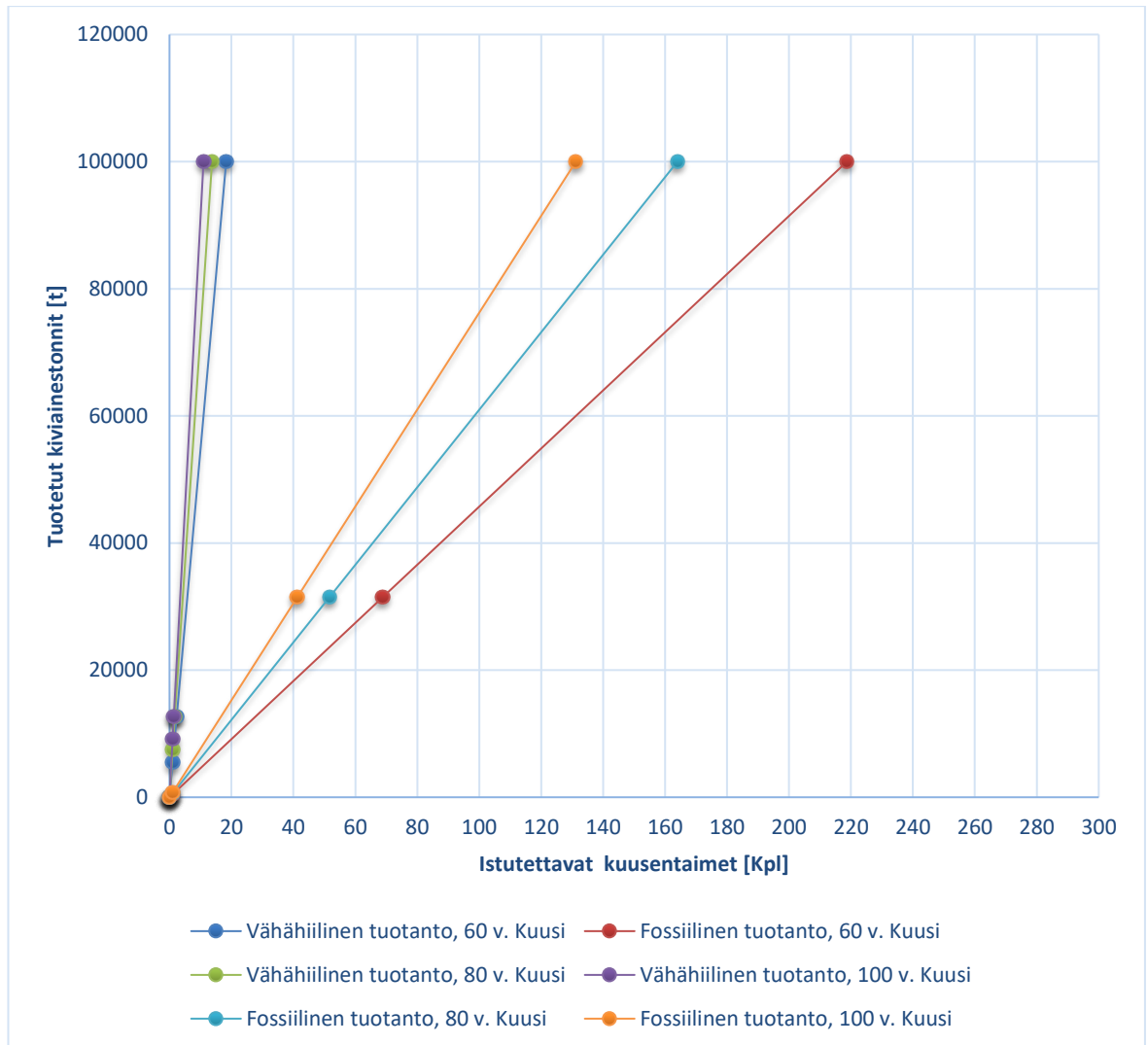
### 7.4.1 Kiviainestuotantojen hiilikompensaatio

Kiviainestuotantojen hiilidioksidipäästöt voidaan kompensoida istuttamalla kuusen taimia. Kappaleissa 6.1.2 ja 6.2.2 määriteltiin tuotettujen kiviainestonnien määrä istutettavaa kuusen taimea kohden, näistä käytetään nimitystä kompensaatioarvo. Kuvassa 34 on koottu fossiilisen ja vähähiilisen tuotannon laskennallisesti saadut kompensaatioarvot 60-, 80- ja 100- vuotiaalle kuusille.



**Kuva 34.** Fossiilisen ja vähähiilisen tuotantojen kompensaatioarvot.

Kuvan 34 kompensaatioarvot kuvastavat tuotettua kiviainestonnimäärää, jonka hiilidioksidipäästöt vastaavat 60-, 80- ja 100-vuotiaan kuusen sitomia hiilidioksidimääriä. Fossiilisen tuotannon kompensaatioarvot ovat noin 92 % pienempiä kuin vähähiilisen tuotannon kompensaatioarvot, johtuen siitä, että vähähiilisessä tuotannossa muodostuu vähemmän päästöjä tuotettua kiviainestonnia kohden. 60-vuotiaalla kuusella on havaittavissa pienimmät kompensaatioarvot molemmissa tuotannoissa, koska 80-vuotiaat ja 100-vuotiaat kuuset sitovat enemmän hiilidioksidia. Kuvassa 35 on esitetty molempien tuotantojen istutettavat kuusen taimet suhteessa tuotettuihin kiviainestonneihin.



