

Opinnäytetyö (AMK)

Liiketoiminnan logistiikka

2016

Ville-Pekka Johansson

# TUHKAN HYÖTYKÄYTTÖÖN LIITTYVÄN LOGISTISEN KETJUN SUUNNITTELU



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Liiketoiminnan logistiikka

2016 | 62 + 16 sivua

Kari Jalkanen

Ville-Pekka Johansson

# TUHKAN HYÖTYKÄYTTÖÖN LIITTYVÄN LOGISTISEN KETJUN SUUNNITTELU

Opinnäytetyön tarkoituksena oli työstää logistinen ketju tuhkakuljetuksille, kehittää ideoita tuhkan välivarastointiin sekä tehostaa voimalaitoksista saatavan lentotuhkan hyötykäyttöä.

Voimalaitosten maantieteellistä sijaintia ja niissä vuosittain syntyvää lentotuhkamäärää tarkasteltiin Arc GIS Online -ohjelmiston avulla. Lentotuhkan tuotantoa ja kuljetuksia koskevaa informaatiota kerättiin voimalaitoksilta käyttäen puhelinhaastatteluja työmenetelmänä. Lentotuhkan logistinen prosessi mallinnettiin. Lentotuhkan maantie- ja laivakuljetukset välillä Pietarsaari–Naantali mallinnettiin ja niille laskettiin hinnat. Lentotuhkan rautatiekuljetuksen hintaa arvioitiin viidellä erilaisella laskentatavalla. Maantie-, laiva- ja rautatiekuljetusten hintoja vertailtiin. Lentotuhkan välivarastointikohteita kartoitettiin puhelinhaastattelujen avulla.

Tärkeimmät puu- ja turvevoimalat sijaitsevat maan keskiosissa, ja kivihiiuvoimalat vastaavasti länsirannikolla sekä pääkaupunkiseudulla. Työssä ehdotetaan, että lentotuhkan välivarastot perustetaan Turun ja Helsingin seuduille, joissa lentotuhkaa käytetään runsaasti työmailla savimaan stabilointiin. Lentotuhkan maantiekuljetus on hinnaltaan kilpailukykyinen, jos 50 % kuljetuksista sisältää paluukuorman. Maantiekuljetuksen hinta on selvästi kalliimpi, mikäli paluukuormia ei ole saatavilla. Laiva- ja rautatiekuljetus ovat molemmat hinnaltaan kilpailukykyisiä vaihtoehtoja. Laivan käyttö lentotuhkatehtaana voisi olla mielenkiintoinen aihe seuraavalle logistiikkaselvitykselle. Rautatiekuljetus on ympäristöystävällinen kuljetusmuoto ja on kannattavaa tehdä sille yksityiskohtaisempi kustannusanalyysi. Eräät potentiaaliset yhteistyökumppanit ovat selvästi kiinnostuneita tuhkan välivarastointiin liittyvästä liiketoiminnasta. Suurinta osaa haastatelluista yrityksistä tuhkan välivarastointi kiinnostaa liiketoimintana ainakin jossakin määrin.

Kerättyä informaatiota voidaan hyödyntää esim. aloitusvaiheessa olevan tuhkaliiketoiminnan suunnittelussa.

ASIASANAT:

lentotuhka, logistiikka, merikuljetus, rautatiekuljetus, tiekuljetus, tuhka, voimalat

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Business logistics

2016 | 62 + 16 pages

Kari Jalkanen

Ville-Pekka Johansson

## PLANNING A LOGISTICAL CHAIN FOR UTILIZATION OF ASH

The goal of this thesis was to plan a logistical chain for transportation of fly ash, to develop ideas for intermediate storage of ash and to make the utilization of ash obtained from power plants more effective.

The geographical location of power plants and the amount of fly ash annually generated in them were studied with Arc GIS Online software. Information regarding the production and transportation of fly ash was gathered from power plants by telephone interviews. The logistical process of fly ash was modelled. The road and sea transportations of fly ash between Pietarsaari and Naantali were modelled and prices were calculated for them. The price of a rail transportation of fly ash was estimated with five different calculation procedures. The prices of road, sea and rail transportations were compared. Suitable locations for intermediate storage of fly ash were charted with telephone interviews.

The most important power plants burning wood and peat are situated in the central part of the country, and correspondingly power plants burning coal are located on the west coast and in the capital region. It is suggested that intermediate storages of fly ash could be established in the regions of Turku and Helsinki, in which fly ash is largely used for stabilization of clay soil on the construction sites. The price of a road transportation of fly ash is competitive if 50 % of the transportations contain a return load. The price of a road transportation is clearly more expensive if there are no return loads available. Both sea and rail transportations seem to be competitive options. Using a boat as a refining site for fly ash could be an interesting theme for the next investigation project. Rail transportation is an environmentally friendly mode of transport and it is worthwhile to make a more detailed cost analysis for it. Some potential cooperation partners are clearly interested in the business connected with the intermediate storage of ash. The most companies interviewed find the intermediate storage of ash as at least a slightly interesting business idea.

Information gathered can be utilized for example in the planning of new ash business.

### KEYWORDS:

ash (matter), fly ash, logistics, power plants, railway transport, road transport, sea transport

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>8</b>
<b>2 LENTOTUHKAN OMINAISUUKSIA</b>	<b>10</b>
<b>3 VOIMALAITOKSET</b>	<b>15</b>
3.1 Yleistä voimalaitoksista	15
3.2 Polttotekniikat	16
3.2.1 Leijupetipoltto	16
3.2.2 Pölypoltto	18
3.2.3 Arinapoltto	18
3.2.4 Lentotuhkan erottaminen savukaasuista	19
<b>4 LENTOTUHKAN KÄYTTÖKOhteita</b>	<b>21</b>
4.1 Metsänlannoitus	21
4.2 Maanrakennus	22
4.3 Tierakenteet	23
4.4 Kaatopaikkojen tiivisterakenteet	26
4.5 Lentotuhkan käyttö betonissa	27
4.6 Lentotuhkan käyttö asfaltissa	27
<b>5 LENTOTUHKAN KÄSITTELY</b>	<b>29</b>
5.1 Varastointi kosteana	29
5.2 Varastointi kuivana	29
5.3 Lentotuhkan kostuttaminen	31
5.4 Lentotuhkan kuljettaminen	31
5.5 Lentotuhkaan liittyvä työturvallisuus	32
<b>6 VOIMALAITOSTEN SIJAINTI JA LENTOTUHKAN KULJETUS</b>	<b>33</b>
6.1 Kartta-analyysi	33
6.2 Voimalaitosten puhelinhaastattelut	36
<b>7 KULJETUSKUSTANNUSTEN MALLINNUKSE</b>	<b>38</b>
7.1 Logistinen prosessi	38

7.2 Maantiekuljetukset	39
7.2.1 Maantiekuljetusten mallinnus	39
7.2.2 Maantiekuljetusten kustannuslaskenta	40
7.2.3 Alennusten vaikutus maantiekuljetuksen kustannuksiin	41
7.2.4 Työajan vaikutus maantiekuljetuksen kustannuksiin	42
7.3 Laivakuljetukset	43
7.4 Rautatiekuljetukset	43
7.5 Hintalaskelmien vertailua	46
7.6 Maantiekuljetukseen liittyviä vaihtoehtoja	47
7.7 Hintalaskelmien yhteenveto	48
<b>8 LENTOTUHKAN VÄLIVARASTOINTI</b>	<b>50</b>
<b>9 TULEVAISUUDENNÄKYMÄ</b>	<b>53</b>
<b>10 JOHTOPÄÄTÖKSET</b>	<b>57</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>59</b>

## **LIITTEET**

Liite 1. Syntyvän lentotuhkan määrä puu- ja turvevoimaloissa t/a

Liite 2. Lentotuhkan kuljetusmatka kilometreinä voimalaitokselta loppukäyttäjälle puu- ja turvevoimaloissa

Liite 3. Lentotuhkan hyötykäyttöprosentti puu- ja turvevoimaloissa

Liite 4. Syntyvän lentotuhkan määrä t/a ja lentotuhkan kuljetusmatka kilometreinä voimalaitokselta loppukäyttäjälle kivihiilivoimaloissa

Liite 5. Lentotuhkan hyötykäyttöprosentti kivihiilivoimaloissa

Liite 6. Mallinnuksen informaatio yrityksellä A (tuhkan kuljetus kuorma-autolla)

Liite 7. Mallinnuksen informaatio yrityksellä B (tuhkan kuljetus täysperävaunuyhdistelmällä)

Liite 8. Kustannuslaskelma täysperävaunuyhdistelmän vetoautolle

Liite 9. Autokuljetuksen hintalaskelma

Liite 10. Laivakuljetuksen hintalaskelma

Liite 11. Junakuljetuksen hintalaskelma

## KUVAT

Kuva 1. Lentotuhkan ja veden seoksesta valettuja näytteitä.	10
Kuva 2. Lentotuhkanäytteitä.	11
Kuva 3. Näkymä Fortumin Naantalin voimalaitokselta.	15
Kuva 4. Kivihiilikasoja ja hiilen purkuhina Fortumin Naantalin voimalaitoksella.	16
Kuva 5. Kaatopaikan pintasuojarakenne.	26
Kuva 6. Lentotuhkan tuotantomäärät Suomen puu- ja turvevoimaloissa vuonna 2011.	33
Kuva 7. Laivakuljetusreittejä puu- ja turvevoimaloiden lentotuhkalle.	35
Kuva 8. Laivakuljetusreittejä kivihiilivoimaloiden lentotuhkalle.	36
Kuva 9. Vanhoja lentotuhkan varastointiin soveltuvia säiliöitä.	50

## KUVIOT

Kuvio 1. Lentotuhkan kuljetuksen lähtötilanne Pietarsaaressa.	39
Kuvio 2. Logistinen toiminta Naantalissa.	39

## TAULUKOT

Taulukko 1. Kivihiilenpoltossa syntyvän lentotuhkan kemiallinen koostumus painoprosentteina.	12
Taulukko 2. Puun ja turpeen poltossa syntyvän lentotuhkan koostumus painoprosentteina Suomen olosuhteissa.	13
Taulukko 3. Lentotuhkan käyttökohteita maanrakennuksessa.	23
Taulukko 4. Päälystetyn tien rakenne.	24
Taulukko 5. Soratien rakenne.	25
Taulukko 6. Soratien rakenne vanhan tien päällä.	25
Taulukko 7. Tapoja varastoida lentotuhkaa.	30
Taulukko 8. Tuhkakuljetuksen vaiheet.	32
Taulukko 9. Lentotuhkan kuljetus- ja varastointiprosessi.	38
Taulukko 10. Kilometri-, tunti- ja tonnihinnat maantiekuljetukselle Pietarsaari–Naantali–Pietarsaari.	40
Taulukko 11. Alennusten vaikutus maantiekuljetuksen kustannuksiin.	42
Taulukko 12. Työajan vaikutus maantiekuljetuksen kustannuksiin.	42
Taulukko 13. Kuljetusten hintalaskelmien yhteenveto.	47
Taulukko 14. Maantiekuljetusten hintoja vähennettäessä varastoinnin osuutta.	48
Taulukko 15. Yhteenveto haastatelluista välivarastointikohteista.	52

## KÄYTETYT LYHENTEET

Lyhenne	Lyhenteen selitys
a	vuosi
AKT	Auto- ja Kuljetusalan Työntekijäliitto
DWT	kuollut paino (engl. <i>deadweight tonnage</i> ) = aluksen kantavuus eli aluksen lastin, polttoaineen, vesivarastojen, tarvikkeiden ja henkilöiden suurin yhteispaino viranomaisten hyväksymän lastimerkin mukaan (Satamaoperaattorit 2008)
i-m <sup>3</sup>	irtokuutiometri
ka	keskiarvo
kn	solmu
mepa	menopaluu
MGO	laivojen käyttämä polttoöljy (engl. <i>marine gas oil</i> )
mpk	meripeninkulma
Mt/a	miljoonaa tonnia vuodessa
MW <sub>th</sub>	terminen megawatti, lämmöntuotantoon liittyvä sähkötehon määrä (TVO 2016)
Nm <sup>3</sup> (Nm <sup>3</sup> )	normaalikuutiometri, 1 m <sup>3</sup> kaasua normaalissa ilmanpaineessa (1,0 bar) ja lämpötilassa 0°C (Fortum 2013)
SE	Stora Enso
SKAL	Suomen Kuljetus ja Logistiikka ry
SW	Schauman Wood

# 1 JOHDANTO

Suomen kivihiili-, puu- ja turvevoimalaitoksissa syntyy vuosittain 1–1,8 miljoonaa tonnia tuhkaa (Pekkala 2012, 6). Kevyt lentotuhka on tähän asti valtaosin läjitetty kaatopaikoille. Nykyaikaisessa kiertotaloudessa kaikki syntyvä jätemateriaali pyritään kierrättämään mahdollisimman tehokkaasti. Tutkimuksen päätavoitteena on kyetä tästä lähin hyödyntämään kaikki syntyvä lentotuhka kaatopaikalle läjittämisen sijasta.

Ammattiharjoittelu suoritettiin Renotech Oy:ssä kesällä 2015. Renotech Oy toimi myös tämän opinnäytetyön toimeksiantajana. Se on kemian alan pk-yritys, joka on perustettu vuonna 1994. Yrityksellä on toimipisteet Turussa ja Raisiossa. Renotech Oy on erikoistunut materiaalitekologiaan. Se kehittää, valmistaa, markkinoi ja tuo maahan innovatiivisia palonsuoja-, akustiikka- sekä muita rakennusalan tuotteita. Tämän lisäksi yritys valmistaa myös komposiittimateriaaleja biomassoista ja teollisuusjätteistä. Yrityksellä on kokemusta sementti- ja betoniteknologiasta sekä geopolymeereistä. Renotech Oy:n yhteistyökumppaneita ovat mm. YIT ja muut rakennusalan yritykset, Ekokem sekä Ecolan. Yrityksessä työskentelee omistajan lisäksi kahdeksan työntekijää. Renotech Oy:n liikevaihto oli 738 000 € vuonna 2014.

Renotech Oy toimii tammikuussa 2015 toimintansa aloittaneessa Smart Chemistry Park -yrityspuistossa Raisiossa. Smart Chemistry Parkissa yhteistyötä tekevät Åbo Akademi, Turun yliopisto, Turun ammattikorkeakoulu, Yrkeshögskolan Novia sekä Oulun Yliopisto. Smart Chemistry Parkissa toimii tällä hetkellä 11 kemian alan pk-yritystä. Smart Chemistry Park kuuluu osana suurempaan yrityspuistoon, Turku Science Parkiin. Turku Science Parkin toimialoja ovat biotieteet, informaatioteknologia, kemia ja cleantech. Smart Chemistry Parkin ja Turku Science Parkin keskeisenä tavoitteena on kehittää uutta liiketoimintaa Turun seudulla.



Renotech Oy:n ja Turun ammattikorkeakoulun lisäksi tutkimuksen taustalla olevaan verkostoon kuuluivat Varsinais-Suomen liitto, Turun kaupungin kiinteistöliikelaitos, Fortum sekä Meriaura. Renotech Oy ja Varsinais-Suomen liitto seurasi säännöllisesti toistensa projektien edistymistä. Turun kaupungin kiinteistöliikelaitos antoi informaatiota maa-ainesprojekteista ja kertoi tuhkan logistiikkaan liittyvistä tulevaisuudensuunnitelmista Turun seudulla. Fortum puolestaan järjesti selvitykseen liittyvät voimalaitosvierailut Naantalissa ja Espoon Suomenojan voimalaitoksille. Meriaura osallistui laivaliikennettä koskevien laskelmien tekoon.

Opinnäytetyön tavoitteena oli työstää logistinen ketju tuhkakuljetuksille, kehittää ideoita tuhkan välivarastointiin sekä tehostaa voimalaitoksista saatavan lentotuhkan hyötykäyttöä.

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää syntyvän lentotuhkan määrä, tuotantopaikkojen sijainti, lentotuhkan kuljetusmatkat sekä nykyinen hyötykäyttö. Tiedonkeruu suunniteltiin tehtäväksi puhelinhaastattelujen avulla. Tämän lisäksi tarkoituksena oli myös tehdä kuljetusten mallinnus sekä kustannusvertailu eri kuljetusmuotojen välillä. Tavoitteena oli tehdä kuljetuksista mahdollisimman monipuoliset ja realistiset laskelmat.

## 2 LENTOTUHKAN OMINAISUUKSIA

Tuhkaa syntyy eloperäisten aineiden ja kivihiilen hapellisessa palamisessa sekä maaperän vulkaanisessa toiminnassa. Tuhka on palamisprosessissa syntyvä jauhemainen jäännös (Sax 1987, 101). Se sisältää runsaasti erilaisia ainesosia, kuten kaliumia, natriumia, kalsiumia, magnesiumia, rautaa, oksideja, silikaatteja, fosfaatteja, sulfaatteja sekä karbonaatteja (Misra 1993, 111–112).

Voimalaitoksen savukaasuista erotettavaa tuhkaajetta kutsutaan *lentotuhkaksi*. Vastaavasti kattilan pohjalle kerääntyvää tai poistettavan leijupetimateriaalin mukana poistuvaa tuhkaajetta kutsutaan *pohjatuhkaksi*. (Ramboll Finland Oy 2012, 8.) Kevyttä lentotuhkaa ja raskaampaa pohjatuhkaa syntyy voimalaitoksissa kivihiilen, puun ja turpeen polton sivutuotteina. Tämän lisäksi lentotuhkaa syntyy myös rauta- ja terästeollisuudessa. Koko Suomen teollisuutta ajatellen lentotuhka on merkittävä jätejäte. (Pekkala 2012, 6.)



Kuva 1. Lentotuhkan ja veden seoksesta valettuja näytteitä.

Lentotuhka on väriltään yleensä harmaata tai ruskeaa (kuvat 1 ja 2). Tämän lisäksi myös muita värisävyjä esiintyy. Lentotuhka on väriltään sitä tummempaa, mitä enemmän hiiltä palamistuote sisältää (Oy Finn Ash-Power Ltd 2015b). Rakenteeltaan se on hienojakoista ja jauhemaista. Lentotuhka muodostuu rakeista, jotka ovat lasimaisia ja pallomaisia. Pallomaisten rakeiden joukossa on pitkiä kui-

tumaisia rakeita. Pieni määrä pallomaisista rakeista on onntoja. Lentotuhka vastaa rakeisuudeltaan silttiä (partikkelikoko 0,002–0,06 mm). (Lounais-Suomen ympäristökeskus 2009, 11; Lillman 2009, 33.)



Kuva 2. Lentotuhkanäytteitä.

Lentotuhkan ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti riippuen polttoaineesta, palamisolosuhteista, käytettävästä polttotekniikasta ja prosessin säätöparametreista (Pekkala 2012, 112). Lentotuhka otetaan talteen voimalaitoksen savukaasuista sähköisten tai mekaanisten erottimien avulla. Talteenottoon käytetään nykyään useimmiten sähkösuodattimia. Voimalaitosten leijupoltossa koko tuhkamäärästä 80–100 % on lentotuhkaa ja loppuosa 0–20 % on pohjatuhkaa. Suomen voimalaitoksissa syntyy erilaisia tuhkia n. 1,0–1,8 Mt/a. Kaukolämmöntarpeen kasvaessa vuosittain syntyvän lentotuhkan määrä nousee. (Pekkala 2012, 6–10.)

Lentotuhkan ominaispaino vaihtelee huomattavasti tuhkan alkuperästä ja kemiallisesta koostumuksesta riippuen. Puutuhkan ominaispaino vaihtelee välillä 0,21–0,51 t/m<sup>3</sup> ja turvetuhkan välillä 0,5–1,1 t/m<sup>3</sup> (Pekkala 2012, 20–26). Vastavasti kivihiilituhkan ominaispaino on 2,0–2,5 t/m<sup>3</sup>. Ominaispaino on korkea, jos lentotuhka sisältää runsaasti rautaa, ja matala, jos lentotuhka sisältää runsaasti hiiltä. (Chandra 1997, 152.) Lentotuhkan maksimikuivairtoteiheys on 1,1–1,4 t/m<sup>3</sup> (Ramboll Finland Oy 2012, 12).

Lentotuhkat ovat sementtimäisiltä ominaisuuksiltaan erilaisia, puhutaan *itselujittuvista* ja *pozzolaanisista materiaaleista*. Itselujittuva materiaali on ominaisuuksiltaan sementtimäistä, sillä se kehittää lujittuvia rakenteita sekoitettaessa veden kanssa. Pozzolaaninen materiaali tarvitsee kovettuakseen kalsiuminlähteen. (Helmuth 1987, 91.) Kivihiilen pölypoltosta saatava lentotuhka luokitellaan kalsiumoksidipitoisuutensa perusteella (taulukko 1). Luokan F lentotuhka sisältää vähän (< 14 %) ja luokan C lentotuhka runsaasti ( $\geq 14$  %) kalsiumoksidia. (McCarthy & Lauf 1985, 12.) Voidaan ajatella, että luokan C lentotuhka on itselujittuvaa ja luokan F lentotuhka pozzolaanista materiaalia (Helmuth 1987, 91).

