

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Energia- ja ympäristötekniikan osasto

DIPLOMITYÖ

**JÄTTEENPOLTON TUHKIEN KÄSITTELYTEKNIKOIDEN
YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET**

Tarkastajat: Professori TkT Mika Horttanainen
Erikoistutkija DI Margareta Wahlström

Helsingissä 22.7.2007

Kirsi Koivunen
Tilkankatu 6 C 35
00300 Helsinki

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Energia- ja ympäristötekniikan osasto

Kirsi Koivunen

Jätteenpolton tuhkien käsittelytekniikoiden ympäristövaikutukset

Diplomityö

2007

109 sivua, 17 kuvaa, 36 taulukkoa ja 8 liitettä

Tarkastajat: Professori TkT Mika Horttanainen
Erikoistutkija DI Margareta Wahlström

Hakusanat: jätteenpoltto, tuhka, käsittely, loppusijoitus, ympäristövaikutus
Keywords: incineration, residue, treatment, disposal, environmental impact

Jätteenpoltoissa syntyvät tuhkat sisältävät paljon haitta-aineita, joiden vuoksi niitä ei yleensä voida suoraan sijoittaa kaatopaikoille. Käsittelyllä pyritään parantamaan tuhkien ominaisuuksia ja vähentämään haitta-aineiden liukoisuutta. Samalla kuitenkin käsittely kuluttaa raaka-aineita ja energiaa sekä aiheuttaa päästöjä. Tuhkien käsittelyn kokonaisuhyötyjä ja -haittoja ympäristön kannalta arvioitaessa tulisikin ottaa huomioon sekä käsiteltävän tuhkan parantuneet ominaisuudet että käsittelystä aiheutuneet ympäristökuormitukset.

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää jätteenpolton tuhkien käsittelystä aiheutuvia ympäristövaikutuksia tarkastelemalla esimerkinomaisesti neljää erilaista käsittelytekniikkaa (pesua, sementtikiinteytystä, Ferrox-prosessia ja vitrifointia) sekä kahta muuta loppusijoitusvaihtoehtoa (mahdollisuutta sijoittaa tuhkat kaatopaikalle ilman käsittelyä ja kuljetamista Norjassa sijaitsevalle käsittely- ja loppusijoituslaitokselle). Tarkastelussa keskityttiin jätteenpolton ongelmallisimpiin tuhkakajakeisiin, lentotuhkaan ja savukaasujen puhdistusjätteisiin eli APC-jätteisiin. Tavoitteena oli selvittää käsittelyvaihtoehdoista syntyvät ympäristökuormitukset ns. koko niiden elinkaaren ajalta, eli huomioiden käsittelyyn tarvittavien lisäaineiden valmistuksesta, itse käsittelyprosessista sekä loppusijoituksesta aiheutuvat kuormitukset.

Tarkastelun perusteella eri käsittelyvaihtoehdot aiheuttavat hyvin erilaisia ja erisuuruisia ympäristökuormituksia. Lisäksi käsitellyn materiaalin ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti käsittelytavasta riippuen. Tarkastelluista käsittelyvaihtoehdoista suurimmat ympäristökuormitukset ilmapäästöjen osalta aiheutuivat tyypillisesti joko käsittelyyn tarvittavien raaka-aineiden valmistuksesta tai itse käsittelyprosessin energiankulutuksesta. Loppusijoituksesta sen sijaan aiheutui ympäristöhaittoja kaatopaikkarakenteiden muodostamisesta sekä maaperään vapautuvista haitta-aineista, joiden määrä riippuu tuhkan käsittelyn tehokkuudesta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Department of Energy and Environmental Technology

Kirsi Koivunen

Environmental impacts of treatment of solid waste incineration residues

Master's thesis

2007

109 pages, 17 figures, 36 tables and 8 appendixes

Examiners: Professor, D. (Tech.) Mika Horttanainen
Senior research scientist, M. Sc. (Tech.) Margareta Wahlström

Keywords: incineration, residue, treatment, disposal, environmental impact

Residues from municipal solid waste incineration (MSWI) contain environmentally harmful substances and they usually cannot be landfilled without treatment. By treating the residues their characteristics and leaching properties will be improved. However at the same time the treatment process consumes resources and energy and causes emissions. When evaluating overall benefits and disbenefits of residue treatment, both the quality of treated residue and the emissions of the treatment process, should be taken into account.

The goal of this master's thesis was to study the impacts on environment of MSWI residue treatment. This is done by comparing four treatment methods (washing, cement stabilization, Ferrox-process and vitrification) and two other disposal options (landfilling without treatment and shipping residues to disposal site in Norway). This study focuses on the most critical MSWI residues; fly ash and air pollution control residues. The aim was to study the impacts on environment of selected options from their whole life cycle, also observing emissions from treatment additive manufacturing, the actual treatment process and disposal.

A conclusion of the study is that different treatment techniques cause emissions of different types and volumes. Also the quality of treated residues varies by the method of treatment. Of the studied treatment methods the largest air emissions follow from the manufacturing of treatment additives or energy consumption of the treatment process. Disposal usually causes impacts on environment by building of the landfill structures and by leaching of harmful substances, which's amount is related to the effectiveness of the treatment process.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty talven ja kevään 2006-2007 aikana VTT:lla jätteiden hyötykäyttö -tiimissä. Työ on rahoitettu Ekokem Oy:n ympäristöstipendiraaston myöntämällä stipendillä. VTT:lla työni ohjaajinani ovat toimineet Margareta Wahlström, Jutta Laine-Ylijoki, Tommi Kaartinen sekä Paula Eskola. Kiitos koko ohjaustiimille ajankäytöstä, neuvoista ja ohjauksesta työnteon aikana. Kiitos myös työni tarkastajana toimineelle professori Mika Horttanaiselle kommentteista.

Opiskelu-urani Lappeenrannassa alkoi pienenä fuksina lähes kuusi vuotta sitten. Matkan varrella muuttuivat koulun nimi toiseksi, opintoviikot pisteiksi ja omat urasuunnitelmat päälaelleen, mutta tavoite valmistua diplomi-insinööriksi pysyi samana. Vaikka talvet tahkottiin kursseilla ja kesät töissä, ei vapaa-ajanvietto kuitenkaan päässyt kokonaan unohtumaan. Erityiskiitos siis sekä opintojen että hauskanpidon osalta kuuluukin kaikille ystäville, kavereille ja tutuille lappeen Rannassa, joiden ansiosta opiskeluaika on ollut opiskelijaelämää.

Helsingissä 22.7.2007

Kirsi Koivunen

SISÄLTÖ

KUVALUETTELO	4
TAULUKKOLUETTELO	5
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Tausta.....	8
1.2 Työn tavoite, rajaukset ja rakenne	9
2 JÄTTEENPOLTON TUHKAT	12
2.1 Poltettavat jätteet.....	12
2.2 Palamisprosessi ja polttotekniikat.....	14
2.2.1 Arinapoltto	14
2.2.2 Leijukerrospoltto.....	15
2.2.3 Muut jätteenpolttotekniikat.....	16
2.3 Savukaasut ja niiden puhdistaminen.....	17
2.4 Poltossa syntyvät kiinteät jätteet.....	19
2.4.1 Pohjatuhka ja -kuona	21
2.4.2 Lentotuhka ja savukaasujen puhdistuksessa syntyvät jätteet.....	23
3 LENTOTUHKAN JA APC-JÄTTEIDEN KÄSITTELY JA LOPPUSIJOITUS	25
3.1 Käsittelyn tavoitteet ja nykykäytäntö	25
3.2 Käsittelytekniikat	26
3.2.1 Erotusmenetelmät	26
3.2.2 Kiinteytysmenetelmät	27
3.2.3 Stabilointimenetelmät	28
3.2.4 Termiset käsittelymenetelmät	29
3.3 Loppusijoitus	30
3.3.1 Kaatopaikat	30
3.3.2 Loppusijoitus hyötykäyttökohteisiin.....	31

4	TUHKIEN YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTI.....	33
4.1	Elinkaariarvioinnin periaatteet.....	33
4.2	Tuhkien elinkaari ja ympäristökuormitusten tarkastelu.....	35
5	KÄSITTELYTEKNIKOIDEN YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN MÄÄRITTÄMINEN	38
5.1	Arvioinnin toteutus	38
5.1.1	Käsittelyn elinkaaren aikaisten ympäristökuormitusten arviointi	39
5.1.2	Loppusijoituksen ympäristökuormitusten arviointi	42
5.1.3	Ympäristönäkökohtien yhteenveto ja arviointi.....	44
5.2	Sijoittaminen kaatopaikalle ilman käsittelyä	46
5.3	Pesu.....	47
5.3.1	Menetelmän toimintaperiaate ja käyttö.....	47
5.3.2	Pesuprosessin elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset.....	48
5.3.3	Pestyn tuhkan ominaisuudet ja loppusijoitus.....	50
5.3.4	Yhteenveto pesun ympäristökuormituksista.....	52
5.4	Sementtikiinteytys	54
5.4.1	Menetelmän toimintaperiaate ja käyttö.....	54
5.4.2	Sementin valmistus ja kuljetus	55
5.4.3	Sementtikiinteytyksen elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset.....	57
5.4.4	Sementtiin kiinteytetyn tuhkan ominaisuudet ja loppusijoitus.....	58
5.4.5	Yhteenveto sementtikiinteytyksen ympäristökuormituksista.....	59
5.5	Ferrox-prosessi.....	62
5.5.1	Menetelmän toimintaperiaate ja käyttö.....	62
5.5.2	Ferrox-prosessin elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset.....	63
5.5.3	Ferrox-tuotteen ominaisuudet ja loppusijoitus	66
5.5.4	Yhteenveto Ferrox-prosessin ympäristökuormituksista	68
5.6	Vitrifointi	70
5.6.1	Menetelmän toimintaperiaate	70
5.6.2	Vitrifioinnin elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset	72
5.6.3	Vitrifioidun tuotteen ominaisuudet ja loppusijoitus	74
5.6.4	Yhteenveto vitrifioinnin ympäristökuormituksista.....	75

5.7	Kuljetus Norjaan loppusijoituslaitokselle.....	77
5.7.1	Käsittely- ja loppusijoitusprosessi	77
5.7.2	Norjaan kuljetuksen ympäristökuormitukset.....	78
6	KÄSITTELYTEKNIKOIDEN YMPÄRISTÖNÄKÖKOHDAT	80
6.1	Käsittelytekniikoiden elinkaaren aikaisten ympäristökuormitusten vertailu ja tulosten arviointi	80
6.1.1	Elinkaaren aikaisten ympäristökuormitusten vertailu.....	80
6.1.2	Lähtötietojen luotettavuuden arviointi.....	82
6.2	Käsittelyvaihtoehtojen ympäristönäkökohtien arviointi.....	84
6.2.1	Sijoittaminen kaatopaikalle ilman käsittelyä	84
6.2.2	Pesu.....	86
6.2.3	Sementtikiinteytys	87
6.2.4	Ferrox-prosessi.....	88
6.2.5	Vitrifiointi	89
6.2.6	Kuljettaminen Norjaan käsittely- ja loppusijoituslaitokselle.....	90
6.2.7	Yhteenvedo ympäristönäkökohdista.....	91
6.3	Tulosten tarkastelu ja pohdinta	92
6.4	Jatkotutkimusaiheet	95
7	YHTEENVETO.....	97
	LÄHDELUETTELO	101

LIITTEET

KUVALUETTELO

Kuva 1. Sekajätteen koostumus Suomessa	12
Kuva 2. Arinakattilan rakenne	14
Kuva 3. Leijukerroskattilan rakenne.....	16
Kuva 4. Kiinteiden aineiden massavirrat sekajätteen massapolttolaitoksella.....	19
Kuva 5. Kiinteiden aineiden massavirrat käsiteltyä yhdyskuntajätettä polttavassa leijukerroskattilassa	20
Kuva 6. Jätteenpolton tuhkien elinkaari pääpiirteittäin	36
Kuva 7. Pesun toimintaperiaate	47
Kuva 8. Pesun elinkaaren vaiheiden osuudet ympäristökuormituksista.....	53
Kuva 9. Sementtikiinteytyksen toimintaperiaate	55
Kuva 10. Sementtikiinteytyksen elinkaaren vaiheiden osuus ympäristökuormituksista60	
Kuva 11. Ferrox-prosessin toimintaperiaate	62
Kuva 12. Ferrox-prosessin elinkaaren vaiheiden osuus ympäristökuormituksista....	69
Kuva 13. Vitrifioinnin toimintaperiaate.....	71
Kuva 14. Vitrifioinnin elinkaaren vaiheiden osuus ympäristökuormituksista	76
Kuva 15. Langøyan stabilointiprosessi	78
Kuva 16. Käsittelytekniikoiden ympäristökuormitusten vertailu	81
Kuva 17. Käsittelyvaihtoehtojen kuormitus ja lähtötietojen luotettavuus.....	83

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Jätepolttoaineiden ja kivihiilen ominaisuuksia.....	13
Taulukko 2. Arvio tulevaisuudessa syntyvistä tuhka- ja APC-jättemääristä Suomessa	21
Taulukko 3. Jätteenpolton tuhkien määriä Euroopassa	21
Taulukko 4. Pohjatuhkan ja –kuonan ominaispiirteitä	22
Taulukko 5. Pohjatuhkan, lentotuhkan ja APC-jätteiden haitta-ainepitoisuuksia	24
Taulukko 6. Lentotuhkien ja APC-jätteiden ominaispiirteitä.....	24
Taulukko 7. Käsittelytekniikoiden arviointitaulukko	45
Taulukko 8. Erään jätteenpolton tuhkan ominaisuuksia	46
Taulukko 9. Pesusta syntyvien jätevesien ominaisuuksia	49
Taulukko 10. Pesun energiankulutuksen ympäristökuormitukset	50
Taulukko 11. Liukoisuus tuhkasta ennen ja jälkeen pesun.....	50
Taulukko 12. Pestyn tuotteen loppusijoituksen ympäristökuormitukset	51
Taulukko 13. Pesuprosessin elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset.....	52
Taulukko 14. Ympäristökuormitukset valmistettaessa 300 kg sementtiä.....	56
Taulukko 15. Kiinteytysprosessin energiankulutuksen ympäristökuormitukset	58
Taulukko 16. Kiinteytetyn tuhka-sementtimatriisin liukoisuusominaisuudet	58
Taulukko 17. Sementtikiinteytetyn tuhkan loppusijoituksen ympäristökuormitukset	59
Taulukko 18. Sementtikiinteytyksen elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset	60
Taulukko 19. Ferrosulfaatin kuljetuksesta aiheutuvat ympäristökuormitukset	64
Taulukko 20. Ferrox-prosessista syntyvien jätevesien ominaisuudet.....	65
Taulukko 21. Ferrox-prosessin energiankulutuksesta aiheutuvat ympäristökuormitukset	66
Taulukko 22. Liukoisuus ennen ja jälkeen Ferrox-käsittelyn.....	67
Taulukko 23. Ferrox-tuotteen loppusijoituksen ympäristökuormitukset.....	68
Taulukko 24. Ferrox-käsittelyn elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset.....	68
Taulukko 25. Kvartsin louhinnasta ja kuljetuksesta aiheutuvat ympäristökuormitukset	73
Taulukko 26. Vitrifioinnin energiankulutuksen ympäristökuormitukset	73
Taulukko 27. Vitrifioidun tuotteen liukoisuusominaisuuksia.....	74
Taulukko 28. Vitrifioidun materiaalin loppusijoituksen ympäristökuormitukset	74
Taulukko 29. Vitrifioinnin elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset.....	75
Taulukko 30. Laivakuljetuksesta aiheutuva ympäristökuormitus	79

Taulukko 31. Arviointitaulukko kaatopaikkasijoittamiselle ilman käsittelyä	85
Taulukko 32. Pesu-menetelmän arviointitaulukko	86
Taulukko 33. Sementtikiinteytyksen arviointitaulukko.....	87
Taulukko 34. Ferrox-prosessin arviointitaulukko.....	88
Taulukko 35. Vitrifioinnin arviointitaulukko	89
Taulukko 36. Norjaan kuljettamisen arviointitaulukko	90

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Alaindeksit

t käsiteltävä tuhka, sisältäen lentotuhkan ja APC-jätteet

Lyhenteet

APC	savukaasujen puhdistus (Air Pollution Control)
K	maaperän vedenläpäisevyys
LCA	elinkaariarviointi (Life Cycle Analysis)
p-%	painoprosentti
REF	syntypaikkalajittelusta yhdyskuntien energiajätteestä valmistettu kierrätyspolttoaine (Recovered/Recycled Fuel)
RDF	yhdyskuntien sekajätteestä mekaanisella käsittelyllä valmistettu kierrätyspolttoaine (Refuse Derived Fuel)
SRF	kansainvälisesti käytetty termi REF:lle (Solid Recovered Fuel)
S/S	kiinteytys- ja stabilointi (solidification/stabilization)
TOC	orgaanisen hiilen kokonaismäärä
L/S	nesteen ja kuiva-aineen suhde, liquid to solid -ratio [l/kg]
t	tonni, 1000 kg
VNa	valtionneuvoston asetus
VNp	valtionneuvoston päätös
VOC	haihtuvat orgaaniset yhdisteet

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Jätteitä polttamalla voidaan vähentää kaatopaikoille sijoitettavan materiaalin määrää sekä samalla hyödyntää jätteiden sisältämä energia muuntamalla se sähköksi tai lämmöksi (Chandler et al. 1997, 59). Poltossa jätteiden tilavuus pienenee noin 10 %:in alkuperäisestä (Lundtorp 2001, 3). Tämä jäljelle jäävä osuus koostuu pääosin pohja- ja lentotuhkasta sekä savukaasujen puhdistuksessa syntyvistä kiinteistä jätteistä, joista käytetään nimitystä APC (Air Pollution Control) -jätteet (van der Sloot et al. 2001, 753). Nämä jakeet sisältävät korkeita pitoisuuksia haitta-aineita, joista merkittävimpiä ovat suolat ja metallit (Sabbas et al. 2003, 63). Verrattuna perinteisten polttoaineiden poltossa syntyviin tuhkiin, jätteenpolton tuhkien haitta-ainepitoisuudet ovat huomattavasti korkeampia johtuen poltettavien jätteiden sisältämisestä materiaaleista. Usein näiden haitallisten yhdisteiden pitoisuudet ja liukoisuus jätteenpoltossa syntyvissä tuhissa ja savukaasujen puhdistuksen jätteissä ovat niin suuria, ettei niitä voida hyötykäyttää tai sijoittaa kaatopaikoille ilman käsittelyä (ISWA 2003b, 6).

Jätteenpoltossa syntyville tuhille ja savukaasujen puhdistuksen jätteille on kehitetty lukuisia erilaisia käsittelytekniikoita, joilla joko pyritään poistamaan haitta-aineita tai saattamaan ne mahdollisimman pysyvään muotoon. Useissa menetelmissä tuhkia käsitellään vesiliuoksilla tai niihin sekoitetaan lisäaineita, joiden avulla haitallisten aineiden vapautumista loppusijoituskohteessa pyritään vähentämään. Käsittelytekniikkaa valittaessa tulee tavoiteltujen tuhkan ominaisuuksien lisäksi ottaa huomioon myös käsittelyssä tarvittavien raaka-aineiden ja energiankulutus sekä siinä syntyvät uudet jätevirrat, kuten savukaasut ja jätevedet (van der Sloot et al. 2001, 760). Näillä sivuvirroilla ja -prosesseilla voi olla merkittäviä vaikutuksia arvioitaessa tuhkien käsittelyllä saavutettavia ympäristöhyötyjä ja -haittoja kokonaisuudessaan.

Suomessa tuotettiin vuonna 2005 noin 2,4 miljoonaa tonnia yhdyskuntajätettä. Tästä määrästä sijoitettiin kaatopaikoille noin 60 % ja energiana hyödynnettiin noin 9 %. Yleisimmin vielä vuonna 2005 yhdyskuntajätettä poltettiin rinnakkaispolttona yhdessä tavanomaisten polttoaineiden kanssa. Noin 50 000 tonnia jätettä, eli 2 % yhdyskuntajätteen kokonaismäärästä, poltettiin erillisillä jätteenpolto- ja ongelmajätelaitoksilla. (Tilastokeskus 2006) Jät-

teiden energiakäyttö on Suomessa perustunut pitkään juuri rinnakkaispolttoon, jolla on saavutettu hyvä laitoksen kokonaishyötysuhde sekä pystytty toimimaan taloudellisesti kilpailukykyisesti (Vesanto 2006, 13). Rinnakkaispolttolaitosten ohella maassamme toimiikin tällä hetkellä ainoastaan yksi varsinainen yhdyskuntajätteiden polttolaitos. Vuoden 2005 lopussa voimaan astunut uusi jätteenpolttoa säätelevä lainsäädäntö (VNa 15.3.2003/362) asettaa tiukkoja päästövaatimuksia myös jätteitä rinnakkaispolttona hyödyntäville laitoksille. Tämän vuoksi monet laitokset lopettivat rinnakkaispolton ja jätteiden polton kokonaismäärät samalla pienenivät (Vesanto 2006, 14). Uudessa jätelainsäädännössä puolestaan asetetaan tiukkoja velvoitteita kaatopaikoille sijoitettavan biohajoavan jätteen määrän vähentämiseksi ja hyötykäytön lisäämiseksi (Myllymaa et al. 2006, 5). Lisäksi ehdotus uudeksi valtakunnalliseksi jätesuunnitelmaksi painottaa jätteenpolton roolia ja sen ehdottamien tavoitteiden toteutuessa vuonna 2016 käsiteltäisiin Suomessa 31 % syntyvästä yhdyskuntajätteestä polttamalla (Huhtinen et al. 2007, 97-98). Näin ollen jätteenpolton oletetaan lisääntyvän huomattavasti jo lähivuosina. Uusien polttolaitosten rakentamiseksi on käsitellyssä lukusia ympäristölupahakemuksia ja vastoinikäymisistä huolimatta uusien laitosten rakentaminen tulee lisääntymään lähiaikoina. Polton lisääntyessä myös siinä syntyvien tuhkien ja APC-jätteiden määrä sekä tarve niiden käsittelylle ja loppusijoitukselle lisääntyvät.

Monissa maissa koko jätehuoltojärjestelmän ympäristövaikutuksia ja erilaisten toimintamallien eroja on tutkittu elinkaarianalyysien avulla. Näistä analyyseistä tuhkien käsittely on rajattu usein tarkastelun ulkopuolelle sen monimutkaisuuden ja vähän saatavilla olevan tutkimustiedon vuoksi. Tuhkien käsittelyyn ja hyödyntämiseen keskittyvissä tutkimuksissa on tarkasteltu lähinnä pohjatuhkan käyttöä maarakentamisessa tai haitta-aineiden liukenevista maaperään. Tuhkien käsittelymenetelmien ympäristövaikutuksista on sen sijaan saatavilla vain vähän tutkimustietoa. Myöskään tutkimuksia eri käsittelymenetelmien eroista arvioiden niiden kokonaisvaikutuksia ympäristöön ei ole esitetty.

1.2 Työn tavoite, rajaukset ja rakenne

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää jätteenpolton tuhkien käsittelyn ympäristövaikutuksia. Tarkoituksena on osoittaa esimerkkitapausten avulla erilaisten käsittelytekniikoiden ympäristön kannalta keskeiset tekijät sekä vertailla eri käsittelyvaihtoehtojen koko-

naisvaikutuksia ympäristöön. Ympäristövaikutukset arvioidaan polttolaitokselta kerättävästä tuhkasta loppusijoitukseen asti. Tarkastelussa huomioidaan eri käsittelymenetelmien kyky vähentää tuhkista aiheutuvia ympäristöriskejä, käsittelyssä tarvittavien raaka-aineiden hankinnasta ja käsittelyn energiankulutuksesta aiheutuvat ympäristöhaitat sekä käsittelyprosessissa syntyvien rejektien ja sivuvirtojen määrä sekä mahdollinen jatkokäsittelyn tarve.

Työ toteutettiin VTT:lla jätteiden hyötykäyttö -tiimissä osana Ekotrash-hanketta, ja työ on rahoitettu Ekokem Oy:n ympäristöstipendirahaston myöntämällä stipendillä.

Työssä keskitytään tarkastelemaan yhdyskuntajätteiden polton lentotuhkaa ja savukaasujen puhdistuksessa syntyviä jätteitä. Toisin sanoen poltossa syntyvistä kiinteistä jätevirroista rajataan tarkastelun ulkopuolelle käsittelyn ja loppusijoituksen kannalta vähemmän ongelmallinen pohjatuhka. Koska käsittelytekniikoita on olemassa lukuisia erilaisia, valittiin niistä tarkasteluun neljä: pesu, sementtikiinteytys, Ferrox-prosessi sekä vitrifikaatio. Lisäksi työssä tarkastellaan mahdollisuuksia sijoittaa tuhkat kaatopaikalle ilman käsittelyä tai kuljettaa ne Norjassa sijaitsevaan käsittely- ja loppusijoituslaitokseen.

Työn ensimmäisissä luvuissa tarkastellaan tuhkien muodostumista ja erilaisia käsittelyvaihtoehtoja kirjallisuuden perusteella. Jäljempänä työssä keskitytään valittujen käsittelyvaihtoehtojen ympäristökuormitusten laskentaan ja arviointiin. Työn alussa luvussa kaksi käsitellään jätteenpolttoprosessia ja tuhkien muodostumista edeten poltettavien jätteiden koostumuksesta eri polttotekniikoiden kautta savukaasujen puhdistusmenetelmiin, jotta voidaan ymmärtää missä polttoprosessin osissa tuhkia muodostuu ja mitkä tekijät vaikuttavat niiden ominaisuuksiin. Samalla tarkastellaan poltossa tyypillisesti syntyviä tuhkamääriä sekä ominaisuuksia, jotka ovat olennaisia käsittelyn ja loppusijoituksen kannalta. Luvussa kolme keskitytään tarkastelemaan lentotuhkan ja APC-jätteiden käsittelyn nykytilannetta eri maissa sekä erilaisia käsittelytekniikoita. Tämän lisäksi käydään läpi näiden jakeiden loppusijoittamisessa huomioitavia seikkoja. Luvussa neljä käsitellään yleisesti elinkaariarvioinnin toteutusperiaatteita, sekä sitä miten tuhkien käsittelyn ympäristökuormituksia voidaan arvioida ja miten tarkastelussa voidaan soveltaa elinkaariarviointia. Valittujen käsittelyvaihtoehtojen ympäristökuormitusten tarkastelu suoritetaan luvussa viisi, jossa ensin määritetään arviointiperiaatteet. Tämän jälkeen käydään läpi kunkin tarkasteltavan vaihtoehdon toiminta sekä aiheutuvat ympäristökuormitukset. Eri käsittelyvaihtoehtojen ympäris-

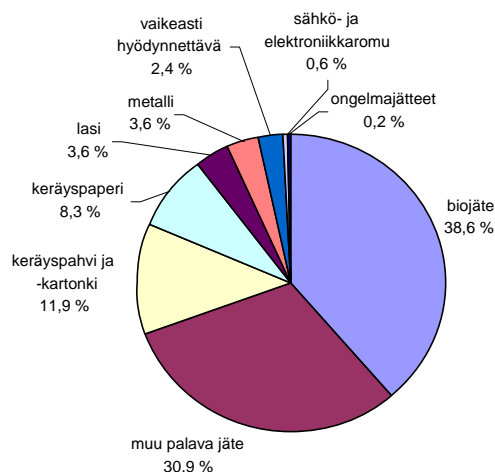
tökuormituksia vertaillaan luvussa kuusi, jossa samalla arvioidaan tarkastelun onnistumista ja nostetaan esille mahdollisia työnteon aikana havaittuja jatkotutkimusaiheita jätteenpolton tuhkien käsittelyyn liittyen. Työn lopussa luvussa seitsemän esitetään yhteenveto työn tuloksista.