**Kuva 35.** Istutettavat kuusen taimet suhteessa tuotettuun kiviainestonniin.

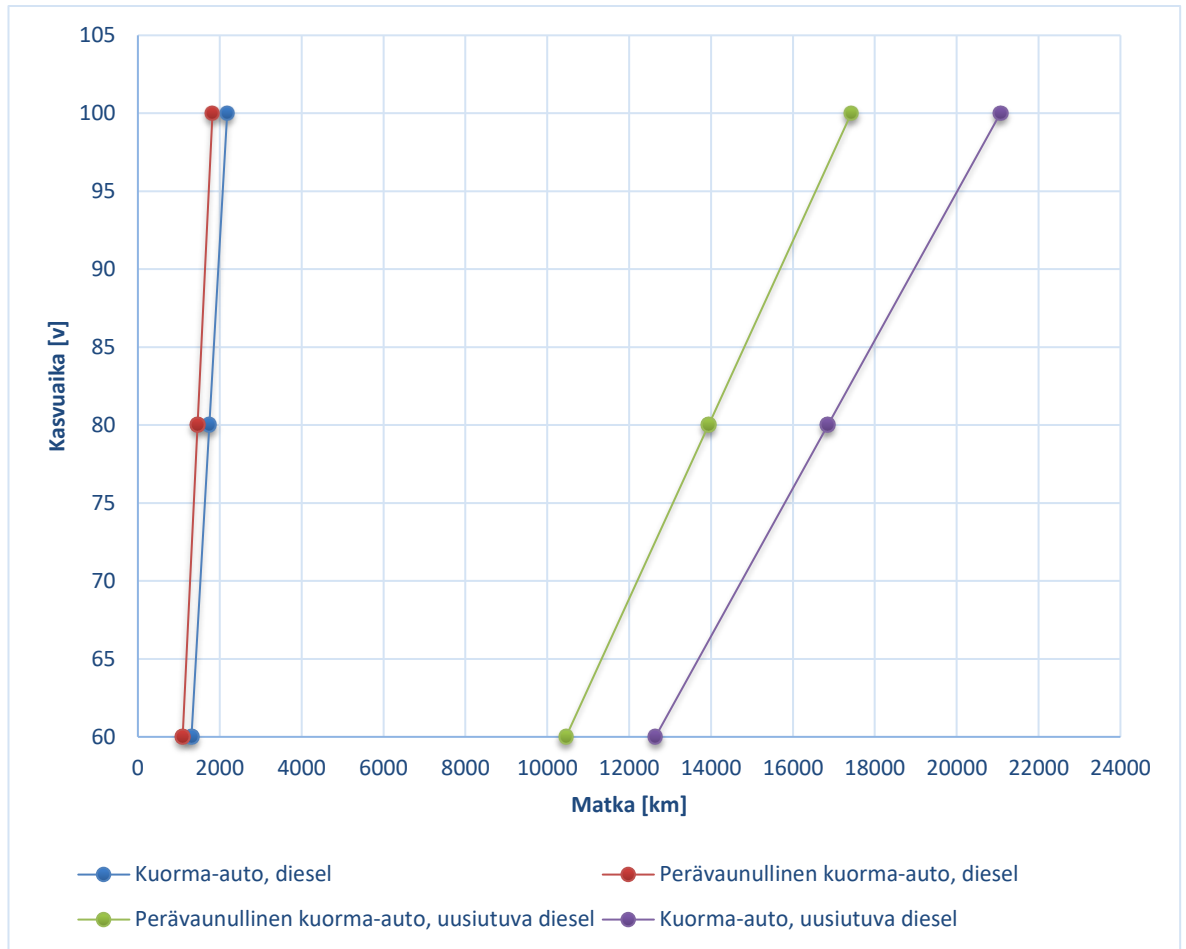
Kuvassa 35 havaitaan, että vähähiilisen tuotannon päästöjen kompensoinniksi vaaditaan merkittävästä vähemmän istutettavia kuusen taimia kuin fossiilisessa tuotannossa. Vähähiilisessä tuotannossa on noin 92 % pienempi istutustarve kuin fossiilisessa tuotannossa.

#### 7.4.2 Kuljetuksen hiilikompensaatio

Kuljetuksen hiilikompensaation laskelmia siitä, että mikä on kiviaineksen kuljetamisen kilometrimäärät, jotka vastaavat hiilidioksidipäästöiltään 60-, 80- tai 100- vuotiaista kuusta. Laskentaa tehtiin eri polttoaineiden kulutuksille. Hiilikompensointilaskelmia tehtiin myös kiviainestonnikilometriä kohden.

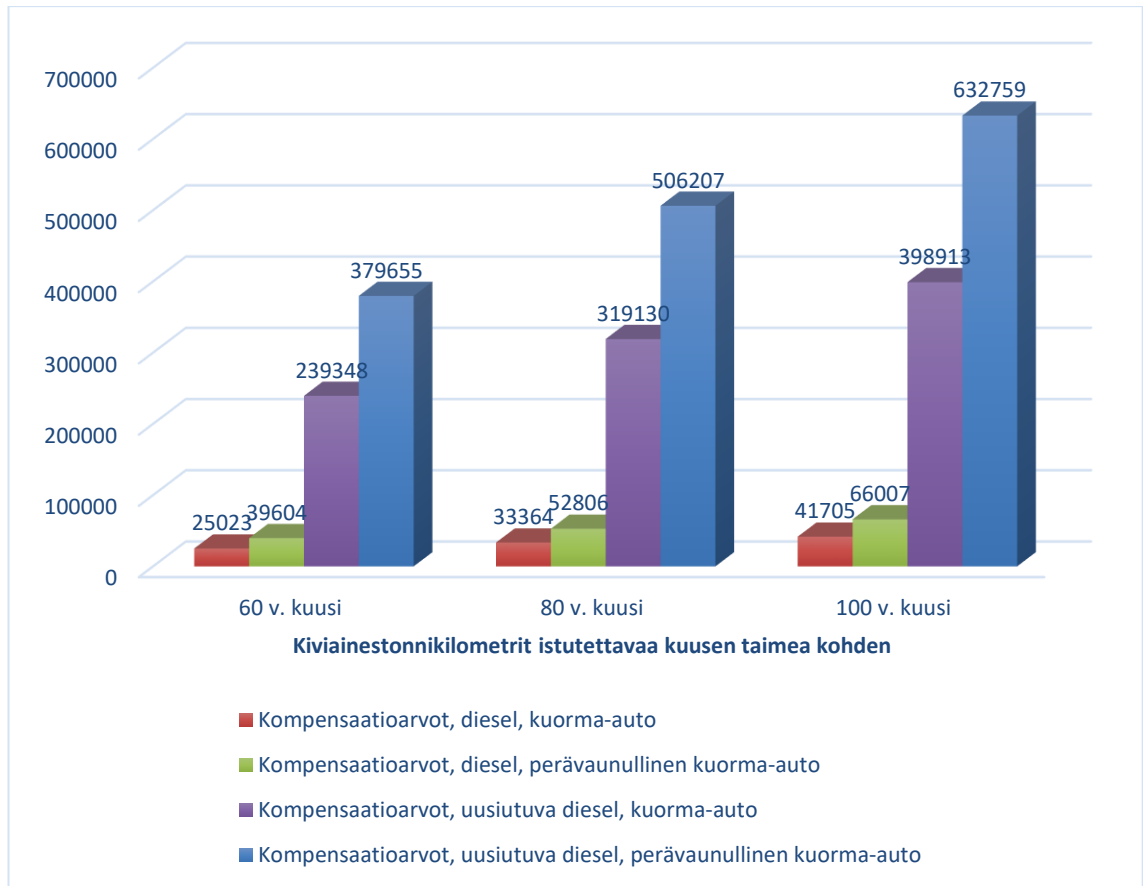
Kuvassa 36 on esitetty kuorma-autolle ja perävaunulliselle kuorma-autolle kilometrimäärät, joiden hiilidioksidipäästöt vastaavat 60 – 100 vuotiaan kuusen sitomaa hiilimäärää.

Kilometrimäärät, jotka vastaavat kuusen sitoma hiilidioksidimäärää on laskettu kuljetusten keskimääräisen polttoaineen kulutuksen avulla. Kuvassa 36 on esitetty kuljetusmatkan kompensoimiseksi tarvittava taimen kasvu-aika.



**Kuva 36.** Kuljetusmatkan kompensoimiseksi tarvittava taimen kasvu-aika.

Dieseliä käyttävällä perävaunullisella kuorma-autolla kuvan 36 mukainen kilometrimäärä on 1093 km, joka vastaa 60-vuotiaan kuusen sitoma hiilimäärä. Uusiutuvaa dieseliä käyttävällä perävaunullisella kuorma-autolla vastaavanlainen arvo on 10456 km. Uusiutuvan dieselin käytöllä saadut kilometrimäärät ovat noin 90 % suurempia kuin dieselin käytöllä saadut kilometrimäärät. Uusiutuvan dieselin avulla kiviaineksen kuljetuksen hiilijalanjälki on noin 90 % pienempi kuin perinteisen dieselin hiilijalanjälki. Kuvassa 37 on esitetty fossiilisen ja vähähiilisen kuljetuksen kiviainestonnikilometrit, joiden kompensoimiseksi tarvitsee istuttaa yksi 60-,80- tai 100-vuotta kasvava kuusen taimi.