Taulukko 1. Kivihiilenpoltossa syntyvän lentotuhkan kemiallinen koostumus painoprosentteina (McCarthy & Lauf 1985, 10).

<b>ainesosa</b>	<b>kemiallinen kaava</b>	<b>luokan F lentotuhka</b>	<b>luokan C lentotuhka</b>
piidioksidi	SiO <sub>2</sub>	38–65 %	33–61 %
alumiinioksidi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11–33 %	8–26 %
rauta (III) oksidi	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3–31 %	4–10 %
kalsiumoksidi	CaO	0,6–13,3 %	14–37 %
magnesiumoksidi	MgO	0–5,0 %	1,0–7,0 %
natriumoksidi	Na <sub>2</sub> O	0–3,1 %	0,4–6,4 %
kaliumoksidi	K <sub>2</sub> O	0,7–5,6 %	0,3–2,0 %
titaanidioksidi	TiO <sub>2</sub>	0,7–5,6 %	0,9–2,8 %
rikkitrioksidi	SO <sub>3</sub>	0–4,0 %	0,5–7,3 %
hehkutushäviö	–	0,1–12,0 %	0,2–1,4 %

Puun ja turpeen poltossa syntyvän lentotuhkan koostumus (taulukko 2) poikkeaa selvästi kivihiililentotuhkan koostumuksesta (Keppo & Ylinen 1980, 24; McCarthy & Lauf 1985, 10).

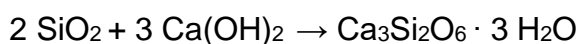
Taulukko 2. Puun ja turpeen poltossa syntyvän lentotuhkan koostumus painoprosentteina Suomen olosuhteissa (Keppo & Ylinen 1980, 24).

ainesosa	kemiallinen kaava	puun tuhka (mukana kuorta)	turvetuhka
piidioksidi	SiO <sub>2</sub>	6,4 % (ka)	12–40 %
alumiinioksidi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9 % (ka)	5,7–13 %
rauta (III) oksidi	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9–2,9 %	8,9–41 %
kalsiumoksidi	CaO	9,0–46 %	7,3–15 %
magnesiumoksidi	MgO	2,3–4,5 %	1,7–2,6 %
natriumoksidi	Na <sub>2</sub> O		5,9 % (ka)
kaliumoksidi	K <sub>2</sub> O	0,86–2,1 %	1,6–11 %
titaanidioksidi	TiO <sub>2</sub>		0,40 % (ka)
fosforipentoksidi	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,48–2,3 %	3,0–7,2 %
rikkitrioksidi	SO <sub>3</sub>	0,60–12 %	0,01 % (ka)
hehkutushäviö	–	36–47 %	

Raskasmetallien (mm. molybdeeni, kromi, arseeni, lyijy ja seleeni) pitoisuudet ovat lentotuhkassa pieniä (Oy Finn Ash-Power Ltd 2015b).

Tuhkan koostumus ja määrä riippuvat voimakkaasti poltetun biomassan tai kivihiilen koostumuksesta ja laadusta, palamisolosuhteista sekä savukaasujen puhdistustekniikasta. Tuhkaa muodostavien ainesosien määrät vaihtelevat huomattavasti eri polttoaineiden välillä. Alkuainekoostumus voi olla erilainen saman polttoaine-erän eri osissa. Tuhkan koostumukseen ja laatuun voi vaikuttaa myös se, että maaperän alkuainepitoisuus vaihtelee ajan ja paikan mukaan. Kaikista näistä syistä tuhkan laatu vaihtelee voimakkaasti eri voimalaitosten välillä. (Pesonen 2012, 21.)

Antiikin Roomassa valmistettiin betonia, joka perustui tulivuoren tuhkan ja kalsiumhydroksidin väliseen reaktioon. Tätä reaktiota kutsutaan *pozzolaaniseksi reaktioksi*, ja nykyaikainen tuhkan käyttö betonin seosaineena perustuu tähän.



Tuhkan sisältämä piidioksidi reagoi kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraattia, joka antaa betonille lujuutta. (Pesonen 2012, 38.) Tuhkaa voidaan käyttää sementin korvaajana betonin valmistuksessa (Oy Finn Ash-Power Ltd 2015a).

Pohjatuikka on raskaampaa ja rakenteeltaan karkeampaa kuin lentotuikka. Pohjatuikka vastaa rakeisuudeltaan hiekkaa (partikkelikoko > 0,06–2 mm). (Lounais-Suomen ympäristökeskus 2009, 11.) Pohjatuikka ei ole itselujittuvaa (Lillman 2009, 33). Pohjatuikka ei pölyä, ja varastointi ei vaikuta pohjatuikkan tekniseen laatuun. Pohjatuikka soveltuu erityisesti maanrakennukseen, esim. katujen, kevyen liikenteen väylien ja kenttien rakentamiseen. (Pekkala 2012, 109.)

## 3 VOIMALAITOKSET

### 3.1 Yleistä voimalaitoksista

Teollisuusmittakaavassa toimivaa sähköntuotantolaitosta kutsutaan yleensä *voimalaitokseksi*. Vastaavasti sähköä ja lämpöä yhteistuotantona tuottavaa tuotantolaitosta kutsutaan *lämmitysvoimalaitokseksi*. Mikäli voimala tuottaa sähköä lämmön avulla, puhutaan *lämpövoimalaitoksesta*. Pelkästään lämpöä tuottavaa voimalaa kutsutaan *lämpölaitokseksi*. (Sanastokeskus TSK 2015.)



Kuva 3. Näkymä Fortumin Naantalin voimalaitokselta.

Yleisin voimalaitostyyppi Suomessa on höyryvoimalaitos (Hietalahti 2013, 56). Höyryvoimalaitoksessa paineistettua vettä höyrystetään höyrykattilassa. Yleensä vesihöyry myös tulistetaan, eli vesihöyry kuumennetaan niin, että sen lämpötila on kyllästeisen höyryn lämpötilaa korkeampi (Hautala & Peltonen 2011, 217). Tulistettu höyry ohjataan turbiiniin, jossa höyryn lämpöpaine-energia muutetaan turbiinin pyörimisenergiaksi. Turbiini pyörittää generaattoria, joka synnyttää sähkövirran. (Huhtinen ym. 2008, 24.) Ydinvoimalassa vesi höyrystetään ydinenergialla (Aura & Tonteri 1993, 50). Kaasuturbiinivoimalassa kuumat ja korkeapaineiset

savukaasut pyörittävät turbiinia (Aura & Tonteri 1993, 49). Muita voimalaitostyypppejä ovat mm. vesi- ja tuulivoimalat sekä moottorivoimalaitokset (Huhtinen ym. 2008, 181).



Kuva 4. Kivihiilikasoja ja hiilen purkuhahna Fortumin Naantalin voimalaitoksella.

## 3.2 Polttotekniikat

Tärkeimmät puun ja turpeen polttoon soveltuvat tekniikat ovat leijupetipolttto sekä pienemmässä mittakaavassa pölypolttto ja arinapolttto. Kivihiiltä poltetaan perinteisesti pölypoltttona. Kivihiilen leijupetipolttto on yleistymässä. (V. Wigren, henkilökohtainen tiedonanto 27.1.2016.)

### 3.2.1 Leijupetipolttto

Ympäristönäkökulman korostuminen on viime vuosina lisännyt kiinnostusta leijupetipoltttoa kohtaan. Leijupetipolttossa polttoaine poltetaan ilmavirran avulla leijutettavassa hehkuvan hiekan ja tuhkan muodostamassa kerroksessa eli pedissä (Koivunen 2007, 15). Kuuma leijukerros kuivattaa polttoaineen ja lämmittää sen syttymislämpötilaan, ja samalla se toimii lämpövarastona. Polttoaine liikkuu ja sekoittuu leijukerroksessa jatkuvasti, ja kaasujen ja lämmön siirtyminen on hyvin tehokasta. Hienojakoinen lentotuhka ja jauhautunut petimateriaali kulkeutuvat sa-



vukaasun mukana ulos tulipesästä ja erottuvat savukaasusta kattilassa ja savukaasujen puhdistuksessa. Tulipesän pohjalta poistetaan karkeaa pohjatuhkaa ja polttoaineessa mahdollisesti ollutta palamatonta materiaalia, kuten metalli- ja lasikappaleita. (Jätelaitosyhdistys 2015.)

Leijupetipolttto voidaan suorittaa kahdella eri tavalla, joko kerrosleijutekniikalla tai kiertoleijutekniikalla (Jätelaitosyhdistys 2015).

Kerrosleijutekniikassa (kupliva leiju, *bubbling fluidized bed*) leijukerroksen hiukaset pysyvät leijukerroksessa. Kerrosleijussa poistuvan savukaasuvirran nopeus on pieni, ja petimateriaalipartikkelit eivät lähde poistuvan kaasuvirtauksen mukaan. (Jätelaitosyhdistys 2015; Koivunen 2007, 16.) Kerrosleiju soveltuu kiertoleijua paremmin hyvin märille ja matalalämpöarvoisille polttoaineille. Lisäksi se on tekniikaltaan huokeampi. (Raiko ym. 1995, 418.)

Kiertoleijutekniikassa (*circulating fluidized bed*) savukaasujen virtausnopeus on niin suuri, että petimateriaalia siirtyy merkittävä määrä tulipesästä pois savukaasun mukana. Petimateriaali erotetaan savukaasusta syklonilla ja palautetaan takaisin tulipesään. (Jätelaitosyhdistys 2015; Koivunen 2007, 16.) Kiertoleijutekniikassa polttoaineen sekoittuminen on voimakkaampaa kuin kerrosleijutekniikassa (Jätelaitosyhdistys 2015). Kiertoleijutekniikka antaa mahdollisuuden polttaa tehokkaasti laajaa valikoimaa erilaisia polttoaineita. Esim. Suomen suurimpiin puu- ja turvevoimaloihin kuuluva Alholmens Kraft Pietarsaassa polttaa kiertoleijuprosessissaan 40 % turvetta, 20 % kivihiihtä, 30 % biomassaa ja 10 % kiinteää kiertätyspolttoainetta. Alholmens Kraftin prosessin joustavuutta kuvaa se, että voimala voi polttaa kaikenlaisia polttoaineseoksia sadasta prosentista biomassaa sataan prosenttiin kivihiihtä. (Kärki 2013, 4.)

Leijupetipolttto ei aseta korkeita laatuvaatimuksia polttoaineelle. Myös huonolaatuiset, kosteat ja matalan lämpöarvon omaavat polttoaineet soveltuvat leijupetipoltttoon. (Koivunen 2007, 15.) Teknologia sallii polttoaineelle nopeat ja suuret laatuvahtelut. Leijupetipolttossa lentotuhkaa syntyy 80–100 % ja pohjatuhkaa 0–

20 %. Menetelmän etuja ovat huokea rikinpoisto, vähäiset typen oksidien ja palamattomien aineiden päästöt sekä mahdollisuus käyttää joustavasti erilaisia polttoaineita. (Motiva 2014b.)

### 3.2.2 Pölypoltto

Pölypoltto on keskeinen polttotekniikka sähkövoimateollisuudessa. Teknologia on alun perin kehitetty kivihiilen polttoon, mutta se soveltuu myös puulle ja turpeelle. Pölypolttotekniikassa kivihiili tai muu polttoaine jauhetaan hienoiksi jyväsiksi. Jyväset sekoitetaan kuumaan kantoilmavirtaan, joka ensin kuivattaa ne ja sen jälkeen kuljettaa ne polttimeen. Polttoaineen sisältämät mineraalit palavat lentotuhkaksi ja pohjatuhkaksi. Kantoilma kuljettaa lentotuhkan mukanaan pois palamisvyöhykkeeltä, ja se kerätään suodattimille. Palamisessa syntyvä energia tuottaa höyryä voimalan turbiineihin. Biomassaa ja muita materiaaleja voidaan tarvittaessa sekoittaa poltettavaan hiileen. Haketta ja turvetta voidaan jauhaa biomassajauhimilla pölypolttoon sopivaksi polttoaineeksi. (Kanteleen Voima 2015; Motiva 2014c.)

### 3.2.3 Arinapoltto

Arinapoltto soveltuu lähes kaikille kiinteille polttoaineille. Ennen arinapolttoa polttoaine käsitellään sopivaan muotoon esim. murskaamalla. Prosessin alkuvaiheessa polttoaine johdetaan arinalle. Arinan liike kuljettaa polttoainepatjaa eteenpäin eri lämpötilavyöhykkeiden läpi. Polttoaine kuivuu aluksi, ja tämän jälkeen polttoaineesta alkaa pyrolyysireaktioiden kautta haihtua kaasumaisia yhdisteitä, jotka palavat varsinaisessa palamisvyöhykkeessä. Palamisessa vapautuva lämpö hyödynnetään voimalaitoksen energiatuotannossa. (Luukkanen 2003, 17; Motiva 2014a; Työterveyslaitos 2011, 9.)

Arinapoltto on perinteinen polttomenetelmä kosteille polttoaineille. Esim. polttoaineena käytettävän puunkuoren kosteus voi olla jopa 70 %. Arinapolttoa käytetään

yleisesti pienemmän kokoluokan voimaloissa ( $< 10 \text{ MW}_{\text{th}}$ ). Vastaavasti leijuteknologiaa käytetään suuremman kokoluokan voimaloissa ( $10\text{--}500 \text{ MW}_{\text{th}}$ ). (Kärki 2013, 5.)

### 3.2.4 Lentotuhkan erottaminen savukaasuista

Lentotuhka voidaan erottaa savukaasuista sähkö-, letku- tai pussisuodattimella tai savukaasupesurilla.

Sähkösuodattimessa elektrodit luovuttavat savukaasupartikkeleille sähköisen varauksen, ja partikkelit erotetaan savukaasuista keräyslevyille. Keräyslevyiltä tuhka ravistetaan tuhkasuppiloihin ja niistä edelleen siiloihin tai kuljetukseen tarkoitetuille lavoille. Useat sarjaan ja rinnan kytketyt erotuskammiot muodostavat sähkösuodattimen. Ensimmäisessä kammiossa tapahtuu suurten tuhkapartikkelien erottuminen. Pienimmät partikkelit erottuvat vasta viimeisessä kammiossa. (Pesonen 2012, 23.)

Letkusuodatin on kangaspussi, joka on avoin toisesta päästään. Voimalaitoksella letkusuodatimet on asennettu suodatinkammioon. Hiukkaset erottuvat savukaasusta kaasun virratessa suodatinkankaan läpi. Painovoiman vaikutuksesta osa lentotuhkasta voi pudota suodatinkammion pohjalle jo ennen suodatusvaihetta. Kammion alaosassa olevan ruuvin avulla lentotuhka poistetaan suodatinkammion osta. (Lekander 2011, 13; Luukas 2014, 8.)

Pussisuodattimessa savukaasut johdetaan teflonista, lasikuidusta tai synteettisestä materiaalista valmistetun pussin läpi. Suodatin, joka asennetaan savukaasukanavaan sisältää yleensä useita rinnakkain olevia pusseja. Suodattimen pinta kerää tuhkan. Kertynyt tuhka poistetaan ravistamalla ja samalla estetään suodattimen tukkeutuminen. (Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus 2004, 9.)

Savukaasupesurin toiminta perustuu savukaasun ja veden väliseen kontaktiin. Joko vettä tai savukaasua syötetään suurella voimalla ja korkealla nopeudella sisään pesuriin. Molemmissa toimintatavoissa vesi muodostaa pisaroita, joihin

savukaasupartikkelit tarttuvat. Hiukkasia sisältävät pisarat kerätään pisanerot-  
timen avulla. (Luukas 2014, 8.)

## 4 LENTOTUHKAN KÄYTTÖKOHTTEITA

### 4.1 Metsänlannoitus

Lentotuhka on emäksistä. Sen pH on 11–13, ja sen sisältämä kalsium neutraloi happoa. Tuhkaa voidaan käyttää maaperän neutralointiin. (Anttila 2008, 16.) Tuhka sisältää ravinteita kasvillisuuden tarvitsemassa suhteessa (Pekkala 2012, 104–105). Vallitsevia ainesosia tuhkassa ovat kalsium, kalium ja magnesium. Näiden lisäksi tuhka sisältää myös mm. fosforia, booria, kuparia ja sinkkiä. (Anttila 2008, 16.) Tuhka ei sisällä typpeä, joka poistuu palamisessa (Pekkala 2012, 105).

Metsälannoitus on luonnonmukainen tapa hyödyntää lentotuhkaa. Puun korjuun seurauksena metsästä poistuvat ravinteet voidaan lannoituksessa luontaisesti palauttaa takaisin metsämaahan (Anttila 2008, 15; Pekkala 2012, 106). Lannoitus vaikuttaa maaperään, kasvillisuuteen ja vesistöihin, minkä takia tuhkan ympäristövaikutukset on tarkasti tunnettava. Lentotuhka on pitkäaikainen lannoite, sillä sen vaikutus kestää jopa kymmeniä vuosia (Anttila 2008, 33).

Tuhkan sisältämien raskasmetallien ei haluta rikastuvan maaperään, ja niille on asetettu raja-arvot. Lentotuhkan on alitettava raja-arvot, jotta sitä voidaan käyttää lannoitteena. (Anttila 2008, 16.) Raskasmetallit, esim. kadmium, saattavat rikastua luontoon. Kadmiumin määrä voi joskus rajoittaa lentotuhkan lannoitekäyttöä. Raskasmetallit vaikuttavat puihin, muuhun kasvillisuuteen, maaperään ja vesistöihin. Alitettaessa lainsäädännön enimmäismäärät haitta-aineille tuhka on turvallinen lannoite ja maanparannusaine. (Anttila 2008, 25–33.)

Metsälannoitteeksi sopii parhaiten puhdas puun tuhka. Lentotuhka soveltuu hyvin lannoitteeksi. Se on pölymäistä, mikä mahdollistaa ravinteiden nopean liukene-  
misen maaperään (Anttila 2008, 16). Rakeistamaton tuhka on erittäin reaktiivista, ja se nostaa nopeasti maaperän pH:ta. Jos maaperän pH lentotuhkan vaikutuksesta nousee nopeasti, pieneliöt ja kasvit kärsivät. Tällainen pH-shokki voidaan välttää lentotuhkan rakeistamisella. Rakeistus hidastaa lentotuhkan liukenemistä

maaperään ja helpottaa tuhkan käsittelyä. (Anttila 2008, 19; Pekkala 2012, 51.) Rakeistettu lentotuhka uppoaa hyvin aluskasvillisuuteen ja lannoitus on helppo kohdistaa valittuun kohteeseen metsässä (Anttila 2008, 19). Rakeistus vähentää tuhkan pölyämistä ja parantaa työturvallisuutta (Pekkala 2012, 108). Lentotuhka voidaan rakeistaa useilla eri menetelmillä, mm. itsekovetuksella, lautasrakeistuksella, rumpurakeistuksella, valssauksella, biolietekostutuksella tai matriisipuristimella (Anttila 2008, 19–22; Pekkala 2012, 56). Rakeistettua tuhkaa voidaan levittää metsään joko maa- tai lentolevityksenä. Maalevitys suoritetaan käsinlevityksenä tai traktorilla. Traktorilevityksessä käytetään yleensä pyörivää lautaslevitintä. (Anttila 2008, 22–23; Pekkala 2012, 61–62.) Lentolevitys suoritetaan helikopterilla, ja se soveltuu suurempien alueiden lannoittamiseen. Lentolevitys edellyttää tarpeeksi suurta ja tasaista raekokoa, jotta tuhka valuu levityssuppilosta tasaisesti eikä pölyä ilmassa. Lentolevitys on menetelmänä suhteellisen kallias, ja useampi kohde kannattaa lannoittaa samalla kertaa maanomistajien yhteishankkeena. (Anttila 2008, 23–24; Pekkala 2012, 62; Pesonen 2012, 30.)

Metsälannoitus ei ole toistaiseksi yleistynyt tuhkan hyötykäyttökohteena (Pesonen 2012, 60). Ainoa merkittävä tuhkien rakeistaja maassamme on Viitasaarella toimiva Ecolan Oy (Pesonen 2012, 29).

## 4.2 Maanrakennus

Maanrakennukseen käytetään Suomessa vuosittain n. 80 miljoonaa tonnia luonnonkiviainesta, josta osa voitaisiin korvata tuhalla. Tuhkan käyttöä maanrakennuksessa on jossakin määrin vähentänyt käyttäjien epätietoisuus materiaalin teknisestä soveltuvuudesta ja ympäristökelpoisuudesta. (Pesonen 2012, 47.) Tasa-laatuinen lentotuhka soveltuu hyvin maanrakennuksen raaka-aineeksi (Oy Finn Ash-Power Ltd 2015a).