2 JÄTTEENPOLTON TUHKAT

Jättemateriaalien sisältämät aineet rikastuvat poltossa jäljelle jääviin tuhkiin, minkä vuoksi tuhkien käsittelyn kannalta on tärkeää tuntea poltettavan jätteen ominaisuudet (Chandler et al. 1997, 15). Myös polttotekniikalla ja varsinkin savukaasujen puhdistusmenetelmällä on merkittävä vaikutus poltossa aiheutuvien kiinteiden jätteiden ominaisuuksiin ja määriin.

2.1 Poltettavat jätteet

Yhdyskuntajätteiden koostumus ja ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi niiden alkuperän mukaan (Chandler et al. 1997, 17). Kuvassa 1 on esitetty Suomessa kerätyn sekajätteen koostumus hyötykäyttöön soveltuvuuden mukaan. Sekajätteestä noin 31 % on polttoon soveltuvaa jätettä sisältäen muun muassa muoveja, tekstiilejä ja puuta (YTV 2004, 69).



Kuva 1. Sekajätteen koostumus Suomessa (YTV 2004, 68-69)

Jätteenpoltto voidaan karkeasti jakaa sekajätteen ja kierrätyspolttoaineiden polttoon. Suomessa puhutaan usein erityisesti syntypaikkalajittelusta sekajätteestä, jos jätteistä on erotettu kierrätykseen kelpaavia ja palamattomia materiaaleja jo ennen keräystä niiden syntypaikalla kotitalouksissa ja yrityksissä. Syntypaikkalajittelulla voidaan tehostaa materiaalien kierrätystä sekä parantaa poltettavan jätejakeen laatua. (Wilén et al. 2004, 9) Sekajätettä voidaan polttaa myös ns. massapolttona, jolloin sekajätettä ei käsitellä ennen polttoa lukuun ottamatta hyvin suurten esineiden poistoa (Brereton 1996, 227). Kierrätyspolttoaineilla sen sijaan tarkoitetaan polttokelpoisista, kiinteistä ja kuivista syntypaikkalajitelluista

jätteistä mekaanisella käsittelyllä valmistettuja polttoaineita. Niistä Suomessa käytetään yleisesti nimitystä REF (recovered/recycled fuel), kun raaka-aineena on erilliskerätty energiajäte. Kansainvälisesti käytetympiä lyhenteitä jäteperäisistä kierrätyspolttoaineista ovat RDF (refuse derived fuel) ja SRF (solid recovered fuel). (Ympäristöministeriö 2003, 10)

Polton kannalta jätteiden ominaisuuksista tärkeimmät ovat niiden kemiallinen ja fysikaalinen koostumus, kuten partikkelikoko, sekä termiset ominaisuudet, kuten lämpöarvo ja kosteus (European Commission 2006, 6). Tuhkien kannalta sen sijaan on olennaista poltettavien jätteiden kemiallinen koostumus sekä poltossa reagoimattomat aineet. Jätteet sisältävätkin usein huomattavan määrän juuri näitä inerttejä, poltossa palamattomia aineita, kuten metalleja, lasia tai keramiikkaa (Chandler et al. 1997, 17). Taulukossa 1 on esitetty tietoja jäteperäisten polttoaineiden ominaisuuksista ja kemiallisesta koostumuksesta, sekä vertailua helpottamaan vastaavat tiedot kivihiilestä.

Taulukko 1. Jätepolttoaineiden ja kivihiilen ominaisuuksia (Enprima 2004, liite 2)

	REF	syntypaikkalajiteltu polttokelpoinen jäte	kivihiili
kosteus (%)	10-35	25-50	10
lämpöarvot (MJ/kg)			
- tehollinen kuiva-aineessa	18-25	15-22	26-29
- tehollinen saapumistilassa	12-22	9-15	23-27
tuhkapitoisuus (%)	3-15	10-30	14-15
rikki (%)	0,05-0,4	0,05-0,6	0,3-0,8
kloori (%)	0,05-1	0,1-1,5	0,05-0,1
arseeni (mg/kg)	3-30	3-40	3-7
kadmium (mg/kg)	<20	<30	0,06-0,8
elohopea (mg/kg)	<0,5	<0,6	0,01-1
kromi (mg/kg)	20-300	20-400	3-29
kupari(mg/kg)	10-1000	10-1000	-
lyijy (mg/kg)	<100	<100	1-30

Taulukon tiedoista voidaan huomata, että jäteperäiset polttoaineet sisältävät huomattavasti enemmän raskasmetalleja kuin kivihiili. Rikkipitoisuus jätteissä sen sijaan on kivihiieltä pienempi. Jätepolttoaineiden sisältämät pitoisuudet kuitenkin vaihtelevat huomattavasti riippuen niiden esikäsittelystä ja keräyslähdeistä. REF verrattuna vähemmän käsiteltyyn jättejakeeseen on ominaisuuksiltaan homogeenisempi sekä korkeamman lämpöarvon omaava polttoaine. REF:n poltossa myös syntyvän tuhkan määrä on pienempi, savukaasujen ja lentotuhkan hiilipitoisuudet alhaisemmat sekä poltosta aiheutuu vähemmän haitallisia päästöjä. (Chang et al. 1998, 41)

2.2 Palamisprosessi ja polttotekniikat

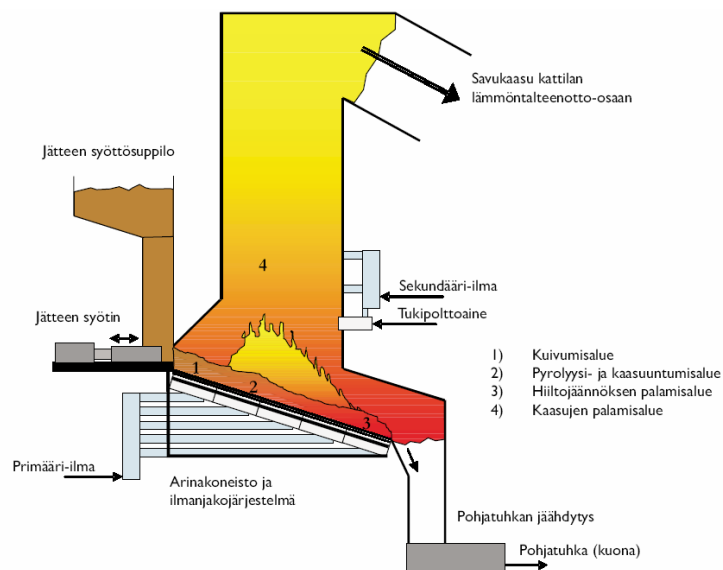
Jättemateriaalin palaminen voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin (Saastamoinen 2002, 186-211; European Commission 2006, 1):

- 1) kuivuminen: jätteen sisältämät haihtuvat yhdisteet (esimerkiksi vesi ja hiilivedyt) purkaantuvat noin 100-300 °C –lämpötilassa
- 2) pyrolyysi: kiinteä orgaaninen aines muuntuu kaasumaiseen muotoon
- 3) jäännöshiilen palaminen: kaasuuntuvien aineiden haihduttua jäljelle jäänyt hiili palaa
- 4) kaasujen hapettuminen: edellisissä vaiheissa syntyneet palavat kaasut hapettuvat savukaasujen lämpötilan ollessa noin 800-1450 °C:tta

Poltossa jätteen sisältämät orgaaniset aineet hapettuvat pääasiassa vedeksi, hiilidioksidiksi ja hiilimonoksidiksi. Jätteen sisältämät muut aineet, kuten epäorgaaniset yhdisteet sekä mineraalit, voivat poltossa joko pysyä kiinteinä partikkeleina ja jäädä tuhkavirtoihin, höyrystyä ja kulkeutua savukaasuissa kunnes yhdistyvät suurempiin partikkeleihin tai poistua sellaisenaan savukaasujen mukana. (Chandler et al. 1997, 41)

2.2.1 Arinapoltto

Maailmalla yleisimmin jätteenpolttoon käytetty kattilatyyppeä on arinakattila (European Commission 2006, 35), jonka rakenne on esitetty kuvassa 2.



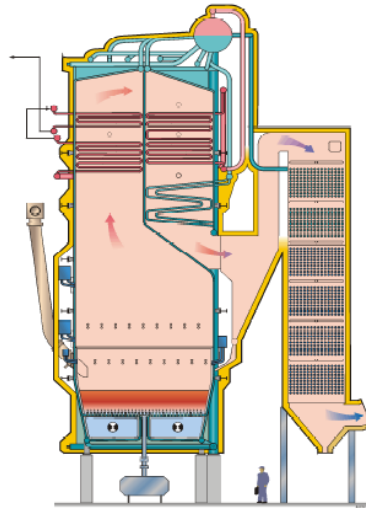
Kuva 2. Arinakattilan rakenne (Vesanto 2006, 31)

Arinat ovat kattilan pohjalle sijoitettavia polttolaitteita, joiden päällä kiinteää polttoainetta poltetaan joko paikallaan pysyvänä tai hitaasti liikkuvana kerroksena (Huhtinen et al. 2000, 146). Yksinkertaistetusti polttoaine syötetään arinalle toiselta reunalta ja tuhka poistuu arinan toiselta reunalta (Huhtinen et al. 2000, 152). Arinan eri palamisvyöhykkeillä syntyvät savukaasut palavat arinan yläpuolella korkeassa lämpötilassa. Karkea tuhka ja jätteen sisältämät palamattomat materiaalit poistuvat pohjakuonana. Tulipesästä poistuvat savukaasut sisältävät paljon hienojakoista tuhkaa sekä tulipesässä höyrystyneitä epäorgaanisia aineita. Höyrystyneet aineet pyritään savukaasujen esijäähdytyskammiossa tiivistämään kiinteiksi partikkeleiksi, jotta ne eivät tartu lämmönsiirtimiin. Osa näistä kiinteätyneistä partikkeleista ja tuhkasta erottuu esijäähdytyksessä ja kattilassa muodostaen kattilatuhkaa, joka poistetaan kattilan pohjalta. (Vesanto 2006, 30)

Arinatekniikka sopii monenlaisen jätteen polttoon, koska se kestää jätteen kosteuden, lämpöarvon ja tuhkapitoisuuden vaihtelua. Tavanomaiselle yhdyskuntajätteelle riittää käsittelyksi ennen arinaan syöttöä hyvin suurten kappaleiden rikkominen pienemmiksi sekä suurten metalliesineiden poisto. Kiinteän yhdyskuntajätteen lisäksi arinoilla voidaan polttaa teollisuuden jätteitä, jätevedenpuhdistamoiden lietteitä sekä sairaalajätteitä. Ongelmajätteen, nestemäisten, jauhemaisten tai sulavien jätteiden polttoon arinakattilat eivät kuitenkaan sovellu. (European Commission 2006, 35; Vesanto 2006, 30)

2.2.2 Leijukerros poltto

Toinen yleisesti jätteidenkin poltossa käytetty kattilatyyppeä on leijukerroskattila, jonka rakenne on esitetty kuvassa 3. Leijukerroskattilassa jäte palaa hiekan ja tuhkan muodostamassa kerroksessa, eli pedissä, jota leijutetaan tulipesän alaosaan syötettävällä ilmavirralla. Polttoaine sekoittuu pedissä koko ajan, mikä tehostaa kaasujen ja lämmön siirtoa. Näin ollen leijukerroskattiloissa voidaan polttaa myös kosteita ja huonolaatuisia polttoaineita sekä seospolttona eri polttoaineita yhtäaikaaisesti. Jätteet on ennen kattilaan syöttöä kuitenkin murskattava leijutukseen sopivaan palakokoon, yleensä noin 100 mm:in. Petimateriaalina käytetään tyypillisesti hiekkaa sekä tuhkaa, jonka osuus jätteenpoltossa voi olla suuri. (Huhtinen et al. 2000, 153; Myllymaa et al 2006, 22; Vesanto 2006, 31)



Kuva 3. Leijukerroskattilan rakenne (Helynen 2007)

Leijukerroskattilat jaetaan kahteen päätyyppiin: leijupeti- ja kiertopetikattiloihin. Leiju- eli kuplapetitekniikassa tulipesästä poistuvien savukaasujen nopeus on riittävän alhainen, ettei petimateriaali poistu savukaasujen mukana. Tuhka poistetaan kattilasta päästämällä hiekkaa tulipesästä ja seulomalla se, jolloin karkea kuona saadaan erotettua. Puhdistettu hiekka palautetaan tulipesään. Sintraantuneen tuhkan poisto kattilasta on hankalaa, joten pedin lämpötila pidetään yleensä niin alhaisena, ettei tuhka pääse sulamaan. Hienojakoinen tuhka jauhautuu leijupedissä ja poistuu savukaasujen mukana tulipesästä. Myös jauhautunutta hiekkaa poistuu savukaasuvirrassa. Ne erotetaan savukaasuista kattilassa tai savukaasujen puhdistuksessa. Kiertopetikattiloissa sen sijaan savukaasujen virtausnopeus on niin suuri, että merkittäviä määriä petimateriaalia poistuu niiden mukana tulipesästä. Petimateriaali ja palamaton polttoaine erotetaan savukaasuista syklonilla ja palautetaan tulipesään. Hienojakoinen tuhka, joka ei erotu syklonissa savukaasuista, poistuu kattilasta lentotuhkana ja erotetaan erillisillä järjestelmillä savukaasuista. Polttoaineen sekoittuminen on kiertopetikattilassa voimakasta, jonka takia palaminen on hyvin tehokasta ja kiertopetikattilat soveltuvat myös hitaasti hapettuville polttoaineille ja jätteille. (Huhtinen et al. 2000, 158-161; Vesanto 2006, 31-33)

2.2.3 Muut jätteenpolttotekniikat

Muita jätteenpoltoon käytettäviä polttotekniikoita ovat muun muassa rumpu-uunit ja kaasutus (Maskuniitty 2002, 482; Laine-Ylijoki et al. 2005, 18). Rumpu-uuneja käytetään käytetään usein ongelmajätteiden käsittelyssä, koska niissä poltettavan jätteen viipymäaika

tulipesässä voi olla hyvin pitkä ja lämpötila korkea, jolloin haitalliset yhdisteet saadaan tuhottua (Vesanto 2006, 34). Kaasutus vaatii sen sijaan jätteiden esikäsitteilyä, jonka vuoksi se sopii esimerkiksi REF-polttoaineiden polttoon. Kaasutuksen taloudellinen kilpailukyky on kuitenkin usein vielä tällä hetkellä muita jätteenpolttomenetelmiä huonompi, eikä se ole jätteiden käsittelyssä laajasti käytössä. (Laine-Ylijoki et al. 2005, 73)

2.3 Savukaasut ja niiden puhdistaminen

Jätteenpolton päästöistä savukaasut ovat olleet pitkään huomion keskipisteenä. Puhdistustekniikoiden voimakkaan kehityksen seurauksena niitä on pystytty vähentämään merkittävästi, mutta savukaasujen puhdistukseen on kiinnitettävä polttolaitoksilla edelleen paljon huomiota. (European Commission 2006, 9) Jätteenpolton savukaasut koostuvat kaasumaisista palotuotteista, kuten hiilidioksidista (CO_2), vetykloridista (HCl), rikkidioksidista (SO_2) ja typen oksideista (NO_x). Lisäksi ne sisältävät kiinteitä partikkeleita sekä höyrystyneitä metalleja ja orgaanisia yhdisteitä. (Chandler et al. 1997, 97)

Jätteenpolttolaitoksen hiukkaspäästöt muodostuvat pääosin lentotuhkasta (European Commission 2006, 153). Hiukkasia ja muita kiinteitä partikkeleita erotetaan savukaasuista sähkösuodattimilla, dynaamisilla erottimilla, kangassuodattimilla sekä savukaasupesureilla (Huhtinen et al. 2000, 251). Erotusmenetelmän valintaan vaikuttavat muun muassa hiukkasten määrä, keskimääräinen hiukkaskoko ja hiukkaskokojakauma, vaadittu puhdistustaso sekä menetelmän yhteensopivuus muiden käytettävien savukaasujen puhdistuslaitteistojen kanssa. Tämän lisäksi valintaan vaikuttavat erotetun aineksen käsittely-, hyötykäyttö- ja sijoitusvaihtoehdot. (European Commission 2006, 102-103)

Savukaasujen rikinpoistomenetelmät voidaan jakaa kuivaan, puolikuivaan ja märkämene- telmään. Kuivassa ja puolikuivassa menetelmässä syntyvät jätteet ovat ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaisia, minkä vuoksi niitä käsitellään usein yhdessä verrattuna märkämene- telmään. Kuivassa rikinpoistomenetelmässä epäpuhtauksia sitovaa ainetta, yleensä kalkkia tai natriumbikarbonaattia, syötetään hienona jauheena savukaasuvirtaan, jossa se reagoi savukaasujen sisältämien rikkiyhdisteiden kanssa. Reaktiotuotteet ovat tyypillisesti kiinteitä ja ne voidaan poistaa savukaasuista esimerkiksi kangassuodattimilla. Sideainetta syöte- tään savukaasujen sekaan ylimääräiä, millä pyritään saavuttamaan asetetut päästörajat. Tä-

män vuoksi menetelmästä syntyvät jätteet sisältävät runsaasti reagoimatonta sideainetta, joka joissain tapauksissa kuitenkin voidaan kierrättää takaisin prosessiin ja pienentää näin ollen syntyvän jätteen määrää. (European Commission 2006, 107)

Puolikuivassa menetelmässä savukaasujen sekaan suihkutetaan kalsiumhydroksidivesilietettä, joka sitoo haitta-aineita. Lieite kuivuu savukaasuvirrassa ja reaktiotuotteet poistuvat pesurista savukaasujen mukana pölynä, joka erotetaan pesurin jälkeen tyypillisesti kangassuodattimilla. Puolikuivamenetelmä kuluttaa vähemmän sideainetta kuin kuivamenetelmä, mutta toisin kuin märkämenetelmässä, siitä ei synny jätevesiä. (Vesanto 2006, 39)

Orgaanisia aineita, kuten dioksiineja, voidaan erottaa savukaasuista lisäämällä niihin aktiivihiihtä tai koksia ennen kangassuodatinta. Näin toimittaessa savukaasujen puhdistusjätteet sisältävät lentotuhkan, reagoimattoman kalkin ja reaktiotuotteiden lisäksi myös hiiltä ja adsorboituneita dioksiineja. (ISWA 2003a, 10)

Märkämenetelmässä savukaasut puhdistetaan pesemällä ne vesiliuoksella. Ennen pesunesteen syöttöä savukaasuista poistetaan hiukkaset eli lentotuhka. Tämän jälkeen savukaasut pestään vedellä pesutornissa, jossa niistä liukenee pesuveteen muun muassa kloorivetyä. Savukaasut pestään tämän jälkeen edelleen alkalisella liuoksella, joka sisältää kalsium- tai natriumhydroksidia. Tämä vaihe poistaa savukaasuista muun muassa rikin oksidit. (Vesanto 2006, 37)

Märällä puhdistusmenetelmällä päästään erittäin hyvään puhdistustulokseen, ja se onkin Euroopan jätteenpolttolaitoksilla käytetyin savukaasujen puhdistusmenetelmä (Vesanto 2006, 38; European Commission 2006, 101). Dioksiinien poisto märkämenetelmää käytettäessä voidaan toteuttaa joko samoin kuin kuivaa/puolikuivaa menetelmää käytettäessä suihkuttamalla lisäaineet pesuprosessiin tai dioksiinit voidaan erottaa myös erillisenä jakeena ennen vesilietteen lisäämistä savukaasuihin (ISWA 2003a, 10).

Märkäprosessista haittana ovat siinä syntyvät jätevedet, jotka vaativat käsittelyä. Joillakin uusilla polttolaitoksilla jätevedet haihdutetaan, jolloin niihin sitoutuneet epäpuhtaudet voidaan siirtää jatkokäsittelyyn tai loppusijoitukseen jauhe- tai pastamaisina. (Vesanto 2006, 38)

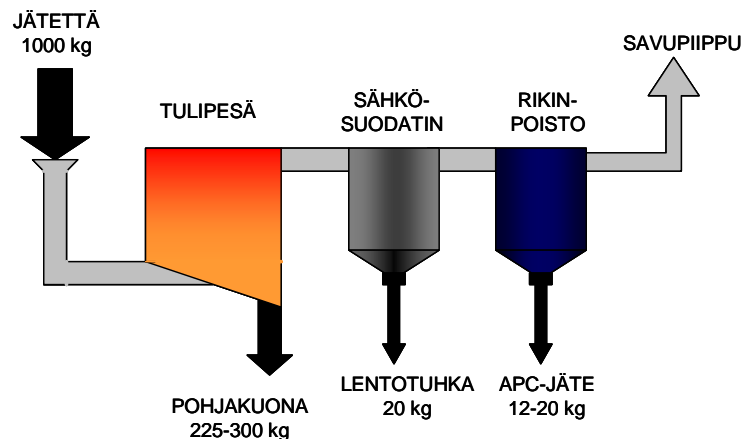
Näiden menetelmien lisäksi jätteenpolttolaitosten savukaasujen puhdistukseen kuuluu typenoksidipäästöjen hallinta, joka toteutetaan yleensä joko katalyyttisellä (SCR, selective catalytic reduction) tai ilman katalyyttiä toimivalla (SNCR, selective non-catalytic reduction) kemiallisella pelkistyksellä. Menetelmissä savukaasuihin lisätään ammoniakkaa tai SNCR-menetelmässä vaihtoehtoisesti ureaa, joka reagoi savukaasujen sisältämien typen

oksidien kanssa. (Vesanto 2006, 58) Savukaasujen koostumukseen voidaan vaikuttaa myös muun muassa säätelällä niiden lämpötilaa tai lisäämällä tiettyjä haitta-aineita absorboivia lisäaineita, joiden määrä on yleensä kuitenkin pieni.

2.4 Poltossa syntyvät kiinteät jätteet

Jätteenpoltossa syntyvät kiinteät jätteet voidaan luokitella yleisellä tasolla pohjatuuhkaan, lentotuuhkaan sekä savukaasujen käsittelyssä syntyviin jätteisiin eli APC-jätteisiin. Pohjatuuhkan lisäksi arinapoltossa syntyy tulipesässä sihtijäänöksiä, jotka yhdistetään yleensä pohjatuuhkan kanssa, samoin kuin kattilasta kerättävä kattilatuuhka. Ekonomaiseriassa erottuva tuuhka yhdistetään puolestaan lentotuuhkaan, joka poistetaan joko erikseen tai yhdessä savukaasujen puhdistuksessa syntyvien jätteiden kanssa. (Hjelmar 1996, 347)

Arinatekniikkaa käyttävällä massapolttolaitoksella tyypillisesti kulkevat kiinteiden aineiden massavirrat poltettavaa jätetonna kohden on esitetty kuvassa 4.