**Kuva 37.** Fossiilisen ja vähähiilisen kuljetuksen kiviainestonnikilometrit istutettavaa kuusen taimea kohden.

Kuvassa 37 havaitaan, että uusiutuvaa dieseliä käyttävä perävaunullinen kuorma-auto voi kuljettaa jopa 90 % enemmän kiviainestonnikilometrejä kuin dieselillä toimiva perävaunullinen kuorma-auto.

## 8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Vähähiilisen tuotannon kalliomurskeen hiilidioksidipäästöt olivat 202 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden ja fossiilisen tuotannon kalliomurskeen hiilidioksidipäästöt 2408 grammaa tuotettua kiviainestonna kohden. Epätarkkuutta tuloksiin toi tapaustutkimusten erilainen tuotejakauma, sillä fossiilisessa tuotannossa tuotettiin enimmäkseen pienirakeisempia kiviainestuotteita. Tutkimuksissa havaittiin, että vähähiilisen kalliomurskeen hiilijalanjälki oli noin 92 % pienempi kuin fossiilisella polttoaineella tuotetun kalliomurskeen. Hiilijalanjälki pieneni oletettua enemmän, sillä hypoteesina oli Neste Oy:n ilmoittama noin 90 % hiilijalanjäljen väheneminen. Hypoteesin ylityksen arvellaan johtuvan juuri tuotantojen erilaisesta tuotejakaumasta. Lajitekohtaisessa hiilidioksidipäästövertailussa hiilijalanjäljen vähennys oli Neste Oy:n ilmoittaman hypoteesin mukainen.

Hiilidioksidipäästöjen lisäksi lähipäästöt olivat vähähiilisessä tuotannossa pienempiä kuin fossiilisessa tuotannossa. Typenoksidipäästöjä muodostui vähähiilisessä tuotannossa noin 35 % vähemmän kuin fossiilisessa tuotannossa. Samojen lajitteiden tuotannoissa havaittiin sen sijaan 14 % vähennys typenoksidipäästöissä. Molemmissa tuotannoissa typenoksidipäästöt ( $\text{NO}_x$ ) olivat kuitenkin suuria: typenoksidipäästöjen suuruuteen vaikuttivat esimerkiksi aggregaatin suuri  $\text{NO}_x$ -päästökerroin ja SCR-tekniikan puuttuminen. Tuotantoprosessissa ei käytetty SCR-tekniikan vaatimaa reagenssiluosta. Käytetyllä aggregaatilla ei ollut myöskään samanlaista päästöluokkavaatimusta kuin työkonoiden moottoreilla.

Työssä havaittiin, että työkonoiden polttoaineenkulutus oli uusiutuvaa polttoainetta käytettäessä 3 % suurempaa kuin fossiilista polttoainetta käytettäessä. Polttoaineen kulutus tuotettua kiviainestonna kohden oli kuitenkin suurempi fossiilista polttoainetta käytettäessä, minkä arvellaan selittyvän muun muassa pienempirakeisemmän kiviaineksen tuotannosta. Fossiilisessa tuotannossa keskimääräinen polttoaineen kulutus oli 0,94 litraa kiviainestonna kohden ja vähähiilisessä 0,78 litraa kiviainestonna kohden.

Laskennallisesti vähähiilinen kalliomurske on noin 0,20 € / t kalliimpaa kuin fossiilisilla polttoaineilla tuotettu kalliomurske. Vähähiilisen tuotannon suurempia kustannuksia selittää polttoaineen korkeampi litrahinta.

Kuljetusvaiheen hiilidioksidipäästöt ovat uusiutuvaa dieseliä käytettäessä 90 % pienemmät kuin perinteistä dieseliä käytettäessä. Päästöjä tarkasteltiin kuorma-autokuljetukselle ja perävaunulliselle kuorma-autokuljetukselle. Hiilidioksidipäästöt kiviainestonnikiometriä kohden olivat pienimmät perävaunullisella kuorma-autolla, joka käytti polttoaineena uusiutuvaa dieseliä. Hiilidioksidipäästöt olivat perävaunullisella kuorma-autolla



kiviainestonnakilometriä kohden uusiutuvaa dieseliä käytettäessä 2,9 grammaa ja perinteistä dieseliä käytettäessä 27,8 grammaa. Tutkimustulosten perusteella kuljetusvaiheen hiilijalanjälki on pienin, kun yli 22 t kiviaineskuormat kuljetetaan perävaunullisella kuorma-autolla ja alle 22 t kiviaineskuormat kuljetaan kuorma-autolla.

Hiilikompensaatioiden avulla sekä vähähiilisestä että fossiilisesta kiviainestuotannosta on mahdollista saada hiilineutraalia. Laskelmien perusteella vähähiilisestä murskeesta on mahdollista tehdä hiilineutraalia istuttamalla yksi kuusen taimi 5464 tuotettua kiviainestonna kohden, mikäli kuusen taimi annetaan kasvaa vähintään 60 vuotta. Fossiilisessa tuotannossa istutustarve on yksi kuusen taimi 457 tuotettua kiviainestonna kohden. Kuljetuspäästöjen kompensoimiseksi olisi perävaunullisella kuorma-autolla kuljettessa istutettava uusiutuvaa dieseliä käytettäessä yksi taimi/ 10 456 km ja perinteistä dieseliä käytettäessä yksi kuusen taimi/1093 km, mikäli taimien annetaan kasvaa vähintään 60-vuotiaaksi.

Kiviainestuotannon kokonaispäästöjen lisäksi tulisi jatkotutkimustarpeena laskea louhinnan päästöt. Päästöjen laskennallisen määrittämisen rinnalla olisi hyvä toteuttaa myös päästömittauksia, jotka toisivat luotettavuutta laskennallisille arvoille. Tässä työssä selvitetty päästöt vastasivat suurusluokaltaan kirjallisuudesta löytyviä päästöarvioita, esimerkiksi infrarakentamisen päästötietokannassa oli määritelty fossiilisesti tuotetun kalliomurskeen lajitteille useita eri arvioita. Arviot olivat välillä 1800 - 6000 gCO<sub>2</sub>/tuotettu kiviainestonni. Infrarakentamisen päästötietokannan kalliomurskeen hiilidioksidipäästölaskennassa oli myös huomioitu louhinnan päästöt. (Suomen ympäristökeskus 2024) Tässä työssä määritetyt lähipäästöarviot vastasivat Destia Oy:n sisäisen päästölaskurin tuloksia ja kirjallisuudesta löytyviä arvioita (Anna Kaartinen 2021; Destia 2021). Työssä esitetyllä päästölaskentamenetelmällä saatiin yhteneviä tuloksia kirjallisuudesta esitettyjen arvioiden kanssa. Päästöjen määrittämisen lisäksi työssä käytetyn laskentamenetelmän avulla voidaan arvioida murskauslaitoksen energiankulutusta.