Taulukko 3. Lentotuhkan käyttökohteita maanrakennuksessa (Autiola 2012, 4).

pengerrakenteet (mm. meluvallit, maisemavallit, tulvavallit)
viherrakentaminen (mm. golfkentät, puistot)
kaatopaikat
kaivostäytöt
pohjanvahvistukset (uusien alueiden pohjarakenteet)
pehmeikköjen massastabilointi
tie- ja kenttärakenteet

Lentotuhkaa sisältävät rakenteet ovat kevyitä, kantavia ja routimattomia. Lentotuhka on itselujittuvaa, ja sillä on hyvät sitoutumisominaisuudet. Kivihiilituhkaa on jo pitkään käytetty luonnonkiviaineksen korvaajana tierakenteissa. Puu- ja turvetuhkia on maanrakennuksessa lähinnä käytetty erilaisissa koerakenteissa. Koheet osoittavat, että myös puu- ja turvetuhka soveltuu kohtuullisen hyvin maanrakennuskohteisiin. Tuhka lujittuu tierakenteessa tehokkaasti ja mahdollistaa ohuemman tierakenteen. Lentotuhka vähentää maanrakennuksen materiaalikustannuksia. (Oy Finn Ash-Power Ltd 2015a.)

Tuhkalta vaaditaan ympäristökelpoisuus, sen on täytettävä lainsäädännön vaatimukset jätteen hyötykäytölle maarakenteissa. Tiettyjen haitta-aineiden pitoisuudet tuhkassa on selvitettävä. Mikäli raja-arvot alittuvat, tuhkaa voidaan käyttää maanrakennukseen. Ympäristökelpoisuuden lisäksi tuhkan on oltava tasalaa-tuista, ja sen on täytettävä sille asetetut tekniset laatuvaatimukset. (Anttila 2008, 34–35.)

#### 4.3 Tierakenteet

Erilaiset tierakenteet ovat keskeinen lentotuhkan käyttökohde. Lentotuhkaa voidaan hyödyntää mm. päällystettyjen teiden ja sorateiden rakentamisessa (Anttila 2008, 46–49).

Taulukko 4. Päälystetyn tien rakenne. (Anttila 2008, 46)

päälyste
kantava kerros
jakava kerros
suodatinkerros
pohjamaa tai pengerkevennys

Tien päälysteen tulee olla tasainen, kulutusta kestävä ja vedenpitävä. Tärkeitä päälysteen ominaisuuksia ovat lujuus, sitkeys, kestävyys muodonmuutoksia vastaan sekä kulumiskesto. (Anttila 2008, 46.)

Kantavan kerroksen tehtävänä on kestää liikennekuormien aiheuttamat jännitykset ja muodonmuutokset. Kantava kerros jakaa kuormituksen laajemmalle alueelle ja muodostaa hyvän alustan päälystekerrokselle. Kantava kerros kuivattaa veden, joka on läpäissyt päälysteen. Kantavan kerroksen keskeisiä ominaisuuksia ovat sopiva rakeisuus, routimattomuus, jäätymis- ja sulamiskestävyys sekä vedenläpäisevyys. (Anttila 2008, 47.)

Jakava kerros jakaa kuormia sekä lisää rakenteen kantavuutta ja routakestävyyttä. Jakavan kerroksen tulee kestää rakenteeseen kohdistuvat leikkausjännitykset ja muodonmuutokset. Jakava kerros johtaa pois rakenteen läpi tulleen veden sekä katkaisee kapillaarisen veden nousun. Jakavan kerroksen tärkeitä ominaisuuksia ovat kantavuus, rakeisuus, roudankestävyys, routimattomuus, lämmöneristävyys, jäätymisvastus sekä vedenläpäisevyys. (Anttila 2008, 47.)

Suodatinkerros estää pohjamaan ja ylempien kerrosten sekoittumisen. Suodatinkerros lisää tierakenteen kantavuutta ja toimii kapillaarisen veden nousun katkaisijana. Suodatinkerros vähentää roudan tunkeutumista tierakenteen alakerrokseen. Suodatinkerros vähentää myös routanousun ja sulamisvaiheen vaikutuksia ajoradan pintaan. (Anttila 2008, 47.)

Pohjamaa eli penger toimii tien alusrakenteena. Hyvälaatuinen pohjamaa varmistaa tasaisen routanousun ja sulamisvaiheen siirtymän. Pohjamaan keskeisiä ominaisuuksia ovat homogeenisuus, kuormituskestävyys, routimattomuus sekä lujuus sulamisvaiheessa. (Anttila 2008, 47.)



Pengerkevennystä voidaan käyttää esim. rakennettaessa pihoja tai pysäköinti-alueita. Pengerkevennys pienentää kuormitusta, joka kohdistuu pehmeään pohjamaahan. Pengerkevennyksen tärkeitä ominaisuuksia ovat kuormituskestävyys, sulamisvaiheen lujuus sekä keveys. (Anttila 2008, 47.)

Taulukko 5. Soratien rakenne (Anttila 2008, 48).

kulutuskerros
kantava kerros
jakava kerros
suodatinkerros
pohjamaa

Taulukko 6. Soratien rakenne vanhan tien päällä (Anttila 2008, 49).

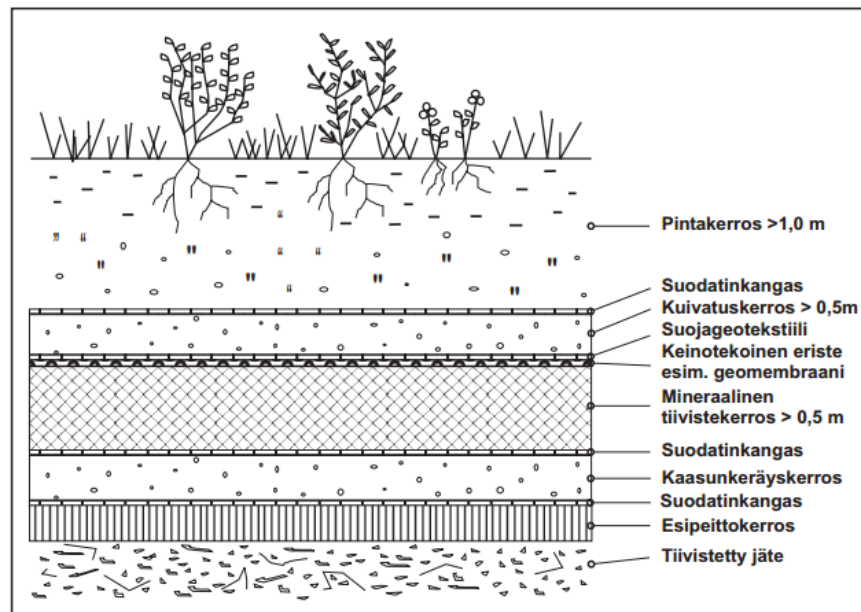
kulutuskerros
kantava kerros
jakava kerros ja suodatinkerros
vanha tierakenne
pohjamaa

Soratien rakenteessa päällimmäisenä kerroksena on kulutuskerros päällysteen sijasta. Muuten soratien rakenne vastaa päällystetyn tien rakennetta. Soratien rakenteen tavoitteena on hallittu routanousu. (Anttila 2008, 48.)

Tierakenteissa lentotuhkaa käytetään routaa eristävänä materiaalina, mm. päällystetyn tierakenteen kantavassa ja jakavassa kerroksessa. Lentotuhka ohentaa tierakenteen paksuutta. Lentotuhkan käyttö tienrakennuksessa säästää uusiutumattomia luonnonvaroja, esim. soraharjuja ei tarvitse käyttää tienrakennusmateriaalin hankkimiseen. Pohjavesialueet säästyvät ja ei ole tarvetta läjittää lentotuhkaa kaatopaikalle. Lentotuhkan pitkäaikaislujittuminen on hyvä, mikä merkitsee että tierakenteiden käyttöikä pitenee. Tämä johtaa huomattaviin säästöihin tierakenteen elinkaarikustannuksissa. (Anttila 2008, 49–50.)

#### 4.4 Kaatopaikkojen tiivisterakenteet

Lentotuhka soveltuu hyvin pintatiivisterakenteeksi kaatopaikoille. Lentotuhka estää pintaveden imeytymisen jätteeseen ja vähentää haju-, pöly-, lintu- ja maise-mahaittoja. Vastaavasti lentotuhka ei sovellu kaatopaikan pohjatiivisteeksi. (Anttila 2008, 42.)



Kuva 5. Kaatopaikan pintasuojarakenne (Suomen ympäristökeskus 2002, 60).

Esipeittokerros rakennetaan ylijäämämaasta tai muusta luonnonmaa-aineksesta. Se estää tiivistyskerroksen ja jätteen sekoittumisen ja johtaa kaasun kaasunkeräyskerrokseen. (Suomen ympäristökeskus 2002, 60.) Kaasunkeräyskerros on yleensä soraa, hiekkaa ja arinatuhkaa. Se kerää jätetäytössä syntyvät kaasut ja johtaa ne käsiteltäviksi. Tiivistyskerros sisältää muovikalvon sekä lentotuhkaa ja kuitusavea. Se estää pintavaluntavesien pääsyn jätetäyttöön ja ohjaa kaasun keräilyjärjestelmään. Lentotuhkaa voidaan käyttää tiivistyskerroksessa, jos haitta-aineille määritellyt raja-arvot alitetaan. Kuivatuskerros johtaa tiivistyskerroksen päälle kertyvät sadevedet pois jätetäytön alueelta. Pintakerros toimii alapuolisten

kerrosten suojana. Pintakerrokselle tärkeitä ominaisuuksia ovat tiivistyvyys, puristuslujuus, muodonmuutoskyky sekä plastisuus. Kasvukerroksen tulee tarjota hyvä kasvualusta kasvillisuudelle. Kasvillisuus istutetaan alueen maisemointitavoitteiden mukaan. Kasvukerros lisää haihtumista ja vähentää imeytymään pyrkivän veden määrää. Kasvien juuret sitovat maa-ainesta ja vähentävät eroosiota. (Anttila 2008, 43–44; Suomen ympäristökeskus 2002, 63.)

#### 4.5 Lentotuhkan käyttö betonissa

Tiukat betoninormit määräävät, minkälaisia ainesosia betonissa voidaan käyttää. Toistaiseksi vain kivihiilituhkia on hyödynnetty vaativien betonirakenteiden seosaineina. Puu- ja turvetuhkien soveltuvuutta betonin valmistukseen on myös jonkin verran tutkittu. Hyvälaatuiset puu- ja turvetuhkat näyttävät suhteellisen hyvin toimivan betonin ainesosina. Keskeinen haaste näyttää olevan puutuhkan laadunvaihtelu käytettyjen polttoaineiden ja vuodenajan mukaan (Karikorpi 2013, 42).

Betonin valmistuksessa lentotuhkan tulee olla kuivaa. Betonissa voidaan käyttää lentotuhkaa hienon kiviaineksen tai täyteaineen sijasta. Lentotuhka parantaa betonin loppulujuutta ja pidentää betonin työstämisaikaa. Lentotuhkan käyttö betonin valmistuksessa vähentää syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Betoniin lisättyä tuhkatonnin kohti käytettävän sementin määrää voidaan vähentää 400 kg. Tuhkan hyödyntäminen vähentää hienojakoisimman ja usein kalleimman kiviaineksen tarvetta betonissa. Tämä merkitsee, että tuhkan käyttö seosaineena laskee betonin materiaalikustannuksia merkittävästi. (Oy Finn Ash-Power Ltd 2015a; Pesonen 2012, 35.)

#### 4.6 Lentotuhkan käyttö asfaltissa

Pääsääntöisesti kaikki uudet asfalttipäällysteet tehdään nykyään käyttäen lentotuhkaa täyteaineena. Lentotuhka korvaa maaperästä louhittavan ja murskattavan kalkkifillerin. Asfalttimassan täytejauheena lentotuhka parantaa asfaltin sisältämän bitumin ja kiviaineksen välistä tartuntaa, asfaltin tiivistettävyyttä sekä veden-

ja pakkasenkestävyyttä. Lentotuhkaa sisältävä asfalttimassa on työtekniisesti helpommin käsiteltävää kuin perinteiset asfalttimassat. Lentotuhka on asfalttimassassa sidotussa muodossa, ja siksi sen ympäristövaikutukset ovat vähäiset. Lentotuhka vähentää asfaltin materiaalikustannuksia. (Oy Finn Ash-Power Ltd 2015a.)

## 5 LENTOTUHKAN KÄSITTELY

Suurin osa tuhkasta syntyy energiantuotannossa talvisaikaan. Vastaavasti esim. maanrakennuksessa runsaasti tuhkaa käytetään kesällä. Tämä synnyttää tarpeen varastoida tuhkaa. (Lillman 2009, 32.)

### 5.1 Varastointi kosteana

Lentotuhkaa voidaan varastoida joko kuivana tai kosteana. Varastointi kosteana on helppoa ja taloudellista (Pesonen 2012, 57). Kosteaa lentotuhkaa varastoidaan kasoissa, ja erityistä varastorakennusta ei tarvita. Pölyhaittoja ei ole. Kun lentotuhkaa varastoidaan kosteana, monet tuhkan keskeiset ominaisuudet heikkenevät (Anttila 2008, 57; Ramboll Finland Oy 2012, 49), mm. lentotuhkan lujittumiskyky alenee huomattavasti. Varastointi kosteana muuttaa lentotuhkan routivaksi. Kosteana varastoitua tuhkaa voidaan käyttää mm. maanrakennuksessa, jossa tuhkan heikentynyttä sitoutumiskykyä kompensoidaan sideainelisäyksellä (Anttila 2008, 57; Pesonen 2012, 57). Varastoitaessa tuhkaa kosteana kasan pölyävää pintaa on tarvittaessa kuitenkin kasteltava (Anttila 2008, 57).

### 5.2 Varastointi kuivana

Lentotuhkaa kannattaa varastoida mieluiten kuivana, koska varastointi kosteana heikentää lentotuhkan lujuusominaisuuksia mm. maanrakennuksessa. Kuivavarastointi saattaa olla suhteellisen kallista. Tuhkan kontrolloidusta varastoinnista on Suomessa vain vähän kokemusta suuressa mittakaavassa. Tähän asti lentotuhkaa on varastoitu kuivana vain lyhyitä aikoja, normaalisti joitakin viikkoja. (Anttila 2008, 56; Pesonen 2012, 56.) Kuiva lentotuhka on reaktiivista ja homogeenista jopa vuosien ajan. Kuivan lentotuhkan ongelmana on pölyäminen ja vaikea käsiteltävyys. (Ramboll Finland Oy 2012, 51.) On suositeltavaa, että tuhkaa ei kostuteta välivarastointivaiheessa (Pekkala 2012, 91).

Taulukko 7. Tapoja varastoida lentotuhkaa (Ramboll Finland Oy 2012, 49; Anttila 2008, 56–57).

kalliosiilo
lämpöeristetty halli
suursäkki
teräskontti
tyynymäinen pussi LePillow
ruiskubetonoitu holvirakenne
teollisuusrakenteiden saneeraus varastoksi, esim. vanhat öljysäiliöt
auma
kuivat tilat käytöstä poistuneissa maatalousrakennuksissa

Lentotuhkaa voidaan varastoida kuivana kalliosiiloissa. Tätä paremmin lentotuhkan pitkäaikaisvarastointiin soveltuu kuitenkin lämpöeristetty halli. Tuhkan pölyäminen vaikuttaa varastohallin ilmastointiin, ja on mahdollista että hallin seinät eivät kestä tuhkan painoa. Tästä syystä tarvitaan erikoisrakenteisia halleja. Lämpöeristetyn hallin täyttöaste on melko pieni etukuormaajaa käyttäen, ja täyttöastetta voidaan huomattavasti parantaa väliseinillä ja paineilmalla. (Anttila 2008, 56.)

Suursäkit ovat suhteellisen epäkäytännöllisiä lentotuhkan varastoinnissa. Ne eivät ole rakenteeltaan kestäviä, ja ne vievät paljon tilaa varastossa. Lentotuhkan varastointiin soveltuu paremmin tyynymäinen LePillow-pussi. Pussi täytetään ja tyhjennetään pneumaattisesti. Pussiin mahtuu n. 1 000 tonnia tuhkaa ja se kestää kymmenen täyttöä ja tyhjennystä ilman huoltoja. Talvella pussin täyttöaste on pienempi. Pussin pakkasenkesto on varmistettava ennen käyttöä. (Anttila 2008, 56.)

Tämän lisäksi lentotuhkaa voidaan varastoida mm. teräskonteissa tai ruiskubetonoiduissa holvirakenteissa (Anttila 2008, 56). On myös mahdollista saneerata vanhoja maatalous- tai tehdasrakennuksia tuhkaravastoiksi (Simi 2007, 53). Tuhkaa on mahdollista varastoida aumoissa. Aumavarastoinnissa haittapuolena on kapillaarisen veden imeytyminen tuhkaan. Suosituksena onkin, että aumavarasto suojataan alapuolelta vesitiiviillä materiaalilla, esim. suojamuovilla. (Anttila 2008, 56–57; Ramboll Finland Oy 2012, 50.)

### 5.3 Lentotuhkan kostuttaminen

Lentotuhkan vesipitoisuuden säätäminen kostuttamalla on hyvin keskeinen asia maanrakennuksen ja logististen toimintojen kannalta. Kuivaan lentotuhkaan on tapana lisätä vettä niin, että pölyhaitat poistuvat. Vähäinenkin kostutus alentaa kuitenkin samalla lentotuhkan reaktiivisuutta. (Anttila 2008, 57; Ramboll Finland Oy 2012, 46.) Reaktiivisuuden heikkeneminen tapahtuu 1–2 viikon kuluessa kostutuksesta (Ramboll Finland Oy 2012, 51). Lisättävää vesimäärää rajoitetaan normaalisti niin että jäädään selvästi alle lentotuhkan optimivesipitoisuuden. Tuhkan vesipitoisuus säädetään myöhemmin rakennusvaiheessa optimaaliseksi. Optimaaliseen vesipitoisuuteen kostutettu lentotuhka lujittuu nopeasti. Korkeaan vesipitoisuuteen kastunut tuhka vastaavasti liettyy, ja maanrakentamista sateella on tästä syystä vältettävä (Lillman 2009, 33). Kostutukseen vaadittavaa vesimäärää kuvaa se, että kymmentä tonnia kuivaa lentotuhkaa vastaa 12 tonnia lentotuhkaa pölyämättömyyskosteudessa ja 13–14 tonnia lentotuhkaa optimaalisessa vesipitoisuudessa (Ramboll Finland Oy 2012, 47).

### 5.4 Lentotuhkan kuljettaminen

Tuhkan kuljetusmatka ja välivaraston sijainti tulee optimoida. Välivarasto kannattaa sijoittaa tuhkan kuljetusreitin varrelle voimalaitosten ja käyttökohteiden väli- maastoon (Anttila 2008, 57; Ramboll Finland Oy 2012, 47). Esim. maanrakennuksessa kuljetuskustannuksilla on merkittävä vaikutus toiminnan kannattavuuteen. On kannattavaa etsiä sopivia menopaluuuormia. Vajaita kuormia ei kannata kuljettaa pitkiä matkoja. (Pekkala 2012, 110.)

Taulukko 8. Tuhkakuljetuksen vaiheet (Anttila 2008, 57).

odotusaika voimalaitosalueella
lastaus
punnitus
ajoaika ajomatkan keskeytyksineen
kuorman tyhjennys
ajomatka tyhjänä

Kuljetuskustannusten minimoimiseksi tuhka kannattaa kuljettaa mahdollisimman kuivana. Tuhkan pölyäminen kuljetuksen aikana voidaan estää kuorman suojaamisella. Kuljetusvaiheessa tuhkan oikea kosteustaso on tärkeä. Ylimääräistä vettä ei kannata kuljettaa tuhkan mukana pitkiä matkoja. Jos tuhka on hyvin kostea, kerrallaan kuljetettavan lentotuhkan määrä jää pienemmäksi. Matalampi tuhkan vesipitoisuus vähentää ajettavien autokuormien tarvetta, mikä puolestaan alentaa kuljetuskustannuksia ja sideainetarvetta ja antaa mahdollisuuden säästöihin kokonaiskustannuksissa. (Anttila 2008, 57.) Lentotuhkan optimaalinen vesipitoisuus kannattaa säätää vasta lähellä käyttökohdetta (Ramboll Finland Oy 2012, 47).

### 5.5 Lentotuhkaan liittyvä työturvallisuus

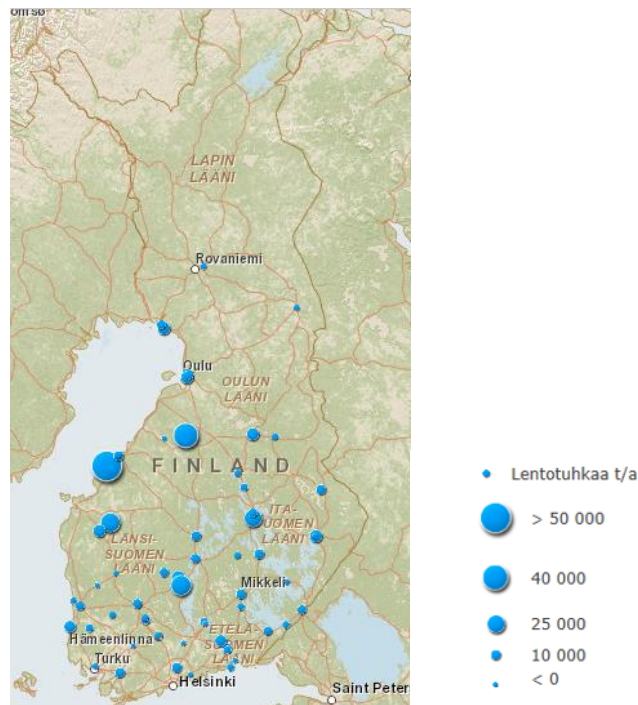
Kuiva lentotuhka pölyää helposti, ja se on voimakkaan emäksistä (pH 11–13). Jotkut tuhkalaadut ovat syövyttäviä. Tuhka voi aiheuttaa silmävammoja sekä ärsyttää ihoa ja hengitysteitä. Pölyävissä työvaiheissa on käytettävä silmäsuojaimia, hengityssuojainta, suojakäsineitä ja suojavaatetusta. Kostutettu tuhka ei juurikaan pölyä, mutta siitä huolimatta suojakäsineitä ja suojavaatetusta suositellaan. Pohjatuhka ei pölyä vastaavassa määrin kuin lentotuhka. Valmistunut tuhkarakenne tulee pölyämisen vuoksi peittää mahdollisimman nopeasti. Pölyhaitat tulee minimoida kuljetuksen ja varastoinnin aikana. On suositeltavaa, että tuhkarakennuskohteisiin laaditaan työturvallisuusohje ja työturvallisuussuunnitelma, joissa on esitetty vaadittavat työsuojelutoimenpiteet ja oikeat työtavat. (Ramboll Finland Oy 2012, 59.)