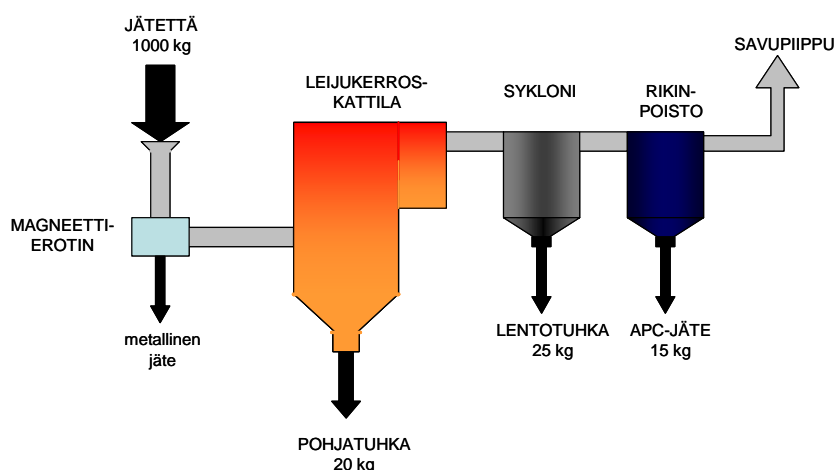


Kuva 4. Kiinteiden aineiden massavirrat sekajätteen massapolttolaitoksella (mukaillen Chandler et al. 1997, 285; IEA 2004, 9)

Arinapolttolaitoksella tulipesästä erotettavaa pohjakuonaa syntyy tyypillisesti noin 225-300 kg/t_{jätettä}. Koska massapolttolaitoksella jätteet syötetään polttoon ilman merkittävää esikäsittelyä, pohjakuonasta erotetaan yleensä keräyksen jälkeen metallinen aines. Niin kutsuttu kattilatuuhka, joka yhdistetään pohjakuonaan, kerätään tulipesän yläosista ja lämmönsiirtimistä ja sitä syntyy noin 5 kg/t_{jätettä}. Lentotuuhkasta suurin osa erotetaan suodattimilla ja sen määrä on noin 20 kg/t_{jätettä}. Rikinpoistojärjestelmistä syntyvän kiinteiden aineiden

den massavirran suuruus vaihtelee voimakkaasti käytettävän puhdistusmenetelmän mukaan. Tyypillinen arvio APC-jätteiden määräksi on noin 12-20 kg/t_{jätettä}, mutta kuivaa/puolikuivaa rikinpoistomenetelmää käytettäessä määrä voi olla jopa 30 kg/t_{jätettä}. (Chandler et al. 1997, 285; IEA 2004, 9)

Leijukerrospoltoissa tuhkia syntyy kokonaisuudessaan arinamenetelmää vähemmän, koska suurin osa palamattomasta materiaalista erotetaan jätteistä esikäsittelyssä ennen polttoa (IEA 2004, 14). Tällaista esikäsiteltyä kierrätyspolttoainetta, kuten REF:a, polttavalla leijukerroslaitoksella syntyvät kiinteiden aineiden virrat on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Kiinteiden aineiden massavirrat käsiteltyä yhdyskuntajätettä polttavassa leijukerroskattilassa (muokailen IEA 2004, 11)

Esikäsittelyn ansiosta pohjatuuhkaa syntyy leijukerrospoltoissa huomattavasti arinapolttua vähemmän, tyypillisesti noin 20 kg/t_{jätettä}. Metallinen aines on poistettu jätteistä tavallisesti jo ennen polttoa erillisillä erottimilla. Sykloneilla erotettavan lentotuhkan määrä on leijukerroskattilassa sen sijaan yleensä arinakattilaa suurempi, noin 25 kg/t_{jätettä}. APC-jätteiden määrä myös leijukerroslaitoksella riippuu voimakkaasti käytettävästä rikinpoistomenetelmästä, mutta niiden määräksi voidaan arvioida noin 15 kg/t_{jätettä}. (IEA 2004, 11)

Suomessa toimii tällä hetkellä ainoastaan yksi varsinainen jätteenpolttolaitos, joka sijaitsee Turussa (Vesanto 2006, 13). Laitoksella poltetaan vuosittain noin 50 000 tonnia syntypaikalajiteltua yhdyskuntajätettä, josta muodostuu noin 11 000 t pohjakuonaa ja yhteensä noin 3 000 t lento- ja kattilatuuhkaa sekä APC-jätteitä. (Ympäristölupapäätös LOS-2004-Y-1048-

111, 4 ja 7-8) Tämän lisäksi maassamme syntyy jätteenpolton tuhkiiksi rinnastettavia tuhkia jätteiden rinnakkaispolttolaitoksilta. Taulukkoon 2 on koottu yhteenvetona tyypillisiä määriä eri polttotekniikoilla syntyvistä kiinteistä jätteistä. Samalla on arvioitu Suomessa tulevaisuudessa syntyvien jätteenpolton tuhkien ja APC-jätteiden määriä, jos jätteenpolton määrä kasvaa kuten muun muassa uudessa valtakunnallisen jättesuunnitelman ehdotuksessa on esitetty. Lisäksi esimerkkietoja joissakin Euroopan maissa tällä hetkellä vuosittain syntyvistä jätteenpolton tuhkamääristä on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 2. Arvio tulevaisuudessa syntyvistä tuhka- ja APC-jättemääristä Suomessa (mukailen Chandler et al. 1997, 285; IEA 2004, 9 ja 11; Laine-Ylijoki et al. 2005, 77)

	arinakattila	leijukattila	kaasutus	yhteensä
pohjatuhka, kg/t _{jätettä}	225-300	20	40-60	
lentotuhka, kg/t _{jätettä}	20	25	90-180	
APC-jäte ⁽¹⁾ , kg/t _{jätettä}	12-20	15	60-120	
käsiteltävä jättemäärä, 1000 t/a	800	350	100	1250
syntyvät tuhkien ja APC-jätteiden määrät				
pohjatuhka, 1000 t/a	180-240	7	4-6	190-246
lentotuhka, 1000 t/a	16	9	9-18	34
APC-jäte, 1000 t/a	10-16	5	6-12	20-33

Taulukko 3. Jätteenpolton tuhkien määriä Euroopassa (Laine-Ylijoki et al. 2005, 39)

	pohjatuhka (1000 t/vuosi)	lentotuhka ja APC-jätteet (1000 t/vuosi)
Tanska	500	75
Ruotsi	400	80
Hollanti	700	115
Saksa	4 000	675

Jotta tuhkia ja APC-jätteitä voidaan käsitellä, hyötykäyttää ja loppusijoittaa oikein sekä minimoida ympäristölle niistä aiheutuvat haitat, on tärkeää tuntea näiden jakeiden ominaisuudet (IEA 2004, 17). Seuraavissa luvuissa käsitellään lyhyesti jätteenpolton pohjatuhkan ja tarkemmin lentotuhkan ja APC-jätteiden koostumusta ja ominaisuuksia, jotka ovat olennaisia käsittelyn ja loppusijoituksen sekä niiden aiheuttamien ympäristövaikutusten kannalta.

2.4.1 Pohjatuhka ja -kuona

Pohjatuhka, josta erityisesti arinakattiloista puhuttaessa käytetään myös termiä pohjakuona, sisältää yleensä enimmäkseen karkeaa palamatonta ainesta sekä palamatta jäänyttä or-

gaanista ainesta (Sabbas et al. 2003, 63). Sen koostumus on hyvin riippuvainen poltettavan jätteen laadusta ja poltto-olosuhteista, mutta tyypillisesti se sisältää kuonaa, metalleja, keramiikkaa, lasia ja muita palamattomia aineita (Wiles 1996, 327). Pohjatuhkasta yleensä ainoastaan hyvin pieni osuus on veteen liukenevaa ainesta, mikä poikkeaa huomattavasti lentotuhkan ja APC-jätteiden ominaisuuksista (Hjelmar 1996, 348). Yleisesti ottaen pohjatuhka sisältääkin lentotuhkaa ja APC-jätteitä vähemmän ympäristölle haitallisia yhdisteitä. Pohjatuhkalle tyypillisiä haitallisten aineiden pitoisuuksia on esitetty yhdessä muiden tuhka- ja APC-jätteiden kanssa taulukossa 5. Pohjatuhkaa syntyy määrällisesti paljon, noin 20-30 % poltettavien jätteiden painosta ja se edustaa 85-95 %:a kaikista jätteenpoltossa syntyvistä kiinteistä jätteistä (Chandler et al. 1997, 339), minkä vuoksi se on eniten tutkittu tuhkalaa- tu. Syntyvän pohjatuhkan määrä on kuitenkin voimakkaasti riippuvainen poltettavien jät- teiden esikäsittelystä sekä polttotekniikasta.

Yleensä pohjatuhka murskataan keräyksen jälkeen ja siitä erotetaan magneettinen materi- aali uudelleenkäyttöä varten, jos erotusta ei ole tehty jo ennen polttoa. Myös jäljelle jääväl- le osalle voidaan löytää hyötykäyttökohteita, varsinkin jos se on hyvin loppuun palanutta eikä sisällä paljoa metalleja. (Maskuniitty 2002, 488; Vesanto 2006, 69) Jätteenpolton poh- jatuhkan hyödyntämistä varsinkin maarakennuksessa on tutkittu paljon ja hyötykäyttöko- hteita löytyy muun muassa Tanskasta ja Hollannista (Laine-Ylijoki et al. 2005, 39-40). Yh- teenveto pohjatuhkan ja -kuonan ominaispiirteistä on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Pohjatuhkan ja -kuonan ominaispiirteitä (mukaiillen Kaartinen et al. 2007, 29)

leijupolton pohjatuhka	
ominaispiirteitä	- <i>kriittiset haitta-aineet</i> : antimoni, arseeni, kromi, kupari, lyijy ja sinkki - <i>liukoisuus</i> : kromi, arseeni ja sulfaatti - <i>sijoitus</i> : mahdollisesti inerttiä ja sellaisenaan hyötykäytettävää, laadunvalvonta
ominaisuuksiin vai- kuttavia tekijöitä	- polttoaineen koostumus; kyllästetty puu ja rakennusjätteet poltto- aineessa
arinapolton pohjakuona	
ominaispiirteitä	- <i>kriittiset haitta-aineet</i> : antimoni, kromi, kupari, lyijy ja sinkki - <i>liukoisuus</i> : kupari, antimoni, molybdeeni, fluoridi ja kloridi - heterogeenisyys - <i>sijoitus</i> : järjestelmällinen laadunvalvonta välttämätön
ominaisuuksiin vai- kuttavia tekijöitä	- polttoaineen koostumus; metalli ja sähköelektronii- karomu poltto- aineessa

2.4.2 Lentotuhka ja savukaasujen puhdistuksessa syntyvät jätteet

Lentotuhkalla tarkoitetaan hiukkasmaista ainesta, joka kulkeutuu tulipesästä savukaasujen mukana ja erotetaan niistä muiden savukaasujen puhdistusprosessien yhteydessä (Chandler et al. 1997, 441; Laine-Ylijoki et al. 2005, 23). Lentotuhka erotetaan märkämenetelmää käytettäessä tavallisesti ennen savukaasujen pesua. Kuiva- ja puolikuivamenetelmiä käytettäessä lentotuhka sen sijaan useimmiten kulkeutuu savukaasuissa puhdistusprosessin läpi ja erotetaan yhdessä muiden puhdistusjätteiden kanssa. Näin ollen erillistä lentotuhkajätettä ei muodostu, vaan se sisältyy savukaasujen puhdistusjätteisiin. Savukaasujen puhdistuksessa syntyvistä jätteistä käytetään usein nimitystä APC-jätteet (engl. Air Pollution Control – residues), jolla yleensä tarkoitetaan jätettä joka sisältää sekä lentotuhkan että savukaasujen pesussa syntyvät kiinteät jätteet (ISWA 2003a, 9-10). APC-jätteet koostuvat pääosin hiukkasista ja savukaasujen puhdistuksessa reagoimatta jääneistä lisäaineista sekä reaktiotuotteista, kuten kalsiumklorideista (IEA 2004, 17). Niiden määrä ja koostumus ovat kuitenkin hyvin riippuvaisia käytettävästä rikinpoistomenetelmästä sekä siinä käytettävistä lisäaineista.

Liukoisuus ja mahdollisesti ympäristölle haitallisten aineiden vapautuminen ovat tärkeimpiä tuhkien ja APC-jätteiden ominaisuuksista loppusijoituksen kannalta. Lentotuhkasta veteen liukenevia suoloja on noin 20-25 %. Kuivan ja puolikuivan rikinpoistomenetelmän jätteistä 30-40 % koostuu suoloista, jotka ovat veteen liukenevia ja märkämenetelmän jätteistä noin 14 % on veteen liukenevaa ainesta (Hjelmar 1996, 348). Palamisessa tapahtuvan yhdisteiden haihtumisen ja sitä seuraavan tiivistymisen seurauksena sekä lentotuhka että savukaasujen puhdistusjätteet sisältävät korkeita pitoisuuksia raskasmetalleja, suoloja ja orgaanisia aineita (Sabbas et al 2003, 63). Taulukossa 5 on esitetty lentotuhkalle ja APC-jätteille sekä pohjatuhkalle tyypillisiä haitta-aineiden pitoisuuksia. Taulukossa on huomioitu ainoastaan ne yhdisteet, joiden on asetettu raja-arvoja kaatopaikkasijoituksen suhteen. On huomioitava, että taulukossa 5 esitetyissä arvoissa kuivan/puolikuivan menetelmän jätteet sisältävät lentotuhkan, kun taas märkämenetelmää käytettäessä lentotuhka on erotettu ennen puhdistusprosessia. Märkämenetelmää käytettäessä lentotuhka monissa maissa kuitenkin lopulta sekoitetaan APC-jätteisiin.

Taulukko 5. Pohjatuhkan, lentotuhkan ja APC-jätteiden haitta-ainepitoisuuksia
(Chandler et al. 1997, 378 ja 462)

PITOISUUS (mg/kg)	POHJA- TUHKA	LENTOTUHKA	APC-JÄTTEET (kuiva/puolikuiva- menetelmä)	APC-JÄTTEET (märkämenetelmä, ei lentotuhkaa)
arseeni (As)	0,1-189	37-320	18-530	41-210
barium (Ba)	400-3 000	330-3 100	51-14 000	55-16 000
kadmium (Cd)	0,3-70	50-450	140-300	150-1 400
kloori (Cl)	800-4 190	29 000-210 000	62 000-380 000	17 000-51 000
kromi (Cr)	23-3 170	140-1 100	73-570	80-560
kupari (Cu)	190-8 240	600-3 200	16-1 700	440-2 400
elohopea (Hg)	0,02–7,8	0,7-30	0,1-51	2,2-2 300
molybdeeni (Mo)	2,5-276	15-150	9,3-29	1,8-44
nikkeli (Ni)	7-4 280	60-260	19-710	20-310
lyijy (Pb)	98-13 700	5 300-26 000	2 500-10 000	3 300-22 000
antimoni (Sb)	10-432	260-1 100	300-1 100	80-200
seleeni (Se)	0,05-10	0,4-31	0,7-29	-
sinkki (Zn)	613-7 770	9 000-70 000	7 000-20 000	8 100-53 000

Lentotuhkan sisältämistä aineista kriittisiä ovat liukoisuuden kannalta erityisesti arseeni, lyijy, kadmium ja kromi. APC-jätteissä erityistä huomiota sen sijaan vaativat liukenevat suolat, erityisesti kloori. (Kaartinen et al. 2007, 10) Yhteenvedo erilaisten lentotuhka- ja APC-jätejakeiden ominaispiirteistä on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Lentotuhkien ja APC-jätteiden ominaispiirteitä (mukaillen Kaartinen et al. 2007, 29)

lentotuhka, joka erotetaan savukaasuista omana fraktionana	
ominaispiirteitä	- <i>kriittiset haitta-aineet</i> : antimoni, arseeni, kromi, kupari, lyijy, sinkki, tina ja metallinen alumiini - klooripitoisuus n. 15 % - <i>liukoisuus</i> : kloridi (75 000 - 100 000 mg/kg) ja antimoni - <i>sijoitus</i> : laadunvalvonta, käsittely tai poikkeaminen kriteereistä riskinarviointimenettelyn pohjalta
ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä	- polttoaineen koostumus ja klooripitoisuus - meriveden käyttö - erotuksen tehokkuus
puolikuivassa ja kuivassa savukaasujen puhdistusmenetelmässä syntyvä lentotuhkan ja APC-jätteen seos	
ominaispiirteitä	- <i>kriittiset haitta-aineet</i> : antimoni, arseeni, kupari, lyijy, sinkki, kromi, tina ja metallinen alumiini - klooripitoisuus yli 15 % - <i>liukoisuus</i> : kloridin merkittävä (78 000 – 170 000 mg/kg), lyijyn korkea (26-300 mg/kg), lisäksi kadmium ja seleeni - <i>sijoitus</i> : laadunvalvonta ja käsittely
ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä	- polttoaineen koostumus ja klooripitoisuus - kemikaalien ja meriveden käyttö
APC-jäte märkämenetelmästä (ei sisällä lentotuhkaa)	
ominaispiirteitä	- <i>kriittiset haitta-aineet</i> : antimoni, lyijy ja sinkki - klooripitoisuus yli 25 % - <i>sijoitus</i> : ei mahdollista ilman käsittelyä
ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä	- kemikaalien ja meriveden käyttö

3 LENTOTUHKAN JA APC-JÄTTEIDEN KÄSITTELY JA LOPPU-SIJOITUS

Tuhkille ja APC-jätteille on kehitetty lukuisia erilaisia käsittelymenetelmiä, jotka tuottavat hyvin erilaisia lopputuotteita. Toisten menetelmien tarkoituksena on muuntaa käsiteltävät materiaalit mahdolliseen hyötykäyttöön soveltuviksi, toisilla menetelmillä pyritään sen sijaan ainoastaan saavuttamaan kaatopaikkasijoittamiselle asetetut raja-arvot.

3.1 Käsittelyn tavoitteet ja nykykäytäntö

Jätteenpolton lentotuhkan ja APC-jätteiden sisältämien haitallisten aineiden pitoisuudet ovat usein niin korkeita, että niiden hyötykäyttö on vähäistä. Pohjatuhkan käyttöä erityisesti maarakentamisessa on sen sijaan viime vuosina tutkittu paljon. Lentotuhkan ja APC-jätteiden hyötykäytön tutkiminen on ollut vähäisempää sekä niiden pohjatuhkaa pienemmän määrän että suurien haitta-ainepitoisuuksien vuoksi.

Lähes kaikki jätteenpoltossa syntyvä lentotuhka ja APC-jätteet sijoitetaan tällä hetkellä kaatopaikoille tai muihin loppusijoituslaitoksiin. Esimerkiksi Tanskassa, jossa pohjatuhkasta hyötykäytetään suurin osa, lentotuhka ja APC-jätteet kuljetetaan sijoitettaviksi Saksan kaivoksiin täyttömateriaalina tai Norjaan loppukäsittelylaitokselle. Myös muissa Euroopan maissa, kuten Ruotsissa, Hollannissa ja Isossa-Britanniassa, päävaihtoehtona on sijoittaa lentotuhka ja APC-jätteet käsiteltyinä kaatopaikoille tai kuljettaa ulkomaille. (Laine-Ylijoki et al. 2005, 39)

Suomessa tällä hetkellä ainoassa toimivassa jätteenpolttolaitoksessa muodostuvat tuhkat sijoitetaan ympäristöluvan mukaan sementtiin kiinteytettynä kaatopaikka-alueelle. Ympäristövaikutusten arviointiraporteissa ja ympäristölupapäätöksissä ei rakenteilla oleville jätteenpolttolaitoksille ole määritelty tarkkoja ehtoja ja tapoja tuhkien käsittelylle ja loppusijoitukselle. Suunnitelmissa mainittuja käsittelyvaihtoehtoja ovat kiinteytys ja stabilointi, jotka voivat sisältää myös muita esikäsittelytapoja. Pohjatuhkan hyötykäyttömahdollisuus on huomioitu, mutta myös sen sijoittamiseen kaatopaikalle on varauduttu. Lentotuhkalle ja APC-jätteille ei sen sijaan oleteta löytyvän hyötykäyttökohteita ja ne suunnitelmien mu-

kaan sijoitetaan käsiteltyinä kaatopaikalle. (Ympäristölupapäätökset LOS-2004-Y-1048-111, LOS-2004-Y-1106-121 ja LOS-2005-Y-321-11; Electrowatt-Ekono Oy 2005, 32)

Korkeiden haitta-ainepitoisuuksien vuoksi lentotuhka ja APC-jätteet tulee lähes aina käsitellä myös ennen loppusijoitusta, jotta ne eivät aiheuttaisi haittaa maaperälle tai vesistölle sekä alittaisivat kaatopaikoille sijoittamiseen vaadittavat haitallisille aineille asetetut raja-arvot. Käsittelyllä pyritään ensisijaisesti vähentämään liukoisuutta, mutta samalla pyritään vähentämään myös muiden kuin veteen liukenevien haitta-aineiden, kuten metallien, vapautumista. (Lewin ja Young 2004, 16) Ympäristövaikutusten kannalta käsittelymenetelmien tärkeitä ominaisuuksia ovat haitta-aineiden vapautumisen estämisen lisäksi käsittelyprosessiin tarvittavien energian ja raaka-aineiden määrä sekä käsittelyssä mahdollisesti syntyvät uudet jätevirrat (ISWA 2003a, 13).

3.2 Käsittelytekniikat

Tuhkien ja APC-jätteiden käsittelyyn on olemassa lukuisia erilaisia menetelmiä, ja niitä kehitetään jatkuvasti lisää. Käyttämällä eri lisäaineita tai yhdistelemällä osaprosesseja toisiinsa, voidaan kehittää perustekniikoista uusia, erilaisia käsittelymenetelmiä. Yleisesti lentotuhkan ja APC-jätteiden käsittelytekniikat voidaan jakaa neljään pääryhmään; erotus-, kiinteytys- ja stabilointimenetelmiin sekä termiseen käsittelyyn.

3.2.1 Erotusmenetelmät

Erotusmenetelmillä tarkoitetaan kaikkia menetelmiä, joissa joko erotellaan eri laatuista massavirtoja toisistaan tai erotetaan tiettyjä yksittäisiä jakeita jätevirrasta tarkoituksena parantaa kunkin jakeen laatua tai ottaa talteen tiettyjä jättejakeita. Erotusmenetelmät eivät ole tarpeellisia ainoastaan vähentämään hyvin heterogeenisten jätevirtojen ympäristövaikutuksia, vaan ne ovat usein myös välttämättömiä, jotta tuhkat ja APC-jätteet ovat teknisesti soveltuvia seuraaviin käsittely- tai hyötykäyttövaiheisiin. (Chandler et al 1997, 735) Niitä käytetäänkin usein osana laajempaa käsittelyprosessia tai esikäsittelymenetelmänä erottamaan tiettyjä haitta-aineita. Pohjatuhkien käsittelyssä on käytössä paljon erilaisia mekaanisia erotusmenetelmiä, joilla pyritään metallien erotuksen kautta tehostamaan materiaalin kierrätystä ja vähentämään tuhkan määrää (Laine-Ylijoki et al. 2005, 60). Lentotuhkalle ja APC-jätteille käytetyimmät erotusmenetelmät tavoittelevat liukoisten suolojen poistoa kä-

siteltävästä materiaalista ja ne perustuvat vesiliuosten käyttöön, jonka vuoksi niissä syntyy jatkokäsittelyä vaativia jätevesiä (Lundtorp 2001, 8).

Yleisimmin käytetty erotusmenetelmä lentotuhkalle ja APC-jätteille on pesu, jossa käsiteltävä materiaali pestään vesiliuoksella, johon liukenevat yhdisteet erottuvat. Menetelmällä saadaan poistettua huomattava osa liukoisista yhdisteistä, mutta sen kyky sitoa metalleja on huono. (Lewin ja Young 2004, 16) Tämän vuoksi pesua usein käytetäänkin yhdessä stabiointi- tai kiinteytysprosessin kanssa, jolloin pesulla pyritään erottamaan suolat ja stabiointilla tai kiinteytyksellä sitomaan raskasmetallit. Pesuprosessien ongelmina ovat myös niissä syntyvät jätevedet, joiden haitallisuus ja käsittelyntarve vaihtelevat huomattavasti käsiteltävän tuhkan ominaisuuksista ja käytettävästä pesuliuksesta riippuen. Jätevesien hallintaan liittyviä seikkoja on esitetty liitteessä I.

Erotusprosessia tehostamaan voidaan jätteenpolton lentotuhkalle ja APC-jätteille käyttää happamia pesuliuksia, joilla päästään parempiin tuloksiin kuin pelkkää vettä käyttämällä. Esimerkiksi Sveitsissä käytetään jätteenpolton tuhkien käsittelyssä märän savukaasujen puhdistusmenetelmän hapanta vesiliuosta hyödyntävää FLUWA-menetelmää. Menetelmällä saadaan poistettua huomattava osa raskasmetalleista ja samalla vähennettyä käsiteltävää tuhkasta liukenevien aineiden määrää. Muita vastaavia happamia liuoksia käyttäviä käsittelytekniikoita ovat MR-, AES- ja 3R-prosessit. (ISWA 2003a, 28-30)

3.2.2 Kiinteytysmenetelmät

Kiinteytys- ja stabilointitekniikoista (solidification/stabilization, S/S) puhutaan usein yhtenä käsitteenä, jolla tarkoitetaan menetelmiä, joilla jätteiden ominaisuuksia voidaan muuntaa ympäristölle vähemmän haitalliseen muotoon. Prosessit käsittävät yleensä jätteen sisältämien haitta-aineiden fysikaalista ja/tai kemiallista sitomista. (Chandler et al 1997, 763)

Kiinteytysmenetelmät perustuvat haitta-aineiden ja veden kosketuspinnan vähentämiseen sekoittamalla käsiteltävä jäte sideaineen kanssa. Niiden tarkoituksena on tuottaa materiaalia, jonka fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet vähentävät haitallisten aineiden vapautumista käsiteltävästä jätteestä. Kiinteytysmenetelmiä on kehitetty lukuisilla erilaisilla sideaineilla, joista yleisimpiä ovat epäorgaaniset aineet, kuten sementti, kalkki ja jotkin teollisuuden sivutuotteet kuten hiilenpolton lentotuhka ja masuunikuona. Orgaanisena sideai-

neena voidaan käyttää esimerkiksi bitumia. Kiinteytysmenetelmät ovat usein tekniikaltaan yksinkertaisia ja ne ovatkin yleisesti käytössä monissa maissa. (Lundtorp 2001, 8-9; ISWA 2003a, 22)

Yleisimmin käytetty kiinteytysmenetelmä ja samalla yleisin jätteenpolton lentotuhkan ja APC-jätteiden käsittelymenetelmä on kiinteyttäminen sementtiin, jossa käsiteltävä jäte sekoitetaan sementin kanssa ja saadaan aikaan kiinteää, helposti käsiteltävää ainesta. Käsiteltävän materiaalin sekoittaminen sementin kanssa vähentää jätteen vedenjohtavuutta ja huokoisuutta sekä lisää sen kestävyyttä. Raskasmetallien vapautuminen tuhka-sementtimatriisista on pientä, mutta pidemmällä aikavälillä matriisin rakenteen hajotessa varsinkin suolojen liukeneminen on todennäköistä. Sementin lisääminen kasvattaa huomattavasti jättemateriaalin tilavuutta ja näin ollen vaikuttaa myös loppusijoitukseen. Monissa maissa sementtikiinteytys on kuitenkin viranomaisten hyväksymä käsittelytekniikka jätteenpolton APC-jätteille. (Chandler et al. 1997, 777; ISWA 2003a, 22-24)

3.2.3 Stabilointimenetelmät

Stabilointimenetelmissä muunnetaan käsiteltävän materiaalin kemiallisia ominaisuuksia vähemmän liukoiseen ja ympäristölle vähemmän haitalliseen muotoon (Wiles 1996, 336). Stabiloinnissa materiaalin fysikaalinen luonne ja sen käsittelyominaisuudet eivät välttämättä muutu (Laine-Ylijoki et al. 2005, 57), vaan siinä vaikutetaan ainoastaan jätteiden sisältämien haitta-aineiden kemialliseen muotoon. Tämä tapahtuu sekoittamalla käsiteltävät jätteet niiden kanssa reagoivien lisäaineiden kanssa, joina voidaan käyttää esimerkiksi fosfaatteja, sulfideja tai aktiivihiihtä (Lundtorp 2001, 9). Stabilointimenetelmiä onkin kehitetty eri lisäaineita käyttäen lukuisia erilaisia. Jätteenpolton lentotuhkalle ja APC-jätteille soveltuvia markkinoilla olevia stabilointimenetelmiä ovat Ferrox-prosessi, VKI-menetelmä sekä WES-Phix-menetelmä (ISWA 2003a, 30-35).