Haasteita päästölaskentaan toi erityisesti aggregaatin hyötysuhteen ja lajitekohtaisien energiankulutuksien arvioiminen. Murskausprosessissa energiaa kuluu laajasti muun muassa kitkan voittamiseen ja lämmön tuottamiseen. Energiankulutuksien arvioiden tarkkuutta olisi lisännyt tieto tuotantojen päiväkohtaisista polttoaineiden kulutuksista. Olisi myös tärkeää tutkia kiviainestuotannossa käytettävien aggregaattien hyötysuhteita, jotta aggregaateille saataisiin määriteltyä vakioituja hyötysuhdearvoja. Työssä käytetyn aggregaatin hyötysuhdevakio oli todennäköisesti hyvin lähellä aggregaatin todellista hyötysuhdetta, sillä työssä määritetyt lajitekohtaiset energiankulutukset vastasivat lähes Bruno -ohjelman energiankulutuksia (Taulukko 3). Näin ollen Kick -arviointimenettelyn

avulla saatiin luotua oikean suurusluokan eroavaisuudet eri lajitteiden energiankulutuksille. Työssä havaittiin lisäksi, että Kick -arviointimenettelyllä ei voida suoraan määrittää lajitekohtaisia mekaanisen energian kulutuksia, koska Kick -kaava ei ota huomioon aggregaatin hyötysuhdetta. Tämän vuoksi Kick -kaavalla määritetyille arvioihin tehtiin skaalaus. Skaalattuihin arvoihin sovellettiin aggregaatin hyötysuhdetta, jotta saatiin määriteltyä aggregaatin mekaanisen energiankulutukset.

Tutkimustuloksien avulla Destia Oy voi tuotteistaa vähähiilisen murskeen, sillä työssä on selvitetty riittävät pohjatiedot vähähiilisen murskeen myynnille.

## LÄHTEET

Aggregates Business (2012). Home. Features. Quarry products. Finland has high capacity for aggregates. Saatavilla (viitattu 7.12.2023): <https://www.aggbusiness.com/ab10/feature/finland-has-high-capacity-aggregates>

Anna Kaartinen (2021). Opinnäytetyö. Ympäristövastuullisen ja hiilineutraalin kiviaineksen tuotanto. 25 s. Saatavilla (viitattu 11.6.2024): <https://www.theseus.fi/handle/10024/509805>

Ayhan Demirbas (2008). Biodiesel – A realistic fuel alternative for diesel engines. Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature 2008. 116-162 s.

Balasubramanian, A., (2017). Size reduction by crushing methods. Research report (3), University of Mysore. Saatavissa (viitattu 9.11.2023): [https://magadhuniversity.ac.in/download/econtent/pdf/SIZE%20REDUCTION%20BY%20CRUSHING%20METHODS\\_Pharm%20Eng%20I.pdf](https://magadhuniversity.ac.in/download/econtent/pdf/SIZE%20REDUCTION%20BY%20CRUSHING%20METHODS_Pharm%20Eng%20I.pdf)

Berrocal, K., 2014. Crushing and Screening Handbook. Metso. Saatavilla (7.11.2023): <https://www.mogroup.com/insights/e-books/crushing-and-screening-handbook/>

CAT (2020). CAT C18. 1-2 s. Saatavilla (viitattu 21.1.2024): <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20200521-b7509-74567>

Considine, D. M., Chemistry and process technology encyclopedia, McGrawHill, 1974

Coulson, J.M., Richardson, J.F., Chemical Engineering, Volume 2, (1991): Particle Technology & Separation Processes, Fourth edition

Destia (2021). Destia Oy:n sisäinen päästölaskuri. Lähipäästöjen määrittäminen.

Destia (2023a). Etusivu. Tietoa meistä. Vastuullisuus. Ympäristö. Saatavilla (viitattu 3.10.2023): <https://www.destia.fi/tietoa-meista/vastuullisuus/ymparisto/>

Destia (2023b). Etusivu. Uutishuone. Uusi konsepti vahvistaa hiilineutraaliutta infrahankkeilla. Saatavilla (viitattu 3.10.2023): <https://www.destia.fi/artikkeli/uusi-konsepti-vahvistaa-hiilineutraaliutta-infrahankkeilla/>

Destia (2024). Kuorma-auton ja peräkäräyllisen kuorma-auton maksikuormatiedot ja polttoaineen kulutus maksimikuorman kanssa. Haastattelu Destia Oy:n yhteishenkilön kanssa.

DieselNet (2021a). Home. Emission Standards. European Union. Heavy-Duty Engines. EU: Heavy-Duty Truck and Bus Engines. Table 2. Saatavilla (viitattu 11.12.2023): <https://dieselnet.com/standards/eu/hd.php>

DieselNet (2021b). Home. Emission Standards. European Union. Nonroad Engines. Stage III/IV Standards. Table 2. Saatavilla (8.11.2023): <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php#s5>

DieselNet (2024). Home. Emission Standards. How emission are regulated. Saatavilla (28.2.2024): <https://dieselnet.com/standards/intro.html>

Energiateollisuus (2024). Etusivu. Tilastot. Sähkötalastot. Saatavilla (viitattu 26.2.2024): <https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/>

EU (2023). DIRECTIVE (EU) 2016/2284 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 14 December 2016. National emission reduction commitments table A and B. Saatavilla (viitattu 20.10.2023): [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2016.344.01.0001.01.ENG&toc=OJ:L:2016:344:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2016.344.01.0001.01.ENG&toc=OJ:L:2016:344:TOC)

Euroopan parlamentti (2022). Kehitys kohti EU:n vuoden 2020 ilmastotavoitteita. Saatavilla (viitattu: 1.10.2023): <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20180706STO07407/kehitys-kohti-eu-n-vuoden-2020-ilmastotavoitteita-infografiikka>

Eurooppa neuvosto (2022). Etusivu. Infografiikka. Saatavilla (viitattu 12.1.2024): <https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/how-is-eu-electricity-produced-and-sold/>

Eurooppa neuvosto (2023). 55-valmiuspaketti. Saatavilla (viitattu 25.9.2023): <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/fit-for-55/>

Eurooppa neuvosto (2024). Etusivu. Poliitikat. Miten ja milloin EU hyväksyy pakotteita? EU:n rajoittavat toimenpiteet Venäjää vastaan Ukrainan tilanteen johdosta. EU:n Venäjän vastaiset pakotteet. Saatavilla (viitattu 26.2.2024): <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/sanctions-against-russia/sanctions-against-russia-explained/#oilban>

European Environment agency (2023). European Union emission inventory report 1990-2023. 49- 62 s. Saatavilla (viitattu 20.10.2023): <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-emissions-inventory-report-1990-2021>

Finnair (2022). Päästöhyvityspalvelu. Saatavilla (viitattu 19.4.2024): <https://finnair.choose.today/fi/>

General Power (2024). Home. Diesel Generator vs. Gas Generator: Which is more efficient? Saatavilla (viitattu 25.2.2024): <https://www.genpowerusa.com/blog/diesel-generator-vs-gas-generator-which-is-more-efficient/>

Gupta, A. & Yan, D.S. (2006). Mineral processing design and operations an introduction. 65-67 s.

Hakapää, A. & Lappalainen, P. (2011). Kaivos- ja louhintatekniikka. 2nd ed. Helsinki. Suomi: Opetushallitus. s. 202- 388

Harold H. Schobert (2002). Energy and Society: An Introduction. Taylor & Francis: New York, 20 s.

Hiilineutraalisuomi (2021). Keskeiset käsitteet. Poistuma. Saatavilla (viitattu 25.9.2023): [https://www.hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Ilmastotyö/Metsät/Keskeiset\\_kasitteet\(60013\)](https://www.hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Ilmastotyö/Metsät/Keskeiset_kasitteet(60013))

Holdich, R. G. (2002). Fundamentals of particle technology. Loughborough University, U.K. Department of Chemical Engineering. 115 s.