## 6 VOIMALAITOSTEN SIJAINTI JA LENTOTUHKAN KULJETUS

### 6.1 Kartta-analyysi

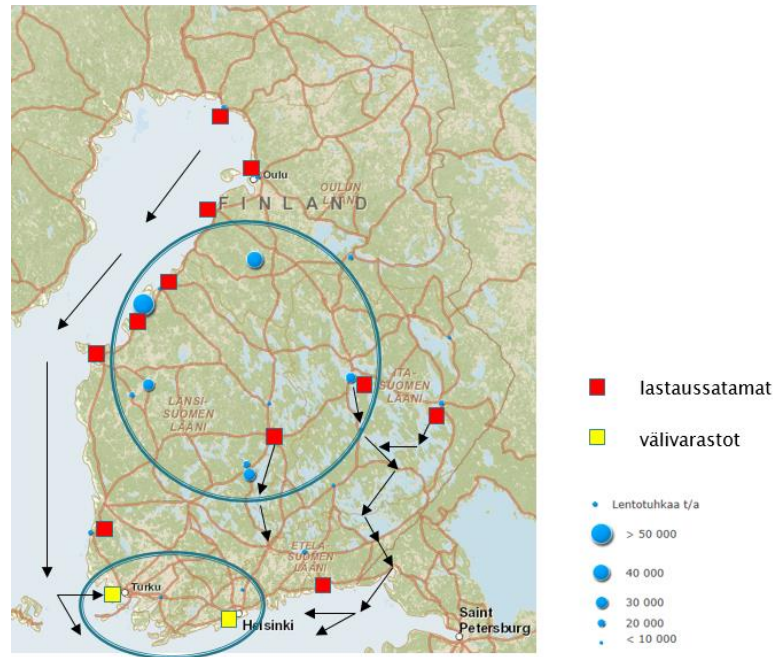
Työskentelyn alussa päätettiin, että selvitys tehdään puu- ja turvevoimaloille sekä kivihiilivoimaloille. Jätteenpolttolaitokset ja sahat rajattiin selvityksen ulkopuolelle. Ensimmäisessä työvaiheessa tehtiin kaksi Excel-taulukkoa, joihin kirjattiin voimalaitokset, niiden maantieteelliset koordinaatit sekä niissä vuosittain syntyvät lentotuhkamäärät. Vuonna 2011 lentotuhkaa syntyi puu- ja turvevoimaloissa n. 535 000 t/a, kivihiilivoimaloissa n. 667 500 t/a ja näissä yhteensä n. 1,2 Mt/a (Renotech 2011). Voimalaitospaikkakuntien koordinaatit kerättiin internetistä. Voimalaitosdata piirrettiin karttapohjalle käyttäen Arc GIS Online -ohjelmistoa. Ohjelmiston edustajana Suomessa toimii Esri Oy. Turun ammattikorkeakoulun kautta oli mahdollista saada kokeilulisenssi ohjelmiston käyttöön.



Kuva 6. Lentotuhkan tuotantomäärät Suomen puu- ja turvevoimaloissa vuonna 2011 (Esri Oy, Arc GIS Online).

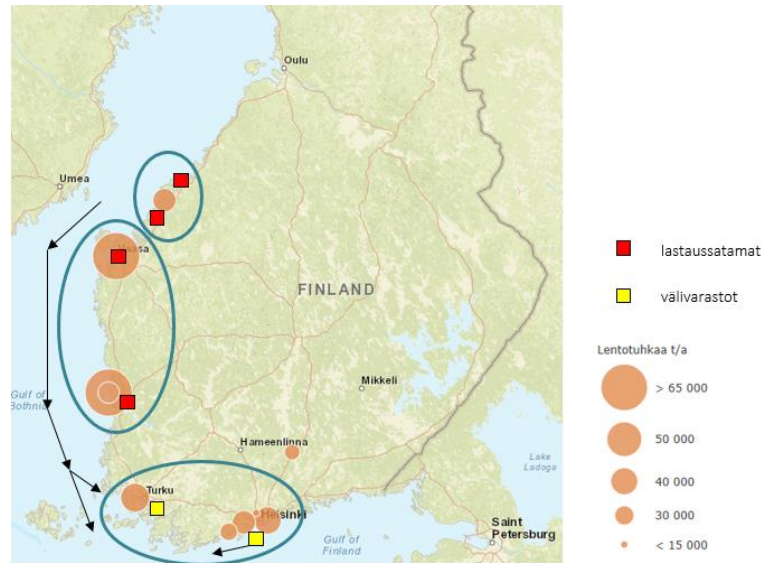
Kaikki Suomen puu- ja turvevoimalat piirrettiin karttapohjalle (kuva 6) käyttäen vuodelta 2011 peräisin olevaa dataa (Renotech Oy 2011). Tärkeimmät puu- ja turvevoimalat sijaitsevat maan keskiosissa. Suurimpia puu- ja turvevoimaloita vuonna 2011 olivat Alholmens Kraft Pietarsaassa, Haapaveden voimalaitos, Seinäjoen voimalaitos, UPM Kaipolan voimalaitos Jämsänkoskella sekä Haapaniemen voimalaitos Kuopiossa. Johtuen savimaiden stabilointitarpeesta tärkein lentotuhkan käyttöalue sijaitsee eteläisessä Suomessa Turun ja Helsingin välisellä alueella. Tähän perustuen lentotuhkan välivarastot sijoitettiin tässä selvityksessä Turkuun ja Helsinkiin.

Laivakuljetus katsottiin edulliseksi ja kiinnostavaksi lentotuhkan kuljetusmuodoksi. Lentotuhkan meri- ja sisävesikuljetuksia ideoitiin karttojen avulla. Kuvan 7 kartassa on esitetty tärkeimmät puu- ja turvevoimalat (lentotuhkan tuotanto > 10000 t/a). Karttapohjaan on tämän lisäksi piirretty puu- ja turvevoimaloiden lentotuhkan lastaukseen soveltuvia satamia, mm. Pohjanlahden rannikkokaupunkien sekä Rauman ja Kotkan satamat. Lentotuhkan merikuljetukset voidaan suorittaa pitkin Pohjanlahtea ja Suomenlahtea. Sisävesiliikenteen lastaussatamina arvioitiin Jyväskylää, Kuopiota ja Joensuuta. Kuopiossa ja Joensuussa on rahtisatamat, joista lentotuhka voidaan kuljettaa Saimaan ja Saimaan kanavan kautta merelle ja Helsingin ja Turun välivarastoihin. Keski-Suomen alueella tilanne on mutkikkaampi. Kaipolassa ja Jämsässä ei ole satamaa. Rahdin kuljetus Jyväskylästä Lahteen on Päijännettä pitkin hankala järjestää. Infrastrukturi Jyväskylän ja Lahden satamissa on pienimuotoista, ja Vääksyn kanavan kapasiteetti on rajallinen. Päijänteestä ei ole laivaliikenteeseen soveltuvaa vesireittiä merelle. Väylien jäätyminen talvisaikaan rajoittaa sisävesikuljetuksia sekä Saimaalla että Päijänteellä. Selkeä rajoite on myös se, että Saimaan kanava on suljettu liikenteeltä tammikuun lopulta huhtikuun alkuun.



Kuva 7. Laivakuljetusreittejä puu- ja turvevoimaloiden lentotuhkalle (Esri Oy, Arc GIS Online).

Johtuen suurista muutoksista kivihiilivoimaloiden toiminnassa viime vuosina lentotuhkan tuotantomääriä kivihiilivoimaloissa ei piirretty vuoden 2011 datalla vaan käytettiin puhelinhaastattelujen avulla kerättyä uudempaa informaatiota. Piirrettiin kartta (kuva 8), jossa näkyy lentotuhkan tuotanto Suomen kivihiilivoimaloissa vuonna 2014 (yhteensä n. 382 000 t/a). Tärkeimpiä kivihiilivoimaloita ovat Meri-Porin voimalaitos, Vaskiluoto 2 Vaasassa sekä Naantalin voimalaitos. Lentotuhkan kuljetus voidaan suorittaa meriteitse Pohjanlahden satamista Turun ja Helsingin välivarastoihin. Etelä-Suomen kivihiilivoimaloiden lentotuhka voidaan maanteitse kerätä Helsingin välivarastoon ja sieltä tarvittaessa kuljettaa meritse Turkuun.



Kuva 8. Laivakuljetusreittejä kivihiihivoimaloiden lentotuhkalle (Esri Oy, Arc GIS Online).

## 6.2 Voimalaitosten puhelinhaastattelut

Selvityksen pohjana käytetty voimalaitoksiin liittyvä data on peräisin vuodelta 2011. Datan paikkansapitävyyttä nykytilanteessa tarkastettiin puhelinhaastattelujen avulla. Puu- ja turvevoimaloita varten työstettiin kysymyssarja, jossa tiedusteltiin mm. tuhkan kuljetusmatkaa, kuljetuksen suorittajaa, vuosittain syntyvän lentotuhkan määrää, tuhkan käyttökohteita sekä prosenttiosuutta, joka tuhkasta saadaan hyötykäyttöön. Tuhkan kuljetusmatka vaihteli muutamasta sadasta metristä satoihin kilometreihin. Pisimmät tuhkan kuljetusmatkat olivat pituudeltaan 300–500 km. Kuljetusmatkojen keskiarvo oli 57 km ja mediaani 25 km. Kuljetukset suoritti yleensä paikallinen urakoitsija. Lentotuhkaa syntyi puu- ja turvevoimaloissa vuosittain runsaasta sadasta tonnista 50 000 tonniin. Tuhkan tärkeimmät käyttökohteet olivat maanrakennus, maisemointi, metsänlannoitus, kaatopaikkarakentaminen sekä kaivosten täyttö. Useimmat puuta ja turvetta polttavat voimalaitokset ilmoittivat, että 100 % lentotuhkasta saadaan hyötykäyttöön. Muutama voimala ilmoitti, että lentotuhkasta voidaan hyödyntää vain 0–80 %. Syynä matalampaan hyötykäyttöprosenttiin oli yleensä lentotuhkan epäpuhdas laatu tai sopivan käyttökohteen puuttuminen.

Kivihiilivoimaloilla tuhkan kuljetusmatka vaihteli parista sadasta metristä satoihin kilometreihin. Pisimmät lentotuhkan kuljetusmatkat olivat välillä 200–400 km. Kuljetusmatkojen keskiarvo oli 61 km ja mediaani 50 km. Kuljetukset suoritti yleensä paikallinen urakoitsija. Lentotuhkaa syntyi vuosittain 25 000–65 000 tonnia. Tuhkan tärkeimmät käyttökohteet olivat kivihiilivoimaloilla vastaavat kuin puu- ja turvevoimaloilla. Kivihiilivoimaloissa lentotuhkasta saatiin lähes poikkeuksetta 100 % hyötykäyttöön. Vain Salmisaaren voimalaitos Helsingissä ilmoitti, että hyötykäyttöön saadaan alle 100 % lentotuhkasta. Tämän kysymyssarjan lisäksi kivihiilivoimaloille esitettiin myös joitakin kivihiilenpolton tulevaisuuteen liittyviä kysymyksiä. Voimalat eivät halunneet kommentoida hiilenpolton tulevaisuutta. Eräs voimalaitos kertoi polttaneensa hiilen ja puun sekoitusta jo parin vuoden ajan. Voimalaitosten puhelinhaastatteluihin liittyvä data on esitetty pylväsdiagrammeina opinnäytetyön liitteissä 1–5.

## 7 KULJETUSKUSTANNUSTEN MALLINNUS

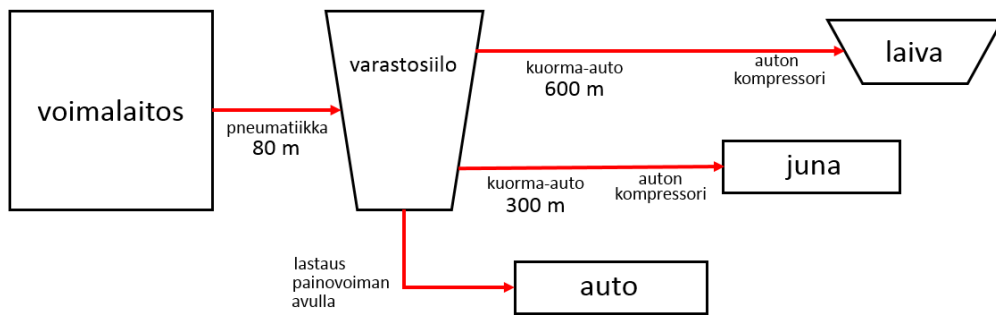
### 7.1 Logistinen prosessi

Logistisen prosessin mallinnus aloitettiin listaamalla lentotuhkan kuljetus- ja varastointiprosessin eri vaiheet. Prosessi jakaantuu kymmeneen eri vaiheeseen (taulukko 9).

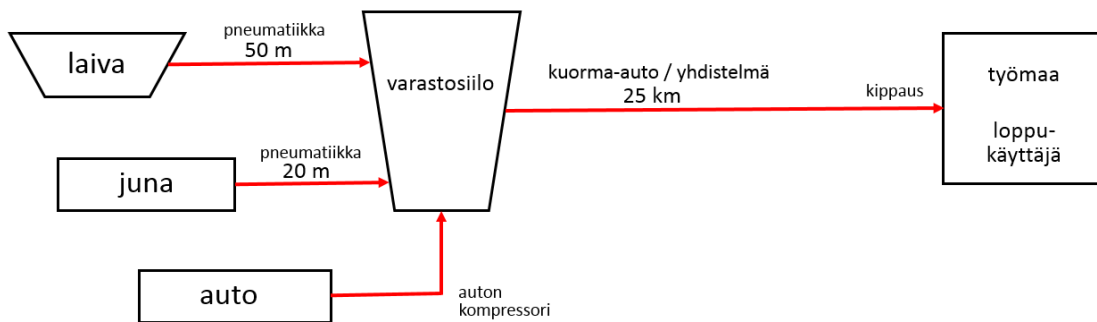
Taulukko 9. Lentotuhkan kuljetus- ja varastointiprosessi.

polttoaine tuodaan voimalaitokselle
lentotuhka syntyy voimalaitoksen prosessissa
siirto varastoon
varastointi 1
lastaus
<b>kuljetus kuorma-autolla / laivalla / junalla</b>
purku
varastointi 2
siirto loppukäyttäjälle
loppukäyttäjä käyttää lentotuhkan

Tutkittavan kuljetusreitit lähtöpisteeksi valittiin kapasiteetiltaan suuri voimalaitos ja loppupisteeksi lentotuhkan tärkeimmällä käyttöalueella sijaitseva ja volyymitaan riittävän suuri satama. Selvityksessä päätettiin verrata lentotuhkan auto-, laiva- ja rautatiekuljetusten kustannuksia välillä Pietarsaari–Naantali. Paikkakuntien etäisyys maanteitse on 427 km. Logistisen toiminnan mahdollisuuksia Alholmens Kraftin alueella Pietarsaarella sekä Naantalissa satamassa kartoitettiin puhelinhaastattelujen avulla (Alholmens Kraft, henkilökohtainen tiedonanto 15.1.2016; Stevena, henkilökohtainen tiedonanto 15.1.2016). Työtä varten hahmoteltiin prosessikaaviot, joissa esitetään lentotuhkan logistiikkaan liittyvä toimintamalli Pietarsaarella ja Naantalissa (kuvio 1 ja 2).



Kuvio 1. Lentotuhkan kuljetuksen lähtötilanne Pietarsaarella.



Kuvio 2. Logistinen toiminta Naantalissa.

Kustannuslaskelmat tehtiin lentotuhkan maantie-, laiva- ja rautatiekuljetuksille. Kaikissa laskelmissa kuljetettava määrä oli 3 000 tonnia, joka vastaa yhtä laivalastillista lentotuhkaa.

## 7.2 Maantiekuljetukset

### 7.2.1 Maantiekuljetusten mallinnus

Mallinnettaviksi valittiin kaksi lentotuhkan maantiekuljetuksiin erikoistunutta yritystä. Yritysten A ja B toimintamalli kartoitettiin puhelinhaastattelujen avulla. Yritys A toimii Pohjanmaalla ja kuljettaa lentotuhkaa avolavalla varustetuilla kuorma-

autoilla. Yritys B toimii valtakunnanlaajuisesti ja kuljettaa lentotuhkaa säiliöperävaunuyhdistelmillä. Näiden kahden yrityksen avulla luotiin kustannuslaskennan perusmalli. Varsinainen kustannuslaskenta suoritettiin vakiintuneen maantiekuljetusalalla käytettävän laskentamallin mukaan (Oksanen 2004, 77–102). Mallinusta varten kerätty informaatio on koottu liitteisiin 6 ja 7, ja laskentamallin käytösesimerkki on vastaavasti esitetty liitteessä 8.

## 7.2.2 Maantiekuljetusten kustannuslaskenta

Aluksi laskettiin kilometri-, tunti- ja tonnihinnat maantiekuljetukselle Pietarsaari–Naantali–Pietarsaari. Tehtävässä käytettiin vakiintunutta maantiekuljetusalalla käytettävää laskentamallia (Oksanen 2004, 77–102). Laskelma tehtiin kolmelle erilaiselle paluukuormaa koskevalle vaihtoehdolle, joko ei paluukuormia (paluu 0), paluukuorma 50 prosentissa tapauksista (paluu 50 %) tai täydet meno-paluukuormat (täysi mepa).

Taulukko 10. Kilometri-, tunti- ja tonnihinnat maantiekuljetukselle Pietarsaari–Naantali–Pietarsaari.

<b>Pietarsaari - Naantali - Pietarsaari</b>			
<b>kilometrihinta € / km</b>			
	paluu 0	paluu 50 %	täysi mepa
vetoauto	1,33	1,40	1,47
perävaunu	0,15	0,15	0,15
<b>yhdistelmä</b>	<b>1,48</b>	<b>1,55</b>	<b>1,62</b>
<b>tuntihinta € / h</b>			
	paluu 0	paluu 50 %	täysi mepa
vetoauto	87,24	91,99	96,74
perävaunu	10,00	10,00	10,00
<b>yhdistelmä</b>	<b>97,24</b>	<b>101,99</b>	<b>106,74</b>
<b>tonnihinta € / t</b>			
	paluu 0	paluu 50 %	täysi mepa
vetoauto	27,00	18,12	13,97
perävaunu	3,09	1,97	1,44
<b>yhdistelmä</b>	<b>30,09</b>	<b>20,09</b>	<b>15,41</b>

Tämän jälkeen tehtiin maantiekuljetuksen kustannuslaskelma. Laskelma tehtiin yhtä laivakuljetusta vastaavalle lentotuhkamäärälle (3 000 t). Kopar Oy selvitti



paineilman kulutuksen ja Atlas Copco paineilman hinnan lentotuhkan pneumaattisessa siirrossa voimalaitokselta varastosiiloon (Kopar Oy, henkilökohtainen tiedonanto 25.1.2016; Atlas Copco, henkilökohtainen tiedonanto 15.1.2016). Lentotuhkan varastoinnin hinnaksi arvioitiin 5 €/t/kk (B. Talling, henkilökohtainen tiedonanto 12.1.2016). Laskelmissa kaikkien varastointien ajalliseksi kestoksi sovittiin 1 kk. Varastointikustannusten laskentaa on yksinkertaistettu. Laivan tai junan lastin varastointiin tarvitaan isokokoisempi siilo, ja se aiheuttaa suuremmat pääomakustannukset. Autokuorman varastointiin riittää pienempi ja pääomakustannuksiltaan huokeampi siilo. Lastauksen ja purkamisen hinnassa huomioitiin auton polttoaineenkulutus työvaiheen aikana. Autokuljetuksen hinta laskettiin kolmelle eri vaihtoehdolle (ei paluukuormia, paluukuorma 50 %:ssa tapauksista, täydet menopaluukuormat). Arvioitiin, että lentotuhkan siirto varastosta loppukäyttäjälle on pituudeltaan keskimäärin 25 km. Laskettuna kehitetyllä Excel-laskentamallilla tonninhinta on 7,61 €/t siirrettäessä lentotuhkaa täysperävaunuyhdistelmällä varastosta loppukäyttäjälle. (Excel-laskentamallia käyttäen vastaava siirto kuorma-autolla maksaisi 8,27 €/t.) Kuljetuksen kolmelle eri vaihtoehdolle laskettiin kokonaishinnat ja tonninhinnat. Maantiekuljetuksen yksityiskohtainen hintalaskelma on esitetty opinnäytetyön liitteessä 9.