Ferrox- ja VKI-tekniikoissa on kemialliseen stabilointiin yhdistetty pesu, jonka tarkoituksena on erottaa veteen liukenevia suoloja. Tämän jälkeen käsiteltävä tuhka stabiloidaan Ferrox-prosessissa ferrosulfaattia ja VKI-prosessissa hiilidioksidia tai fosforihappoa käyttäen, millä pyritään sitomaan raskasmetalleja. Menetelmillä voidaan käsitellyn tuotteen liukoisuutta pienentää huomattavasti ja samalla jätteen tilavuus pienenee noin 10-15 %:lla. Menetelmien haittapuolena ovat kuitenkin käsittelyssä syntyvät, runsaasti suoloja sisältävät

jätevedet, ja molempia menetelmiä on tähän mennessä käytetty ainoastaan pilotmittakaavassa. (ISWA 2003a, 31-34)

WES-Phix on yksinkertainen menetelmä, jossa käsiteltävä materiaali sekoitetaan stabilointiaineena käytettävän fosfaatin kanssa. Menetelmä ei poista käsiteltävästä jätteestä sen sisältämiä suoloja, mutta vähentää niiden liukoisuutta merkittävästi. Toisaalta käsittely lisää metallien, kuten lyijyn ja kadmiumin, liukoisuutta. Näin ollen WES-Phix-menetelmällä käsitellyn tuotteen ominaisuudet ovat ympäristön kannalta Ferroxi- tai VKI-menetelmiä huonommat. Menetelmää käytetään kuitenkin erityisesti Yhdysvalloissa, Japanissa ja Taiwanissa, joissa sillä käsitellyt tuhkat täyttävät kaatopaikkasijoittamisen ehdot. (ISWA 2003a, 31-34)

3.2.4 Termiset käsittelymenetelmät

Termiset tuhkien käsittelytekniikat voidaan ryhmitellä kolmeen tyyppiin: vitrifikaatioon, fuusioon ja sintraukseen (Lundtorp 2001, 9). Kaikissa näissä menetelmissä pyritään vähentämään haitta-aineiden liukoisuutta ja pienentämään jätteiden tilavuutta käsittelemällä tuhkat hyvin korkeissa lämpötiloissa, jolloin ne sulavat. Vitrifioinnin ero muihin termisiin menetelmiin on ns. lasinmuodostaja-aineen lisäys käsiteltävän tuhkan joukkoon, jolla voidaan edelleen vähentää liukoisuutta käsitelystä materiaalista. (Laine-Ylijoki et al. 2005, 57-58)

Termisten käsittelymenetelmien lopputuotteet ovat hyvin stabiileja ja sekä raskasmetallien että suolojen vapautuminen niistä on hyvin pientä. Käsittelyllä myös tuhkien tilavuus pienenee noin 30-50 %:lla. Menetelmien haittana ovat kuitenkin niiden vaatima suuri energiankulutus sekä niissä muodostuvat haitallisia yhdisteitä sisältävät savukaasut. Energiankulutus käsittelyssä on tyypillisesti noin 700-1200 kWh käsiteltävää tuhkatonnia kohti. Jätteenpolton lentotuhkien ja APC-jätteiden käsittelyyn menetelmiä käytetään paljon Japanissa, jossa on toiminnassa useita kymmeniä eri termisiä käsittelytekniikoita käyttäviä laitoksia. (ISWA 2003a, 25-28)

3.3 Loppusijoitus

Jätteenpolton lentotuhkat ja APC-jätteet sijoitetaan tyypillisesti kaatopaikoille. Vaihtoehtoisesti loppusijoituskohteena voi olla ns. hyötykäyttökohde, kuten tuhkien hyödyntäminen vanhojen kaivosten täyteaineena.

3.3.1 Kaatopaikat

Jätteenpoltoissa syntyvien tuhkien kaatopaikkasijoituksen ympäristöriskit aiheutuvat liukenemisestä sekä haitallisten epäorgaanisten suolojen ja metallien vapautumisesta. Mahdollisesti myös kaasun muodostus ja pölyäminen voivat aiheuttaa haittoja, jotka ovat kuitenkin liukenemistä vähäisempiä. (ISWA 2003a, 11; Sabbas et al. 2003, 64)

Suomessa jätteenpolton tuhkat ja savukaasujen puhdistusjätteet luokitellaan jäteasetuksen (Ympäristöministeriön asetus 22.11.2001/1129) mukaan joko tavanomaisiksi jätteiksi tai ongelmajätteiksi niiden sisältämien haitallisten yhdisteiden määrän perusteella. Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista (VNp 4.9.1997/861) luokittelee kaatopaikat kolmeen ryhmään: pysyvän jätteen, tavanomaisen jätteen sekä ongelmajätteen kaatopaikkoihin. Kunkin ryhmään kuuluvalla kaatopaikalle voidaan sijoittaa vain jätettä, joka täyttää päätöksessä sille esitetyt sijoittamisperusteet ja kelpoisuusvaatimukset. Nämä vaatimukset on esitetty liitteessä II (sivu II-2).

Kaatopaikoilla syntyy suotovesiä ja kaatopaikkakaasuja, joiden aiheuttamia haittoja pyritään vähentämään erilaisilla tiivistysrakenteilla, jotka puolestaan jaotellaan pinta- ja pohjarakenteisiin sekä katkaisuseiniin. Pintarakenteilla pyritään rajoittamaan jätekerrokseen suotautuvan sadeveden määrää sekä estämään kaatopaikkakaasujen vapautuminen. Pohjarakenteiden tehtävänä on edistää suotoveden keräilyä sekä pyrkiä estämään likaantuneen suotoveden ja sen sisältämien haitta-aineiden leviäminen alla olevaan maaperään ja sitä kautta pohjavesiin. Katkaisuseinät puolestaan ovat pystysuuntaisia rakenteita, joita käytetään estämään likaantuneen pohjaveden leviäminen tai puhtaan veden pääsy likaantuneelle alueelle. (Wahlström et al. 2004, 15) Rakennekerroksille kaatopaikkalainsäädännössä asetetut vaatimukset on esitetty liitteessä II (taulukot II-2 ja II-3).

Jätteenpolton tuhkat eivät ilman käsittelyä tai usein kevyen käsittelyn jälkeenkään täytä kaatopaikkasijoituksen raja-arvoja. Osa raja-arvoista (liite II taulukko II-1) voidaan jä-

teasetuksen mukaan korottaa enintään kolminkertaisiksi, jos katsotaan, etteivät korkeammat pitoisuudet lisää kaatopaikan päästöjen aiheuttamaa vaaraa tai haittaa ympäristölle. Raja-arvoja voidaan korottaa huolellisen riskinarvioinnin perusteella kolminkertaisiksi liukenevien aineiden osalta lukuun ottamatta liukoista orgaanista hiiltä (DOC) sekä pysyvän jätteen TOC-pitoisuuden osalta kaksinkertaiseksi. Raja-arvojen korottaminen vaatii kuitenkin riskinarviointia, jossa tunnistetaan mahdolliset haittatekijät, niiden esiintymisen todennäköisyys sekä mahdolliset vaikutukset ympäristöön. Tarkastelun tärkein vaihe on arvio sijoitettavista materiaaleista liukenevien aineiden kulkeutumisesta, jossa arvioidaan haitta-aineen kulkeutumista sijoitetusta materiaalista tiivistysrakenteiden läpi ja edelleen ympäristöön. Tällä kulkeutumisarvioinnilla pyritään osoittamaan, ettei jätteen haitta-aineiden kohonnut liukoisuus aiheuta suurempaa ympäristökuormitusta kuin jäte, joka alittaa kyseisen kriteerin. Käytännössä tämä voi tarkoittaa esimerkiksi ylimääräisten suojakerrosten rakentamista kaatopaikalle, tehostettua suotovesien käsittelyä tai suolapitoisten vesien kanavoimista luonnollisesti korkeamman suolapitoisuuden omaavaan ympäristöön kuten mereen. (Wahlström et al. 2006, 31-32) Kaatopaikkavesien käsittelyä tarkastellaan lyhyesti liitteessä I yhdessä tuhkien käsittelystä syntyvien jätevesien kanssa.

3.3.2 Loppusijoitus hyötykäyttökohteisiin

Jätteenpolton tuhkien loppusijoittamisena hyötykäyttökohteisiin voidaan pitää niiden sijoittamista kaivosten täyttöön. Euroopassa toimivia sijoituskohteita ovat muun muassa Saksassa vanhat suolakaivokset ja Norjassa toimiva käsittely- ja loppusijoituslaitos.

Saksassa jätteenpolton tuhkia käytetään suolakaivosten täyttöaineena. Suolakaivoksissa jätteet eivät pääse kosketuksiin veden kanssa, joten ne voidaan sijoittaa kaivoksiin sellaiseenaan tai esimerkiksi kiinteytettyinä sementtiin. Saksan kaivoksiin sijoitetaan vuosittain noin 600 000 t APC-jätteitä sisältäen myös lentotuhkaa. Suurin osa tästä määrästä on peräisin Saksasta, mutta lisäksi noin puolet Tanskassa ja noin 20 % Hollannissa syntyvistä APC- ja lentotuhkajätteistä kuljetetaan Saksaan kaivoksiin sijoitettaviksi. (ISWA 2003a, 18-20; ISWA 2003b, 3)

Varsinkin Pohjois-Euroopassa jätteenpoltossa syntyvistä tuhista merkittävä osa kuljetetaan tällä hetkellä Norjassa sijaitsevaan käsittely- ja loppusijoituslaitokseen, joka on polttolaitoksille ensisijaisesti kustannuksiltaan houkutteleva vaihtoehto. Langøyen-saarella on

ennen louhittu kalkkikiveä, josta syntyneisiin suuriin merenpinnan alapuolella sijaitseviin louhoksiin sijoitetaan käsittelyn jälkeen tuhkien lisäksi myös muita ongelmajätteitä sekä pilaantuneita maamassoja. Laitoksella jätteenpolton alkalisia tuhkia käytetään jäterikkihapon neutralointiin, josta syntyvä rautapitoinen kipsi pumpataan louhosten täytteeksi. Laitokselle kuljetetaan jätteenpolton lentotuhkia vuosittain noin 150 000 tonnia. Käsiteltyjä jätteitä voidaan louhoksiin sijoittaa yhteensä yli 7 Mm³ ja niiden arvioidaan täyttyvän vuonna 2030. (Laine-Ylijoki 2004, 7-8)

4 TUHKIEN YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTI

Lainsäädäntö määrää vähimmäisvaatimukset teollisuuden ympäristönsuojelulle, mutta sen lisäksi kuluttajien halu suojella luontoa ja ympäristöä luo kysyntää tuotannolle, jossa ympäristöasiat hoidetaan oma-aloitteisesti lainsäädännön velvoitteitakin paremmin. Sekä lainsäädäntö että yritysten oma-aloitteinen ympäristönsuojelu ovat laajenemassa koskemaan pelkän tuotantoprosessin lisäksi tuotteiden koko elinkaarta, jolla tarkoitetaan kaikkia tuotteen tuotantoon, käyttöön ja käytöstä poistamiseen liittyviä vaiheita. Jätteiden osalta lainsäädäntö velvoittaa yrityksen vähentämään jätteiden syntyä ja haitallisuutta sekä tehostamaan niiden hyötykäyttöä. Näitä tavoitteita pyritään edistämään kasvattamalla tuottajan vastuuta jätteistä sekä korostamalla koko elinkaaren huomioista. (Hakala ja Välimäki 2003, 351, 359-360, 382 ja 386) Työkaluksi tuotteiden tai prosessien ympäristökuormituksen huomioimiseksi ja tiedon keräämiseksi kokonaisvaltaisesti ja koko niiden elinkaaren ajalta on kehitetty elinkaariarviointimenetelmiä.

4.1 Elinkaariarvioinnin periaatteet

Elinkaariarviointi (LCA, Life Cycle Analysis) on työkalu tuotteen tai toiminnon kokonaisvaltaisten ympäristökuormitusten selvittämiseen ja niiden vaikutusten arviointiin (Kautto et al. 2001, 21). Arvioinnissa otetaan huomioon kaikki tarkastelukohteeseen liittyvät suorat ja epäsuorat ympäristövaikutukset tuotteen koko elinkaaren ajalta, niin sanotusti kehdestä hautaan. Näin ollen se kattaa raaka-aineiden oton ja käsittelyn, tuotanto- ja kokoonpanoprosessit, tuotteiden jakelun, käytön, uudelleenkäytön, kunnossapidon, kierrätyksen sekä jätteiden loppusijoituksen. (Burgess ja Brennan 2001, 2590-2592) Huomioimalla ympäristökuormitukset koko elinkaaren ajalta voidaan tunnistaa ne elinkaaren vaiheet, jotka kuormittavat ympäristöä eniten ja näin ollen kohdistaa parannustoimet tehokkaasti (Linnanen et al. 1994, 110).

Elinkaariarvioinneilla tuotetaan tietoa niin teollisuuteen kuin viranomaisorganisaatioihinkin parannuskohteiden priorisoinnin, prosessien suunnittelun ja uudistamisen sekä strategisen suunnittelun tueksi (Setac 2005). Arviointien käyttökohteita on lukuisia, ja ne voidaan karkeasti jakaa julkiseen ja yksityiseen käyttöön tarkoitettuihin arviointeihin. Julkisia elinkaarianalyysyjä käytetään muun muassa ympäristölainsäädännön, ympäristöverojen, stan-

dardien ja ympäristömerkkien kehittämässä sekä tiedon tuottamisessa kuluttajille. Yksityisellä sektorilla elinkaarianalyysijä sen sijaan käytetään tuotekehityksen ja markkinoinnin tukena, yrityksen ympäristöpolitiikan luotettavuuden edistämässä tai esimerkiksi ohjaamaan alihankkijoita toimimaan ympäristöä säästäen. (Miettinen ja Hämäläinen 1997, 280) Yrityksen sisäiseen käyttöön tarkoitetuissa elinkaarimalleissa tulisi käyttää tarkkoja, todellisiin prosesseihin perustuvia tietoja, kun taas julkiseen käyttöön tehtävissä tarkasteleissa voidaan käyttää teollisuusalojen keskiarvotietoja ja muita vastaavia yleisiä arvoja ja päästökertoimia (Weidema 1997, 33).

Elinkaariarvioinnit voidaan jakaa tarkastelun syvyyden mukaisesti kolmeen tyyppiin, jotka ovat yksityiskohtaiset ja yksinkertaistetut elinkaariarvioinnit sekä elinkaariajattelu. Yksityiskohtaisissa elinkaariarvioinneissa noudatetaan kansainvälisen standardoimisjärjestön ISO:n standardeja elinkaarianalyysien toteutuksesta. Yksinkertaistetuissa elinkaariarvioinneissa tarkempi analyysi kohdennetaan vain tiettyihin elinkaaren osa-alueisiin ja elinkaariajattelu voi yksinkertaisimmillaan olla sanallinen arvio elinkaaren aikaisista ympäristövaikutuksista ja niiden jakautumisesta. (Kautto et al. 2001, 22)

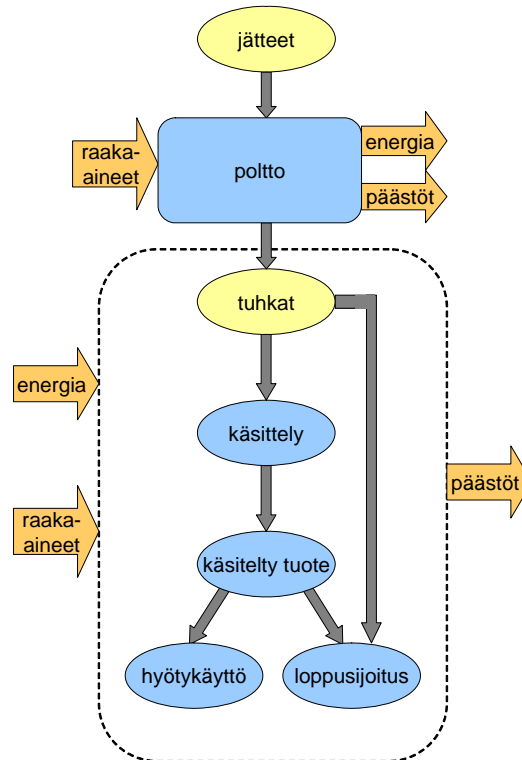
ISO:n 14040-sarjan standardit elinkaarianalyysistä valmistuivat vuosituhanen vaihteessa. Standardien mukaisessa analyysissä toteutetaan neljä vaihetta, jotka ovat tavoitteen määrittely, inventaarioanalyysi, vaikutusten arviointi ja tulosten tulkinta. (Weidema 1997, 15-16 ja 32) Koska elinkaariarviointi on erittäin laaja-alainen ympäristövaikutusten tarkastelumenetelmä, ei sitä aina voida suorittaa täydessä laajuudessaan esimerkiksi tiedonpuutteiden tai rajallisten resurssien vuoksi (Linnanen et al. 1994, 116). Tämän vuoksi tutkimuksen tavoitteen määrittelyssä tulee tehtäviin rajauksiin kiinnittää erityistä huomiota. Tavoitteen määrittely -vaiheessa lisäksi määritellään tarkasteltavat prosessit, työn laajuus sekä tutkimuksessa ja tiedonkeruussa käytettävät menetelmät. (Weidema 1997, 35) Erityisen tärkeää on määrittää yksiselitteisesti ns. toiminnallinen yksikkö, jota kohden ympäristökuormitukset määritetään. Toiminnallinen yksikkö voi olla esimerkiksi yksi 0,5 litran muovipullo tai 1 kg tiettyä materiaalia, jonka ympäristökuormitukset koko elinkaaren ajalta arvioinnissa selvitetään. Inventaarioanalyysi-vaiheessa kerätään tiedot tutkimuskohteen raaka-aine- ja energiatarpeista sekä elinkaaren aikana syntyneistä sivutuotteista ja päästöistä. Inventaariossa kerättyjen tietojen tulkinnan ongelmana on, etteivät ne ole yhteismitallisia eli esitetty toisiinsa verrattavissa olevissa yksiköissä. (Linnanen et al. 1994, 119, 122) Tätä ongelmaa pyritään ratkomaan vaikutusten arvioinnin vaiheessa, jossa inventaarioanalyysissä kerätyt

tiedot ympäristökuormituksista jaetaan vaikutusluokkiin, jotka kuvaavat kuormitusten aiheuttamia ympäristövaikutuksia, esimerkiksi ilmastonmuutosta, ympäristön kemikalisoitumista tai maan käyttöä (Miettinen ja Hämäläinen 1997, 282-283). Jako vaikutusluokkiin perustuu kuitenkin laskennallisiin painotuskertoimiin, joita on käytössä useita erilaisia ja joiden käytöstä on esitetty myös runsaasti kritiikkiä (muun muassa Krozert ja Vis 1998; Burgess ja Brennan 2001).

Viimeinen vaihe ISO 14040 -standardien mukaisesti toteutetussa elinkaariarvioinnissa on tulosten tulkinta, jossa tarkastellaan tulosten oikeellisuutta herkkyysanalyysien avulla sekä tehdään tulosten perusteella tutkimuksen johtopäätökset. Herkkyystarkasteluilla arvioidaan toteutetun elinkaariarvioinnin tulosten luotettavuutta ja herkkyyttä arvioinnissa käytettävien lähtötietojen epävarmuuksille ja vaihtelevuudelle. Näitä epävarmuuksia aiheutuu esimerkiksi toiminnallisen yksikön ja elinkaaren sisältämien yksikköprosessien määrittämisestä sekä lähtötietojen sisältämisestä oletuksista ja keskiarvoista. Lähtötiedoissa käytettäviä oletuksia tarkastellaan usein herkkyystarkasteluissa tutkimalla parametrin muutoksen vaikutusta, esimerkiksi tarkastelemalla kuljetusmatkojen pituuden vaikutusta kokonaiskuormitukseen. Elinkaariarviointien luotettavuus ja niiden tulosten käytettävyys riippuvat siis käytettävien lähtötietojen laadusta. Näin ollen tulosten tulkinta -vaiheessa tulisi esittää myös arvio käytettävien tietojen luotettavuudesta ja tehdyistä oletuksista. (Weidema 1997, 33, 56 ja 67-69)

4.2 Tuhkien elinkaari ja ympäristökuormitusten tarkastelu

Yksinkertaistettu malli jätteenpolton tuhkien elinkaaresta on esitetty kuvassa 6. Kuvassa tuhkien elinkaaren oletetaan alkavan polttoon menevistä jätteistä. Poltossa mahdollisesti tarvitaan jätteiden lisäksi muita raaka-aineita, esimerkiksi lisäpolttoainetta. Poltettaessa jätteitä vapautuu energiaa ja samalla syntyy päästöjä, kuten savukaasuja. Tarkasteltavat tuhkat on erotettu kuvassa polton muista päästöistä. Tuhkat voidaan johtaa polttolaitokselta käsiteltäviksi tai joissain tapauksissa suoraan loppusijoittaa. Käsitellyt tuhkat voidaan edelleen joko hyötykäyttää tai loppusijoittaa alkuperäistä vähemmän haitallisessa muodossa. Näihin vaiheisiin tarvitaan tyypillisesti sekä energiaa että erilaisia raaka-aineita.



Kuva 6. Jätteenpolton tuhkien elinkaari pääpiirteittäin

Kuvassa 6 mainittujen prosessien lisäksi elinkaareen sisältyy esimerkiksi tuhkien ja raaka-aineiden kuljetuksia, joista syntyy päästöjä. Myös tuhkien käsittelyprosessiin voi liittyä sivuprosesseja esimerkiksi raaka-aineiden hankinnasta tai syntyvien päästöjen käsittelystä, jotka tulee elinkaariarvioinnissa huomioida. Lisäksi loppusijoitus- ja hyötykäyttökohteessa mahdollisesti vapautuvat päästöt kuuluvat tuhkien elinkaareen.

Jätehuoltojärjestelmiä on tarkasteltu monissa maissa elinkaariarviointien avulla (esim. Mendes et al. 2004; Diaz ja Warith 2006). Tutkimuksissa on usein vertailtu erilaisten jätehuoltovaihtoehtojen ympäristökuormituksia, esimerkiksi verraten polttoa, kierrätystä ja kaatopaikkaläjitystä. Kokonaistarkastelujen lisäksi myös jätteenpoltoon keskittyviä elinkaariarviointeja on esitetty (esim. Consonni et al. 2005). Poltossa syntyvät tuhkat ovat pieni osa jätteenpolton elinkaarta ja niiden tarkastelu useimmissa tutkimuksissa jää ainoastaan maininnan tasolle. Jätteenpolton tuhkiin keskittyvissä tarkasteluissa on tutkittu lähinnä pohjatuhkan hyötykäyttöä maarakentamisessa (esim. Birgisdóttir et al. 2006; Olsson et al. 2006). Vastaavia tutkimuksia on tehty myös Suomessa tavanomaisten polttoaineiden poltosta peräisin olevien tuhkien hyötykäytöstä (esimerkiksi Eskola ja Mroueh 1998). Yleisesti jätteenpolton tuhkiin liittyen on tutkittu paljon niiden liukoisuusominaisuuksia sekä käyt-

täytymistä kaatopaikalla. Tuhkien eri käsittelytekniikoiden toimintaan liittyviä tutkimuksia on esitetty paljon erilaisille tuhkanäytteille ja niissä on yleensä keskitytty tarkastelemaan tekniikan kykyä parantaa näytteiden liukoisuusominaisuuksia. Sveitsissä jätteenpolton tuhkien käsittelyä ja loppusijoittamista on tutkittu yhdistäen poliittiset ja tekniset näkökohdat tarkoituksena tuottaa ohjeita tuhkien käsittely- ja loppusijoitusmenetelmän valintaan. Varsinaista eri menetelmien ympäristönäkökohtien arviointia ei tutkimuksessa kuitenkaan ole julkaistu. (Bollinger ja Pictet 2006) Tämän lisäksi muita käsittelymenetelmien ympäristökuormituksia kokonaisvaltaisesti tarkastelevia tutkimuksia on esitetty hyvin vähän.

5 KÄSITTELYTEKNIIKOIDEN YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN MÄÄRITTÄMINEN

Tekniikoita jätteenpolton lentotuhkan ja APC-jätteiden käsittelemiseksi on kehitetty kymmeniä erilaisia. Näin ollen tässä työssä on ympäristönäkökohtien arvioimiseksi valittu tarkasteluun esimerkinomaisesti neljä käsittelytekniikkaa. Valinnassa on pyritty huomioimaan mahdollisimman erilaiset tekniikat, niiden käytön yleisyys sekä soveltuvuus Suomen tilanteeseen. Tarkasteluun on valittu erotusmenetelmistä pesu, jonka erityispiirteinä on sen käyttö esikäsitteilynä monissa prosesseissa sekä siinä syntyvät jätevedet. Kiinteytysmenetelmistä tarkastellaan paljon käytössä olevaa sementtikiinteytystä. Stabilointimenetelmiä kuvaamaan on valittu Ferrox-prosessi, jossa yhdistyvät pesu ja kemiallinen stabilointi sekä termisistä käsittelymenetelmistä arvioidaan vitrifointia. Lisäksi työssä tarkastellaan mahdollisuutta sijoittaa lentotuhkaa ja APC-jätteitä kaatopaikalle ilman käsittelyä tai kuljettaa ne käsiteltäviksi Norjassa sijaitsevalle loppusijoitus- ja hyötykäyttölaitokselle. Viimeksi mainittuja vaihtoehtoja kuitenkin tarkastellaan ensin mainittuja neljää käsittelymenetelmää suppeammin.

5.1 Arvioinnin toteutus

Tuhkien käsittelytekniikoiden ympäristönäkökohtien arviointi jakautuu tässä työssä kolmeen osaan: elinkaarenaikaisen ympäristökuormituksen, loppusijoituksen sekä tekniikan käytön tarkasteluihin. Elinkaaren aikaista ympäristökuormitusta arvioidaan pääosin laskenallisesti huomioiden käsittelyprosessissa tarvittavat raaka-aineet ja syntyvät päästöt. Loppusijoitus sisältyy käsittelyn elinkaareen, mutta sitä tarkastellaan omana osanaan tuhkan liukoisuusominaisuuksien sekä kaatopaikkavaatimusten osalta. Tekniikan käytön tarkastelu sen sijaan ei varsinaisesti liity ympäristövaikutuksiin, mutta vaikuttaa huomattavasti käsittelymenetelmän valintaan. Nämä kolme näkökantaa yhdistetään ns. arviointitaulukossa, johon kootaan yhteen kunkin käsittelyvaihtoehdon ympäristön ja käytön kannalta olennaiset asiat.