Infra ry (2021). Louhinta ja kiviainestuotanto. Saatavilla (viitattu 1.10.2023): <https://rt.fi/INFRA/tietoa-alasta/Louhinta-ja-kiviaines/>

Ilmatieteenlaitos (2023a). Teematietoa. Yhteiskunta, terveys ja turvallisuus. Ilmanlaatu. Ilmansaasteet. Typpidioksidi. Saatavilla (viitattu 7.12.2023): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/typpidioksidi>

Ilmatieteenlaitos (2023b). Teematietoa. Yhteiskunta, terveys ja turvallisuus. Ilmanlaatu. Ilmansaasteet. Hiukkaset. Saatavilla (viitattu 7.12.2023): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmansaasteet>

Keith Addison (1999). Journey to Forever. Non-Government Organization. Biodiesel. Saatavilla (viitattu 10.12.2023): <http://journeytoforever.org/biodiesel.html>

Kivirock-lehti (2019). Uutiset. Saatavilla (viitattu: 5.12.2023): <https://www.kivirock.fi/uutiset.html?a100=150860>

Kone-Kostamo (2020). Koti. Murskauspalvelut. Kubisaattori & Keskipakomurskain. Saatavilla (viitattu 7.12.2023): <https://kone-kostamo.fi/murskauspalvelu/kubisaattori-keskipakomurskain/>

Koskinen (2023). Tietoa meistä. Uutishuone. Uutiset. Päätehakkuu on jaksollisen metsänkasvatuksen viimeinen vaihe. Saatavilla (8.1.2024): <https://koskisen.fi/paatehakkuu/>

Kuula P. (2015). Tien ja radan sitomattomissa rakennekerroksissa käytettävien kiviainesten lujuuden ja hienontumisen tutkiminen. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä. Kirjallisuusselvitys. Saatavilla (viitattu 19.4.2024): <https://www.doria.fi/handle/10024/121669>

Luonnonvarakeskus (2022). Kuinka monta puuta pitäisi istuttaa ja kasvattaa kompensoimaan yhden ihmisen hiilipäästöt. Saatavilla (viitattu 8.1.2024): <https://www.luke.fi/fi/blogit/kuinka-monta-puuta-pitaisi-istuttaa-ja-kasvattaa-kompensoimaan-yhden-ihmisen-hiilipäästöt-osa-1>

Maanmittauslaitos (2020). Maaperä ja pohjavesi. Maaperä. Kiviainesalueiden arviointi. Kiviainesalue-tunnistaminen, esiintymät, ja hyväksikäyttö. Saatavilla (viitattu 24.10.2023): <https://ak.maanmittauslaitos.fi/2020/maapera-ja-pohjavesi/maapera/kiviainesalueiden-arviointi/kiviainesalue-tunnistaminen#KALLIOAINES>

Metso (2016). Etusivu. Insights. Blogi. Blogi-kiviainestuotanto. Sähkökäytön suosio kasvaa kivenmurskauksessa ja seulonnassa. Saatavilla (viitattu 11.12.2023): <https://www.metso.com/fi/insights/blogi/kiviainestuotanto/sahkokayton-suosio-kasvaa/>

Metso (2023). Kiviainesala. Tuotteet. Murskaimet. Saatavilla (viitattu 9.11. 2023): <https://www.metso.com/fi/kiviainesala/tuotteet/murskaimet/>

Metso (2024). Bruno Simulation Software. Kuvakaappaus.

Motiva (2024). Etusivu. Ratkaisut. Kestävä liikenne. Valitse auto viisasti. Energialähteet. Saatavilla (viitattu 26.2.2024): [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikuminen/valitse\\_auto\\_viisaasti/energialahteet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikuminen/valitse_auto_viisaasti/energialahteet)

MTK. Maa- ja metsätaloustuottajien ilmastosanasto. Saatavilla (viitattu 11.9.2023): <https://www.mtk.fi/ilmastosanastoa>

Neot (2023). Hankinta. Tuotteet. Polttoöljy. Saatavilla (7.12.2023): <https://www.neot.fi/hankinta/tuotteet/polttooljyt/>

Neste (2020). Neste Renewable Diesel Handbook. Fuel consumption. 8-52 s. Saatavilla (viitattu 27.2.2024): <https://www.sustainable-ships.org/stories/2023/neste-renewable-diesel-handbook>

Neste (2023a). Yritysassiakkaat. Tuotteet. Neste My Uusiutuva Polttoöljy. Saatavilla (viitattu 25.8.2023): <https://www.neste.fi/yritysassiakkaat/tuotteet/polttoaineet/neste-my-uusiutuva-polttooljy>

Neste (2023b). Yritysassiakkaat. Tuotteet. Neste Tempera polttoöljy. Saatavilla (viitattu 10.12.2023): <https://www.neste.fi/yritysassiakkaat/tuotteet/polttoaineet/neste-tempera-polttooljy>

Neste (2023c). Uusiutuva polttoöljy My Neste. Nesteen koulutus 10.10.2023. Helsinki. 3 s.

Neste (2023d). Yritysassiakkaat. Artikkelit. Biodiesel ja uusiutuva diesel – Mitä eroa? Saatavilla (viitattu 10.12.2023): <https://www.neste.fi/artikkeli/biodiesel-ja-uusiutuva-diesel-mita-eroa>

Neste (2023e). Etusivu. Konserni. Tietoa meistä. Innovaation. NEXBTL-teknologia. Saatavilla (viitattu 11.12.2023): <https://www.neste.fi/konserni/tietoa-meista/tuotanto/nexbtl-teknologia>

Neste (2023f). Etusivu. Vastuulliset ratkaisut. Ratkaisut. Uusiutuvat polttoaineet. Merkittävästi pienemmät päästöt. Saatavilla (viitattu 26.1.2024): <https://www.neste.fi/vastuulliset-ratkaisut/ratkaisut/uusiutuvat-polttoaineet/pienemmat-paastot>

Neste (2024). Etusivu. KONSERNI. Tietoa meistä. Tuotanto. Porvoo. Saatavilla (viitattu 26.2.2024): <https://www.neste.fi/konserni/tietoa-meista/tuotanto/porvoo>

Nylund, N.-O., Söderena, P., & Pettinen, R. (2020). Biopolttoaineiden demonstraatiohanke BioSata: Korkeaseosteisilla biopolttoaineilla hiilettömään kaupunkiliikenteeseen. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Tutkimusraportti Nro VTT-R-00585-20. 18 s

Peltonen, P. (1986). Kiviaineksen alueelliset laatuselvitykset. Luento TTKK:n täydennyskoulutuskurssi. 10.2.1986-11.2.1986. Tampere. 22 s

Puuinfo (2020). Puutieto. Puun ominaisuudet. Lujuusteknisiä ominaisuuksia. Saatavilla (viitattu 8.1.2024): <https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/lujuusteknisia-ominaisuuksia/>

RT (2023). Tietoa alasta. Ympäristö ja energia. Rakennettu ympäristö ja ilmastonmuutos. Saatavilla (viitattu 6.10.2023): <https://rt.fi/tietoa-alasta/ymparisto-ja-ilmasto/>

Repola J. (2009). Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica* vol. 43 no. 4

Ruuskanen J., (1999). Syötteen vaikutus murskaimen tuotteeseen ja toimintaan.

Ruuskanen, J. (2006). Influence of rock properties on compressive crusher performance, Tampere University of Technology, Tampere, 236 s.