### 7.2.3 Alennusten vaikutus maantiekuljetuksen kustannuksiin

Kuljetusyritykset saavat normaalisti alennusta vakuutuksista, auton ja perävaunun ostohinnoista, renkaista ja niiden pinnoituksesta sekä polttoaineesta. Autojen ja perävaunujen ostohinnoista, renkaista ja niiden pinnoituksesta sekä polttoaineesta arvioitiin myönnettävän keskimäärin 10 % alennusta. Tässä selvityksessä kuorma-auton vakuutuksesta saatiin n. 61 %, yhdistelmän vetoauton vakuutuksesta n. 40 % ja perävaunun vakuutuksesta n. 39 % alennusta (Fennia, henkilökohtainen tiedonanto 13.11.2015).

Alennukset pudottivat kuorma-auton kilometri-, tunti- ja tonnिकustannuksia n. 9 %. Yhdistelmän kustannukset putosivat alennusten vaikutuksesta hieman vähem-

män, n. 8,5–9 %. Tarkasteltaessa yhdistelmää havaittiin, että alennukset pudottivat perävaunun kustannuksia enemmän (12–13 %) kuin vetoauton kustannuksia (n. 8 %).

Taulukko 11. Alennusten vaikutus maantiekuljetuksen kustannuksiin.

	€/ km	€/ h	€/ t
kuorma-auto / listahinnat	3,14	62,73	5,06
kuorma-auto / alennukset	2,85	57,09	4,60
kustannusten pudotus %	9,24	8,99	9,09
vetoauto / listahinnat	1,72	111,57	9,30
vetoauto / alennukset	1,58	102,33	8,53
kustannusten pudotus %	8,14	8,28	8,28
perävaunu / listahinnat	0,24	15,70	1,31
perävaunu / alennukset	0,21	13,65	1,14
kustannusten pudotus %	12,50	13,06	12,98
yhdistelmä / listahinnat	1,96	127,27	10,61
yhdistelmä / alennukset	1,79	115,98	9,67
kustannusten pudotus %	8,67	8,87	8,86

#### 7.2.4 Työajan vaikutus maantiekuljetuksen kustannuksiin

Laskelmien avulla verrattiin tilanteita, joissa kuorma-autolla tai yhdistelmällä ajetaan kaksi työvuoroa tai vaihtoehtoisesti yksi työvuoro päivässä. Havaittiin, että kuorma-autolla kahden vuoron ajaminen päivässä pudotti kilometri-, tunti- ja tonnikustannuksia n. 15 % ja yhdistelmällä vastaavasti n. 17 %. Havaittiin myös, että kahden työvuoron ajaminen pudotti perävaunun kustannuksia huomattavasti enemmän (yli 40 %) kuin vetoauton kustannuksia (n. 13 %).

Taulukko 12. Työajan vaikutus maantiekuljetuksen kustannuksiin.

	€/ km	€/ h	€/ t
kuorma-auto / 8 h	3,14	62,73	5,06
kuorma-auto / 16 h	2,65	53,02	4,28
kustannusten pudotus %	15,61	15,48	15,42
vetoauto / 8 h	1,72	111,57	9,30
vetoauto / 16 h	1,49	96,66	8,05
kustannusten pudotus %	13,37	13,36	13,44
perävaunu / 8 h	0,24	15,70	1,31
perävaunu / 16 h	0,14	8,93	0,74
kustannusten pudotus %	41,67	43,12	43,51
yhdistelmä / 8 h	1,96	127,27	10,61
yhdistelmä / 16 h	1,63	105,59	8,79
kustannusten pudotus %	16,84	17,03	17,15

### 7.3 Laivakuljetukset

Lentotuhkan laivakuljetus välillä Pietarsaari–Naantali mallinnettiin yhteistyössä Meriauran kanssa. Lähtöolettamuksena oli se, että menopaluuuliikennettä reitillä ei ole tässä vaiheessa. Laiva saapuu tarvittaessa Pietarsaareen, ottaa lastin ja kuljettaa sen Naantaliin, minkä jälkeen laiva poistuu muihin tehtäviin. Laskelmia varten valittu laiva on jääluokan 1A kuivabulkkialus. Laivan rahtilavuus on 5 500–6 000 m<sup>3</sup> ja rahdin paino 2 800–3 500 tonnia. Laivan pituus on n. 90 m, leveys 14 m ja syväys vajaat 6 m. Laivan DWT on n. 4 500 tonnia.

Lentotuhkan pneumaattinen siirto voimalaitoksesta varastosiiloon sekä varastointivaiheet laskettiin vastaavalla tavalla kuin maantiekuljetuksessa. Laivan lastauksen tonnihinta oli 4,03 €/t (Fortum, henkilökohtainen tiedonanto 11.1.2016). Meriaura arvioi laivan vuokraksi 5 500 €/vrk. Laivan vuokra-aikaa laskettaessa käytettiin viivästyskerrointa 1,2, joka kuvaa keskimääräisiä myöhästymisaikoja satamissa sekä merimatkoissa. Meriaura arvioi aluksen polttoaineenkulutukseksi 8,3 t MGO/vrk. Laivan positiointiaika oli keskimäärin 0,7 vrk. Viikonloppuriskinä käytettiin laskelmassa yhden vuorokauden vuokraa 5 500 €. Meriaura arvioi kuljetukseen liittyvät satamamaksut Pietarsaaren ja Naantalin satamissa. Lentotuhkan kuljetukseen liittyvät tavaramaksut saatiin Pietarsaaren ja Naantalin satamien internetsivuilta. Lentotuhkan purkamisessa tarvittavan pneumatiikan hinta laskettiin Kopar Oy:n ja Atlas Copcon antaman informaation pohjalta. Lentotuhkan siirto varastosta loppukäyttäjälle hinnoiteltiin vastaavalla tavalla kuin maantiekuljetusten laskelmassa. Laivakuljetuksen hintalaskelma on esitetty opinnäytetyön liitteessä 10.

### 7.4 Rautatiekuljetukset

Rautatiekuljetusten mallinnusta vaikeuttaa se, että julkista tietoa rautateiden kustannuksista ja kuljetuspalvelujen hinnoitteluperusteista on melko vähän. Vaikka rautateiden tavaraliikenne vapautettiin kilpailulle vuonna 2007, ei uusia toimijoita Suomen rataverkolle ole tullut. Vasta vuoden 2016 alusta VR-konserniin kuuluva

VR Transpoint sai kilpailijan, kun Fennia Rail aloitti kaupallisen tavarajunaliikenteen (Sajari 2015).

Fennia Railin edustaja arvioi lentotuhkan rautatiekuljetuksen hinnaksi noin 0,035 €/nettotonnikm (Fennia Rail, henkilökohtainen tiedonanto 3.12.2015). Tällöin 3000 tonnin kuljettaminen maksaisi junakuljetuksena Pietarsaaresta Naantaliin 47 050 €. Junakuljetusetäisyydeksi Pietarsaaresta Naantaliin on laskettu 448,1 km. Laskelmissa käytetään lentotuhkalle ominaispainoa 0,5 t/m<sup>3</sup>.

Rautatiekuljetusten mallinnus on viime vuosina ollut kasvaneen kiinnostuksen kohteena etenkin energiapuun ja metsäenergian hankintaketjujen selvittämisessä. Junakuljetusten kustannustarkasteluissa on käytetty erilaisia malleja. Mallit voidaan jakaa lähtökohtaisesti kahteen kategoriaan: tapahtumakohtaisiin laskennallisiin tuotantokustannuksiin ja rahtihintoihin perustuviin mallitarkasteluihin.

Junakuljetusten tapahtumakohtaisia tuotantokustannuksia on mallinnettu energiapuun ja biomassan osalta mm. Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja Oulun yliopiston tutkimuksissa (Korpinen ym. 2011; Hakonen 2013). Hakonen (2013, 37) käytti junakuljetusten laskemisessa mm. seuraavia lähtöarvoja:

- veturin hankintahinta 3,5 M€
- veturin pitoaika 25 a
- veturin arvonaleneminen 18 %/a
- veturin huolto- ja ylläpitokustannukset 22,5 €/käyttötunti
- veturinkuljettajan palkka 20 €/tunti
- hakevaunun hankintahinta 150 000 €.

Hakosen tutkimuksen (2013) junakuljetusmatkan kustannusfunktion kuvaajan pohjalta on arvioitavissa, että yhden hakekuution kuljetuskustannus on noin 0,016 €/km. Jos tätä hakekuljetuskustannusta käyttää lentotuhkan kustannuslaskennassa, maksaa 6 000 m<sup>3</sup>:n (3 000 t) kuljetus Pietarsaaresta Naantaliin 43 008 €. Tässä on huomioitava, että kuljetus on yhdensuuntainen, eli junan mahdollista paluuta tyhjänä ei ole otettu huomioon.

Bioenergiatuotannon kasvun ja siten bioenergiamassojen kuljetusetäisyyksien pitenemisen myötä on Suomessa tehty useita selvityksiä, joissa rautatiekuljetuksia on mallinnettu ja optimoitu (esim. Lähdevaara ym. 2010; Pöyry Management Consulting Oy 2010; Iikkanen & Sirkiä 2011). Näissä tutkimuksissa on usein käytetty konsulttiselvityksiä apuna junakuljetuskustannusten määrittämisessä.

Vuonna 2009 liikenne- ja viestintäministeriö teetti selvityksen Keiteleen kanavan kehittämisestä (Liikenne- ja viestintäministeriö 2010). Kuljetusten mallintamisen teki Ramboll Finland yhteistyössä Pöyry Energy Consulting Oy:n kanssa. Rautatiekuljetuksissa hyödynnettiin Metsätehon keräämiä todellisia raakapuukuljetuksista maksettuja rahtihintoja sovellettuna hakekuljetuksiin. Keiteleen kanavatyöryhmän taustaselvityksessä esitettiin, että rautatiekuljetuksen kustannus 100 kilometrin matkalla on noin  $2,0 \text{ €/i-m}^3$ . Jos oletetaan, että yksi irtokuutiometri ( $\text{i-m}^3$ ) metsähaketta painaa noin 0,5 tonnia, tulee junakustannusfunktion yksikkökertoimen arvoksi  $0,04 \text{ €/tonnikm}$ . Laskettaessa näillä arvoilla maksaa 3 000 tonnin lentotuhkakuljetus junalla Pietarsaaresta Naantaliin  $53\,772 \text{ €}$ .

Lentotuhkan kuljetuskustannuksia rautateitse voidaan arvioida myös Metsäteho Oy:n keräämän aineiston pohjalta. Metsäteho Oy:n tulosalvosarjan mukaan kotimaisen puutavaran rautatiekuljetuksen yksikkökustannus oli vuonna 2015 keskimäärin  $2,2 \text{ snt/m}^3\text{km}$  (Strandström 2016, 9). Jos lasketaan tällä yksikkökertoimella, saadaan lentotuhkan (3 000 t) kuljetuskustannukseksi välillä Pietarsaari–Naantali  $59\,149 \text{ €}$ .

Vuonna 2014 Liikennevirasto teki valtakunnallisen energiapuuvirtojen optimointimallin (Iikkanen ym. 2014). Optimointimallilla voidaan tarkastella esimerkiksi kuljetuskustannusten muutosten vaikutuksia energiapuun tavaravirtoihin, kuljetusmuotojen työnjakoon ja kuljetusten kokonaiskustannuksiin. Optimointimalliin määritettiin kustannusfunktiot sekä auto-, rautatie- että vesitiekuljetuksille. Optimointimallin kustannusfunktion junakuljetusten kuvaajasta on arvioitavissa, että energiapuun yksikkökuljetuskustannus per kilometri on  $0,0111 \text{ €/MWh}$ . Laskettaessa, että yhden MWh:n tuottama energiapuumäärä painaa noin 375 kg, saadaan tällä laskentamallilla rautatiekuljetuksen (3 000 t) hinnaksi Pietarsaaresta Naantaliin  $39\,831 \text{ €}$ .

Edellä on junakuljetuskustannusten suuruusluokkaa haarukoitu viidellä eri laskentamenetelmällä. Tulokset ovat melko yhdenmukaiset. Junakuljetuksen keskihinnaksi välillä Pietarsaari—Naantali muodostuu viiden mallin mukaan laskettuna 48 562 €. Kaikissa edellä olevissa tarkasteluissa on pyritty varmistumaan, että junakuljetuksissa olisi mukana vain matkakustannukset, eikä lastaus- ja purkaus- tai siirtokustannuksia. Tämä on tärkeää, sillä seuraavassa lasketaan junakuljetusten alku- ja loppukustannukset samalla tavalla kuin edellä maantie- ja laivalaskelmissa.

Lentotuhkan pneumaattinen siirto voimalaitoksesta varastosiiloon sekä molemmat varastointivaiheet laskettiin vastaavalla tavalla kuin maantie- ja laivakuljetuksissa. Junan lastauksen tonnihinnan arvioitiin olevan sama 4,03 €/t kuin laivan lastauksessa (Fortum, henkilökohtainen tiedonanto 11.1.2016; Stevena, henkilökohtainen tiedonanto 10.2.2016). Lentotuhkan purkamisessa tarvittavan pneumatiikan hinta laskettiin Kopar Oy:n ja Atlas Copcon antaman informaation pohjalta. Lentotuhkan siirto varastosta loppukäyttäjälle hinnoiteltiin vastaavalla tavalla kuin maantie- ja laivakuljetusten laskelmissa. Rautatiekuljetuksen hintalaskelma on esitetty opinnäytetyön liitteessä 11.

## 7.5 Hintalaskelmien vertailua

Vertailua varten taulukkoon kerättiin laiva- ja rautatiekuljetusten sekä kolmen erilaisen maantiekuljetusvaihtoehdon hintalaskelmat.

Taulukko 13. Kuljetusten hintalaskelmien yhteenveto.

	laiva	juna	auto paluu 0	auto paluu 50 %	auto mepa
siirto varastoon €	2100	2100	2100	2100	2100
varastointi 1 €	15000	15000	15000	15000	15000
lastaus €	12090	12090	627	627	627
laivakuljetus €	57446				
rautatiekuljetus €		48562			
autokuljetus €			90270	60270	46230
purku €	1650	1500	1255	1255	1255
varastointi 2 €	15000	15000	15000	15000	15000
siirto loppukäyttäjälle €	22830	22830	22830	22830	22830
yhteensä €	126116	117082	147082	117082	103042
tonnihinta €/t	42,04	39,03	49,03	39,03	34,35

Lentotuhkan pneumaattinen siirto voimalaitokselta varastosiiloon sekä ensimmäinen varastointivaihe hinnoiteltiin kaikissa vaihtoehdoissa samalle tasolle. Auton painovoiman avulla tapahtuva lastaus oli kustannuksiltaan erittäin huokea verrattuna laivan tai junan lastaukseen, joka sisältää lyhyen kuorma-autokuljetuksen sekä auton kompressorilla tapahtuvan siirron alukseen tai rautatievaunuun. Runkokuljetuksen hinnoissa oli huomattavaa vaihtelua eri kuljetusvaihtoehtojen välillä. Laivan ja junan purku pneumatiikan avulla on jonkin verran kalliimpaa kuin auton purku kompressorilla. Toinen varastointivaihe ja siirto loppukäyttäjälle on hinnoiteltu samalla tavalla kaikissa kuljetusvaihtoehdoissa.

Sekä laiva- että rautatiekuljetus ovat hinnaltaan suhteellisen kilpailukykyisiä. Jos paluukuorma saadaan joka toiseen autokuljetukseen, myös maantiekuljetus on hinnaltaan kilpailukykyinen. Mikäli paluukuormia ei ole saatavilla, autokuljetus on suhteellisen kallis vaihtoehto.

## 7.6 Maantiekuljetukseen liittyviä vaihtoehtoja

Kokeiltiin, kuinka huokeita autokuljetukset ovat, jos varastointivaiheita vähennetään lentotuhkan logistisesta prosessista.

Taulukko 14. Maantiekuljetusten hintoja vähennettäessä varastoinnin osuutta.

	auto paluu 50 % 2 varastointia	auto paluu 50 % alkuvarastointi	auto paluu 50 % loppuvarastointi	auto paluu 50 % ei varastointia	auto mepa ei varastointia
siirto varastoon €	2100	2100			
varastointi 1 €	15000	15000			
lastaus €	627	627	627	627	627
autokuljetus €	60270	60270	60270	60270	46230
purku €	1255	941	1255	941	941
varastointi 2 €	15000		15000		
siirto loppukäyttäjälle €	22830		22830		
yhteensä €	117082	78938	99982	61838	47798
tonnihinta €/t	39,03	26,31	33,33	20,61	15,93

Laskelma tehtiin keskimääräiselle tilanteelle, jossa joka toinen kuljetussuoritus sisältää paluukuorman. Havaittiin, että autokuljetusten tonnihinta putoaa huomattavasti, jos logistisesta ketjusta jätetään pois lentotuhkan alku- tai loppuvarastointi. Erityisen halvaksi logistinen ketju muodostuu ilman varastointivaiheita. Tässä tapauksessa lentotuhkaa kuljetetaan suoraan voimalaitokselta loppukäyttäjälle. Ihanteellisessa tilanteessa saadaan täydet menopaluu kuljetukset eikä logistinen ketju sisällä varastointivaiheita. Tämä toimintatapa antaa kaikkein halvimman tonnihinnan.

## 7.7 Hintalaskelmien yhteenveto

Lentotuhkan autokuljetus on hinnaltaan kilpailukykyinen, jos 50 % kuljetussuorituksista sisältää paluukuorman. Mikäli paluukuormia ei ole, maantiekuljetuksen hinta kohoaa selvästi. Autokuljetus on hinnaltaan erittäin kilpailukykyinen, jos varastointivaiheiden osuus jää vähäiseksi.

Myös lentotuhkan laivakuljetus on hinnaltaan suhteellisen kilpailukykyinen vaihtoehto. Laskelma on tehty yksittäisille laivakuljetuksille, ja säännöllinen menopaluuliikenne alentaisi kuljetuskustannuksia.



Lentotuhkan rautatiekuljetus on myös hinnaltaan selkeästi kilpailukykyinen vaihtoehto. Rautatiekuljetus näyttäisi olevan laivakuljetusta huokeampaa. Rautatiekuljetuksen kustannuslaskelma tehtiin erilaisten logistiikkaselvitysten pohjalta. Jotta rautatiekuljetuksia voitaisiin tarkemmin verrata maantie- ja laivakuljetuksiin, junaliikenteen kustannusrakenne on yksityiskohtaisemmin tunnettava. Tässä tapauksessa mukaan laskelmien tekoon tarvitaan asiantunteva kontaktihenkilö joko VR:ltä tai Fennia Raililta.

## 8 LENTOTUHKAN VÄLIVARASTOINTI

Ideoita lentotuhkan välivarastointipaikoiksi kerättiin projektin edetessä. Useimmat ideat perustuivat vanhojen teollisuussiilojen hyödyntämiseen. Näiden lisäksi erilaiset varastohallit herättivät keskustelua. Joissakin tapauksissa myös kostean lentotuhkan kasavarastointia ulkotiloissa harkittiin.



Kuva 9. Vanhoja lentotuhkan varastointiin soveltuvia säiliöitä.

Puhelinhaastattelujen avulla selvitettiin kymmenen välivarastointikohteen kiinnostusta tuhkaliiketoimintaan. Kohteet nimettiin kirjaimilla A–J.

Eräät potentiaaliset yhteistyökumppanit olivat selkeästi kiinnostuneita tuhkaliiketoiminnasta. Näissä yrityksissä ideaa oli vuosien mittaan jo pohdittu ja valmisteltu. Suurinta osaa haastatelluista yrityksistä yhteistyö kiinnosti ainakin jonkin verran. Kahdessa haastatellussa yrityksessä yhteistyö ei herättänyt mielenkiintoa.

Kohde A sijaitsee Länsi-Uudellamaalla. Lentotuhkalle sopivia siiloja löytyy alueelta, mutta ympäristöluvan saaminen toiminnalle on ongelmallista. Kohteessa A toimiva yritys on epävarma, haluaako se ulkopuolista toimintaa alueelleen. Alueella sijaitseva hiilikenttä on varattu muuhun toimintaan eikä sovellu lentotuhkan varastointiin.

Kohde B sijaitsee Länsi-Uudellamaalla. Eräs alueella toimiva yritys on kiinnostunut ideasta. Tällä hetkellä yrityksessä syntyvä lentotuhka kuljetetaan konteissa ongelmajätelaitokselle. Yritys haluaa ulkoistaa lentotuhkan käsittelyn. Alueella sijaitseva toinen yritys ei ole vastaavasti kiinnostunut tuhkaliiketoiminnasta. Syynä tähän on tilanpuute, tuhkan pölyäminen sekä ympäristölupaan liittyvät ongelmat.