Eri käsittelytekniikoiden toimintaperiaatteet kuvataan kunkin menetelmän kohdalla ympäristökuormitusten tarkastelemiseksi. Lisäksi käydään läpi käsittelyyn vaadittavien laitteistojen saatavuuteen, käsittelytekniikan käyttökokemukseen sekä käyttö- ja investointikust-

tannuksiin liittyviä tekijöitä, jotka yhdessä muodostavat tarkastelusta tekniikan käytön -osuuden.

5.1.1 Käsittelyn elinkaaren aikaisten ympäristökuormitusten arviointi

Käsittelyvaihtoehtojen ympäristövaikutusten tarkastelussa hyödynnetään elinkaariarvioinnin periaatteita ja ympäristökuormitukset arvioidaan ns. koko tuhkien käsittelyn elinkaaren ajalta. Työssä ei kuitenkaan suoriteta varsinaista ISO-standardiin perustuvaa elinkaariarviointia ja ympäristökuormituksia arvioidaan joistakin elinkaaren vaiheista ainoastaan sanallisesti. Tarkasteltavaksi elinkaareksi tässä työssä määritetään kuvassa 6 katkoviivalla rajattu alue alkaen käsittelyyn syötettävistä tuhista ja päättyen niiden loppusijoituksesta aiheutuviin ympäristövaikutuksiin. Tarkastelussa ei siis huomioida itse jätteenpolttoprosessiin liittyviä ympäristövaikutuksia tai mahdollisuuksia vaikuttaa tuhkien ominaisuuksiin poltettavien jätteiden käsittelyllä tai poltto- ja savukaasujen puhdistustekniikoilla. Lisäksi oletetaan, että tuhkat loppusijoitetaan myös käsiteltyinä eikä mahdollisia hyötykäyttökohteita oteta mukaan arviointiin. Toiminnallisena yksikkönä, jota kohden kaikki ympäristökuormitukset määritetään, käytetään yhtä tonnia (1000 kg) käsittelemätöntä tuhkaa, josta käytetään merkintää t_t .

Käsittelymenetelmien ympäristövaikutuksista otetaan huomioon tarvittavien raaka-aineiden hankinnassa, erilaisissa kuljetuksissa sekä itse käsittelyprosessissa aiheutuvat luonnonvarojen kulutus ja päästöt sekä mahdolliset syntyvien päästöjen käsittelyprosessit. Käsitellyn tuotteen loppusijoittamisesta aiheutuvat ympäristökuormitukset arvioidaan niin läjitykseen käytettävien koneiden kuin käsitellystä materiaalista maaperään mahdollisesti liukenevien yhdisteidenkin osalta. Lisäksi määritetään tarvittavien kaatopaikkarakenteiden muodostamisesta aiheutuvat kuormitukset. Käsittelylaitosten rakentamisesta aiheutuvia ympäristökuormituksia ei työssä selvitetä, koska niiden merkitys kokonaisuuden kannalta oletetaan pieneksi eikä niiden selvittäminen työn resurssien puitteissa ole mahdollista.

Ympäristökuormitusten määrittämiseksi tässä työssä käytetään sekä käsittelylaitoksilta saatuja että kirjallisuudessa esitettyihin tutkimuksiin perustuvia tietoja. Lisäksi kuormituksia määritetään päästökertoimia käyttäen. Lähtötietojen alkuperä on esitetty tekstissä kyseisen tiedon yhteydessä, jonka lisäksi tietolähteet on koottu liitteeseen III sekä käytettävät päästökertoimet esitetty liitteessä IV. Ympäristökuormitukset on raaka-aineiden tuotantoa

ja kaatopaikkarakenteita lukuun ottamatta laskettu laskentataulukolla, joka on esitetty liitteessä V. Ympäristökuormitusten laskenta kullekin tarkasteltavalle vaihtoehdolle on esitetty liitteissä VI-VII, jonka lisäksi laskennan tulokset esitetään kutakin menetelmää käsittelevissä kappaleissa (5.2-5.7) sekä eri menetelmiä vertaillen kappaleessa 6.1.

Tarkasteltavat ympäristökuormitukset

Ympäristökuormituksista keskitytään laskennallisesti tarkastelemaan raaka-aineiden ja energioresurssien kulutusta sekä ilmapäästöjä. Suppeammin arvioidaan lisäksi jätevesien ja loppusijoitettavasta materiaalista liukenevien aineiden aiheuttamia kuormituksia. Laskennallisista kuormituksista raaka-aineiden kulutus jaetaan luonnonvarojen ja jäteraaka-aineiden kulutukseen. Energiaresurssien kulutuksella sen sijaan tarkoitetaan sekä sähkön tuotantoon että kuljetuksiin tarvittavien energiavarojen käyttöä ja ne arvioidaan päästökertoimien avulla. Energiaresurssien kulutus kattaa käytettyjen polttoaineiden kulutuksen sekä useimmissa tapauksissa myös niiden valmistuksesta aiheutuvan energiavarojen kulutuksen.

Ilmapäästöistä tarkastelussa arvioidaan seuraavia yhdisteitä:

- hiilidioksidi (CO₂)
- hiilimonoksidi (CO)
- typenoksidit (NO_x)
- rikkidioksidi (SO₂)
- haihtuvat orgaaniset yhdisteet eli VOC-päästöt, sisältäen metaanin (CH₄)
- typpioksiduuli (N₂O)
- hiukkaset, ja
- raskasmetallit.

Ilmapäästöt arvioidaan päästökertoimia käyttäen. Kaikista tarkasteltavista prosesseista ei ole saatavissa sovellettavissa olevia päästökertoimia kaikista edellä mainituista yhdisteistä, joita ei näin ollen tarkastelussa pystytä huomioimaan.

Kuljetukset

Raaka-aineiden ja käsitellyn tuhkan kuljetusten ympäristökuormitukset lasketaan Suomessa käytettävien ajoneuvotyyppien keskimääräisillä päästökertoimilla, jotka on esittänyt Mäkelä (2005a) TRALCA-ohjelmassa. TRALCA on VTT:n kuljetusten ja työkonoiden

ympäristöprofiilien laskentajärjestelmä, jota pyritään käyttämään yhtenäisyyden vuoksi kaikissa VTT:n kuljetusten ja työkoneiden elinkaaripäästölaskelmissa (Mäkelä 2005a). Ohjelma pohjautuu vapaassa käytössä olevaan LIPASTO-järjestelmään (saatavissa lähteestä Mäkelä 2005b). Kuljetusmatkojen arvioimiseksi oletetaan, että käsittelylaitos sijaitsee pääkaupunkiseudulla ja 25 km:n päässä tuhkia loppusijoittavalta kaatopaikalta. Lisäksi kaikkien kuljetusten oletetaan tapahtuvan maantiekuljetuksina. Kuljetuksista aiheutuvat päästöt on esitetty raaka-aineen hankinnan ja loppusijoitettavan tuhkan muun tarkastelun yhteydessä. Lisäksi kuljetusmatkojen pituuden vaikutusta käsittelyn kokonaisympäristökuormitukseen arvioidaan herkkyystarkasteluiden avulla tiettyjen menetelmien osalta niitä tarkastelevissa kappaleissa.

Raaka-aineiden hankinta ja veden kulutus

Käsittelyprosesseissa tarvittavien raaka-aineiden hankinnasta huomioidaan niin raaka-aineiden tuotannon kuin käsittelylaitokselle kuljetuksenkin ympäristökuormitukset. Raaka-aineiden kuljetuksia arvioidaan edellisessä kappaleessa esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Raaka-aineina hyödynnettävien, toisissa prosesseissa syntyvien sivutuotteiden tuotannon kuormitusta ei tarkastelussa huomioida, koska sivutuotteita syntyy riippumatta siitä onko niille hyötykäyttöä vai ei. Sivutuotteiden kuljetukset tuhkan käsittelylaitokselle kuitenkin huomioidaan. Veden kulutuksen ympäristökuormituksesta huomioidaan ainoastaan käytettävän veden määrä. Raaka-aineiden hankinnan ympäristökuormitusten laskenta esitetään tarkemmin kunkin käsittelymenetelmän kohdalla.

Energiankulutus

Energiankulutuksen ympäristökuormitus määritetään Suomessa käytettävän energian keskimääräisiä kuormitustietoja käyttäen, jotka on esittänyt Tattari (2004). Tarkastelussa oletetaan, että käytettävä energia on sähköä, joka otetaan sähköverkosta eikä sitä tuoteta itse käsittelylaitoksella.

Prosessissa syntyvät päästöt

Tarkasteltavista käsittelyprosesseista aiheutuvia päästöjä ovat jätevedet ja savukaasut. Savukaasuja syntyy ainoastaan vitrifioinnissa ja niitä käsitellään ko. menetelmän yhteydessä. Jätevesien ympäristökuormituksesta huomioidaan niiden määrän lisäksi veden sisältämien

haitta-aineiden määrät. Jätevesien puhdistuksesta huomioidaan ainoastaan energiankulutus, josta määritettävää ympäristökuormitusta voidaan vertailla muiden käsittelyprosessien kuormitusten kanssa. Toisin sanoen jätevesien käsittelyyn vaadittavia lisäaineita ja siinä syntyvän lietteen ympäristövaikutuksia ei huomioida työssä tarkastelun epävarmuuksien ja monimutkaisuuden sekä vähän saatavilla olevan tutkimustiedon vuoksi. Jätevesien käsittelyyn liittyviä tietoja on esitetty tarkemmin liitteessä I. Kiinteitä jätteitä tai sivutuotteita ei käsittelyprosesseissa synny merkittävästi, joten niitä ei huomioida ympäristökuormitusten tarkastelussa.

5.1.2 Loppusijoituksen ympäristökuormitusten arviointi

Koska tarkastelun kohteena ovat käsittelyprosessit, joiden tarkoituksena on haitallisten materiaalien muuntaminen ympäristölle vähemmän haitalliseen muotoon, eivät käsittelyprosessin raaka-aineiden ja energiankulutuksesta aiheutuvat ympäristövaikutukset kuvaa prosessin hyvyttä kokonaisuudessaan ympäristön kannalta. Näiden kuormitusten lisäksi onkin erityisen tärkeää huomioida myös käsitellyn materiaalin parantuneet ominaisuudet ja siitä ympäristöön vapautuvien päästöjen pieneneminen. Kaatopaikkasijoituksen ympäristökuormitus aiheutuu sijoitettavan materiaalin kuljetuksesta ja levityksestä kaatopaikalle, materiaalista mahdollisesti vapautuvista haitta-aineista sekä tarvittavien kaatopaikkarakenteiden rakentamisesta ja mahdollisesta kaatopaikkavesien keräyksestä ja käsittelystä.

Kuljetus ja läjitys kaatopaikalle

Kaatopaikan oletetaan sijaitsevan 25 km:n päässä käsittelylaitokselta ja loppusijoitettavan tuhkan kuljetuksesta aiheutuvat päästöt arvioidaan muiden kuljetusten tapaan, kuten elinkaaren aikaisten ympäristökuormitusten kohdalla on määritelty. Materiaalin läjitykseen kaatopaikalla käytetään puskutraktoreita, joiden päästöt arvioidaan samoilla kertoimilla, joita on käytetty maarakentamisen elinkaariarvioinnin laskentaohjelma MELI:ssä (Laine-Ylijoki et al. 2000). Kaatopaikkakuljetuksen ja läjityksen ympäristökuormituksen laskenta esitetään muiden kuormitusten ohella liitteessä VI sekä saadut tulokset kunkin vaihtoehdon osalta käsittelyn loppusijoitusta tarkastelevassa kappaleessa. Kaatopaikkakuljetuksen päästöjä arvioidaan lisäksi herkkyystarkasteluilla tiettyjen menetelmien osalta ko. menetelmiä käsittelevissä kappaleissa.

Käsittelyn materiaalin ominaisuudet

Eri menetelmillä käsitellyistä materiaaleista arvioidaan haitta-aineiden vapautuminen kirjallisuudessa esitettyjen liukoisuustestitulosten perusteella. Liukoisuustiedoista pyritään käyttämään muiden lähtötietojen kanssa samasta lähteestä peräisin olevia tietoja ja niistä keskitytään tarkastelemaan kaatopaikkasijoittamiselle oleellisia yhdisteitä. Liukenevien haitta-aineiden mahdollista leviämistä maaperään ei tässä työssä pystytä kuitenkaan mallinnuksen monimutkaisuuden ja laajuuden vuoksi määrittämään. Liukoisuustietojen lisäksi käsitellystä materiaalista tarkastellaan sen määrän muutosta, joka vaikuttaa loppusijoituksen tilantarpeeseen. Samalla käydään läpi muita käsittelyn materiaalin ominaispiirteitä, jotka ovat oleellisia ympäristövaikutusten ja loppusijoituksen kannalta.

Kaatopaikkasijoituksen vaatimukset

Jätteenpolton lentotuhka ja APC-jätteet voidaan sijoittaa sellaiselle kaatopaikalle, jonka kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvot (liite II) ne täyttävät. Eri kaatopaikkaluokat puolestaan vaativat erilaisia rakenne- ja suojakerroksia. Kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvot voidaan tietyissä tapauksissa korottaa kolminkertaisiksi, jolloin rakenne- ja suojakerroksille saateetaan asettaa lisävaatimuksia. Kaatopaikkasijoituksen vaatimuksilla tässä työssä tarkoitetaan siis kaatopaikkaluokkaa, jolle tuhka voidaan ominaisuuksiensa perusteella sijoittaa sekä kaatopaikkaluokan vaatimia suojajärjestelmiä.

Kaatopaikkaluokka, jolle materiaali voidaan sijoittaa, arvioidaan eri käsittelymenetelmillä syntyvien tuotteiden liukoisuusominaisuuksien perusteella. Lisäksi arvioidaan mahdolliset kaatopaikkarakenteiden ja hallintajärjestelmien lisävaatimukset, jos kaatopaikkasijoittamisessa hyödynnetään raja-arvojen kolminkertaistamista. Kaatopaikkakerrosten rakentamisen ympäristökuormitus arvioidaan laskennallisesti käsitellyn tuhkatonnin osuutena kooltaan 10 000 m²:n kaatopaikan suojakerrosten rakentamisen ympäristökuormituksista, joiden laskenta on toteutettu MELI-ohjelman avulla, ja jota on raportoinut Kaartinen (2005). Suojakerrosten rakentamisen aiheuttamat kuormitukset on esitetty liitteessä VII. Suotovesien keräämisestä ja käsittelystä aiheutuvia kuormituksia ei työssä selvitetä.

5.1.3 Ympäristönäkökohtien yhteenveto ja arviointi

Eri käsittelyvaihtoehtojen vertailemiseksi käytetään tässä työssä arviointitaulukkoa, jossa on otettu huomioon tuhkien käsittelymenetelmien kannalta olennaiset ympäristövaikutukset ja menetelmän käytettävyyttä koskevat tekijät. Tähän on päädytty, koska työssä ei suoriteta varsinaista elinkaariarvioinnin mukaista ympäristövaikutusten arviointia, vaan tarkoituksena on esiselvityksen tapaan tuoda esille erilaisten käsittelymenetelmien käytössä huomioitavia seikkoja.

Arviointitaulukkoon kootaan yhteen eri käsittelytekniikoiden ympäristönäkökohdat sekä muut arvioitavat seikat kunkin tekniikan osalta (taulukko 7). Pohjana taulukkoa luotaessa on käytetty kustannus-hyötytarkastelun parametrejä, joita on käytetty organotinapitoisten sedimenttien käsittelyvaihtoehtojen vertailuun (esitetty julkaisussa Vahanne ja Vestola 2007, 70-71). Arviointitaulukon avulla pyritään ottamaan huomioon käsittelytekniikoiden käyttöön liittyviä seikkoja mahdollisimman laaja-alaisesti ja havainnollistamaan erilaisten ja eri asteikoilla mitattavien tekijöiden kokonaisvaikutusta ympäristöön.

Arviointitaulukko koostuu kolmesta osasta, jotka ovat: elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset, käsitellyn materiaalin ominaisuudet ja loppusijoittaminen sekä tekniikan käyttö. Elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset jaetaan taulukossa edelleen kolmeen alakohtaan: luonnonvarojen ja energiaressurssien kulutukseen, ilmapäästöihin sekä jätevesipäästöihin. Nämä kohdat sisältävät myös loppusijoituksesta laskennallisesti arvioidut kuormitukset. Käsitellyn materiaalin ominaisuudet ja loppusijoittaminen -osuus sisältää käsittelyllä aikaansaadun haitta-aineiden liukoisuuden vähenemisen ja muut loppusijoitettavan materiaalin ominaisuudet sekä kaatopaikkasijoituksen vaatimukset mukaan lukien sijoitukseen sopivan kaatopaikkaluokan. Kolmas osa, tekniikan käyttö, kuvaa käsittelymenetelmään vaadittavien laitteistojen saatavuutta, käyttökokemusta sekä käsittelyn varmuutta parantaa tuhkan ominaisuuksia. Lisäksi tekniikan käyttöön liittyvät käsittelyn kustannukset.

Taulukko 7. Käsittelytekniikoiden arviointitaulukko

ARVIOINTITÄULUKKO								
elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset								
a) luonnonvarojen ja energiaresurssien kulutus b) ilmapäästöt c) jätevesipäästöt	<p>a) laskennallisesti selvitettyjen luonnonvarojen ja energiare- surssien kulutus suhteessa muiden tarkasteltavien vaihtoehto- jen vastaaviin tietoihin b) laskennallisesti selvitettyjen ilmapäästöjen määrä suhteessa muiden tarkasteltavien vaihtoehtojen aiheuttamiin päästöihin c) käsittelyssä syntyvien jätevesien ja niiden sisältämien hait- ta-aineiden määrä</p> <p>Elinkaaren aikaisessa ympäristökuormituksessa huomioidaan myös loppusijoittamisesta aiheutuvat luonnonvarojen ja ener- giare- surssien kulutus sekä ilmapäästöt.</p> <p>ARVIOINTI: kuormitus "suuri" (-3) → "vähäinen" (0)</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>---</td> <td>--</td> <td>-</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		---	--	-	0		
	---	--	-	0				
käsittelyn materiaalin ominaisuudet ja loppusijoittaminen								
a) liukoisuusominaisuudet b) muut ominaisuudet c) kaatopaikkavaatimukset	<p>a) haitta-aineiden liukeneminen loppusijoitettavasta materiaa- lista liukoisuustestien perusteella b) muut loppusijoittamiseen vaikuttavat ominaisuudet, esimer- kiksi käsiteltävän materiaalin määrän muutokset c) kaatopaikkaluokka, jolle materiaali voidaan raja-arvojen perusteella sijoittaa sekä muut kaatopaikkavaatimukset</p> <p>ARVIOINTI: ominaisuuksien parantuminen "ei parantumista" (0) → "erittäin suuri parantuminen" (+3)</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td></td> <td>0</td> <td>+</td> <td>++</td> <td>+++</td> <td></td> </tr> </table>			0	+	++	+++	
		0	+	++	+++			
tekniikan käyttö								
a) tekniikan saatavuus b) käyttökokemus ja käsitte- lyn varmuus c) kustannukset	<p>a) menetelmän saatavuus b) käyttökokemus menetelmästä jätteenpolton lentotuhkan ja APC-jätteiden käsittelyssä c) käsittelyn kustannukset</p> <p>ARVIOINTI: tekniikka "huono/tuntematon" (-1) → "hyvä/paljon tutkittu" (+1) kustannukset "suuret" (-1) → "vähäiset" (+1)</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td></td> <td>-</td> <td>0</td> <td>+</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>			-	0	+		
		-	0	+				
arviointipisteet yhteensä: -4 ... +4								

Kullekin taulukon osa-alueelle on arviointiasteikko, jolla pyritään huomioimaan ja laske-
maan yhteen erilaisia ympäristö- ja käyttönäkökohtia karkealla tasolla. Elinkaaren aikais-
ten ympäristökuormitusten osalta asteikko on välillä -3...0, jossa suuret ympäristökuormi-
tukset aiheuttava menetelmä saa -3 pistettä, hyvin vähäisiä kuormituksia aiheuttava 0 pis-
tettä ja niin edelleen. Käsitellyn materiaalin ominaisuudet ja loppusijoittaminen -osuuden

arviointiasteikko on 0...+3. Jos käsitellyn tuhkan ominaisuudet ovat loppusijoittamisen kannalta erittäin hyvät, saa se +3 pistettä. Jos tuhkan ominaisuudet eivät sen sijaan parane ennen sijoitusta, saa osuudesta nolla pistettä, jne. Tekniikan käytön arviointiasteikko on suppeampi, koska sille ei työssä anneta yhtä paljon painoarvoa kuin ympäristövaikutuksille. Asteikko vaihtelee välillä -1...+1, jolloin kallis tai vähän käytetty tekniikka saa -1 pistettä ja halpa tai paljon käytössä oleva menetelmä +1 pistettä. Arviointitaulukot tarkasteltaville käsittelyvaihtoehdoille esitetään kappaleessa 6.2. On syytä kuitenkin huomioida, että arviointiasteikot ovat vain yksi näkökulma tarkastella asioita ja eri seikat painottuvat erilaisissa arviointitilanteissa.

5.2 Sijoittaminen kaatopaikalle ilman käsittelyä

Tuhkan sijoittamista ilman käsittelyä kaatopaikalle tarkastellaan käyttäen esimerkkinä julkaisussa Kaartinen et al. (2007) tutkittua jätteenpolton tuhkaa, jonka liukoisuustietoja on esitetty taulukossa 8. Kyseessä on jae, joka sisältää sekä lentotuhkaa että APC-jätettä. Tuhka on peräisin arinatekniikkaa käyttävältä yhdyskuntajätteiden polttolaitokselta, jossa käytetään puolikuivaa rikinpoistomenetelmää (Kaartinen et al. 2007, liite 4). Samaa tuhkanäytettä tarkastellaan myös pesu- ja FerroX-menetelmien yhteydessä ja siitä käytetään jatkossa nimitystä esimerkkituhka.

Taulukko 8. Erään jätteenpolton tuhkan ominaisuuksia (Kaartinen et al. 2007, liite 4)

suodoksen pH	10,9
LIUENNEET AINEET (mg/kg kuiva-ainetta) (L/S = 10 l/kg)	
arseeni (As)	0,77
barium (Ba)	32
kadmium (Cd)	1,8
kromi (Cr)	0,45
kupari (Cu)	0,13
elohopea (Hg)	<0,001
molybdeeni (Mo)	3,6
nikkeli (Ni)	<0,05
lyijy (Pb)	26
antimoni (Sb)	0,05
seleeni (Se)	1,1
sinkki (Zn)	10
kloridi (Cl)	170 000
fluoridi (F)	35
sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	11 000

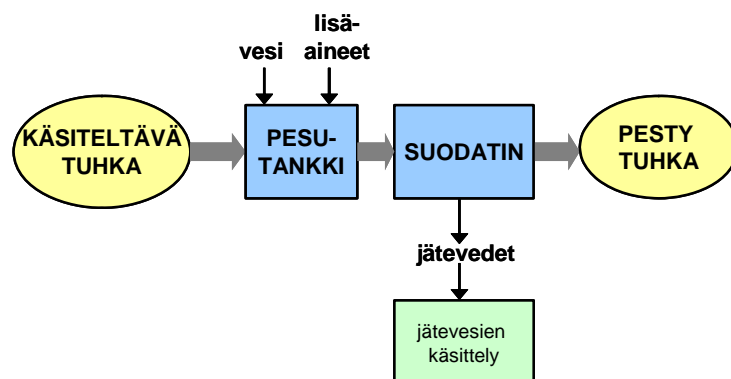
Verrattaessa tuhkan ominaisuuksia kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvoihin (liite II) huomataan, että käsittelemätön tuhka voitaisiin raskasmetallien liukoisuuden osalta sijoittaa ongelmajätteen kaatopaikalle. Kloridin liukoisuus tuhkasta on kuitenkin suurempaa kuin ongelmajätteen kaatopaikan kloridin raja-arvo olisi kolminkertaistettunakaan. Näin ollen tuhkaa ei voida ilman käsittelyä sijoittaa minkäänlaiselle kaatopaikalle, eikä sen ympäristökuormituksia näin ollen selvitetä tässä työssä laskennallisesti. Niitä arvioidaan kuitenkin yhdessä muiden menetelmien ympäristönäkökohtien kanssa luvussa 6.2.

5.3 Pesu

Pesu on usein muihin menetelmiin yhdistettävä käsittelytekniikka, jonka avulla voidaan poistaa käsiteltävästä materiaalista erityisesti liukenevia yhdisteitä. Se on yksinkertainen menetelmä, joka ei kuluta paljoa raaka-aineita eikä energiaa, mutta jossa syntyy haitta-aineita sisältäviä jätevesiä.

5.3.1 Menetelmän toimintaperiaate ja käyttö

Pesu on erotusmenetelmä, jolla pyritään ensisijaisesti poistamaan käsiteltävästä materiaalista liukenevat suolat. Menetelmän toimintaperiaate on esitetty yksinkertaistetusti kuvassa 7. Tuhkien pesulaitteisto koostuu tyypillisesti pesutankista ja suodattimesta. Pesutakissa käsiteltävä tuhka ja vesi sekoitetaan, jonka lisäksi seoksen pH:n tasaamiseksi voidaan käyttää lisäaineita, kuten typpihappoa. Tämän jälkeen seoksesta erotetaan tuhka ja jätevedet suodattamalla. (Mulder 1996, 183)



Kuva 7. Pesun toimintaperiaate

Pesu on yksinkertainen tapa erottaa liukenevat suolat käsiteltävästä tuhkasta, mutta sen ehdottomana haittapuolena ovat kuitenkin syntyvät jätevedet, jotka vaativat usein jatkokäsittelyä. Lisäksi sen teho sitoa raskasmetalleja on suhteellisen huono. Pesua käytetään tyypillisesti yhdistettynä toisiin käsittelymenetelmiin, joilla voidaan vähentää erityisesti raskasmetallien vapautumista. Toisaalta pesemällä voidaan parantaa suolojen erotusta esimerkiksi kiinteytetystä materiaalista. Tuhkia voidaan pestä pelkällä vedellä tai esimerkiksi happamilla vesiliuoksilla, joilla päästään parempaan erotustulokseen erityisesti raskasmetallien osalta. (Chandler et al. 1997, 741 ja 745)

Itse pesuprosessin kustannukset ovat suhteellisen alhaiset, tyypillisesti noin 10 €/t. Kustannuksia kuitenkin nostavat jätevesien käsittelystä aiheutuvat maksut. Pesu on tästä huolimatta hyvä tapa erottaa liukenevat aineet kiintoaineesta, ja sitä on tutkittu ja käytetty paljon sekä yksin että yhdistettynä toisiin käsittelyvaiheisiin. (Laine-Ylijoki et al. 2005, 57)

5.3.2 Pesuprosessin elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset

Tässä työssä tarkastellaan pesumenetelmää, jossa tuhka pestään puhtaalla vedellä eikä pesussa käytetä lisäaineita. Pesu ei näin ollen kuluta energian ja veden lisäksi muita raaka-aineita, joten menetelmän elinkaareen ei sisälly raaka-aineiden hankinta –vaihetta. Prosessissa syntyy kuitenkin jätevesiä, jotka huomioidaan ympäristökuormitusta arvioitaessa. Pesun ympäristökuormituksen arvioinnissa käytetään erityisesti VTT:n julkaisussa Kaartinen et al. (2007) esitettyjä tietoja ja pesun ympäristökuormitusten laskenta on esitetty liitteessä VI (sivut 2-3).