Rotator (2023). Koneet. Mobiiliseulat. Saatavilla (12.11.2023): <https://www.rotator.fi/koneet/metso-mobiiliseulat/>

Sandvik (2023). Sandvikin murskausprosessin koulutus Turussa 10.11.2023. Turku

Savonia (2011). Aggregaatin testaus. Raportti. Saatavilla (viitattu 26.5.2024): <https://energiaa.pks.fi/wp-content/uploads/2017/06/Aggregaatti-testausraportti.pdf>

SFS 5968 (2009). Kevyt polttoöljy, vaatimukset ja testimenetelmät. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki. 5 s.

SFS-EN 590 (2022). Automotive fuels. Diesel. Requirements and test methods. Suomen standardisoimisliitto. 10 s.

SFS-EN 1097-1 (2024). Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval). Suomen standardisoimisliitto, Helsinki. 5-6 s.

SFS-EN 1097-2 (2020). Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki. 5-6 s.

SFS-EN 1097-9 (2014). Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 9: Nastarengaskulutuskestävyyden määrittäminen. Pohjoismainen testi (kuulamylymenetelmä) Suomen standardisoimisliitto. Helsinki. 5-6 s

SFS-EN 14214 (2019). Liquid petroleum products. Fatty acid methyl esters [FAME] for use in diesel engines and heating applications. Requirements and test methods. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki. 1 s.

SFS-EN 15940 (2023). Automotive fuels. Paraffinic diesel fuel from synthesis or hydrotreatment. Requirements and test methods. Suomen standardisoimisliitto. 10 s.

Sitra (2023). Tulevaisuussanasto. Kasvihuonekaasu. Saatavilla (viitattu 5.12.2023): <https://www.sitra.fi/tulevaisuussanasto/kasvihuonekaasu/>

Suomen Betoniyhdistys ry (2018). Louhinta- ja kuljetusvaihe. Betonin kiviainekset by 43. Helsinki

Suomen Kansallinen Geologian Komitea (2019). Luonnonvarat. Kalliokiviaines. Saatavilla (24.10.2023): <https://www.geologia.fi/2019/12/18/kalliokiviaines/>

Suomen ympäristökeskus (2010): Ympäristöasioiden hallinta kiviainestuotannossa. Helsinki. Saatavilla: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/be2823e3-5aa6-434c-8224-12cc176f81ab/content>

Suomen ympäristökeskus (2024). Infrarakentamisen päästötietokanta. Kiviainekset. Murske. Taustaraportti. Liite 2 Murskeen ja sepelin vertailuarvoja. Saatavilla (viitattu 11.6.2024): <https://co2data.fi/infra/>

S.N Hossain & S. Bari (2014). Waste Heat Recovery from Exhaust of a Diesel generator Set Using Organic Fluids. University of South Australia. 440 s.

Sweco (2023). News. Circular use of aggregates could save carbon emissions and reduce raw material costs by EUR 6 billion per year in Europe. Saatavilla (viitattu 7.12.2023): <https://www.swecogroup.com/corporate-news/circular-use-of-aggregates->



could-save-carbon-emissions-and-reduce-raw-material-costs-by-eur-6-billion-per-year-in-europe/

SWEL (2024). Home. Zero Carbon Consultants. Saatavilla (viitattu 18.2.2024): [https://www.southwest-environmental.co.uk/further%20info/carbon/carbon\\_offset\\_consultants.html](https://www.southwest-environmental.co.uk/further%20info/carbon/carbon_offset_consultants.html)

Tilastokeskus (2022a). Sähkön tuotanto energialähteittäin: osuus kokonaistuotannosta 2021. Saatavilla (viitattu 12.1.2024): <https://stat.fi/julkaisu/cku28dfkw805d0b9922uxoyep>

Tilastokeskus (2022b). Tilastotieto. Julkaisut. Energian hankinta ja kulutus. Vuoden 2021 energiankulutus palautui koronavuoden jälkeen normaalille tasolle. Saatavilla (viitattu 12.1.2024): <https://stat.fi/julkaisu/cku4c03s803du0b05fxruenwl>

Tilastokeskus (2023). Tietoa tilastoista. Käsitteet. Epäsuorat kasvihuonekaasut. Saatavilla: [https://stat.fi/meta/kas/epasuorat\\_kasvi.html](https://stat.fi/meta/kas/epasuorat_kasvi.html)

Tulli (2023). Energiatuotteiden ulkomaankauppa vuonna 2022. Saatavilla (viitattu 26.2.2024): <https://tulli.fi/-/energiatuotteiden-ulkomaankauppa-vuonna-2022>

Työ- ja elinkeinoministeriö (2023). Vastuu alueet. Uusiutuva energia Suomessa. Saatavilla (1.10.2023): <https://tem.fi/uusiutuva-energia>

United Nations Climate Change (2023). Process and meetings. The Paris agreement. Saatavilla (viitattu 6.10.2023): <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

UEPG Aggregates Europe (2023). About us. Who we are. Saatavilla (viitattu 7.12.2023): <https://www.aggregates-europe.eu/about-us/>

Ulkoministeriö (2023). Etusivu. Ajankohtaista. Edustustojen raportit. Edustojen raportit maittain. Norja monipuolistaa talouttaan – suomalaisratkaisut kiinnostavat. Saatavilla (viitattu 26.2.2024): [https://um.fi/edustustojen-raportit-maittain/-/asset\\_publisher/UfDI8Y5tJqX1/content/norja-monipuolistaa-talouttaan-suomalaisratkaisut-kiinnostavat/384951](https://um.fi/edustustojen-raportit-maittain/-/asset_publisher/UfDI8Y5tJqX1/content/norja-monipuolistaa-talouttaan-suomalaisratkaisut-kiinnostavat/384951)

UPM (2023). Tietoa. Metsänomistajan tietopaketti hiilensidonnasta. Saatavilla (19.4.2024): <https://www.upmmetsa.fi/tietoa-ja-tapahtumia/artikkelit/metsanomistajan-tietopaketti-hiilensidonnasta/>

UPM (2024). Tietoa. Hiilensidonta. Saatavilla (viitattu 8.1.2024): <https://www.upmmetsa.fi/tietoa-ja-tapahtumia/tietoartikkelit/hiilensidonta/>

Valtioneuvosto (2022). Työ- ja elinkeinoministeriö. Julkaisut. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastaategia. Saatavilla (viitattu 25.8.2023): <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164321>

Volvo Trucks (2018). Report. Emissions from Volvo's trucks. 3 s. Saatavilla (viitattu 6.4.2024): [https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo-trucks/markets/global/our-values/environmental-care/our-trucks/Emis\\_eng\\_10110\\_14001.pdf](https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo-trucks/markets/global/our-values/environmental-care/our-trucks/Emis_eng_10110_14001.pdf)

VTT (2011). Optimized usage of NExBTL renewable diesel fuel: OPTIBIO. 18-76 s. Saatavilla (viitattu 13.11.2023): <https://cris.vtt.fi/en/publications/optimized-usage-of-nexbtl-renewable-diesel-fuel-optibio>

Väylä (2019). Väylärakenteiden materiaalit. Kiviaineksen murskausprosessi pdf esitelmä. Saatavilla (viitattu 20.11.2023): [https://vayla.fi/documents/25230764/35601560/12\\_EeroSorri\\_Kiviainesten+murskaus+prosessi.pdf/9743a3da-d246-493e-ac16-a59fd88a66e1/12\\_EeroSorri\\_Kiviainesten+murskaus+prosessi.pdf?t=1574857465545](https://vayla.fi/documents/25230764/35601560/12_EeroSorri_Kiviainesten+murskaus+prosessi.pdf/9743a3da-d246-493e-ac16-a59fd88a66e1/12_EeroSorri_Kiviainesten+murskaus+prosessi.pdf?t=1574857465545)