Kohde C sijaitsee myös Länsi-Uudellamaalla. Alueella ei ole siloja, mutta runsaasti kenttätilaa löytyy. Kohteen sijainti on voimalaitoksiin nähden hieman syrjäinen. Tuhkan pölyäminen ei ole ongelma. Vienti ja tuonti kiinnostavat erityisesti kohteen C yritystä.

Kohde D sijaitsee Kaakkois-Suomessa. Yritys on selkeästi kiinnostunut tuhkaliiketoiminnasta. Yrityksellä on kohteessa D jonkin verran silokapasiteettia. Enemmän siloja löytyy yrityksen muualla Suomessa sijaitsevista toimipisteistä. Vapaita siloja ei ole tällä hetkellä käytettävissä, ja yrityksen toimipisteissä tarvittaisiin runsaasti järjestelyjä. Tuhkan pölyäminen ei ole ongelma tässä kohteessa.

Kohde E sijaitsee Varsinais-Suomessa. Myös tämä yritys on selkeästi kiinnostunut tuhkaliiketoiminnasta. Yrityksellä on käytettävissään runsaasti tasovarastotilaa ja jonkin verran silokapasiteettia. Kohteessa E tuhkan pölyäminen on ongelma, ja ratkaisuna tilanteeseen pohditaan lentotuhkan granulointia. Kohteessa E pneumatiikkaa ja pölyävän materiaalin käsittelykalustoa on rajallisesti.

Kohde F sijaitsee myös Varsinais-Suomessa. Yritys on selkeästi kiinnostunut tuhkaliiketoiminnasta. Silokapasiteettia ja kuljettimia löytyy. Alueella käsitellään elintarvikkeita, ja yritys pitää tärkeänä, että tuhka ja elintarvikkeet pystytään tehokkaasti erottamaan toisistaan. Kuljettimien puhdistus on yritykselle ensiarvoisen tärkeää, koska tuhkakuljetuksen jälkeen kuljetinta ei voi käyttää minkään muun materiaalin siirtämiseen. Tuhkan pölyäminen on kohteessa F selkeä ongelma ja haaste. Yritys haluaa tehdä mahdollisimman pitkäkestoisen sopimuksen yhteistyökumppanin kanssa.

Kohde G on Satakunnassa sijaitseva teollisuusyritys. Yritys ei ole kiinnostunut tuhkaliiketoiminnasta. Toiminnalle ei löydy tilaa tehdasalueelta. Tuhkan pölyäminen ei ole tässä kohteessa suuri ongelma.

Kohde H on Varsinais-Suomessa sijaitseva viljavarasto. Kohteessa olevaa vanhaa viljasiiloa käytetään viljan varastointiin, eikä sitä voida hyödyntää lentotuhkan säilytyspaikkana. Myös alueella sijaitsevia muita viljasiiloja käytetään normaaliin tapaan viljavarastoina. Kohteessa H ei ole vapaata siilokapasiteettia.

Kohde I sijaitsee Itä-Uudellamaalla. Kohteessa toimiva yritys on periaatteellisella tasolla kiinnostunut tuhkaliiketoiminnasta. Siilokapasiteettia ei ole tarjolla. Yritys tarvitsee aktiivisen yhteistyökumppanin, joka investoi siiloihin. Teknisiä ongelmia on runsaasti. Pölyäminen on selkeä ongelma, ja ratkaisuna siihen on harkittu tuhkan pelletointia. Yritys arvostaa pitkäkestoista sopimusta mahdollisen yhteistyökumppanin kanssa.

Kohde J sijaitsee Länsi-Uudellamaalla. Kohteessa toimiva yritys on harjoittanut tuhkaliiketoimintaa jo pitkän aikaa. Yritys on vuokrannut siiloja paikalliselta kemian alan yhtiöltä. Siiloja ja varastotiloja on käytettävissä toiminnan kannalta riittävä määrä. Tuhkan pölyäminen nähdään haasteena. Yritys keskustelelee mielellään tuhkaliiketoiminnasta.

Taulukko 15. Yhteenvedo haastatelluista välivarastointikohteista.

<b>kohde</b>	<b>alue</b>	<b>kiinnostus</b>	<b>siilokapasiteettia</b>
A	Länsi-Uusimaa	1	kyllä
B	Länsi-Uusimaa	1/0	ei
C	Länsi-Uusimaa	1	ei
D	Kaakkois-Suomi	2	kyllä
E	Varsinais-Suomi	2	kyllä
F	Varsinais-Suomi	2	kyllä
G	Satakunta	0	ei
H	Varsinais-Suomi	0	ei
I	Itä-Uusimaa	1	ei
J	Länsi-Uusimaa	2	kyllä

Taulukossa 2 = selkeästi kiinnostunut, 1 = jonkin verran kiinnostunut, 0 = ei kiinnostusta

## 9 TULEVAISUUDENNÄKYMÄ

Näinä aikoina kiertotalous on keskeinen trendi, joka alkaa enenevässä määrin ohjata taloudellista toimintaa. Pyrkimyksenä kiertotaloudessa on valmistaa materiaalit ja tuotteet niin, että ne mahdollisimman hyvin pysyvät mukana talouden kiertoprosessissa. Toimiva kiertotalous edistää kestävästä kehitystä ja ympäristön säilymistä elinkelpoisena. (Ympäristöministeriö 2015.)

Maanrakennuksessa uusiomateriaalien käyttöä pyritään edistämään. Neitseellisten ja uusiutumattomien luonnonvarojen hyödyntämistä vähennetään. Maanrakennuksen ympäristövaikutuksia rajoitetaan vähentämällä kallio- ja sora-aalien käyttöä. Säästämällä soraharjuja voidaan samanaikaisesti suojella myös arvokkaita pohjavesialueita. (Anttila 2008, 49.)

Tulevaisuudessa tuhkaa ei läjitä kaatopaikalle. Kehitystä ohjataan kohti suurempaa tuhkan hyötykäyttöä korottamalla tuhkan läjitysmaksua. Vuonna 2015 tuhkan läjitysmaksu oli n. 55 €/t. Vuoden 2016 alusta läjitysmaksu nousi tasolle 70 €/t, ja muutaman vuoden sisällä se saattaa kohota tästäkin. (V. Wigren, henkilökohtainen tiedonanto 27.10.2015.) Tavoitteena on, että teollisuusyritykset haluavat välttää läjityskustannuksia ja kehittävät tuhkan hyötykäyttömahdollisuuksia. Tehtyjen laskelmien perusteella (taulukko 13) havaitaan, että lentotuhkan kuljetuskustannukset ovat kaikilla kuljetusmuodoilla halvempia kuin tämänhetkiset läjityskustannukset. On siis kannattavampaa kuljettaa lentotuhkaa hyötykäyttökohteeseen kuin läjittää se kaatopaikalle. Vastaavasti myös metsälannoituksessa kehitystä ohjataan kohti ympäristöystävällisempää toimintatapaa. Lannoitteiden sisältämien kemikaalien pitoisuusrajoja tarkastetaan säännöllisesti (V. Wigren, henkilökohtainen tiedonanto 27.10.2015).

Pariisissa vuonna 2015 solmitun ilmastopöytäkirjan myötä teollisuudelle asetettuja päästörajoja kiristetään entisestään. Savukaasujen puhdistukselle asetetaan aikaisempaa tiukempia vaatimuksia. Lähivuosikymmenten aikana kivihiili jää varapolttoaineeksi. Ympäristösyistä kiinnostus biopolttoaineisiin ja leijupolttoon lisääntyy (Luukkanen 2003, 19).

Talouden laskusuhdanteessa teollisuus on vähentänyt tuotantoaan. Ilmastonmuutoksen myötä talvet ovat aikaisempaa leudompia ja rakennusten lämmittämisen tarve on pienentynyt. Nämä asiat vähentävät voimalaitoksissa syntyvän lentotuhkan määrää. (Lounais-Suomen ympäristökeskus 2009, 15.) Tulevaisuudessa kaukolämmöntarve kasvaa. Tämän lisäksi lähivuosina Suomen jätteenpolttokapasiteetti kasvaa merkittävästi. Nämä tekijät vastaavasti nostavat syntyvän lentotuhkan määrää. (Pekkala 2012, 7; Pekkala 2012, 110.)

Tulevaisuudessa tuhkat halutaan hallita mahdollisimman hyvin. Tuhka käsitellään ennen hyödyntämistä ja käsittelyyn käytettävät menetelmät kehittyvät. Tulevaisuuden voimalaitokset muokkaavat itse tuhkinsa. Syntyy tuhkaliiketoimintaan erikoistuneita yrityksiä. Pitkällä aikavälillä tuhkalta kehitetään uusia hyötykäyttökohteita. Seuraavan 20 vuoden aikana tuhkasta kehitetään mm. uusia rakennusalan tuotteita. (V. Wigren, henkilökohtainen tiedonanto 25.1.2016.)

Yhdysvalloista saadun mallin mukaan Suomeen pyritään luomaan valtakunnallinen tuhkajärjestelmä. Tuhkan varastointi ja jalostus hyötykäyttöön keskitetään noin kuuteen tuhkan käsittelykeskukseen. Yhdessä keskuksessa on varastointitilaa tuhalle n. 100 000 m<sup>3</sup>. Valtakunnallisten keskusten lisäksi on tarkoitus ottaa käyttöön paikallisia tuhkapankkeja. Idea valtakunnallisesta tuhkajärjestelmästä on vasta muotoutumassa. Työtä tehdään tällä hetkellä tuhkajärjestelmän markkinapotentiaalin kehittämiseksi. Valtakunnallinen tuhkajärjestelmä on tarkoitus saada toimintaan viiden vuoden sisällä. (Ramboll Finland Oy, henkilökohtainen tiedonanto 7.1.2016.)

Turun Saramäkeen suunnitellaan maa-ainespuistoa. Alueelle on kaavailtu mm. maa-ainespankkia, kiviainesten myyntiä, lumen vastaanottoa sekä kierrätystoimintaa. Lentotuhkan varastointia varten alueelle on suunniteltu katosta tai siiloa. Alueelle on hyvät liikenneyhteydet sekä maanteitse että rautateitse. Aluetta koskeva rakennuskaava vahvistetaan keväällä 2016. Ympäristölupa on jätetty käsittelyyn syksyllä 2015. Ympäristölupa toiminnalle saadaan, kun rakennuskaava on vahvistettu. Tämä tapahtuu todennäköisesti syksyllä 2016. (Turun kaupungin kiinteistöliikelaitos, henkilökohtainen tiedonanto 9.12.2015.)

Turun Seudun Energiantuotanto Oy rakentaa Naantaliin uutta monipolttoainevoimalaitosta. Voimalaitos tuottaa lämpöä ja sähköä Turun seudun tarpeisiin hyödyntäen ympäristöystävällistä teknologiaa. Energianlähteenä uusi voimalaitos käyttää pääasiassa biopolttoaineita. Voimalan on määrä valmistua vuonna 2017. (Fortum, henkilökohtainen tiedonanto 24.9.2015.) Uutta teknologiaa edustaa myös Turun Luolavuorella käyttöönotettu pellettilämpölaitos. Laitoksen toiminta perustuu puupellettien pölypolttoon. (Energiauutiset 2015.) Myös Porin seudulla on tehty tuhkan hyötykäyttöön liittyviä kehityssuunnitelmia. Tahkoluodon sataman alueelle on mm. rakennettu tuhalla pohjustettuja kenttiä (Fortum, henkilökohtainen tiedonanto 11.1.2016).

Ympäristöystävällisyytensä ansiosta tuhkan rautatiekuljetukset ovat potentiaalinen vaihtoehto maantiekuljetuksille. Rautatiekuljetusten kehittäminen edellyttää investointeja rautatieterminaaleihin sekä kuljetusvälineisiin, lähinnä tuhkakuljetuksiin soveltuviin kontteihin. Rautatieterminaali toimii lentotuhkan tuotantoalueella koontipisteinä, jossa tuhka lastataan junaan käyttöalueelle siirtämistä varten. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2010, 3.) Myös tuhkan laivakuljetukset ovat ympäristöystävällisempiä kuin maantiekuljetukset. Merikuljetusten lisäksi tuhkan sisävesikuljetukset ovat kiinnostavia. Sisävesireittien varsilta saattaa löytyä esim. kaivostäyttöprojekteja, joissa voidaan hyödyntää lentotuhkaa (B. Talling, henkilökohtainen tiedonanto 27.10.2015).

Biomassakuljetuksiin on kehitetty ns. InnoCont-kuormatila. InnoCont on massatuotteiden volyymikuljetuksiin suunniteltu intermodaalinen kuljetusjärjestelmä, joka perustuu teräsrakenteisiin merikontteihin ja standardoituun merikonttilukkojen sijoitukseen. Kuormatiloja voidaan käsitellä olemassa olevalla kuljetus- ja materiaalinkäsittelykalustolla. Kuormatilassa on avattava katto ja kylki, joiden kautta kuormaus ja tyhjennys voidaan suorittaa. (Transidea Oy 2011.) On myös kehitetty kevyitä komposiittikontteja korvaamaan biomassan kuljetuksessa perinteiset raudasta valmistetut kontit. Komposiittikontit ovat helposti siirrettävissä kuljetusmuodosta toiseen, esim. junasta kuorma-autoon. (Mikkelin yliopistokeskus 2016.)

Tulevaisuudessa suuria megakontteja voidaan hyödyntää lentotuhkatehtaina ja -varastoina. Prototyypivaiheessa olevan megakontin kantavuus on 400 tonnia. Megakontteja voidaan kuljettaa kansilastilaivalla. Keskustelua on herättänyt myös merellä tai sisävesillä kuljetettavien proomujen käyttö lentotuhkatehtaina ja -varastoina. (Meriaura, henkilökohtainen tiedonanto 7.12.2015.)



## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Maantiekuljetuksia varten kehitetty Excel-laskentamalli (liite 8) soveltuu erilaisten kuljetustilanteiden analysointiin. Mallin avulla kilometri-, tunti- ja tonnिकustannus voidaan laskea minkä tahansa voimalaitoksen ja välivaraston väliselle maantiekuljetukselle. Vastaavasti liitteissä 9–11 esitetyt maantie-, laiva- ja rautatiekuljetusten hintalaskelmia voidaan käyttää mallina lentotuhkan logistisen prosessin kokonaiskustannusten laskennassa eri kuljetusmuodoilla.

Lentotuhkan autokuljetus on hinnaltaan hyvin kilpailukykyinen, jos 50 % kuljetus-suorituksista sisältää paluukuorman. Mikäli paluukuormia ei ole, maantiekuljetuksen hinta kohoaa selvästi. Autokuljetus on erittäin kilpailukykyinen vaihtoehto, jos varastointivaiheiden osuus jää vähäiseksi.

Myös lentotuhkan laivakuljetus on hinnaltaan suhteellisen kilpailukykyinen vaihtoehto. Laskelma on tehty yksittäisille laivakuljetuksille, ja säännöllinen menopaluuliikenne alentaisi kuljetuskustannuksia. Vuokraamalla halvemman laivan olisi mahdollista pudottaa laivakuljetuksen tonnihintaa jonkin verran. Lentotuhkan pölyämiselle laivan lastauksessa ja purkamisessa asetetaan tiukat rajoitukset, ja tästä syystä lentotuhkan kuljetuksiin kannattaa kuitenkin vuokrata kalliimpi ja teknisesti korkeatasoisempi laiva.

Lentotuhkan rautatiekuljetus on myös hinnaltaan selkeästi kilpailukykyinen vaihtoehto. Rautatiekuljetus näyttäisi olevan laivakuljetusta jonkin verran huokeampaa. Ympäristöystävällisyytensä ansiosta tuhkan rautatiekuljetukset ovat potentiaalinen vaihtoehto maantie- ja laivakuljetuksille. Tässä tutkimuksessa rautatiekuljetuksen kustannuslaskelma tehtiin erilaisten logistiikkaselvitysten pohjalta. Jotta rautatiekuljetuksia voitaisiin tarkemmin verrata maantie- ja laivakuljetuksiin, junaliikenteen kustannusrakenne on yksityiskohtaisesti tunnettava. Tässä tapauksessa mukaan laskelmien tekoon tarvitaan asiantunteva kontaktihenkilö joko VR:ltä tai Fennia Raililta.

Joustavuudessaan lentotuhkan autokuljetus näyttää olevan vaihtoehtoista liiketoiminnan aloitusvaiheessa kaikkein kiinnostavin. Paluukuormat vaikuttavat selvästi maantiekuljetuksen hintaan, ja siksi niiden järjestämiseen on käytettävä riittävästi voimavaroja. Hyvin suunniteltuna lentotuhkan laivakuljetus on myös toteuttamiskelpoinen idea. Lentotuhkan rautatiekuljetus on vielä tässä vaiheessa teoreettinen vaihtoehto, jota voidaan kehittää auto- ja laivakuljetusten taustalla. Kiintoisa uusi ajatus on megakonttien, laivojen ja proomujen hyödyntäminen lentotuhkatehtaina ja -varastoina. Laivan käyttö lentotuhkatehtaan voisi olla seuraavan logistiikkaselvityksen aihe.

Polttoaineen hintataso oli edullinen tehtäessä kustannuslaskelmia syksyllä 2015 ja talvella 2016. Mahdollinen polttoaineen hinnannousu vaikuttaa laskelmien tuloksiin. Autokuljetusten hinta nousisi tässä tapauksessa selvästi ja laivakuljetusten hinta muuttuisi vain hieman. Polttoaineen hinnannousua koskevia vaihtoehtoisia laskelmia ei ole tehty.

Eräät potentiaaliset yhteistyökumppanit ovat selkeästi kiinnostuneita tuhkan välivarastointiin liittyvästä liiketoiminnasta. Vuosien mittaan liikeideaa on näissä yrityksissä jo valmisteltu. Suurinta osaa haastatelluista yrityksistä tuhkan välivarastointi kiinnostaa ainakin jonkin verran. Taustojen huolellinen selvittely ja oikeanlainen markkinointi ovat hyviä keinoja tämän kaltaisten yritysten lähestymiseen. Eräissä kohteissa on runsaasti tuhkan välivarastointiin soveltuvaa tilaa. Yritykset ovat kiinnostuneita kumppaneista, jotka olisivat valmiita investoimaan varastosii-loihin.

Liikeideassa on potentiaalia sen jälkeen, kun lentotuhka on muokattu asiakkaan tarpeisiin sopivaan muotoon. Liiketoiminnan alkuvaiheissa on kannattavaa keskittyä lentotuhkan maantiekuljetusten organisointiin sekä välivarastoinnin ja laivakuljetusten kehittämiseen.

## LÄHTEET

Anttila, H.-K. 2008. Polttoainekoostumuksen vaikutus lentotuhkan laatuun ja hyötykäyttömahdollisuuksiin UPM-Kymmene Oyj:n Kaukaan tehtailla. Diplomityö. Teknillinen tiedekunta. Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Aura, L. & Tonteri, A. 1993. Sähkölaitostekniikka. 1. painos. Porvoo: WSOY.

Autiola, M. 2012. Kestävä kaivostoiminta II. Kokemuksia peittomateriaaleista. Ramboll Finland Oy. Viitattu 4.11.2015 [http://www.kainuunetu.fi/UserFiles/d763e312-4069-4815-82bd-f6886b1871ca/Web/Kivi%20ja%20kaivos/Min-Novation/Kokemuksia%20peittomateriaaleista\\_Merja%20Autiola%20271112.pdf](http://www.kainuunetu.fi/UserFiles/d763e312-4069-4815-82bd-f6886b1871ca/Web/Kivi%20ja%20kaivos/Min-Novation/Kokemuksia%20peittomateriaaleista_Merja%20Autiola%20271112.pdf).

Chandra, S. 1997. Waste Materials Used in Concrete Manufacturing. 1st edition. Westwood: Noyes Publications.

Energiauutiset 2015. Pellettilämpölaite Turkuun. Viitattu 8.1.2016 <http://www.energiauutiset.fi/uutiset/pellettilampolaitos-turkuun.html>.

Esri Oy. Arc GIS Online -kartanpiirto-ohjelma.

Fortum 2013. Vuosikertomus 2013. Viitattu 15.3.2016 [www.annualreport2013.fortum.com/fi](http://www.annualreport2013.fortum.com/fi) > Kestävä kehitys > GRI-osio > Raportissa käytetyt lyhenteet, suuret ja yksiköt.

Hakonen, T. 2013. Bioenergiaterminaalin hankintaketjujen kannattavuus eri kuljetusetäisyyksillä ja -volyymeilla. Oulun yliopisto. Taloustieteiden tiedekunta. Pro gradu -tutkielma. Oulu: Oulun yliopisto.

Hautala, M. & Peltonen, H. 2011. Insinöörin (AMK) fysiikka osa I. 10. painos. Saarijärvi: Lahden Teho-Opetus Oy.

Helmuth, R. 1987. Fly Ash in Cement and Concrete. 1st edition. Skokie: Portland Cement Association.

Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Huhtinen, M.; Korhonen, R.; Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. 1. painos. Helsinki: Opetushallitus.

likkanen, P.; Keskinen, S.; Korpilahti, A.; Räsänen, T. & Sirkiä, A. 2014. Energiapuuvirtojen valtakunnallinen optimointimalli 2014 – mallin kuvaus ja käyttömahdollisuudet. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 54/2014. Viitattu 4.5.2016 [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lts\\_2014-54\\_energiapuuvirtojen\\_valtakunnallinen\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lts_2014-54_energiapuuvirtojen_valtakunnallinen_web.pdf).

likkanen, P. & Sirkiä, A. 2011. Rataverkon raakapuun terminaali- ja kuormauspaikkaverkon kehittäminen, kaikki kuljetusmuodot kattava selvitys. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 31/2011. Viitattu 4.5.2016 <http://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/158035/Rataverkon+raakapuuterminaali+ja+kuormauspaikkaverkon+kehitt%C3%A4minen/8663af95-64a8-4e01-ac07-c3959a77a10c>.

Jätelaitosyhdistys 2015. Leijupetipolttu. Viitattu 30.11.2015 [www.jly.fi](http://www.jly.fi) > Energiahyödyntäminen > Parhaat tekniikat > Leijupetipolttu.

Kanteleen Voima 2015. Puupolttuaineet. Viitattu 29.10.2015 [www.kanteleenvoima.fi](http://www.kanteleenvoima.fi) > Polttoaineet > Puupolttuaineet.

Karikorpi, J. 2013. Karhulan biolämpölaitoksen lentotuhkan hyötykäyttövaihtoehdot Kotkan Energia Oy:lle. Opinnäytetyö. Metsätalouden koulutusohjelma. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Keppo, M. & Ylinen, P. 1980. Voimalaitostuhkat ja niiden hyväksikäyttö. Osa 1. Suomessa muodostuvat tuhkamäärät ja niiden laatu. 1. painos. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Koivunen, K. 2007. Jätteenpolton tuhkien käsittelytekniikoiden ympäristövaikutukset. Diplomityö. Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Korpinen, O.-J.; Föhr, J.; Saranen, J.; Väätäinen, K. & Ranta, T. 2011. Biopolttoaineiden saataavuus ja hankintalogistiikka Kaakkois-Suomessa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Viitattu 4.5.2016 <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/67479/isbn%209789522650689.pdf>.

Kärki, J. 2013. Biomassan poltto CHP-laitoksissa – teknologiat ja talous. Viitattu 9.12.2015 [www.forestenergy2020.org/openfile/109](http://www.forestenergy2020.org/openfile/109).

Lekander, K. 2011. Suodatinelementin markkinapotentiaalin ja kilpailutilanteen selvitys. Opinnäytetyö. Energiatekniikan koulutusohjelma. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Liikenne- ja viestintäministeriö 2010. Keiteleen kanavan kehittäminen. Työryhmän mietintö. Julkaisuja 3/2009. Helsinki: Liikenne- ja viestintäministeriö.

Lillman, E. 2009. Turun tiepiirin sivutuotteiden käyttösuunnitelma. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 24/2009. Viitattu 6.11.2015 [http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf2/4000699-v-sivutuotteiden\\_kaytto-suunnitelma\\_turku.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf2/4000699-v-sivutuotteiden_kaytto-suunnitelma_turku.pdf).

Lounais-Suomen ympäristökeskus 2009. Etelä- ja Länsi-Suomen jätesuunnittelu. Taustaraportti. Tuhkat ja kuonat. Lounais-Suomen ympäristökeskuksen raportteja 09/2009. Turku: Lounais-Suomen ympäristökeskus.

Luukas, K. 2014. Hiilidioksidin neutraloinnissa käytettävän laitteen testaus. Opinnäytetyö. Energiatekniikan koulutusohjelma. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Luukkanen, M. 2003. Lämpöpintojen puhdistus ja korrosio Kainuun Voima Oy:n kiertopetikattilassa. Insinööriyö. Tekniikan ala. Kajaani: Kajaanin ammattikorkeakoulu.

Lähdevaara, H.; Savolainen, V.; Paananen, M. & Vanhala, A. 2010. Mailta ja mannuilta, soilta ja saloilta. Selvitys Keski-Suomen biomassakuljetusten logistiikasta. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 107. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

McCarthy, G. & Lauf, R. 1985. Fly Ash and Coal Conversion By-Products: Characterization, Utilization, and Disposal I. Volume 43. Pittsburgh: Materials Research Society.

Mikkelin yliopistokeskus 2016. Komposiittikontilla voidaan tehostaa metsähakkeen kuljetusta. Viitattu 3.5.2016 <http://www.muc.fi/komposiittikontilla-voidaan-tehostaa-metsahakkeen-kuljetusta>.

Misra, M.; Ragland, K. & Baker, A. 1993. Wood Ash Composition as a Function of Furnace Temperature. Biomass and Bioenergy Vol.4, No 2. Madison: Pergamon Press Ltd. Viitattu 10.12.2015 <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1993/misra93a.pdf>.

Motiva 2014a. Arinapoltto. Viitattu 28.10.2015 [www.motiva.fi](http://www.motiva.fi) > Toimialueet > Uusiutuva energia > Bioenergia > Bioenergian tuotantotekniikka > Polttotekniikka kiinteille polttoaineille > Arinapoltto.

Motiva 2014b. Leijupoltto. Viitattu 3.11.2015 [www.motiva.fi](http://www.motiva.fi) > Toimialueet > Uusiutuva energia > Bioenergia > Bioenergian tuotantotekniikka > Polttotekniikka kiinteille polttoaineille > Leijupoltto.

Motiva 2014c. Poltinpoltto. Viitattu 3.11.2015 [www.motiva.fi](http://www.motiva.fi) > Toimialueet > Uusiutuva energia > Bioenergia > Bioenergian tuotantotekniikka > Polttotekniikka kiinteille polttoaineille > Poltinpoltto.

Oksanen, R. 2004. Kuljetustuotannon toimintolaskenta. Kuljetustalouden perusteista moderniin toimintolaskentaan. 1. painos. Hyvinkää: Ekondata Oy.

Oy Finn Ash-Power Ltd 2015a. Kierrätä lentotuhkaa, säästä luontoa. Viitattu 26.10.2015 [www.ashpower.fi](http://www.ashpower.fi) > Käyttökohteet ja edut.

Oy Finn Ash-Power Ltd 2015b. Kierrätä lentotuhkaa, säästä luontoa. Viitattu 1.12.2015 [www.ashpower.fi](http://www.ashpower.fi) > Tietoa lentotuhkasta.

Pekkala, S. 2012. Puun ja turpeen seospolton vaikutus tuhkan hyötykäyttökohteisiin. Diplomityö. Teknillinen tiedekunta. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Pesonen, J. 2012. Oulun biotuhkien fraktiointi, kemialliset ominaisuudet ja hyötykäyttöpotentiaali. Pro gradu -tutkielma. Kemian laitos. Oulu: Oulun yliopisto.

Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus 2004. Päätös 15.7.2004. Viitattu 12.4.2016 <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B75E2C1B55-AB06-4D5E-9CE5-CF618FA6F435%7D/90565>.

Pöyry Management Consulting Oy 2010. Kainuun biomassaterminaaliverkostohankkeen toteuttavuusselvitys. Viitattu 6.5.2016 <http://docplayer.fi/3847238-Kainuun-biomassaterminaaliverkostohankkeen-toteutettavuusselvitys.html>.

Raiko, R.; Kurki-Suonio, I.; Saastamoinen, J. & Hupa, M. 1995. Poltto ja palaminen. 1. painos. Jyväskylä: Teknillisten Tieteiden Akatemia.

Ramboll Finland Oy 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja. Viitattu 27.10.2015 [http://energia.fi/sites/default/files/tuhkarakentamisen\\_kasikirja.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf).

Renotech Oy 2011. Turvetta käyttävät voimalaitokset Suomessa. Tietokanta.

Sajari, P. 2015. Yksityinen yhtiö aloittaa syksyllä tavarankuljetuksen rautateillä. Helsingin Sanomat 27.3.2015. Viitattu 6.5.2016 <http://www.hs.fi/talous/a1427392611647>.

Sanastokeskus TSK 2015. TEPA – Sanastokeskus TSK:n termipankki. Viitattu 8.12.2015 <http://www.tsk.fi/tepa/netmot.exe?UI=figr&height=156>.

Satamaoperaattorit 2008. Satama- ja merikuljetustietoa. Viitattu 12.4.2016 <http://www.satamaoperaattorit.fi/pages/fi/merenkulun-tietoa.php>.

Sax, N. & Lewis, R. 1987. Hawley's Condensed Chemical Dictionary. 11. painos. New York: Van Nostrand Reinhold Company.

Simi, P. 2007. Järviruoko tulevaisuuden bioenergiälähteenä. Opinnäytetyö. Kestävän kehityksen koulutusohjelma. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.

Strandström, M. 2016. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2015. Metsätehon tuloskalvosarja 4a/2016. Viitattu 4.5.2016 [http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja\\_2016\\_04a\\_Puunkorjuu\\_ja\\_kaukokuljetus\\_vuonna\\_2015.pdf](http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2016_04a_Puunkorjuu_ja_kaukokuljetus_vuonna_2015.pdf).

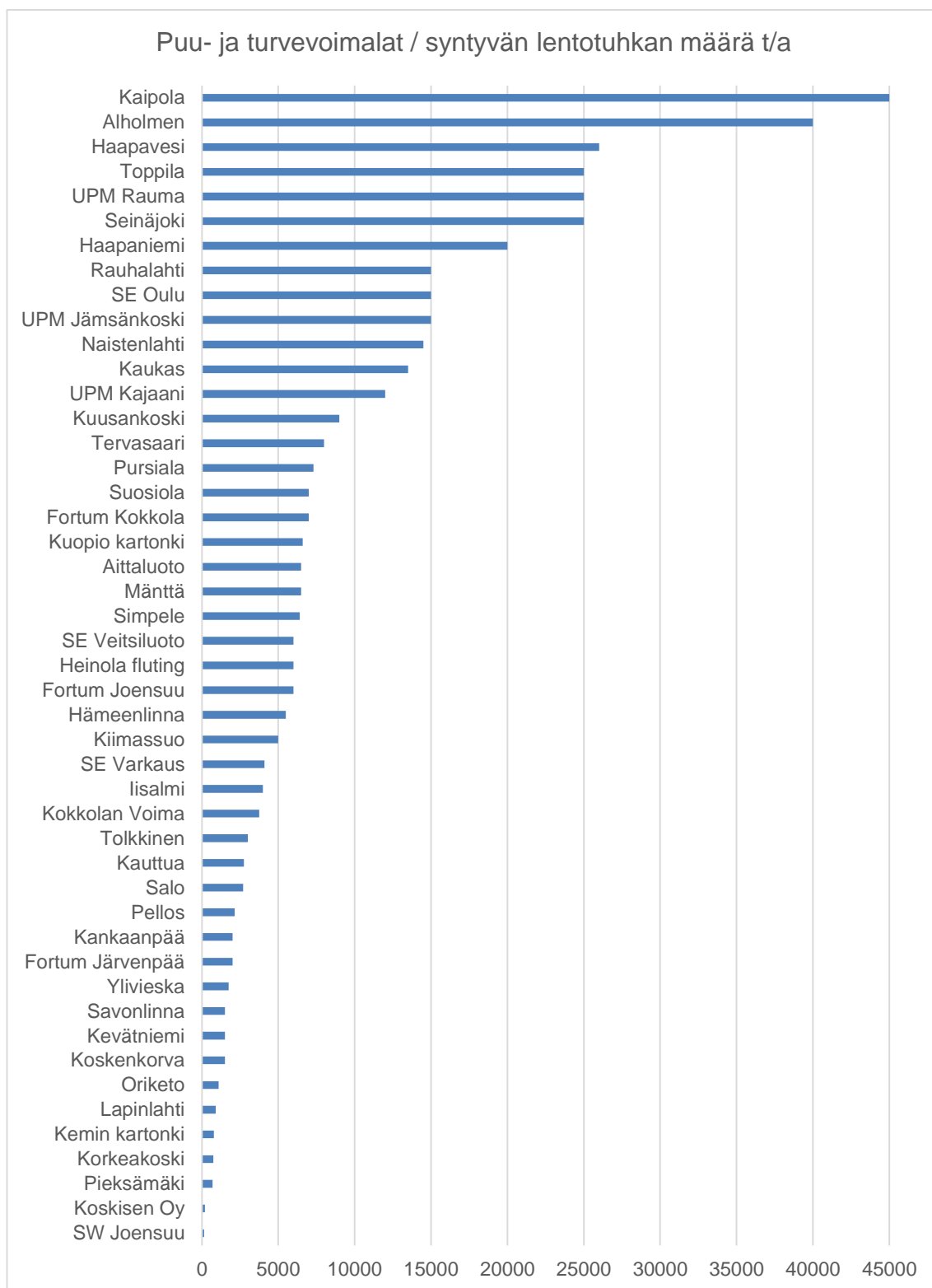
Suomen ympäristökeskus 2002. Ympäristöopas. Kaatopaikan tiivistysrakenteet. Viitattu 28.10.2015 [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/41085/Ymp%C3%A4rist%C3%B6opas\\_36.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/41085/Ymp%C3%A4rist%C3%B6opas_36.pdf?sequence=1).

Transidea Oy 2011. Biomassakuljetusten uusi aikakausi. Viitattu 8.1.2016 <http://innocent.com>.

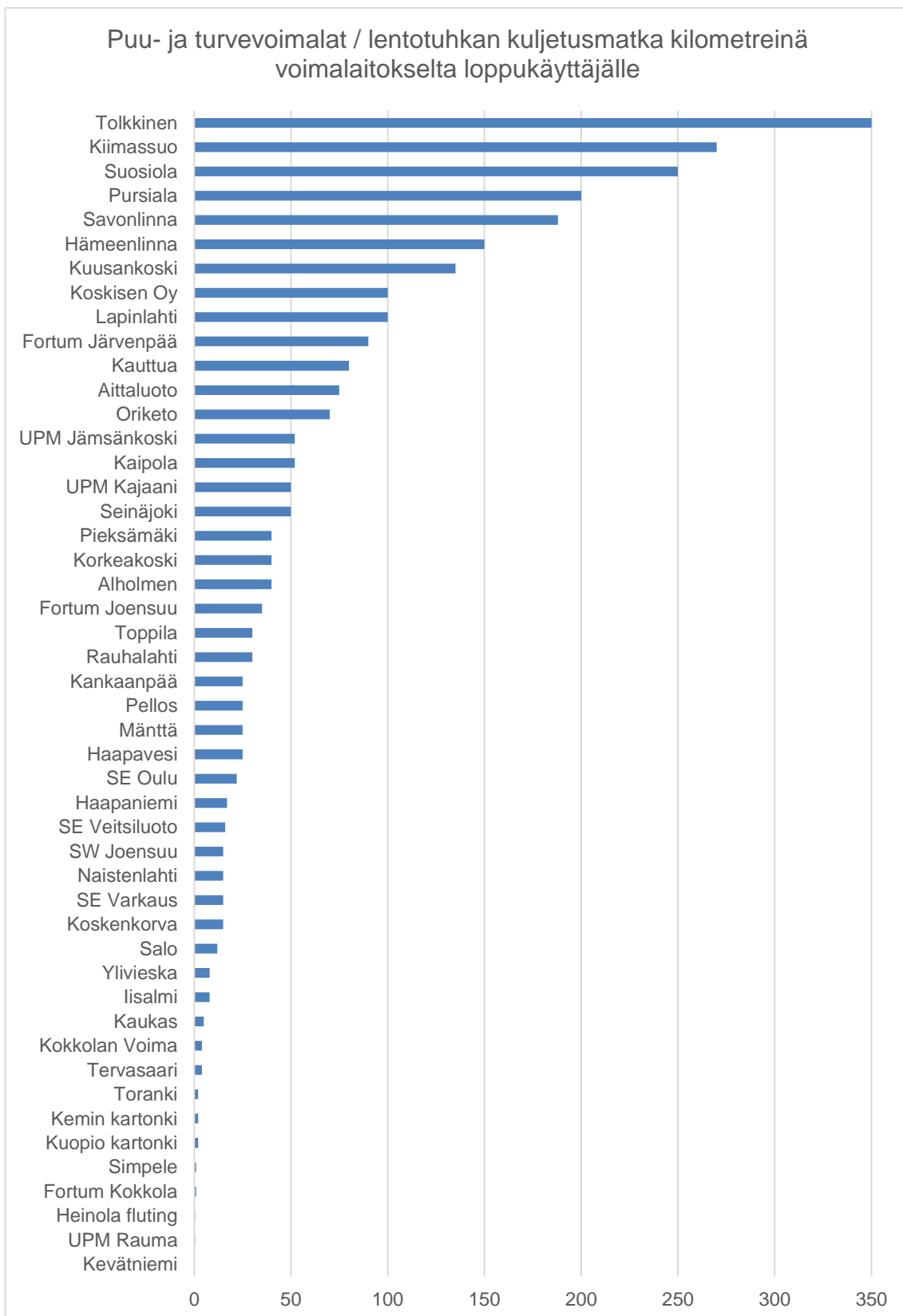
TVO 2016. Sanasto. Viitattu 15.3.2016 [www.tvo.fi](http://www.tvo.fi) > Ydinvoima > Sanasto.

Työterveyslaitos 2011. Tuhkan sisältämät haitalliset kemialliset aineet ja mineraalit – Altistuminen ja torjunta. Viitattu 30.10.2015 [https://www.tsr.fi/c/document\\_library/get\\_file?folderId=13109&name=DLFE-5606.pdf](https://www.tsr.fi/c/document_library/get_file?folderId=13109&name=DLFE-5606.pdf).

Ympäristöministeriö 2015. Kiertotalous. Viitattu 22.1.2016 [www.ym.fi](http://www.ym.fi) > Ympäristö > Vihreä kasvu > Kiertotalous.

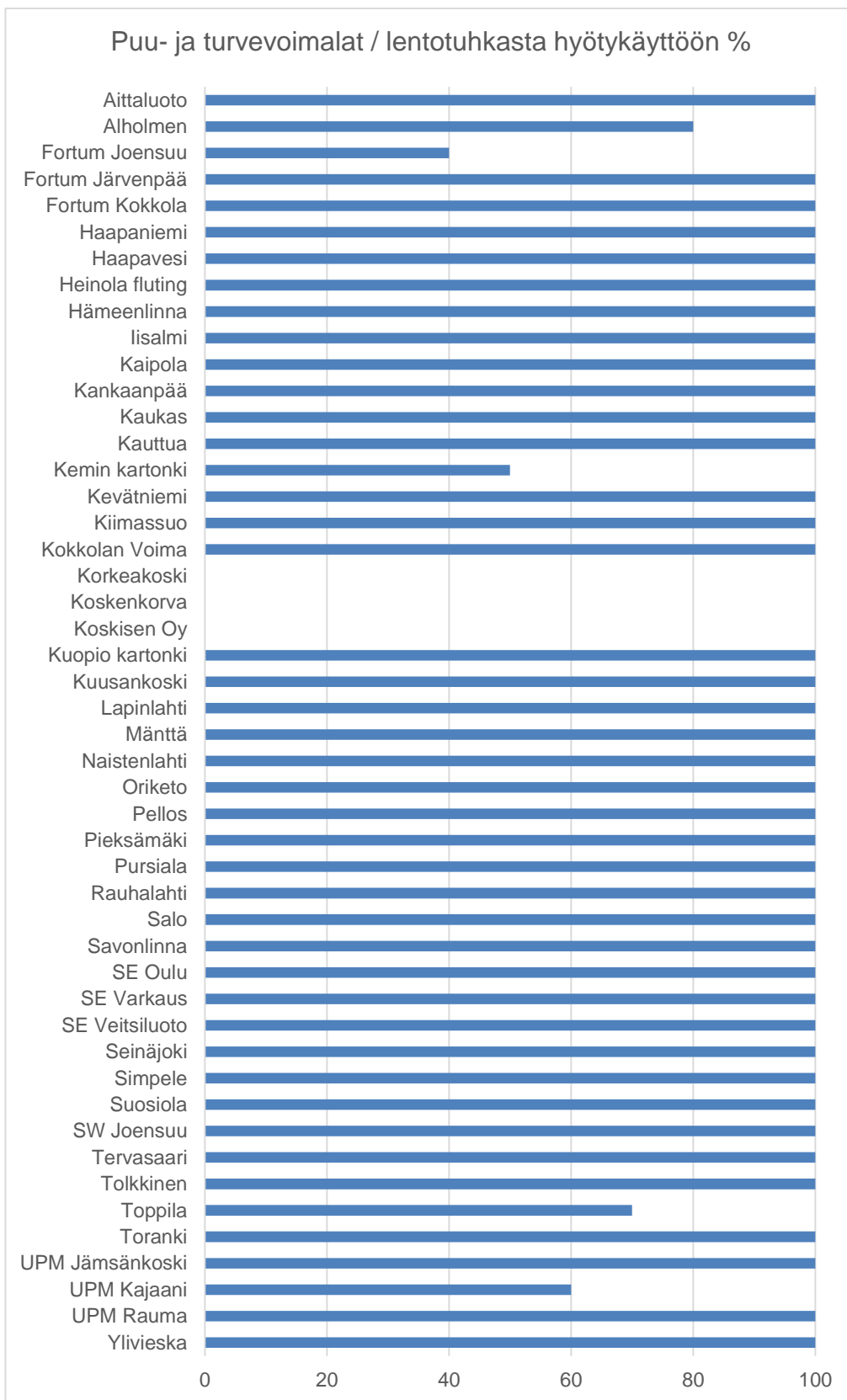


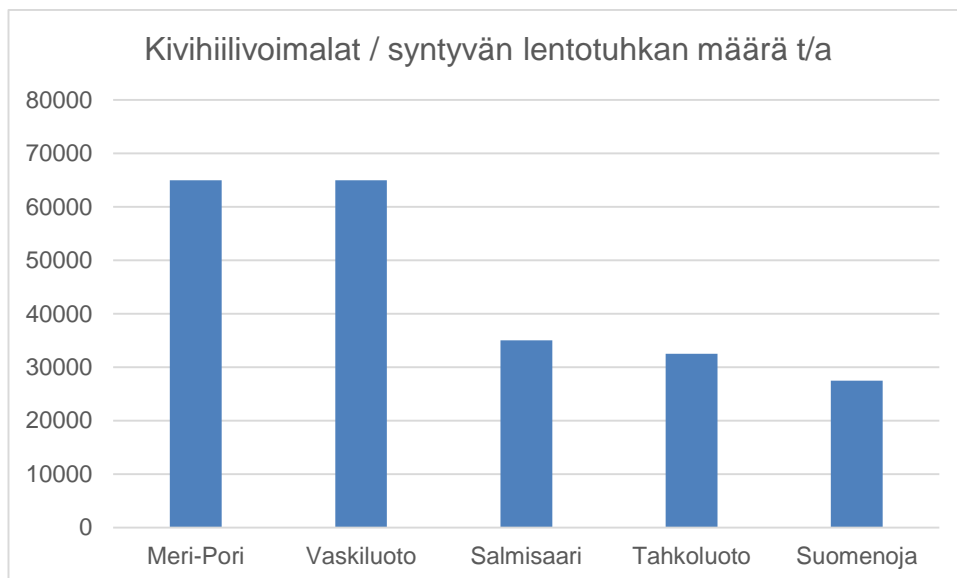
Puu- ja turvevoimaloiden haastattelut tehtiin kesällä 2015.