Veden kulutus

Pesuun käytettävän veden määrä riippuu pestävän tuhkan ominaisuuksista sekä tavoiteltavista käsitellyn tuhkan liukoisuusrvoista. Tarkasteltavassa käsittelyprosessissa pesuun käytettiin vettä noin $3,5 \text{ m}^3/\text{t}$ (Kaartinen et al. 2007, 17). Käytettävän veden määrä vaikuttaa käsitellyn energiankulutukseen, jätevesien määrään ja haitta-ainepitoisuuksiin sekä käsitellyn materiaalin ominaisuuksiin. Näiden tekijöiden vaikutusta ei tässä työssä kuitenkaan selvitetä tarkemmin.

Jätevedet

Pesuprosessissa syntyy jätevesiä noin $2,5 \text{ m}^3/\text{t}$, jos pesuveden määräksi on oletettu $3,5 \text{ m}^3/\text{t}$ (Kaartinen et al. 2007, 23). Myös jätevesien koostumus vaihtelee huomattavasti käsiteltävän tuhkan ominaisuuksista sekä käytettävän veden määrästä riippuen. Tyypillisesti ne kuitenkin sisältävät korkeita pitoisuuksia suoloja ja raskasmetalleja. Taulukossa 9 on esitetty pesussa esimerkkituhkasta sekä toisesta APC-jätenäytteestä syntyvien jätevesien koostumustietoja tärkeimpien haitta-aineiden osalta.

Taulukko 9. Pesusta syntyvien jätevesien ominaisuuksia
(Kaartinen et al. 2007, 23)

näyte	esimerkkituhka	APC-jäte
pH	11,0	12,0
kadmium (Cd) [mg/l]	0,24	0,02
kupari (Cu) [mg/l]	0,35	170
lyijy (Pb) [mg/l]	26	450
sinkki (Zn) [mg/l]	3,4	5,6
kloridi (Cl ⁻) [mg/l]	52 000	44 000
sulfaatti (SO ₄ ²⁻) [mg/l]	1 400	1 100

Verrattaessa pesuvesien tietoja liitteessä I esitettyihin raja-arvoihin kunnalliseen jäteveden puhdistukseen syötettäville vesille, huomataan, että molemmat vesinäytteet ylittävät asetetut raja-arvot. Näin ollen vesiä ei voida ilman esikäsittelyä johtaa kunnalliseen jäteveden puhdistukseen. Jätevesien käsittelyn energiankulutuksen aiheuttama ympäristökuormitus on esitetty taulukossa 10 yhdessä käsittelyn energiankulutuksen kanssa, kun oletetaan jätevesien käsittelyn kuluttavan energiaa $10 \text{ kWh}/\text{m}^3$ (katso liite I).

Energiankulutus

Pesuprosessin energiankulutukseksi arvioidaan noin $20 \text{ kWh}/\text{t}$ Ferroxx-prosessin energiankulutustietojen perusteella. Pesun ja jätevesien käsittelyn energiankulutuksesta aiheutuvat ympäristökuormitukset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Pesun energiankulutuksen ympäristökuormitukset

		pesuprosessi	jätevesien käsittely	yhteensä
Energiaresurssien kulutus	MJ	178,0	222,5	400,5
Raaka-aineiden kulutus				
- luonnon raaka-aineet	kg	2,5	3,1	5,6
- jäteraaka-aineet	kg	-	-	-
Päästöt ilmaan				
- CO ₂	g	5980,0	7 475,0	13 455,0
- CO	g	12,5	15,6	28,1
- NO _x	g	13,6	17,0	30,5
- SO ₂	g	10,8	13,5	24,3
- VOC	g	18,7	23,3	42,0
- N ₂ O	g	0,7	0,8	1,5
- hiukkaset	g	19,1	23,8	42,9
- raskasmetallit	mg	2,7	3,4	6,2

5.3.3 Pestyn tuhkan ominaisuudet ja loppusijoitus

Pesemällä pystytään erottamaan tuhka veteen liukenevia suoloja, mutta varsinkin lentotuhkan ja APC-jätteiden käsittelyssä raskasmetallien poisto on vaikeaa. Raskasmetallien vähäinen erottuminen johtuu lentotuhkan ja APC-jätteiden emäksisyydestä, joka suosii ainoastaan amfoteeristen metallien liukenemistä. Muiden raskasmetallien erottaminen vaatii happojen lisäämistä pesuliukseen. Toisin sanoen pesuprosessin tehokkuus ja pestyn tuotteen ominaisuudet ovat hyvin voimakkaasti riippuvaisia seoksen pH:sta sekä käsiteltävän tuhkan ominaisuuksista. (Chandler et al. 1997, 745) Taulukossa 11 on esitetty liukoisuustietoja esimerkkituhkasta (katso kappale 5.2) ennen ja jälkeen pesun.

Taulukko 11. Liukoisuus tuhkasta ennen ja jälkeen pesun (Kaartinen et al. 2007, liite 3)

L/S-suhde 10 l/kg	ennen käsittelyä	pesun jälkeen
pH	10,9	11,1
liuenneet aineet [mg/kg _{ka}]		
arseeni (As)	0,77	0,04
barium (Ba)	32	1,5
kadmium (Cd)	1,8	0,013
kromi (Cr)	0,45	5,3
kupari (Cu)	0,13	0,1
elohopea (Hg)	<0,001	-
molybdeeni (Mo)	3,6	1,89
nikkeli (Ni)	<0,05	0,09
lyijy (Pb)	26	2,72
antimoni (Sb)	0,05	0,01
seleeni (Se)	1,1	0,43
sinkki (Zn)	10	4,2
kloridi (Cl ⁻)	170 000	6 900
fluoridi (F ⁻)	35	<100
sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	11 000	14 000

Lähes kaikkien määriteltyjen haitallisten aineiden liukoisuus on käsittelyllä vähentynyt, lukuun ottamatta kromia, nikkeliä, fluoridia ja sulfaattia. Näiden tulosten ja raja-arvojen perusteella pesty tuhka voitaisiin sijoittaa tavanomaisen jätteen kaatopaikalle. Yleisesti voidaan kuitenkin olettaa, ettei pesulla päästä raskasmetallien osalta näin hyvään lopputulokseen käyttämällä pesuliuksena pelkkää vettä. Näin ollen tarkastelussa oletetaan, että pesty tuhka joudutaan sijoittamaan ongelmajätteen kaatopaikalle. Ongelmajätteen kaatopaikan suojarakenteiden muodostamisesta aiheutuvat ympäristökuormitukset on laskettu liitteessä VII ja tulokset on esitetty taulukossa 12 yhdessä muiden loppusijoituksen kuormitusten kanssa.

Tuhkan määrän oletetaan käsittelyn seurauksena pienenevän noin 20 % eli kaatopaikalle sijoitettavan, käsitellyn tuhkan määrä on 800 kg. Tämän tuhkamäärän kaatopaikalle kuljettamisesta ja läjittämisestä aiheutuva ympäristökuormitus tärkeimpien tekijöiden osalta on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Pestyn tuotteen loppusijoituksen ympäristökuormitukset

		kuljetus	läjitys	kaatopaikka- rakenteet	yhteensä
Energiaresurssien kulutus	MJ	28,7	1,1	0,4	30,1
Raaka-aineiden kulutus					
- luonnon raaka-aineet	kg	0,6	-	328,6	329,2
- jäteraaka-aineet	kg	-	-	-	-
Päästöt ilmaan					
- CO ₂	g	2 070,3	251,2	82,5	2 404,0
- CO	g	0,6	1,7	0,6	2,9
- NO _x	g	17,6	3,3	1,1	22,0
- SO ₂	g	0,2	-	-	0,2
- VOC	g	0,5	0,8	0,3	1,5
- N ₂ O	g	0,1	-	-	0,1
- hiukkaset	g	0,2	-	-	0,2
- raskasmetallit	mg	-	-	-	-

Loppusijoituksen osalta eniten ilmapäästöjä aiheutuu käsitellyn tuhkan kuljettamisesta kaatopaikalle. Luonnonvaroja kuluu kuitenkin eniten kaatopaikkarakenteisiin. Lisäksi ympäristökuormituksia aiheutuu siis tuhkasta maaperään ja vesistöön vapautuvista yhdisteistä.

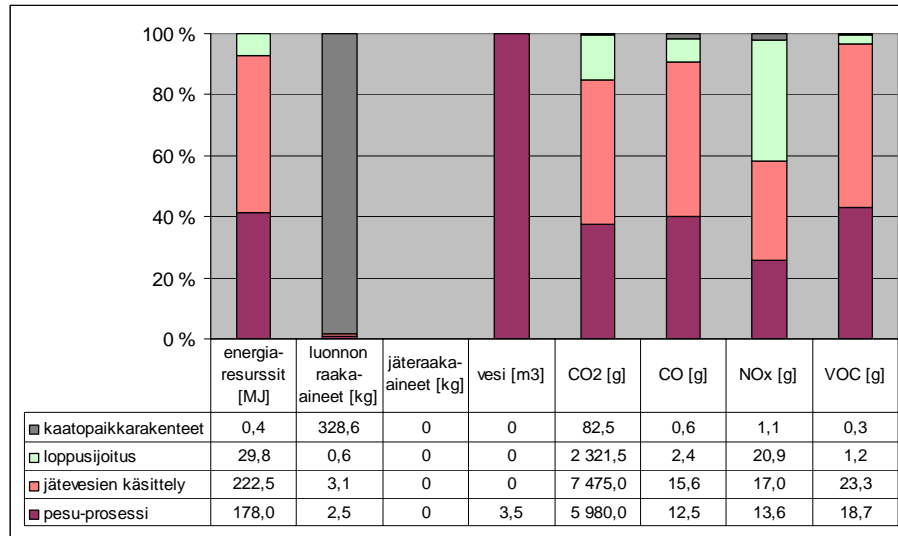
5.3.4 Yhteenveto pesun ympäristökuormituksista

Pesun laskennallisesti arvioidut ympäristökuormitukset on kerätty taulukkoon 13. Koska pesussa ainoa raaka-aine, jota käytetään on vesi, on elinkaaren aikaiset kuormitukset jaoteltu kahteen osaan: prosessin ja kaatopaikkasijoittamisen kuormituksiin. Prosessin ympäristökuormitukset kattavat veden kulutuksen ja sekä pesuprosessin että jätevesien käsittelyn energiankulutuksesta aiheutuvat kuormitukset. Loppusijoitukseen sen sijaan kuuluvat käsitellyn materiaalin kuljetuksesta ja läjityksestä kaatopaikalle sekä kaatopaikkarakenteiden muodostamisesta aiheutuvat kuormitukset.

Taulukko 13. Pesuprosessin elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset

		käsittely- prosessi	loppu- sijoittaminen	yhteensä
Energiaresurssien kulutus	MJ	400,5	30,1	430,6
Raaka-aineiden kulutus				
- luonnon raaka-aineet	kg	5,6	329,2	334,8
- jäteraaka-aineet	kg	-	-	-
Veden kulutus	m ³	3,5	-	3,5
Päästöt ilmaan				
- CO ₂	g	13 455,0	2 404,0	15 859,0
- CO	g	28,1	2,9	31,0
- NO _x	g	30,5	22,0	52,5
- SO ₂	g	24,3	0,2	24,6
- VOC	g	42,0	1,5	43,5
- N ₂ O	g	1,5	0,1	1,6
- hiukkaset	g	42,9	0,2	43,1
- raskasmetallit	mg	6,2	-	6,2

Tuhkan pesun elinkaaren eri vaiheiden aiheuttamat ympäristökuormitukset suhteessa toisiinsa on esitetty kuvassa 8 raaka-aineiden ja energioresurssien kulutuksen sekä merkittävimpien kaasumaisten päästöjen osalta. Kuvassa arvioinnin helpottamiseksi pesuprosessista on irrotettu omaksi vaiheekseen jätevesien käsittely ja loppusijoittamisesta kaatopaikkarakenteiden muodostaminen.



Kuva 8. Pesun elinkaaren vaiheiden osuudet ympäristökuormituksista

Taulukon ja kuvan perusteella voidaan todeta, että jätevesien käsittely aiheuttaa lähes puolet kaikista pesun aiheuttamista ilmapäästöistä. Jätevesien käsittelyn kuormitukseen kuuluu kuitenkin ainoastaan niiden käsittelyprosessin energiankulutus, jonka lisäksi kuormituksia aiheutuu myös mahdollisesti käsittelyyn tarvittavista lisäaineista sekä käsittelyssä syntyvästä lietteestä. Itse pesuprosessin energiankulutus aiheuttaa noin 40 %:n kaikista kuormituksista. Lisäksi pestyn tuhkan loppusijoitus ja kaatopaikkarakenteiden muodostaminen yhdessä aiheuttavat keskimäärin noin neljäsosan kokonaisympäristökuormituksista, joka on merkittävä osuus. Tämä ei kuitenkaan johdu kaatopaikkasijoittamisen suuresta kuormituksesta vaan käsittelymenetelmän muiden elinkaaren vaiheiden vähäisistä kuormituksista. Luonnon raaka-aineiden kulutus kuitenkin aiheutuu lähes ainoastaan kaatopaikkarakenteista, koska niiden kulutus käsittelyssä muuten on hyvin vähäistä.

Herkkyystarkastelut

Pesuvien määrän lisäämisen vaikutusta prosessin energiankulutukseen, käsittelyn tuotteen ominaisuuksiin tai jätevesiin ei tässä yhteydessä voida selvittää. Näin ollen ympäristökuormituksen laskennasta toteutetaan herkkyystarkastelu ainoastaan kaatopaikalle kuljetuksen osalta. Loppusijoitus aiheuttaa merkittävän osan elinkaarenaikaisista ympäristökuormituksista perusmallissa, jossa käsittelylaitokselta on 25 km:ä matkaa kaatopaikalle. Liitteessä VI (sivu 3) esitetään herkkyystarkasteluiden ympäristökuormitukset, jos kaato-

paikka sijaitsee käsittelylaitoksen yhteydessä (välimatka 0 km) tai 50 km:n päässä käsittelylaitokselta.

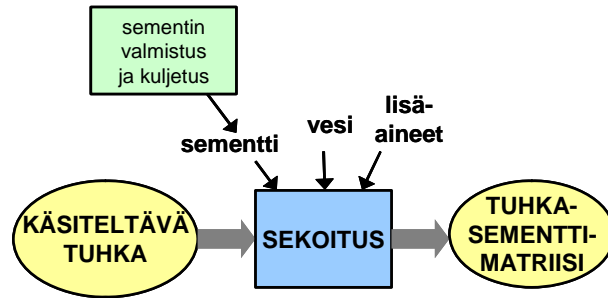
Ensin tarkastellaan tilannetta, jossa oletetaan, ettei käsiteltyä tuotetta tarvitse kuljettaa kaatopaikalle, vaan että kaatopaikka sijaitsee käsittelylaitoksen yhteydessä. Koska kyseessä on kuljetusten muutos, vähenevät eniten typenoksidipäästöt, joita syntyy suhteessa muihin ilmapäästöihin huomattavasti enemmän liikenteestä kuin energiantuotannosta. Jos oletetaan, ettei käsiteltyä materiaalia kuljeteta käsittelylaitokselta mihinkään, vaan loppusijoituksesta huomioidaan ainoastaan läjityksen koneiden sekä kaatopaikkarakenteiden aiheuttamat kuormitukset, vähenee energioresurssien kulutus noin 7 %:lla. Ilmapäästöistä hiilidioksidi- ja typenoksidien kokonaispäästöt vähenevät enemmän kuin energioresurssien kulutus: hiilidioksidipäästöt noin 13 %:a ja typenoksidien päästöt noin 34 %:a verrattuna perustilanteeseen. Jos kuljetusmatka sen sijaan kaksinkertaistuu perustilanteesta, kasvavat kuormitukset vastaavasti kuin edellisessä tapauksessa vähenevät. Eniten kuljetusmatkojen muutos vaikuttaa siis hiilidioksidi- ja typenoksidien päästöihin.

5.4 Sementtikiinteytys

Sementtikiinteytys on yleisin käytössä oleva jätteenpolton lentotuhkan ja APC-jätteiden käsittelymenetelmä. Se on kiinteytysmenetelmä, jossa haitallisten aineiden leviäminen tuhka- kasta pyritään estämään sitomalla käsiteltävä materiaali sementtiin. Menetelmän ympäristövaikutuksista merkittävän osan muodostaa sementin valmistus, jota käsitellään omassa kappaleessaan ennen muiden ympäristövaikutusten tarkastelua.

5.4.1 Menetelmän toimintaperiaate ja käyttö

Sementtikiinteytyksessä käsiteltävä materiaali sekoitetaan sementin, sen ominaisuuksia parantavien lisäaineiden sekä veden kanssa. Sementtinä prosessissa käytetään yleensä Portland-sementtiä. Menetelmän toimintaperiaate yksinkertaistettuna on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Sementtikiinteytyksen toimintaperiaate

Käsiteltävä tuhka reagoi sementin ja veden kanssa ja samalla muodostuu metallihydroksideja ja -karbonaatteja, jotka ovat käsittelemättömiä metalliyhdisteitä vähemmän liukoisia. Tyypillisesti lyijyn ja muiden metallien liukoisuuden pienentämiseksi prosessissa käytetään lisäaineina esimerkiksi silikaattisia ja sulfidipitoisia reagensseja. (European Comission 2006, 412) Vaikka kiinteytysprosessiin lisätään vettä, ei siinä synny jätevesiä, koska vesi sitoutuu tuhka-sementtimatriisiin. Lopuksi kiinteytetty materiaali yleensä pilkotaan lohkoiksi (esim. tilavuudeltaan 1 m³) tai sijoitetaan sellaisenaan loppusijoituskohteeseen (ISWA 2003a, 22).

Sementtikiinteytyksessä hyödynnetään jo olemassa olevaa tekniikkaa, joka on pitkälle kehitettyä ja jossa voidaan huomioida käsiteltävän materiaalin laadun vaihtelut sementin määrää ja lisäaineita vaihtelemalla. Sementtikiinteytyksen kustannuksiksi on arvioitu noin 25 €/t, johon ei kuitenkaan sisälly käsittelylaitoksen investointikustannuksia. Menetelmän haittapuolena on sementin lisäyksen aiheuttama merkittävä jätemateriaalin tilavuuden kasvu. Lisäksi jotkin tuhkan sisältämät aineet voivat vaikuttaa sementin kovettumiseen ja heikentää näin ollen käsitellyn tuotteen ominaisuuksia. Sementtikiinteytystä on käytetty jätteenpolton tuhkien lisäksi myös monien muuntotyypisten vaarallisten jätteiden, kuten matala-radioaktiivisten jätteiden haitallisuuden vähentämiseen. Menetelmä on monissa maissa myös hyväksytty viranomaisten toimesta jätteenpolton APC-jätteiden käsittelykeinoksi. (Chandler et al. 1997, 777-778; ISWA 2003a, 22-24)

5.4.2 Sementin valmistus ja kuljetus

Kiinteytyksessä lisättävän sementin määrä vaihtelee huomattavasti prosessin, käsiteltävän tuhkan sekä käsittelyllä tavoiteltavien materiaalin ominaisuuksien mukaan. Sementin määrän kasvaessa suhteessa käsiteltävän tuhkan määrään kasvavat niin käsittelyn kustannukset,

loppusijoitettavan materiaalin määrä kuin sementin tuotannosta aiheutuvat ympäristövaikutuksetkin. Samalla kuitenkin voidaan vähentää riskiä tuhka-sementtimatriisista vapautuvista haitta-aineista. (Mangialardi et al. 1999, 54) Käsiteltävän tuhkan joukkoon lisätään sementtiä ja lisäaineita tyypillisesti noin 50 %:a käsiteltävän materiaalin kuivapainosta (IS-WA 2003a, 23). Määrä riippuu paljolti muun muassa käsiteltävän tuhkan sisältämien suolojen, erityisesti kloridin ja sulfaatin, sekä raskasmetallien pitoisuuksista. (Österbacka sähköpostiviesti 27.3.2007)

Sementin käytön ympäristökuormitus aiheutuu sementin raaka-aineiden kulutuksesta ja kuljetuksesta, valmistusprosessin energiankulutuksesta sekä sementin kuljetuksesta kiinteytyslaitokselle. Sementin tuotannon ympäristökuormitukset on laskettu MELI-laskentaohjelman avulla, jonka toimintaa on kuvattu julkaisuissa Laine-Ylijoki et al. (2000) ja Eskola (2001). Suomessa on kaksi sementintuotantolaitosta, joista käsittelyyn tarvittava sementti oletetaan valmistettavan tarkasteltavaa käsittelylaitosta lähempänä sijaitsevalla laitoksella, eli Paraisilla. Näin ollen sementin kuljetusmatkaksi tulee noin 170 km (Parainen-Helsinki). Sementin kuljetuksesta tuhkan käsittelylaitokselle aiheutuva kuormitus arvioidaan samoilla päästökertoimilla muiden kuljetusten päästöjen kanssa TRALCA-ohjelmaa käyttäen, mutta sementin valmistukseen käytettävien raaka-aineiden kuljetukset arvioidaan MELI-ohjelman tiedoilla. Tuhkan kiinteytykseen oletetaan tässä käytettävän sementtiä 300 kg/t_e, josta aiheutuva ympäristökuormitus on esitetty taulukossa 14 sekä tarkemmin liitteessä VI (sivu 5). Taulukossa esitetty sementin valmistus kattaa sekä sementin raaka-aineiden kuljetuksen että valmistusprosessin energiankulutuksen.

Taulukko 14. Ympäristökuormitukset valmistettaessa 300 kg sementtiä

		sementin valmistus	sementin kuljetus käsittelylaitokselle	yhteensä
Energiaressurssien kulutus	MJ	1 041,9	73,2	1115,1
Raaka-aineiden kulutus				
- luonnon raaka-aineet	kg	281,0	1,6	282,6
- jäteraaka-aineet	kg	19,0	-	19,0
Päästöt ilmaan				
- CO ₂	g	1 087 904,8	5 279,3	1 093 184,1
- CO	g	389,0	1,6	390,6
- NO _x	g	10 936,2	44,9	10 981,1
- SO ₂	g	137,8	0,6	138,3
- VOC	g	166,6	1,2	167,7
- N ₂ O	g	-	0,2	0,2
- hiukkaset	g	339,7	0,5	340,2
- raskasmetallit	mg	-	-	-

5.4.3 Sementtikiinteytyksen elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset

Sementtikiinteytysprosessin ympäristökuormitukset aiheutuvat sementin ja lisäaineiden valmistuksessa ja kuljetuksesta, veden kulutuksesta sekä kiinteytysprosessin energiankulutuksesta. Sementin valmistuksesta ja kuljetuksesta käsittelylaitokselle aiheutuvat kuormitukset on esitetty yllä luvussa 5.4.2 ja menetelmän kuormitusten laskenta kokonaisuudessaan on esitetty liitteessä VI (sivut 4-6).

Veden kulutus

Kiinteytettävään materiaaliin lisättävän veden määrä vaihtelee huomattavasti ja sen on raportoitu olevan 30-100 % materiaalin kuivapainosta (ISWA 2003a, 23, Österbacka sähköpostiviesti 27.3.2007). Tässä vedenkulutukseksi oletetaan 0,3 m³.

Lisäaineet

Sementtikiinteytyksessä käytettävät lisäaineet vaihtelevat erittäin paljon käsiteltävän materiaalin ominaisuuksista, käsittelyprosessista sekä lisäaineiden saatavuudesta ja kustannuksista riippuen. Seosaineina voidaan usein hyödyntää myös toisissa prosesseissa syntyviä sivutuotteita. Tässä sivutuotteiden määräksi oletetaan 300 kg ja niiden oletetaan olevan samalla laitosalueella syntyviä toisen prosessin sivutuotteita. (Österbacka sähköpostiviesti 27.3.2007) Näin ollen lisäaineiden tuotannosta ja kuljetuksesta ei oleteta syntyvän ympäristökuormitusta.

Energiankulutus

Sementtikiinteytysprosessin energiankulutuksen on raportoitu vaihtelevan huomattavasti (ISWA 2003a, 23). Keskimääräiseksi energiankulutukseksi arvioidaan noin 15-20 kWh/t_t (Österbacka sähköpostiviesti 27.3.2007). Tässä tarkastelussa energiankulutukseksi oletetaan 17,5 kWh, jonka ympäristökuormitukset on esitetty taulukossa 15. Itse kiinteytysprosessin lisäksi energiaa kuluu myös sementin valmistuksessa, jonka kulutus ja kuormitukset on esitetty kappaleessa 5.4.2.

Taulukko 15. Kiinteytysprosessin energiankulutuksen ympäristökuormitukset

Energiaressurssien kulutus	MJ	155,8
Raaka-aineiden kulutus		
- luonnon raaka-aineet	kg	2,2
- jäteraaka-aineet	kg	-
Päästöt ilmaan		
- CO ₂	g	5 232,5
- CO	g	10,9
- NO _x	g	11,9
- SO ₂	g	9,5
- VOC	g	16,3
- N ₂ O	g	0,6
- hiukkaset	g	16,7
- raskasmetallit	mg	2,4

5.4.4 Sementtiin kiinteytetyn tuhkan ominaisuudet ja loppusijoitus

Käsiteltävän tuhkan sekoittaminen sementtiin lisää merkittävästi jätemateriaalin tilavuutta ja painoa, mikä puolestaan kaatopaikalle sijoitettaessa lisää kuljetusten sekä tilan tarvetta. Sementin lisääminen tuhkaan vähentää sen vedenjohtavuutta sekä lisää kestävyyttä. Kiinteytyksen lopputuote on myös helposti käsiteltävää, eikä se pölyä. Sementtikiinteytys siis parantaa käsiteltävän tuhkan fysikaalisia ominaisuuksia sekä suurentaa agglomeroitujen partikkelien kokoa, mikä puolestaan vähentää haitta-aineiden kosketusta veden kanssa ja vapautumista edelleen ympäristöön. (Chandler et al. 1997, 767-777; ISWA 2003a, 23)

Metallien vapautuminen kovettuneesta tuhka-sementtimatriisista on yleensä hyvin vähäistä niin pitkään kun matriisi säilyttää fysikaalisen rakenteensa ja pH ei kohoja korkeaksi. Sementtikiinteytyksen haittapuolena on kuitenkin suolojen, erityisesti kloridin, liukeneminen, mitä käsitteyllä ei pystytä kunnolla estämään. (Chandler et al. 1997, 777-778; ISWA 2003a, 22-23) Keskimääräisiä liukoisuustietoja tärkeimpien haitta-aineiden osalta tuhka-sementtimatriisista on koottu taulukkoon 16.