Yara Suomi (2023). Aloitussivu. Kemikaalit ja ympäristöratkaisut. NO<sub>x</sub> -päästöjen hallinta teollisuuden toimipisteissä. SCR-, SNCR- tai SNCR/SCR-hybridijärjestelmät. SCR-tekniikka. Saatavilla (viitattu 20.11.2023): <https://www.yara.fi/kemikaalit-ja-ymparistoratkaisut/nox-paastojen-hallinta-teollisuuden-toimipisteissa/scr-sncr-tai-hybridijarjestelmat/scrtekniikka/>

Yara Suomi (2024). Kemikaalit ja ympäristöratkaisut. AdBlue ajoneuvoille. Saatavilla (viitattu 19.4.2024): <https://www.yara.fi/kemikaalit-ja-ymparistoratkaisut/adblue-ajoneuvoille/>

Ympäristö (2023). Etusivu. Luvat ja velvoitteet. F-kaasut ja otsonikerrosta heikentävät aineet. Saatavilla (viitattu 6.10.2023): <https://www.ymparisto.fi/fi/luvat-ja-velvoitteet/f-kaasut-ja-otsonikerrosta-heikentavat-aineet>

Ympäristöministeriö (2022). Vastuualueet. Ilmastolainsäädäntö. Keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelma. 32-44 s. Saatavilla (viitattu 25.9.2023): <https://ym.fi/ilmastolainsaadanto>

Ympäristöministeriö (2023a). Vastuualueet. Kansainväliset ympäristösopimukset. Saatavilla (viitattu 11.9.2023): <https://ym.fi/kansainvaliset-ymparistosopimukset>

Ympäristöministeriö (2023b). Vastuualueet. Euroopan unionin vastuupolitiikka. Saatavilla (viitattu: 25.9.2023): <https://ym.fi/euroopan-unionin-ilmastopolitiikka>

Ympäristöministeriö (2023c). Vastuualueet. Ympäristöministeriön hallinnonalan lait, asetukset ja ohjeet. Green deal -sopimukset. Saatavilla (viitattu 6.10.2023): <https://ym.fi/green-deal-sopimukset>

WWF (2021). Stepping up? The continuing impact of EU consumption on natural worldwide. 21-57 s. Saatavilla (viitattu 26.2.2024): <https://wwf.fi/app/uploads/2/4/o/zaus6nbg11hqvzewn0se1l/stepping-up-the-continuing-impact-of-eu-consumption-on-nature-worldwide.pdf>

# LIITE A: FOSSIILISEN KULJETUKSEN PÄÄSTÖT

Fossiilisen kuljetuksen päästöt	Kuorma-auto		Perävaunullinen kuorma-auto	
	Euro V	Euro VI	Euro V	Euro VI
<b>Päästöluokka</b>				
Meno (Kuorman kanssa) 5 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	4,8	4,8	6,2	6,2
Meno (Kuorman kanssa) 5 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	13,3	2,7	17,2	3,4
Meno (Kuorman kanssa) 5 Km, CO, [g]	10,0	10,0	12,9	12,9
Meno (Kuorman kanssa) 5 Km, HC, [g]	3,1	0,9	3,9	1,1
Meno (Kuorman kanssa) 5 Km, PM, [g]	0,1	0,1	0,2	0,1
Paluu (Tyhjänä) 5 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	3,5	3,5	3,8	3,8
Paluu (Tyhjänä) 5 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	9,6	1,9	10,3	2,1
Paluu (Tyhjänä) 5 Km, CO, [g]	7,2	7,2	7,7	7,7
Paluu (Tyhjänä) 5 Km, HC, [g]	2,2	0,6	2,4	0,7
Paluu (Tyhjänä) 5 Km, PM, [g]	0,1	0,0	0,1	0,1
<b>Menopaluu 5 Km+5 Km, CO<sub>2</sub>, [kg]</b>	<b>8,4</b>	<b>8,4</b>	<b>10,0</b>	<b>10,0</b>
<b>Menopaluu 5 Km+5 Km, NO<sub>x</sub>, [g]</b>	<b>22,9</b>	<b>4,6</b>	<b>27,5</b>	<b>5,5</b>
<b>Menopaluu 5 Km+5 Km, CO, [g]</b>	<b>17,2</b>	<b>17,2</b>	<b>20,6</b>	<b>20,6</b>
<b>Menopaluu 5 Km+5 Km, HC, [g]</b>	<b>5,3</b>	<b>1,5</b>	<b>6,3</b>	<b>1,8</b>
<b>Menopaluu 5 Km+5 Km, PM, [g]</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>
Meno (Kuorman kanssa) 15 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	14,5	14,5	18,7	18,7
Meno (Kuorman kanssa) 15 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	39,9	8,0	51,5	10,3
Meno (Kuorman kanssa) 15 Km, CO, [g]	29,9	29,9	38,6	38,6
Meno (Kuorman kanssa) 15 Km, HC, [g]	9,2	2,6	11,8	3,3
Meno (Kuorman kanssa) 15 Km, PM, [g]	0,4	0,2	0,5	0,3
Paluu (Tyhjänä) 15 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	10,5	10,5	11,3	11,3
Paluu (Tyhjänä) 15 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	28,9	5,8	31,0	6,2
Paluu (Tyhjänä) 15 Km, CO, [g]	21,7	21,7	23,2	23,2
Paluu (Tyhjänä) 15 Km, HC, [g]	6,6	1,9	7,1	2,0
Paluu (Tyhjänä) 15 Km, PM, [g]	0,3	0,1	0,3	0,2
<b>Menopaluu 15 Km+15 Km, CO<sub>2</sub>, [kg]</b>	<b>25,1</b>	<b>25,1</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>
<b>Menopaluu 15 Km+15 Km, NO<sub>x</sub>, [g]</b>	<b>68,8</b>	<b>13,8</b>	<b>82,4</b>	<b>16,5</b>
<b>Menopaluu 15 Km+15 Km, CO, [g]</b>	<b>51,6</b>	<b>51,6</b>	<b>61,8</b>	<b>61,8</b>
<b>Menopaluu 15 Km+15 Km, HC, [g]</b>	<b>15,8</b>	<b>4,5</b>	<b>19,0</b>	<b>5,4</b>
<b>Menopaluu 15 Km+15 Km, PM, [g]</b>	<b>0,7</b>	<b>0,3</b>	<b>0,8</b>	<b>0,4</b>
Meno (Kuorman kanssa) 30 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	29,1	29,1	37,5	37,5
Meno (Kuorman kanssa) 30 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	79,8	16,0	102,9	20,6
Meno (Kuorman kanssa) 30 Km, CO, [g]	59,9	59,9	77,2	77,2
Meno (Kuorman kanssa) 30 Km, HC, [g]	18,4	5,2	23,7	6,7
Meno (Kuorman kanssa) 30 Km, PM, [g]	0,8	0,4	1,0	0,5
Paluu (Tyhjänä) 30 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	21,0	21,0	22,6	22,6
Paluu (Tyhjänä) 30 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	57,8	11,6	62,0	12,4
Paluu (Tyhjänä) 30 Km, CO, [g]	43,3	43,3	46,5	46,5
Paluu (Tyhjänä) 30 Km, HC, [g]	13,3	3,8	14,2	4,0
Paluu (Tyhjänä) 30 Km, PM, [g]	0,6	0,3	0,6	0,3
<b>Menopaluu 30 Km+30 Km, CO<sub>2</sub>, [kg]</b>	<b>50,1</b>	<b>50,1</b>	<b>60,1</b>	<b>60,1</b>
<b>Menopaluu 30 Km+30 Km, NO<sub>x</sub>, [g]</b>	<b>137,6</b>	<b>27,5</b>	<b>164,9</b>	<b>33,0</b>
<b>Menopaluu 30 Km+30 Km, CO, [g]</b>	<b>103,2</b>	<b>103,2</b>	<b>123,6</b>	<b>123,6</b>
<b>Menopaluu 30 Km+30 Km, HC, [g]</b>	<b>31,6</b>	<b>8,9</b>	<b>37,9</b>	<b>10,7</b>
<b>Menopaluu 30 Km+30 Km, PM, [g]</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>1,6</b>	<b>0,8</b>
<b>Lähtötiedot</b>				
Päästökerroin CO <sub>2</sub> [g/l]	2550,00			
Päästökerroin NO <sub>x</sub> [g/kWh]	2,00	0,40	2,00	0,40
Päästökerroin CO [g/kWh]	1,50	1,50	1,50	1,50
Päästökerroin HC [g/kWh]	0,46	0,13	0,46	0,13
Päästökerroin PM [g/kWh]	0,02	0,01	0,02	0,01
Diesel energiasisältö [kWh/l]	10,00			
Kulutus kuorman kanssa [l/km]	0,38		0,49	
Kulutus tyhjänä [l/km]	0,28		0,30	
Diesel moottorin hyötysuhde	0,35			
Maksimikuorma [t]	22,00		45,00	
Yhteispaino (sis.maksimikuorman) [t]	32,00		65,00	
Tyhjäpaino (tyhjänä) [t]	10,00		20,00	