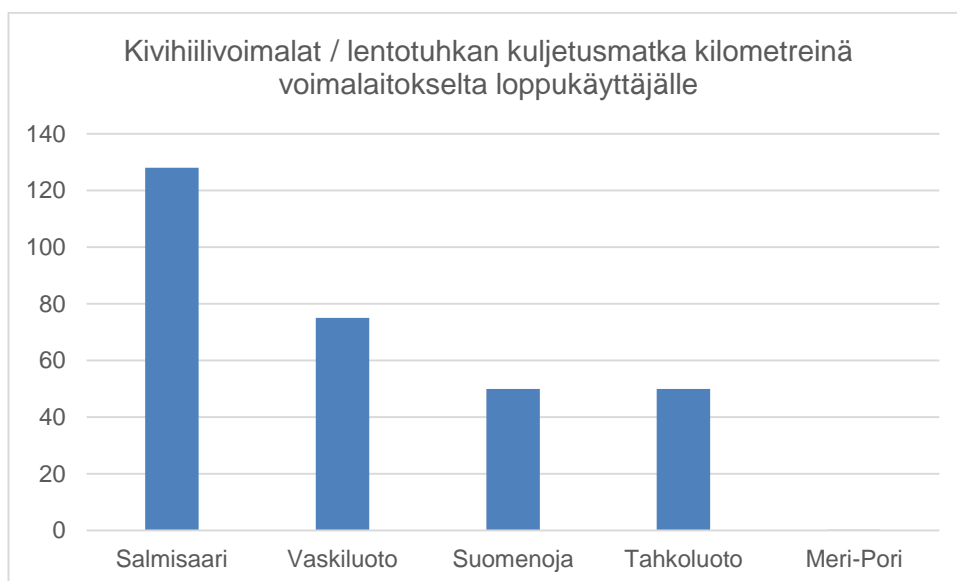
Kuljetusmatkojen keskiarvo = 57 km ja mediaani = 25 km.



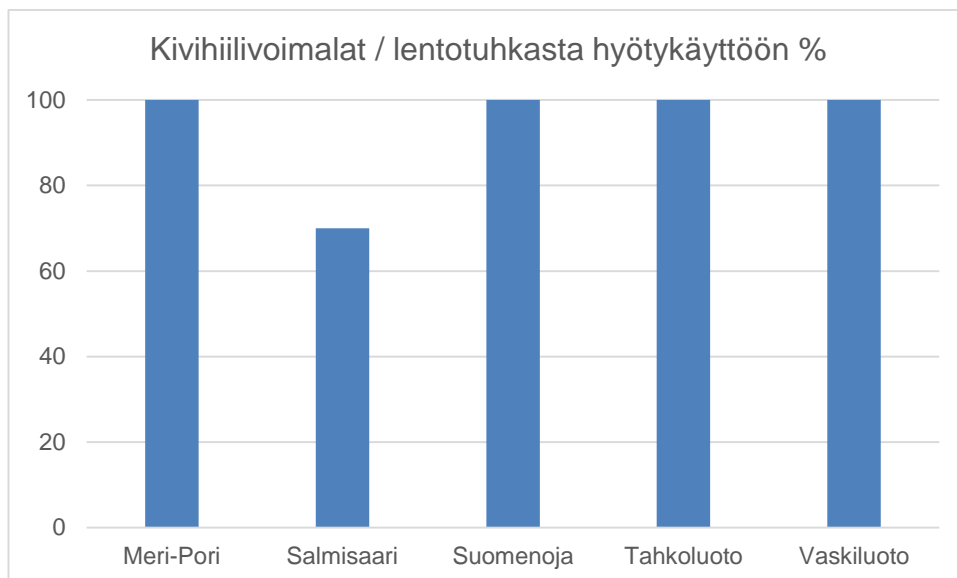




Kivihiilivoimaloiden haastattelut tehtiin kesällä 2015.



Kuljetusmatkojen keskiarvo = 61 km ja mediaani = 50 km.



**Yritys A / kuorma-auto / mallinnuksen informaatio**

- kuljetuskeikan keskimääräinen ajosuorite 25 km
- kuljetuskeikkaan käytettävä aika 1,25 h
- kuljetuskeikkoja tehdään työpäivän aikana 6 kpl
- työpäiviä tehdään vuodessa 300 kpl
- menokuorma 15,5 t
- ei paluukuormaa
  
- auton veroton hankintahinta 180 000 € (Volvo Finland Ab 22.10.2015)
- neliakselinen auto
- renkaiden määrä 12 kpl
- renkaan hinta rengastöineen 418 € (Vannetukku Oy 22.10.2015)
- auton arvonalenemisprosentti 25
- auton laskennallinen käyttöaika 5 vuotta
- auton kokonaismassa 35 t
- auton kantavuus 20 t
- polttoaineen verollinen hinta 1,21 €/l (Polttoaine.net 21.10.2015)
- kuorma-autonkuljettajan peruspalkka ilman lisiä 14,8 €/h (AKT 21.10.2015)
- välillisten palkkakustannusten kerroin 1,7
- renkaan pinnoitus rengastöineen 299 €/kpl (Euromaster ja Vianor 22.10.2015)
- renkaan kestoikä 130 000 km (Vannetukku Oy 20.10.2015)
- pinnoitusten lukumäärä 1 (Vannetukku Oy 20.10.2015)
- laskentakorko 6 %
- auton hallintokustannukset 4 % kokonaiskuluista
- auton vakuutusten listahinta 9 000 €/a (Fennia 13.11.2015)
- auton vakuutuskustannukset alennukset huomioiden 3 500 €/a (Fennia 13.11.2015)
- auton käyttövoimavero 894 €/a (Trafi 13.11.2015)
- auton katsastusmaksu 200 €/a
- auton ylläpitokustannukset 1 500 €/a
- korvauksettoman ajon määrä 1 000 km/a

**Yritys B / yhdistelmä / mallinnuksen informaatio**

- kuljetuskeikan keskimääräinen ajosuorite 486 km
- kuljetuskeikkaan käytettävä aika 7,5 h
- kuljetuskeikkoja tehdään työpäivän aikana 1 kpl
- työpäiviä tehdään vuodessa 250 kpl
- menokuorma 42 t
- paluukuorma 48 t

**Vetoauto**

- auton veroton hankintahinta 245 000 € (Volvo Finland Ab 22.10.2015)
- neliakselinen auto
- vetoautossa säiliö jonka tilavuus 27 m<sup>3</sup> (Nordic Tank Kuortane Oy 29.10.2015)
- renkaiden määrä 12 kpl
- renkaan hinta rengastöineen 418 € (Vannetukku Oy 22.10.2015)
- auton arvonalenemisprosentti 20
- auton laskennallinen käyttöaika 5 vuotta
- yhdistelmän kokonaismassa 76 t
- yhdistelmän kantavuus 54 t
- polttoaineen verollinen hinta 1,21 €/l (Polttoaine.net 21.10.2015)
- ajoneuvoyhdistelmän kuljettajan peruspalkka ilman lisiä 15,8 €/h (AKT 21.10.2015)
- välillisten palkkakustannusten kerroin 1,7
- renkaan pinnoitus rengastöineen 299 €/kpl (Euromaster ja Vianor 22.10.2015)
- renkaan kestoikä 130 000 km (Vannetukku Oy 20.10.2015)
- pinnoitusten lukumäärä 1 (Vannetukku Oy 20.10.2015)
- laskentakorko 6 %
- auton hallintokustannukset 4 % kokonaiskuluista
- auton vakuutusten listahinta 6 700 €/a (Fennia 13.11.2015)
- auton vakuutuskustannukset alennukset huomioiden 4 000 €/a (Fennia 13.11.2015)
- auton käyttövoimavero 1 402 €/a (Trafi 13.11.2015)
- auton katsastusmaksu 200 €/a
- auton ylläpitokustannukset 1 500 €/a
- korvauksettoman ajon määrä 2 000 km/a

**Perävaunu**

- perävaunun veroton hankintahinta 140 000 € (Nordic Tank Kuortane Oy 29.10.2015)
- viisiakselinen perävaunun alusta
- säiliö jonka tilavuus 43 m<sup>3</sup>

- kompressori yhdistelmän molempien säiliöiden lastaamiseen ja purkamiseen
- renkaiden määrä 18 kpl
- renkaan hinta rengastöineen 225 € (Vannetukku Oy 30.10.2015)
- perävaunun arvonalenemisprosentti 15
- perävaunun laskennallinen käyttöaika 8 vuotta
- renkaan pinnoitus rengastöineen 250 €/kpl (Euromaster 30.10.2015 ja Vianor 22.10.2015)
- renkaan kestoikä 150 000 km (Vannetukku Oy 20.10.2015)
- pinnoitusten lukumäärä 1 (Vannetukku Oy 20.10.2015)
- laskentakorko 6 %
- ei hallintokustannuksia
- perävaunun vakuutusten listahinta 3 300 €/a (Fennia 13.11.2015)
- perävaunun vakuutuskustannukset alennukset huomioiden 2 000 €/a (Fennia 13.11.2015)
- perävaunun katsastusmaksu 200 €/a
- perävaunun ylläpitokustannukset 1 000 €/a
- korvauksettoman ajon määrä 1 000 km/a

**Yhdistelmän vetoauto listahinnoilla****Pietarsaari - Naantali****täysi kuorma mepa****Toiminnot vuodessa**

keikkoja / työpäivä	1
työpäiviä / vuosi	250
ajosuorite km / keikka	854
kuljetetut tonnit / keikka	90
käytetty työaika h / keikka	13
keikkoja / vuosi	250
ajosuorite km / vuosi	213500
kuljetetut tonnit / vuosi	22500
käytetty työaika h / vuosi	3250

**Jäännösarvo ja vuosipoisto**

auton hankintahinta €	245000
renkaiden määrä kpl	12
renkaan hinta € / kpl	418
arvonalenemis %	20
auton käyttöaika / vuosi	5
renkaiden hinta €	5016
auton hankintahinta ilman renkaita €	239984
auton arvo 5 vuoden kuluttua €	78638
vuosipoisto € / vuosi	32269

**Polttoainekulut**

kuorma meno / tonnia	42
kuorma paluu / tonnia	48
auton kokonaismassa / tonnia	76
auton kantavuus / tonnia	54
auton omapaino / tonnia	22
keskimääräinen kuorma / tonnia	45
auton ja kuorman kokonaispaino / tonnia	67
polttoainekulutus litraa / 100 km	53,5

**Polttoainekustannukset**

polttoaineen hinta € / litra	0,976
kokonaisajo km / vuosi	213500
polttoainekustannukset € / vuosi	111481
polttoainekustannukset € / km	0,522

**Voiteluainekustannukset**

voiteluainekustannukset € / vuosi	13378
voiteluainekustannukset € / km	0,063

**Työkustannukset**

kuljettajan palkka € / tunti	16,15
välillisten palkkakustannusten kerroin	1,7
palkkakulut € / vuosi	52487,5
työkustannukset € / vuosi	89228,75
työkustannukset € / km	0,418

**Korjaus- ja huoltokustannukset**

korjaus- ja huoltokustannukset € / vuosi	11294
korjaus- ja huoltokustannukset € / km	0,053

**Rengaskustannukset**

renkaan pinnoituksen hinta € / kpl	299
renkaan kestoikä km	130000
pinnoituskertoja / rengas	1
renkaiden kokonaishinta €	5016
pinnoitusten hinta €	3588
renkaiden ja pinnoitusten yhteishinta €	8604
pinnoituksen antamat lisäkilometrit	104000
renkaiden kokonaiskesto km	234000
rengaskustannukset € / vuosi	7850
rengaskustannukset € / km	0,037

**Pääoman keskimääräinen vuosikorko**

laskentakorko %	6
pääoman keskimääräinen vuosikorko € / vuosi	9681
pääoman keskimääräinen vuosikorko € / km	0,045

**Vuosipoisto**

vuosipoisto € / vuosi	32269
vuosipoisto € / km	0,151

**Käyttöpääoman korko**

käyttöpääoman korko € / vuosi	968
käyttöpääoman korko € / km	0,005

**Hallintokustannukset**

auton hallintokustannukset € / vuosi	12577
auton hallintokustannukset € / km	0,059



**Vakuutus- ja liikennekustannukset**

auton vakuutukset € / vuosi	6700
käyttövoimavero € / vuosi	1402
katsastusmaksut € / vuosi	200
vakuutus- ja liikennekustannukset € / vuosi	8302
vakuutus- ja liikennekustannukset € / km	0,039

**Ylläpitokustannukset**

ylläpitokustannukset € / vuosi	1500
ylläpitokustannukset € / km	0,007

**Muuttuvat kilometrikustannukset**

muuttuvat kilometrikustannukset € / km	0,674
--	-------

**Korvaukseton ajo**

korvaukseton ajo km / vuosi	2000
korvauksettoman ajon kustannukset € / vuosi	904
korvauksettoman ajon kustannukset € / km	0,004

**Toimintaylijäämä**

työkustannukset € / vuosi	89228,75
muuttuvat kulut yhteensä € / vuosi	144003
kiinteät kulut yhteensä € / vuosi	66201
toimintaylijäämä € / vuosi	14972

**Kokonaiskustannukset**

kokonaiskustannukset € / vuosi	314405
--------------------------------	--------

**Kuljetuskustannukset**

kilometrikustannus € / km	1,47
tuntikustannus € / h	96,74
tonnikustannus € / t	13,97

**Autokuljetuksen hintalaskelma**

Lentotuhkan määrä tonnia	3000
Auton kuljettama määrä t/kuorma	42
Autolastien määrä kpl	71,4

**Siirto voimalaitokselta varastosiiloon**

Paineilman kulutus Nm <sup>3</sup>	140000
Paineilman hinta €/Nm <sup>3</sup>	0,015
Siirron hinta €	2100

**Varastointi 1**

Varastoinnin hinta €/t/kk	5
Varastointiaika kk	1
Varastointi 1:n hinta €	15000

**Lastaus**

Polttoaineenkulutus tyhjäkäynnillä l/h	9
Polttoaineen veroton hinta €/l	0,976
Polttoaineen hinta lastauksessa €/h	8,78
Lastauksen kesto aika h	1
Yhden lastauksen kulut €	8,78
Kaikkien lastauksien kulut €	627

**Autokuljetus**

Paluu 0 / hinta €/t	30,09
Paluu 50 % / hinta €/t	20,09
Mepa / hinta €/t	15,41
Paluu 0 / hinta €	90270
Paluu 50 % / hinta €	60270
Mepa / hinta €	46230

**Purku**

Polttoaineenkulutus kompressorin käytössä l/h	12
Polttoaineen veroton hinta €/l	0,976
Polttoaineen hinta purkamisessa €/h	11,71
Purkamisen kesto aika h	1,5
Yhden purkamisen kulut €	17,57
Kaikkien purkamisten kulut €	1255

**Varastointi 2**

Varastoinnin hinta €/t/kk	5
Varastointiaika kk	1
Varastointi 2:n hinta €	15000

**Siirto loppukäyttäjälle**

Siirron hinta yhdistelmällä €/t	7,61
Siirtojen hinta €	22830

## Autokuljetusten kokonaishinta €

Paluu 0	147082
Paluu 50 %	117082
Mepa	103042

## Autokuljetusten tonnihinta €/t

Paluu 0	49,03
Paluu 50 %	39,03
Mepa	34,35

**Laivakuljetuksen hintalaskelma****Siirto voimalaitoksesta varastosiiloon**

lentotuhkan määrä tonnia	3000
paineilman kulutus Nm <sup>3</sup>	140000
paineilman hinta €/Nm <sup>3</sup>	0,015
siirron kustannukset €	2100

**Varastointi 1**

varastoinnin hinta €/t/kk	5
varastointiaika kk	1
varastoinnin hinta €	15000

**Lastaus**

lastausaika vrk	1,5
lastauksen tonnihinta €/t	4,03
lastauksen kustannukset €	12090

**Merimatka**

laivan päivittäinen vuokra €/vrk	5500
matkan pituus mpk	300
laivan nopeus kn	10,5
matka-aika Pietarsaari-Naantali h	28,6
matka-aika Pietarsaari-Naantali vrk	1,2
laivan teoreettinen käyttöaika vrk	3,4
viivästyskerroin	1,2
laivan todellinen vuokra-aika vrk	4,1
laivan vuokra €	22704
laivan polttoaineenkulutus t/vrk MGO	8,3
matkan vaatima polttoaine t MGO	9,88
polttoaineen tonnihinta €/t	350
polttoaineen hinta €	3458
laivan positiointiaika vrk	0,7
positiointimatkan hinta €	5884
viikonloppuriski €	5500
merimatkan kustannukset €	37546

**Satamamaksut**

Pietarsaari €	5500
Naantali €	7500
satamamaksut yhteensä €	13000

**Tavaramaksut**

Pietarsaari €/t	1,16
Naantali €/t	1,14
tavaramaksu Pietarsaari €	3480
tavaramaksu Naantali €	3420
tavaramaksut yhteensä €	6900

**Laivakuljetus**

laivakuljetuksen kustannukset yhteensä €	57446
--	-------

**Purku**

Paineilman kulutus Nm <sup>3</sup>	110000
Paineilman hinta €/Nm <sup>3</sup>	0,015
Purkamisen kustannukset €	1650

**Varastointi 2**

varastoinnin hinta €/t/kk	5
varastointiaika kk	1
varastoinnin hinta €	15000

**Siirto loppukäyttäjälle**

Siirron hinta yhdistelmällä €/t	7,61
Siirtojen hinta €	22830

Laivakuljetuksen kokonaiskustannukset €	126116
Laivakuljetuksen tonnikustannukset €/t	42,04

**Junakuljetuksen hintalaskelma****Siirto voimalaitoksesta varastosiiloon**

lentotuhkan määrä tonnia	3000
paineilman kulutus Nm <sup>3</sup>	140000
paineilman hinta €/Nm <sup>3</sup>	0,015
siirron kustannukset €	2100

**Varastointi 1**

varastoinnin hinta €/t/kk	5
varastointiaika kk	1
varastoinnin hinta €	15000

**Lastaus**

lastauksen tonnihinta €/t	4,03
lastauksen kustannukset €	12090

**Rautatiekuljetus**

lentotuhkan ominaispaino t/m <sup>3</sup>	0,5
lentotuhkan tilavuus m <sup>3</sup>	6000
etäisyys Pietarsaari-Naantali km	448,1
rautatiekuljetuksen kustannukset €	48562

**Purku**

Paineilman kulutus Nm <sup>3</sup>	100000
Paineilman hinta €/Nm <sup>3</sup>	0,015
Purkamisen kustannukset €	1500

**Varastointi 2**

varastoinnin hinta €/t/kk	5
varastointiaika kk	1
varastoinnin hinta €	15000

**Siirto loppukäyttäjälle**

Siirron hinta yhdistelmällä €/t	7,61
Siirtojen hinta €	22830

Junakuljetuksen kokonaiskustannukset €	117082
Junakuljetuksen tonnikustannukset €/t	39,03