Taulukko 16. Kiinteytetyn tuhka-sementtimatriisin liukoisuusominaisuudet

(Hjelmar et al. 2005, Österbacka sähköpostiviesti 27.3.2007)

	liuenneet aineet [mg/kg _{ka}] (L/S-suhde 10 l/kg)
kadmium (Cd)	<0,01
kromi (Cr)	0,1-1
kupari (Cu)	0,05 – 0,1
lyijy (Pb)	0,01-1
sinkki (Zn)	<0,05
kloridi (Cl ⁻)	20 000 – 50 000
sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	10 000 – 12 000

Taulukossa esitettyjen liukoisuustietojen perusteella tuhka-sementtimatriisi voitaisiin raskasmetallien osalta sijoittaa tavanomaisen tai jopa pysyvän jätteen kaatopaikalle. Myös sulfaatti alittaa tavanomaisen jätteen raja-arvot, mutta kloridin liukoisuus ylittää ongelmajätteen kaatopaikankin raja-arvon. Kolminkertaistamalla kloridin raja-arvo voitaisiin matriisi kuitenkin sijoittaa ongelmajätteen kaatopaikalle. Koska kyseessä on kiinteytetty materiaali, voidaan olettaa, ettei kaatopaikkarakenteille määräydy raja-arvojen kolminkertaisemisesta kuitenkaan lisävaatimuksia. Ongelmajätteen kaatopaikkarakenteiden muodostamisesta aiheutuvat ympäristökuormitukset on esitetty taulukossa 17 yhdessä muiden loppusijoituksen aiheuttamien kuormitusten kanssa ja niiden laskenta on esitetty liitteessä VII).

Tässä arvioinnissa oletettiin, että sementtiä ja seosaineita lisätään kiinteytettävään tuhkaan yhteensä 600 kg sekä vettä 0,3 m³, jonka massa on noin 300 kg. Näin ollen kaatopaikalle kuljetettavan materiaalin määrä on noin 1900 kg. Loppusijoituksesta aiheutuvat ympäristökuormitukset on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Sementtikiinteytetyn tuhkan loppusijoituksen ympäristökuormitukset

		kuljetus	läjitys	kaatopaikkarakenteet	yhteensä
Energiaresurssien kulutus	MJ	68,2	2,4	0,8	71,3
Raaka-aineiden kulutus					
- luonnon raaka-aineet	kg	1,5	-	720,3	721,8
- jäteraaka-aineet	kg	-	-	-	-
Päästöt ilmaan					
- CO ₂	g	4 917,0	550,7	180,9	5 648,6
- CO	g	1,5	3,9	1,2	6,5
- NO _x	g	41,8	7,2	2,4	51,4
- SO ₂	g	0,5	-	-	0,5
- VOC	g	1,1	1,7	0,6	3,4
- N ₂ O	g	0,2	-	-	0,2
- hiukkaset	g	0,5	-	-	0,5
- raskasmetallit	mg	-	-	-	-

5.4.5 Yhteenveto sementtikiinteytyksen ympäristökuormituksista

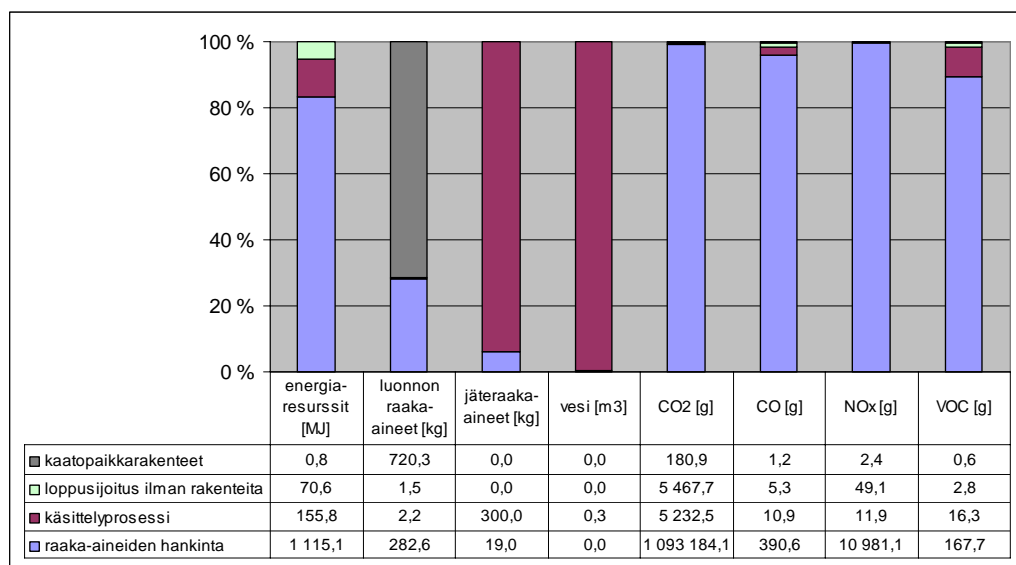
Sementtikiinteytykselle lasketut elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset on koottu yhteen taulukkoon 18. Elinkaari on jaettu kolmeen osaan: raaka-aineiden hankintaan, kiinteytysprosessiin ja loppusijoitukseen. Raaka-aineiden hankinta vastaa sementin tuotannosta ja kuljetuksesta aiheutuvia kuormituksia, kiinteytysprosessiin kuuluu itse kiinteytysprosessis-

sa kulutettava energia ja vesi, ja loppusijoitus kattaa kiinteytetyn materiaalin kuljetuksen ja läjityksen kaatopaikalle sekä kaatopaikkarakenteiden muodostamisen.

Taulukko 18. Sementtikiinteytyksen elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset

		raaka-aineiden hankinta	käsittely-prosessi	loppu-sijoittaminen	yhteensä
Energiaresurssien kulutus	MJ	1 115,1	155,8	71,3	1 342,2
Raaka-aineiden kulutus					
- luonnon raaka-aineet	kg	282,6	2,2	721,8	1006,6
- jäteraaka-aineet	kg	19,0	300,0	-	319,0
Veden kulutus	m ³	0	0,3	0	0,3
Päästöt ilmaan					
- CO ₂	g	1 093 184,1	5 232,5	5 648,6	1 104 065,2
- CO	g	390,6	10,9	6,5	408,0
- NO _x	g	10 981,1	11,9	51,4	11 044,4
- SO ₂	g	138,3	9,5	0,5	148,3
- VOC	g	167,7	16,3	3,4	187,3
- N ₂ O	g	0,2	0,6	0,2	0,9
- hiukkaset	g	340,2	16,7	0,5	357,3
- raskasmetallit	mg	-	2,4	-	2,4

Kuvassa 10 on esitetty kiinteytyksen eri elinkaaren vaiheiden ympäristökuormitusten suhdetta toisiinsa raaka-aineiden ja energioresurssien kulutuksen sekä tärkeimpien kaasumaisien päästöjen osalta. Kuvassa loppusijoittamisen kuormituksesta on eritelty omaksi vaiheekseen kaatopaikkarakenteiden muodostaminen, jonka aiheuttamat kuormitukset ovat kuitenkin hyvin pieniä luonnon raaka-aineiden kulutusta lukuun ottamatta.



Kuva 10. Sementtikiinteytyksen elinkaaren vaiheiden osuus ympäristökuormituksista

Taulukon ja kuvan perusteella voidaan huomata, että menetelmä kuluttaa paljon niin luonnonvaroja kuin jäteraaka-aineitakin. Myös energiaresurssien kulutus on suurta. Elinkaaren vaiheista raaka-aineiden hankinta aiheuttaa ylivoimaisesti suurimmat ympäristökuormitukset. Käsittelyprosessi ja loppusijoittaminen aiheuttavat toisiinsa nähden lähes yhtä paljon hiilidioksidipäästöjä, koska prosessin energiankulutus on suhteellisen pientä ja loppusijoitettavan materiaalin määrän kasvaessa käsittelyn seurauksena myös loppusijoituksesta aiheutuu paljon päästöjä. Luonnon raaka-aineiden kulutuksesta kaatopaikkarakenteet aiheuttavat kuitenkin sementin valmistustakin suuremman osan.

Herkkyystarkastelut

Sementtikiinteistyksen osalta herkkyystarkasteluilla arvioidaan sekä lisättävän sementin määrän että sementin kuljetusmatkan pituuden vaikutusta kuljetusten ympäristökuormitukseen. Kuormitukset näissä tilanteissa on esitetty liitteessä VI (sivu 6). Ensin tarkastellaan tuhkaan lisättävän sementin määrän vaikutusta kuljetuksista aiheutuviin päästöihin. Perustilanteessa ympäristökuormitus arvioitiin käyttäen $300 \text{ kg}_{\text{sementtiä}}/t_t$. Vaihtoehtoisina sementin määrinä pidetään $100 \text{ kg}_{\text{sementtiä}}/t_t$ ja $500 \text{ kg}_{\text{sementtiä}}/t_t$. Jos sementtiä käytetään ainoastaan $100 \text{ kg}/t_t$, vähenee koko elinkaaren kuormituksista luonnonvarojen käyttö noin 26 %:a. Energiaresurssien kulutus vähenee samalla jopa noin 56 %:a. Ilmapäästöistä huomattavimmin vähenevät rikkidioksidipäästöt noin 59 %:lla. Hiilidioksidipäästöt vähenevät noin 21 %:a. Jos sementtiä käytetään $500 \text{ kg}/t_t$, kasvavat päästöt vastaavalla suuruudella. On kuitenkin huomioitava, että tarkastelussa sementin määrän muutos ei vaikuta tuhkan käsittelyprosessin energiankulutukseen, joka todellisuudessa pienenee lisättävän sementin määrän pienentyessä. Lisäksi haitta-aineiden vapautuminen tuhka-sementtimatriisista lisääntyy sementin määrän vähentyessä ja päinvastoin vähenee sementin määrän kasvaessa, mikä tulee ottaa huomioon ympäristökuormituksia arvioitaessa.

Toiseksi kuormitusten laskennan herkkyyttä arvioidaan tarkastelemalla tilannetta, jossa tuhkan käsittelylaitos sijaitsee sementin tuotantolaitoksen yhteydessä. Tilanteesta kuitenkin oletetaan, että myös tuhka syntyy tämän laitoksen yhteydessä, jolloin tuhkan kuljetuksesta käsittelylaitokselle ei aiheudu kuormituksia. Näin ollen perustilanteesta vähennetään sementin kuljetuksesta tuotantolaitokselta tuhkan käsittelylaitokselle syntyvä kuormitus. Energiaresurssien kokonaiskulutus vähenee tilanteessa 5,5 %:a. Muut kuormitukset, lukuun ottamatta typpioksiduulipäästöjä, vähenevät alle prosentin. Typpioksiduulin muodos-

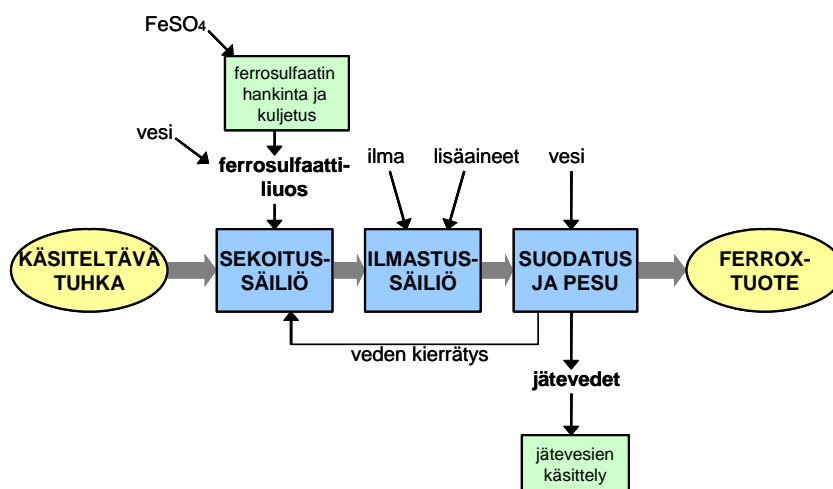
tumista sementin tuotantoprosessissa ei ole huomioitu MELI:ssä tai se on erittäin vähäistä, jonka vuoksi kuljetusmatkan poistuminen vähentää sen kokonaispäästöjä huomattavasti. Kokonaisuudessaan kuitenkin tuhkan käsittelylaitoksen sijaitseminen sementintuotantolaitoksen yhteydessä vaikuttaa kokonaiskuormitukseen vain vähän.

5.5 Ferrox-prosessi

Ferrox-prosessi on kemiallisen stabiloinnin ja pesun yhdistelmä, jolla saadaan käsiteltyä lentotuhka ja APC-jäte hyvin pysyvään, vähäliukoiseen muotoon. Kyseessä on uudempi käsittelytekniikka, jolla on saavutettu hyviä tuloksia. Ympäristökuormitusten osalta ongelmallisia ovat kuitenkin käsittelyssä syntyvät jätevedet.

5.5.1 Menetelmän toimintaperiaate ja käyttö

Ferrox-prosessi on Tanskassa kehitetty stabilointimenetelmä, jossa liukoiset aineet erotetaan vesiliuokseen ja metallit stabiloidaan ferrosulfaatin avulla. Menetelmässä yhdistetään siis pesu ja kemiallinen stabilointi, jotta saadaan aikaan mahdollisimman pysyvä lopputuote. Prosessissa syntyvien, paljon suoloja sisältävien jätevesien raskasmetallipitoisuus pyritään pitämään alhaisena, jotta niiden käsittelyntarve olisi mahdollisimman pieni. Samalla pyritään hyödyntämään yksinkertaista ja edullista tekniikkaa, jolla voidaan kuitenkin saavuttaa tavoitellut ympäristöhyödyt. (Lundtorp 2001, 9) Ferrox-prosessin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Ferrox-prosessin toimintaperiaate

Prosessin ensimmäisessä vaiheessa käsiteltävä tuhka, ferrosulfaattiliuos ja vesi sekoitetaan sekoitussäiliössä. Käytettävä ferrosulfaattiliuos valmistetaan sekoittamalla veden kanssa ferrosulfaattiheptahydraattia ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), joka on titaanin erotuksessa syntyvä sivutuote. Sekoittaessa materiaalit keskenään saostuu ferrosulfaatin sisältämä kahdenarvoinen rauta kiinteään muotoon hydroksideiksi ($\text{Fe}(\text{OH})_2$). Samalla helposti liukenevat aineet, kuten kloori (Cl) erottuvat käsiteltävästä tuhkasta liuetessaan veteen. (Lundtorp 2001, III ja 23-29)

Käsittelyn seuraavassa vaiheessa seokseen lisätään happea ilmastussäiliössä, jolloin rauta hapettuu oksideiksi, jotka sitovat raskasmetalleja. Samalla seoksen pH tasataan lisäaineilla, joina voidaan käyttää esimerkiksi hiilidioksidia (CO_2), ferrosulfaattia (FeSO_4) tai rikkihappoa (H_2SO_4). pH:n tasauksella pyritään vähentämään veteen erottuvien raskasmetallien määrää, ja näin ollen vähentämään jätevesien käsittelyn tarvetta. Lopuksi suodatuksella erotetaan kiintoaineet vedestä, eli syntyy ns. Ferrox-tuote ja jätevesiä. Jätevedet sisältävät erittäin korkeita pitoisuuksia suoloja sekä jonkin verran raskasmetalleja. Lisäksi suodattakku voidaan pestä puhtaalla vedellä suolojen erotuksen parantamiseksi. Tämä pesuvesi voidaan kierrättää uudelleen käytettäväksi prosessin alkuun sekoituksessa käytettäväksi vedeksi, ja vähentää näin ollen käsittelyyn tarvittavan veden määrää. (Lundtorp 2001, 10, 29, 34, 39 ja 43; ISWA 2003a, 31)

Ferrox-menetelmää on tutkittu pilot-mittakaavassa, ja prosessi on suunniteltu myös täyteen mittakaavaan, mutta yhtään varsinaista Ferrox-menetelmää käyttävää laitosta ei ole vielä toiminnassa. Lentotuhkan ja APC-jätteiden käsittelykustannuksiksi Ferrox-prosessissa on arvioitu noin 65 €/t_t sisältäen investointikustannukset laitoksella, jonka kapasiteetti on 20 000 t_t/vuosi. (ISWA 2003a, 32)

5.5.2 Ferrox-prosessin elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset

Ferrox-prosessin elinkaareen kuuluvat prosessiin tarvittavien raaka-aineiden hankinta ja kuljetukset, prosessin energiankulutus sekä siinä syntyvät jätevedet. Ympäristökuormitusten arvioinnissa käytettävät Ferrox-tuotteen ja syntyvien jätevesien koostumustiedot perustuvat VTT:n tutkimuksiin, jotka on esitetty julkaisussa Kaartinen et al. 2007. Ympäristökuormitusten laskenta on esitetty liitteessä VI (sivut 7-8).

Veden kulutus

Vettä tarvitaan Ferrox-prosessissa kolmessa vaiheessa: ferrosulfaattiliuoksen valmistamisessa, sekoitusvaiheessa sekä käsitellyn tuotteen pesussa. Sekoituksessa tarvittavaksi vedeksi voidaan kuitenkin kierrättää pesussa käytettävä vesi ja vähentää näin ollen vedenkulutusta. Menetelmän veden kulutus on tyypillisesti yhteensä noin 3-4 m³/t_t (Lundtorp 2001, 43).

Ferrosulfaatin hankinta

Prosessissa käytettävä ferrosulfaattiliuos valmistetaan titaanioksidin tuotannossa sivutuotteena syntyvästä ferrosulfaatista (FeSO₄). Käsitelyssä ferrosulfaattia tarvitaan noin 80 kg/t_t. Ympäristökuormitusten laskennassa oletetaan, että pH:n tasauksessa käytetään ferrosulfaattia, joka on huomioitu kokonaismäärässä.

Suomessa ferrosulfaattia syntyy titaanioksidin sivutuotteena vain yhdellä tuotantolaitoksella, joka sijaitsee Porissa (Nieminen ja Nurminen 2002). Koska ferrosulfaatti on toisen prosessin sivutuote, sen valmistuksen ympäristökuormituksia ei oteta tarkastelussa huomioon. Kuljetuksesta aiheutuvat päästöt kuitenkin huomioidaan olettamalla kuljetusmatkaksi Ferrox-laitokselle 250 km (Pori-Helsinki) ja ne on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. Ferrosulfaatin kuljetuksesta aiheutuvat ympäristökuormitukset

Energiaresurssien kulutus	MJ	28,7
Raaka-aineiden kulutus		
- luonnon raaka-aineet	kg	0,6
- jäteraaka-aineet	kg	-
Päästöt ilmaan		
- CO ₂	g	2 070,3
- CO	g	0,6
- NO _x	g	17,6
- SO ₂	g	0,2
- VOC	g	0,5
- N ₂ O	g	0,1
- hiukkaset	g	0,2
- raskasmetallit	mg	-

Jätevedet

Ferrox-käsittelystä syntyy jätevesiä tyypillisesti noin 2,5 m³/t_t, kun prosessiin syötetään vettä 3,5 m³/t_t. Prosessissa syntyvät jätevedet sisältävät korkeita pitoisuuksia liukoisia suoloja sekä jonkin verran raskasmetalleja. Niiden koostumus vaihtelee kuitenkin huomatta-

vasti riippuen käsiteltävän materiaalin ominaisuuksista. Taulukossa 20 on esitetty esimerkkituhkasta (katso kappale 5.2) sekä APC-jätettä sisältävästä näytteestä Ferrox-käsittelyssä syntyvien jätevesien koostumustietoja tärkeimpien haitta-aineiden osalta.

Taulukko 20. Ferrox-prosessista syntyvien jätevesien ominaisuudet (Kaartinen et al. 2007, 23)

näyte	esimerkkituhka	APC-jäte
pH	6,2	11,9
kadmium (Cd) [mg/l]	43	<0,002
kupari (Cu) [mg/l]	1,2	0,8
lyijy (Pb) [mg/l]	1,8	56
sinkki (Zn) [mg/l]	150	3,4
kloridi (Cl) [mg/l]	51 000	45 000
sulfaatti (SO ₄ ²⁻) [mg/l]	1 100	950

Verrattuna pesussa syntyviin jätevesiin vastaavista tuhkejakeista (taulukko 9) vaihtelevat eri haitta-aineiden määrät huomattavasti. Teoriassa Ferrox-prosessin jätevesien tulisi kuitenkin sisältää pesun jätevesiin verrattuna vähemmän raskasmetalleja. Ferrox-prosessin jätevedet voidaan usein puhdistuksen jälkeen päästää mereen tai käsitellä esimerkiksi kietyttämällä (European Commission 2006, 463). Jätevesien käsittelyn energiankulutuksesta aiheutuvat ympäristökuormitukset on esitetty yhdessä käsittelyprosessin energiankulutuksen kanssa taulukossa 21. Jätevesien käsittelyssä syntyy lisäksi lietettä, johon erityisesti raskasmetallit jäävät ja joka vaatii edelleen käsittelyä.

Energiankulutus

Ferrox-prosessin energiankulutusta on arvioitu koelaitokselle, jossa on tutkittu menetelmän toimivuutta puoli-teollisessa kokoluokassa (Lundtorp 2001, app. IV-8). Näiden arvioiden mukaan tässä työssä oletetaan prosessin kuluttavan kokonaisuudessaan energiaa noin 45 kWh/t_i. Tässä on huomioitu itse käsittelylaitoksella kulutettava energia raaka-aineiden syötöstä jätevesien ja Ferrox-tuotteet erotukseen. Energiankulutuksesta sekä prosessin että jätevesien käsittelyn osalta aiheutuvat kuormitukset on esitetty taulukossa 21.

Taulukko 21. Ferrox-prosessin energiankulutuksesta aiheutuvat ympäristökuormitukset

		Ferrox-prosessi	jätevesien käsittely	yhteensä
Energiaresurssien kulutus	MJ	400,5	222,5	623,0
Raaka-aineiden kulutus				
- luonnon raaka-aineet	kg	5,6	3,1	8,7
- jäteraaka-aineet	kg	-	-	-
Päästöt ilmaan				
- CO ₂	g	13 455,0	7 475,0	20 930,0
- CO	g	28,1	15,6	43,7
- NO _x	g	30,5	17,0	47,5
- SO ₂	g	24,3	13,5	37,9
- VOC	g	42,0	23,3	65,3
- N ₂ O	g	1,5	0,8	2,3
- hiukkaset	g	42,9	23,8	66,7
- raskasmetallit	mg	6,2	3,4	9,6

5.5.3 Ferrox-tuotteen ominaisuudet ja loppusijoitus

Ferrox-stabiloinnilla voidaan vähentää käsiteltävästä materiaalista vapautuvien haitallisten yhdisteiden määrää merkittävästi, koska liukenevia suoloja poistetaan tuhkasta pesemällä ja raskasmetalleja sidotaan rautaoksidiin. Metalleja sitovien rautaoksidien tunnetaan pysyvän stabiilissa muodossa hyvin pitkiä aikoja, jonka vuoksi raskasmetallien vapautuminen käsitellyistä tuotteista on vähäistä myös pitkällä aikavälillä. Vaikka tuhkaan lisätään ferrosulfaattia, vähenee käsiteltävän tuhkan määrä prosessissa keskimäärin noin 10 %:lla kuivapainosta johtuen suolojen erotuksesta. Näin ollen Ferrox-tuotetta syntyy käsiteltävää tuhkatonnia kohden noin 850-900 kg. (ISWA 2003a, 31)

Taulukossa 22 on esitetty liukoisuustestien tulokset esimerkkituhkalle sekä ennen että Ferrox-käsittelyn jälkeen. Ferrox-käsittelyllä pystytään taulukossa esitettyjen testitulosten perusteella vähentämään huomattavasti raskasmetallien liukoisuutta, lukuun ottamatta kromia ja antimonia. Suoloista kloridin liukoisuutta pystytään vähentämään merkittävästi. Myös muissa tutkimuksissa on saatu samansuuntaisia tuloksia Ferrox-käsittelyn toiminnasta (mm. Lundtorp 2001, 53-57).

Taulukko 22. Liukoisuus ennen ja jälkeen Ferrox-käsittelyn
(Kaartinen et al. 2007, liite 4)

(L/S-suhde 10 l/kg)	ennen käsittelyä	Ferrox-tuote
pH	10,9	10,1
liuenneet aineet [mg/kg _{ka}]		
arseeni (As)	0,77	0,05
barium (Ba)	32	1,6
kadmium (Cd)	1,8	0,01
kromi (Cr)	0,45	0,86
kupari (Cu)	0,13	0,05
elohopea (Hg)	<0,001	-
molybdeeni (Mo)	3,6	2,6
nikkeli (Ni)	<0,05	0,04
lyijy (Pb)	26	0,03
antimoni (Sb)	0,05	0,41
seleeni (Se)	1,1	0,52
sinkki (Zn)	10	0,1
kloridi (Cl ⁻)	170 000	7 000
fluoridi (F ⁻)	35	<100
sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	11 000	13 000

Ferrox-tuotteille ei ole kehitetty vielä hyötykäyttökohteita, vaan on keskitytty niiden turvalliseen kaatopaikkasijoittamiseen. Joitakin ehdotuksia niiden hyödyntämisestä tienrakennuksessa termisen käsittelyn jälkeen on kuitenkin alustavasti tutkittu (ISWA 2003a, 31). Liukoisuustestitulosten perusteella Ferrox-tuote täyttää tavanomaiselle jätteelle asetetut raja-arvot kaikkien muiden tarkasteltujen yhdisteiden osalta lukuun ottamatta seleeniä. Seleenin liukoisuus Ferrox-tuotteesta ylittää tavanomaisen jätteen raja-arvon kuitenkin ainoastaan 0,02 mg/kg:lla. Koska raja-arvon ylitys on alle 10 %:a, voidaan se sallia ja olettaa, että yleisesti Ferrox-tuotteet voidaan sijoittaa tavanomaisen jätteen kaatopaikalle. Tästä aiheutuvat kaatopaikkarakenteiden muodostamisen ympäristökuormitukset on laskettu liitteessä VII ja esitetty muiden loppusijoituksen kuormitusten kanssa yhdessä taulukossa 23. Tarkastelussa oletetaan, että loppusijoitettavan tuhkan määrä on 860 kg.