# LIITE B: VÄHÄHIILISEN KULJETUKSEN PÄÄSTÖT

Vähähiilisen kuljetuksen päästöt	Kuorma-auto		Perävaunullinen kuorma-auto	
	Euro V	Euro VI	Euro V	Euro VI
Meno (Kuorman kanssa) 5 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	0,5	0,5	0,7	0,7
Meno (Kuorman kanssa) 5 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	11,8	2,4	15,2	3,0
Meno (Kuorman kanssa) 5 Km, CO, [g]	7,4	7,4	9,5	9,5
Meno (Kuorman kanssa) 5 Km, HC, [g]	2,1	0,6	2,7	0,8
Meno (Kuorman kanssa) 5 Km, PM, [g]	0,1	0,0	0,1	0,1
Paluu (Tyhjänä) 5 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	0,4	0,4	0,4	0,4
Paluu (Tyhjänä) 5 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	8,5	1,7	9,2	1,8
Paluu (Tyhjänä) 5 Km, CO, [g]	5,4	5,4	5,7	5,7
Paluu (Tyhjänä) 5 Km, HC, [g]	1,5	0,4	1,6	0,5
Paluu (Tyhjänä) 5 Km, PM, [g]	0,1	0,0	0,1	0,0
Menopaluu 5 Km+5 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	0,9	0,9	1,1	1,1
Menopaluu 5 Km+5 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	20,3	4,1	24,4	4,9
Menopaluu 5 Km+5 Km, CO, [g]	12,7	12,7	15,3	15,3
Menopaluu 5 Km+5 Km, HC, [g]	3,6	1,0	4,3	1,2
Menopaluu 5 Km+5 Km, PM, [g]	0,1	0,1	0,2	0,1
Meno (Kuorman kanssa) 15 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	1,5	1,5	2,0	2,0
Meno (Kuorman kanssa) 15 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	35,4	7,1	45,7	9,1
Meno (Kuorman kanssa) 15 Km, CO, [g]	22,7	22,2	28,6	28,6
Meno (Kuorman kanssa) 15 Km, HC, [g]	6,4	1,8	8,1	2,3
Meno (Kuorman kanssa) 15 Km, PM, [g]	0,3	0,1	0,3	0,2
Paluu (Tyhjänä) 15 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	1,1	1,1	1,2	1,2
Paluu (Tyhjänä) 15 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	25,6	5,1	27,5	5,5
Paluu (Tyhjänä) 15 Km, CO, [g]	16,1	16,1	17,2	17,2
Paluu (Tyhjänä) 15 Km, HC, [g]	4,5	1,3	4,9	1,4
Paluu (Tyhjänä) 15 Km, PM, [g]	0,2	0,1	0,2	0,1
Menopaluu 15 Km+15 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	2,6	2,6	3,2	3,2
Menopaluu 15 Km+15 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	61,0	12,2	73,2	14,6
Menopaluu 15 Km+15 Km, CO, [g]	38,8	38,2	45,8	45,8
Menopaluu 15 Km+15 Km, HC, [g]	11,0	3,1	12,9	3,7
Menopaluu 15 Km+15 Km, PM, [g]	0,5	0,2	0,5	0,3
Meno (Kuorman kanssa) 30 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	3,1	3,1	3,9	3,9
Meno (Kuorman kanssa) 30 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	70,8	14,2	91,3	18,3
Meno (Kuorman kanssa) 30 Km, CO, [g]	44,4	44,4	57,2	57,2
Meno (Kuorman kanssa) 30 Km, HC, [g]	12,5	3,5	16,2	4,6
Meno (Kuorman kanssa) 30 Km, PM, [g]	0,5	0,3	0,7	0,3
Paluu (Tyhjänä) 30 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	2,2	2,2	2,4	2,4
Paluu (Tyhjänä) 30 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	51,3	10,3	55,0	11,0
Paluu (Tyhjänä) 30 Km, CO, [g]	32,1	32,1	34,4	34,4
Paluu (Tyhjänä) 30 Km, HC, [g]	9,1	2,6	9,7	2,7
Paluu (Tyhjänä) 30 Km, PM, [g]	0,4	0,2	0,4	0,2
Menopaluu 30 Km+30 Km, CO <sub>2</sub> , [kg]	5,3	5,3	6,3	6,3
Menopaluu 30 Km+30 Km, NO <sub>x</sub> , [g]	122,1	24,4	146,3	29,3
Menopaluu 30 Km+30 Km, CO, [g]	76,5	76,5	91,6	91,6
Menopaluu 30 Km+30 Km, HC, [g]	21,6	6,1	25,9	7,3
Menopaluu 30 Km+30 Km, PM, [g]	0,9	0,4	1,1	0,5
<b>Lähtötiedot</b>				
Päästökerroin CO <sub>2</sub> [g/l]	260,00			
Päästökerroin NO <sub>x</sub> [g/kWh]	1,82	0,36	1,82	0,36
Päästökerroin CO [g/kWh]	1,14	1,14	1,14	1,14
Päästökerroin HC [g/kWh]	0,32	0,09	0,32	0,09
Päästökerroin PM [g/kWh]	0,01	0,01	0,01	0,01
Diesel energiasäilö [kWh/l]	9,46			
Kulutus kuorman kanssa [l/km]	0,39		0,51	
Kulutus tyhjänä [l/km]	0,28		0,30	
Diesel moottorin hyötysuhde	0,35			
Maksimikuorma [t]	22,00		45,00	
Yhteispaino (sis.maksimikuorman) [t]	32,00		65,00	
Tyhjäpaino (tyhjänä) [t]	10,00		20,00	