Taulukon 23 mukaan loppusijoituksen vaiheista kuljetus kaatopaikalle aiheuttaa suurimmat ilmapäästöt ja läjityksen ja kaatopaikkarakenteiden kuormitukset ovat tätä huomattavasti pienemmän lähes kaikissa kuormitusluokissa. Hiilimonoksidipäästöjä aiheutuu kuitenkin eniten läjitys-vaiheesta ja kaatopaikkarakenteiden muodostaminen vaatii eniten luonnonvarojen käyttöä.

Taulukko 23. Ferrox-tuotteen loppusijoituksen ympäristökuormitukset

		kuljetus	läjitys	kaatopaikka- rakenteet	yhteensä
Energiaresurssien kulutus	MJ	30,9	0,9	0,2	32,0
Raaka-aineiden kulutus					
- luonnon raaka-aineet	kg	0,7	-	217,7	218,4
- jäteraaka-aineet	kg	-	-	-	-
Päästöt ilmaan					
- CO ₂	g	2 225,6	216,0	54,7	2 496,3
- CO	g	0,7	1,5	0,4	2,5
- NO _x	g	18,9	2,8	0,7	22,5
- SO ₂	g	0,2	-	-	0,2
- VOC	g	0,5	0,7	0,2	1,3
- N ₂ O	g	0,1	-	-	0,1
- hiukkaset	g	0,2	-	-	0,2
- raskasmetallit	mg	-	-	-	-

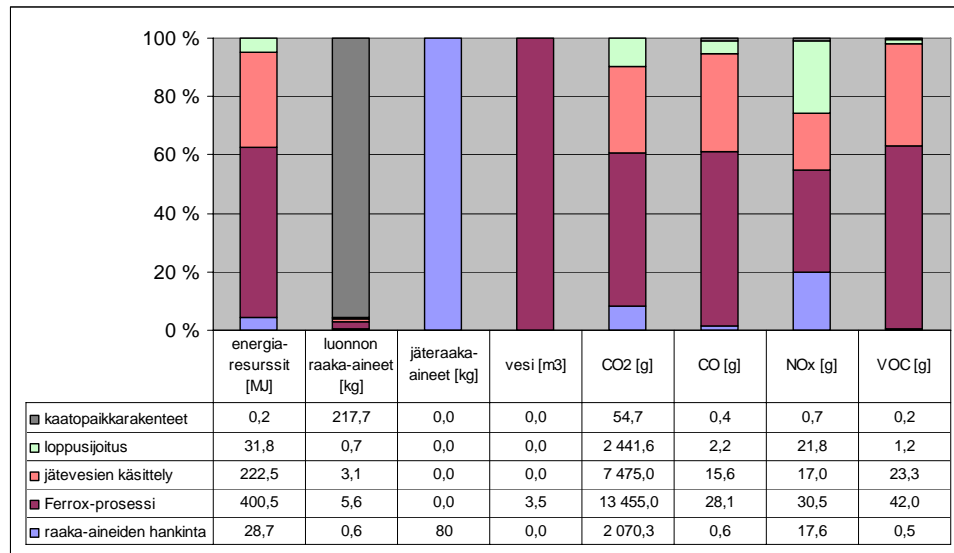
5.5.4 Yhteenvedo Ferrox-prosessin ympäristökuormituksista

Ferrox-käsittelystä aiheutuvat ympäristövaikutukset on koottu yhteen taulukossa 24. Vaikutukset on jaoteltu kolmeen osaan. Raaka-aineiden hankinta kattaa ferrosulfaatin kuljetuksesta aiheutuvat kuormitukset. Käsittelyprosessiin kuuluvat ferrosulfaattia lukuun ottamatta muut raaka-aineet, käsittelyyn tarvittava energiankulutus ja prosessissa syntyvien jätevesien käsittelyn kuormitukset. Lisäksi loppusijoittaminen kattaa käsitellyn tuotteen kuljetuksen ja levityksen kaatopaikalle sekä kaatopaikkarakenteiden muodostamisen.

Taulukko 24. Ferrox-käsittelyn elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset

		raaka-aineiden hankinta	käsittely- prosessi	loppu- sijoittaminen	yhteensä
Energiaresurssien kulutus	MJ	28,7	623,0	32,0	683,7
Raaka-aineiden kulutus					
- luonnon raaka-aineet	kg	0,6	8,7	218,4	227,7
- jäteraaka-aineet	kg	80,0	-	-	80,0
Veden kulutus	m ³	-	3,5	-	3,5
Päästöt ilmaan					
- CO ₂	g	2 070,3	20 930,0	2 496,3	25 496,6
- CO	g	0,6	43,7	2,5	46,9
- NO _x	g	17,6	47,5	22,5	87,6
- SO ₂	g	0,2	37,9	0,2	38,3
- VOC	g	0,5	65,3	1,3	67,1
- N ₂ O	g	0,1	2,3	0,1	2,5
- hiukkaset	g	0,2	66,7	0,2	67,1
- raskasmetallit	mg	-	9,6	-	9,6

Taulukosta voidaan huomata, että Ferrox-prosessi kuluttaa vain vähän luonnonraaka-aineita, koska stabilointiaineena käytetään toisen prosessin sivutuotteena syntyvää ns. jäte- raaka-ainetta. Käsittelyprosessin elinkaaren eri vaiheiden suhteelliset ympäristökuormitukset verrattuna koko elinkaaren aikaisiin kuormituksiin raaka-aineiden ja energiaressurssien käytön sekä merkittävimpien kaasumaisten päästöjen osalta on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Ferrox-prosessin elinkaaren vaiheiden osuus ympäristökuormituksista

Kuvan ja ympäristökuormitustaulukon perusteella voidaan sanoa, että Ferrox-käsittelyn elinkaaren aikana merkittävimmät ympäristökuormitukset aiheutuvat itse käsittelyprosessista ja sen energiankulutuksesta. Siihen verrattuna raaka-aineen hankinnasta ja käsitellyn materiaalin loppusijoituksesta aiheutuvat kuormitukset ovat pieniä. Tähän vaikuttaa erityisesti se, että käsittelyssä pystytään hyödyntämään toisen prosessin sivutuotetta, eikä sen valmistuksesta näin ollen aiheudu kuormitusta. Kuvassa näkyy myös jättevesien käsittelyn energiankulutuksen aiheuttamat kuormitukset irrallaan muusta käsittelyprosessista, ja ne ovat itse käsittelyprosessin jälkeen toiseksi kuormittavin elinkaaren vaihe. Myös kaatopaikkarakenteiden muodostaminen näkyy kuvassa omana vaiheenaan. Sen energiaressurssien kulutus sekä ilmapäästöt ovat hyvin vähäisiä, mutta luonnonvaroja rakenteiden muodostaminen kuluttaa elinkaaren vaiheista ylivoimaisesti eniten.

Herkkyystarkastelut

Ympäristökuormituslaskennan luotettavuutta arvioidaan Ferrox-prosessista sekä ferrosulfaatin että käsitellyn tuhkan kuljetuksen osalta. Alun perin arvioitiin ferrosulfaattia (80 kg)

kuljetettavan 250 km käsittelylaitokselle ja Ferroxtuotetta (860 kg) 25 km käsittelylaitoksesta kaatopaikalle. Jos tuhkan käsittelylaitos sijaitsee ferrosulfaatin syntypaikalta, poistuu tämä kuljetusmatka ja samalla koko raaka-aineiden hankinnan muodostama ympäristökuormitus. Käsittelylaitoksen sijaitessa kaatopaikan yhteydessä poistuu sen sijaan käsittelyn tuotteen kuljetus ja loppusijoituksen kuormitus muodostuu ainoastaan läjityksestä ja kaatopaikkarakenteista.

Tarkastelujen kuormituksen laskenta ja muutokset on esitetty liitteessä VI (sivu 8). Kun käsittelylaitos sijaitsee samassa paikassa, jossa ferrosulfaattia syntyy, vähenee energiaressien kokonaiskulutus 4 %:a. Koska kuljetusten määrä muuttuu, vaikuttaa se voimakkaimmin typenoksidipäästöihin, jotka vähenevät 20 %:a. Hiilidioksidipäästöt vähenevät noin 8 %, ja muut ilmapäästöt tätä vähemmän. Jos käsittelylaitos sijaitsee sen sijaan kaatopaikan yhteydessä, vähenee energiaressien kokonaiskäyttö 4,5 %:a. Edelleen typenoksidipäästöt vähenevät 22 % ja hiilidioksidipäästöt 9 %. Vaikka ferrosulfaatin oletettu kuljetusmatka on kymmenkertainen käsittelyn tuotteen vastaavaan verrattuna, on ferrosulfaatin määrä puolestaan ainoastaan noin kymmenesosa käsitellyn tuotteen määrästä ja kuljetusmäärät tonnikipometreinä perusmallissa ovat näille lähes samat (ferrosulfaatti: 20 tkm ja Ferroxtuote: 21,5 tkm) ja näin ollen myös ympäristökuormitukset ovat samaa kokoluokkaa.

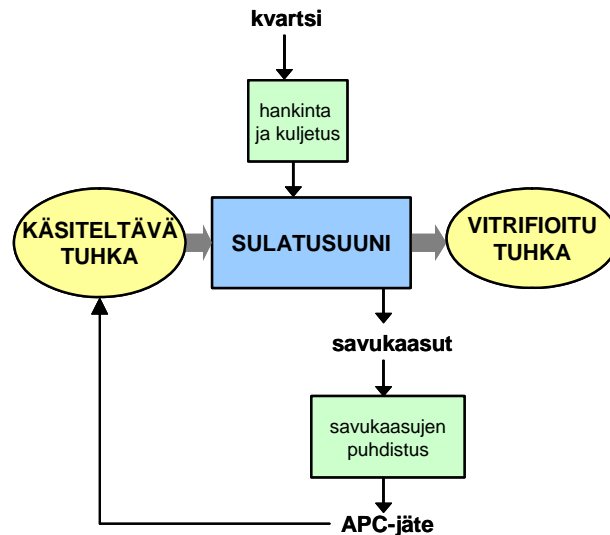
5.6 Vitrifointi

Vitrifointi on termisiin menetelmiin lukeutuva käsittelytekniikka, joka on käytössä varsinkin Japanissa. Vitrifioinnin ympäristökuormituksen arvioinnissa erityistä on menetelmän vaatima suuri energiankulutus.

5.6.1 Menetelmän toimintaperiaate

Vitrifointi eroaa muista termisistä käsittelymenetelmistä sillä, että käsiteltävän tuhkan sekaan lisätään ns. lasinmuodostaja-aineita, joilla voidaan entisestään parantaa käsitellyn tuotteen ominaisuuksia. Yksinkertaistettuna vitrifioinnin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 13. Käsiteltävä tuhka sekoitetaan lasinmuodostaja-aineiden kanssa ja seos sulatetaan korkeassa lämpötilassa lasimaiseksi aineeksi. Sulatuslämpötila on yleensä noin 1300-1500

°C. Lisäaineina eli ns. lasinmuodostaja-aineina voidaan käyttää esimerkiksi kvartsi (SiO_2) tai magnesiumoksidia (MgO). (Park ja Heo 2001, 85; ISWA 2003a, 25-26)



Kuva 13. Vitrifioinnin toimintaperiaate

Vitrifioitavan materiaalin tulee tyypillisesti täyttää tietyt laatuvaatimukset, kuten tuhkan vesipitoisuus < 5 %, palamattoman aineksen osuus < 3 %, metallipitoisuus < 20 p-% ja tuhkapartikkelien koko < 100 mm, jotta käsittelyllä saavutetaan sille asetetut tavoitteet. Vitrifioitavasta tuhkasta haihtuu käsittelyssä raskasmetalleja, erityisesti kadmiumia ja lyijyä, ja prosessissa syntyvät savukaasut vaativat yleensä aina käsittelyä. Vitrifiointilaitoksen sijaitessa jätteenpolttolaitoksen yhteydessä voi olla mahdollista puhdistaa savukaasut polttolaitoksen savukaasujen puhdistusjärjestelmissä. Savukaasuista aiheutuu näin ollen lisää APC-jätettä, mikä samalla vähentää käsittelyllä saavutettavaa kokonaishyötyä. (ISWA 2003a, 26-27) Syntyvän uuden APC-jätteen määrä riippuu sekä vitrifioitavasta tuhkasta että savukaasujen puhdistusmenetelmistä, mutta sen määräksi voidaan arvioida noin 5-10 % käsiteltävän tuhkan määrästä (Chandler et al. 1997, 806-809).

Vitrifiointi on huomattavan kallis menetelmä verrattuna muihin tuhkien käsittelyssä yleisesti käytettäviin menetelmiin. Käsittelykustannuksiksi on raportoitu noin 100-500 €/t_t. Lisäksi vitrifiointilaitoksen investointikustannukset ovat suuruusluokaltaan noin 20 milj. €/t_t laitoksella, jonka kapasiteetti on 1-1,5 t_t tunnissa. Syynä menetelmän käyttöön ovat kuitenkin sillä saavutettavat käsitellyn tuhkan liukoisuusominaisuudet ja merkittävä materiaalin tilavuuden pieneneminen. Vitrifiointi on käytössä varsinkin Japanissa, jossa on toi-

minnassa noin 30-40 laitosta. Muutamia laitoksia löytyy myös muun muassa Euroopasta ja Yhdysvalloista. (ISWA 2003a, 27)

5.6.2 Vitrifioinnin elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset

Vitrifioinnin ympäristökuormitukset aiheutuvat lisäaineiden hankinnasta, syntyvistä savukaasuista sekä energiankulutuksesta. Näistä ensin tarkastellaan savukaasuja, joiden kuormituksen määrittäminen vaikuttaa myös muiden osa-alueiden arviointiin. Käsittelyn ympäristökuormitusten arviointi perustuu kirjallisuudessa esitettyihin tietoihin ja laskenta on esitetty liitteessä VI (sivut 9-11).

Savukaasut

Vitrifioinnissa syntyy savukaasuja, jotka sisältävät käsiteltävästä tuhkasta haihtuvia haitallisia yhdisteitä. Savukaasujen koostumuksesta ei kirjallisuudessa kuitenkaan ole esitetty paljoa tietoa. Vitrifioinnin savukaasujen puhdistuksesta syntyy kiinteää jätettä, jonka määräksi arvioidaan 5 % käsiteltävän tuhkan määrästä. Toisin sanoen oletetaan, että savukaasut puhdistetaan jätteenpolttolaitoksen savukaasujen puhdistusjärjestelmässä ja ne lisäävät käsiteltävän tuhkan määrää noin 50 kg:a, joka aiheuttaa korotuksen edelleen käsittelyn raaka-aineiden ja energiankulutukseen sekä loppusijoituksen ympäristökuormitukseen. Savukaasujen puhdistuksen kuormituksia tässä työssä ei selvitetä tarkemmin.

Lisäaineet

Tarkastelussa oletetaan, että ns. lasinmuodostaja-aineena vitrifioinnissa käytetään kvartssia. Vitrifiointia on tutkittu erilaisilla kvartsin ja tuhkan suhteilla ja tässä suhteeksi oletetaan 80% tuhkaa - 20 % kvartssia, jolloin 1050 kg:n vitrifiointiin tarvitaan kvartssia noin 260 kg. Kvartssia louhitaan Suomessa neljällä louhoksella (GTK 2003), joista oletettua käsittelylaitosta lähimmältä louhokselta kuljetusmatka on noin 160 km. Kvartsin louhinnan ympäristövaikutukset arvioidaan MELI-ohjelman avulla, mutta kvartsin mahdollisesta käsittelystä aiheutuvia kuormituksia ei oteta huomioon. Kvartsin ympäristökuormitukseksi arvioidaan siis luonnon raaka-aineen kulutus sekä kuljetuksesta ja louhinnasta aiheutuvat päästöt, jotka on esitetty taulukossa 25.

Taulukko 25. Kvartsin louhinnasta ja kuljetuksesta aiheutuvat ympäristökuormitukset

		louhinta	kuljetus	yhteensä
Energiaresurssien kulutus	MJ	4,6	60,3	64,9
Raaka-aineiden kulutus				
- luonnon raaka-aineet	kg	262,5	1,3	263,8
- jäteraaka-aineet	kg	-	-	-
Päästöt ilmaan				
- CO ₂	g	1 101,7	4 347,7	5 449,4
- CO	g	6,3	1,3	7,6
- NO _x	g	15,5	37,0	52,5
- SO ₂	g	1,3	0,5	1,7
- VOC	g	2,7	1,0	3,6
- N ₂ O	g	-	0,1	0,1
- hiukkaset	g	1,7	0,4	2,1
- raskasmetallit	mg	-	-	-

Energiankulutus

Vitrifointi kuluttaa huomattavan paljon energiaa, tyypillisesti noin 700-1200 kWh/t_t. Energiantarve vaihtelee käytettävän kattilan ja käsittelylaitoksen toiminnan mukaan. (IS-WA 2003a, 27) Ympäristökuormitusten arvioinnissa energiankulutus oletetaan sähköksi ja kulutukseksi arvioidaan 1000 kWh/t_t. Kun tässä huomioidaan savukaasujen puhdistusjätteen kierrätys takaisin prosessiin, lasketaan ympäristökuormitus 1050 kWh:lle sähköä, jonka kuormitukset on esitetty taulukossa 26.

Taulukko 26. Vitrifoinnin energiankulutuksen ympäristökuormitukset

Energiaresurssien kulutus	MJ	9 345,0
Raaka-aineiden kulutus		
- luonnon raaka-aineet	kg	130,2
- jäteraaka-aineet	kg	-
Päästöt ilmaan		
- CO ₂	g	313 950,0
- CO	g	655,2
- NO _x	g	711,9
- SO ₂	g	568,1
- VOC	g	979,7
- N ₂ O	g	34,7
- hiukkaset	g	1 000,7
- raskasmetallit	mg	143,9

Joissain tapauksissa voi olla mahdollista hyödyntää vitrifointiin esimerkiksi jätteenpolttolaitoksen tuottamaa lämpöenergiaa, jolloin sähkönkulutuksen tarve ja samalla siitä aiheutuvat ympäristökuormitukset pienenevät.

5.6.3 Vitrifioidun tuotteen ominaisuudet ja loppusijoitus

Vitrifiointi vähentää käsiteltävän materiaalin tilavuuden tyypillisesti noin 30-50 %:in alkuperäisestä ja käsitelty materiaali on hyvin tiheää, noin 2,4-2,9 t/m³. Tilavuuden pienenemisestä on hyötyä erityisesti hyvin tiheään asutetuilla alueilla, kuten Japanissa, jossa loppusijoitustilaa on vähän ja kaatopaikkasijoitus kallista. Liukoisuus vitrifioidusta tuotteesta on erittäin pientä. (ISWA 2003a, 26-27) Keskimääräisiä tietoja jätteenpolton vitrifioidun lentotuhkan ja APC-jätteen liukoisuusominaisuuksista on esitetty taulukossa 27.

Taulukko 27. Vitrifioidun tuotteen liukoisuusominaisuuksia
(ScanArc 2005, 8; Sakai ja Hiraoka 2000, 254)

	liuenneet aineet [mg/kg _{ka}] (L/S-suhde 10 l/kg)
arseeni (As)	0,01-0,08
barium (Ba)	0,3-0,7
kadmium (Cd)	0,002-0,02
kromi (Cr)	0,02
kupari (Cu)	0,06-0,12
nikkeli (Ni)	0,02-0,1
lyijy (Pb)	0,008-0,06
sinkki (Zn)	0,1-0,4
kloridi (Cl ⁻)	2

Liukoisuustestitulosten perusteella vitrifioitu tuhka voidaan sijoittaa pysyvän jätteen kaatopaikalle, ja oletetaan, että tuhkan määrä vähenee vitrifioinnissa 400 kg:aan. Kaatopaikan suojakerrosten rakentamisesta aiheutuvat kuormitukset on esitetty yhdessä vitrifioidun materiaalin kuljetuksesta ja läjityksestä aiheutuvien kuormitusten kanssa taulukossa 28.

Taulukko 28. Vitrifioidun materiaalin loppusijoituksen ympäristökuormitukset

		kuljetus	läjitys	kaatopaikka- rakenteet	yhteensä
Energiaresurssien kulutus	MJ	14,4	0,2	0,02	14,6
Raaka-aineiden kulutus					
- luonnon raaka-aineet	kg	0,3	-	15,1	15,4
- jäteraaka-aineet	kg	-	-	-	-
Päästöt ilmaan					
- CO ₂	g	1 035,2	56,9	3,8	1 095,8
- CO	g	0,3	0,4	0,03	0,7
- NO _x	g	8,8	0,7	0,05	9,6
- SO ₂	g	0,1	-	-	0,1
- VOC	g	0,2	0,2	0,01	0,4
- N ₂ O	g	0,03	-	-	0,03
- hiukkaset	g	0,1	-	-	0,1
- raskasmetallit	mg	-	-	-	-

Koska tuhkan määrä vähenee vitrifioinnissa huomattavasti, myös loppusijoituksen aiheuttamat ympäristökuormitukset ovat suhteellisen pieniä.

5.6.4 Yhteenveto vitrifioinnin ympäristökuormituksista

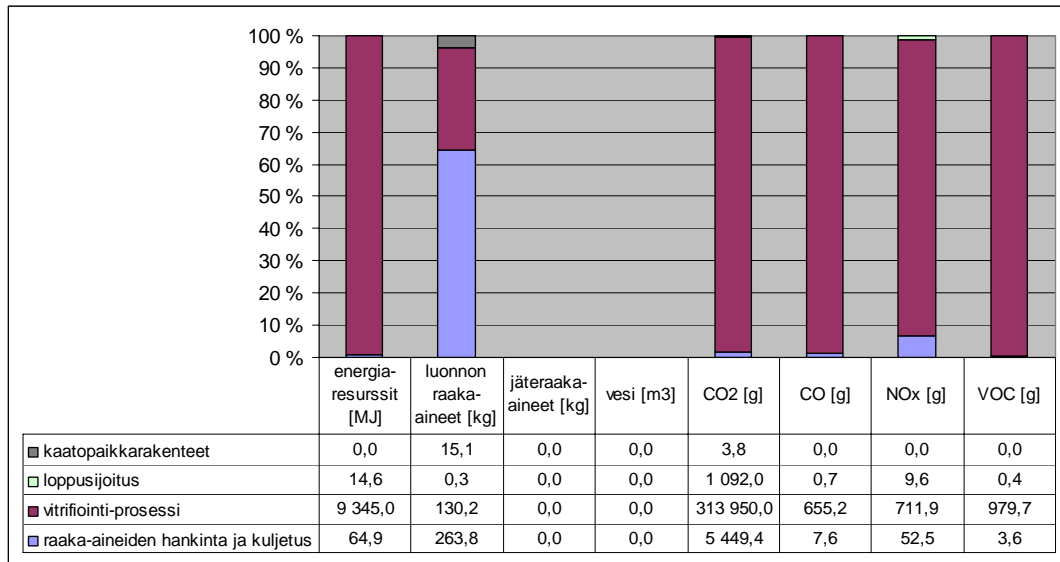
Vitrifioinnin laskennallisesti arvioidut ympäristökuormitukset on koottu taulukkoon 29. Vitrifioinnin ympäristökuormitusten laskennassa raaka-aineiden hankinta kattaa kvartsin hankinnasta aiheutuvat kuormitukset. Käsittelyprosessiin kuuluu käsittelyssä käytettävä energia ja loppusijoittamisella tarkoitetaan vitrifioidun materiaalin kuljetusta ja läjittämistä kaatopaikalle sekä kaatopaikkarakenteiden muodostamista. Tarkastelussa oletetaan, että vitrifioinnissa syntyvien savukaasujen puhdistusjäte kierrätetään takaisin vitrifiointiin eikä käsittelyssä synny savukaasuja.

Taulukko 29. Vitrifioinnin elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset

		raaka-aineiden hankinta	käsittely- prosessi	loppu- sijoittaminen	yhteensä
Energiaresurssien kulutus	MJ	64,9	9 345,0	14,6	9 424,6
Raaka-aineiden kulutus					
- luonnon raaka-aineet	kg	263,8	130,2	15,5	409,4
- jäteraaka-aineet	kg	-	-	-	-
Veden kulutus	m ³	-	-	-	-
Päästöt ilmaan					
- CO ₂	g	5 449,4	313 950,0	1 095,8	320 495,2
- CO	g	7,6	655,2	0,7	663,5
- NO _x	g	52,5	711,9	9,6	774,0
- SO ₂	g	1,7	568,1	0,1	569,9
- VOC	g	3,6	979,7	0,4	983,7
- N ₂ O	g	0,1	34,7	0,03	34,8
- hiukkaset	g	2,1	1 000,7	0,1	1 002,9
- raskasmetallit	mg	-	143,9	-	143,9

Vitrifioinnin elinkaaren vaiheiden ympäristökuormitusta suhteessa toisiinsa on esitetty kuvassa 14 raaka-aineiden kulutuksen sekä tärkeimpien kaasumaisten päästöjen osalta. Kuvan ja taulukon perusteella voidaan todeta, että koska itse käsittelyn energiankulutus on niin suuri, ovat muiden elinkaaren vaiheiden aiheuttamat ympäristökuormitukset suhteessa siihen pieniä. Kuten todettua, vitrifioinnissa syntyvien savukaasujen kuormitus on huomioitu tarkastelussa ainoastaan niiden puhdistuksessa syntyvän uuden APC-jätteen kierrätyksenä takaisin vitrifiointiin. Savukaasut kuitenkin sisältävät ympäristöä kuormittavia aineita, jotka eivät jää APC-jätteisiin vaan vapautuvat ympäristöön. Näin ollen esitettyjen ilmapäästöjen määrät ovat tässä esitettyäkin suurempia. Koska käsittelyssä materiaalin määrä vähenee huomattavasti ja se liukoisuusominaisuuksien perusteella voidaan sijoittaa vähän

suojarakenteita vaativalle pysyvän jätteen kaatopaikalle, ovat loppusijoituksesta aiheutuvat kuormitukset pieniä myös luonnonraaka-aineiden kulutuksen osalta.



Kuva 14. Vitrifioinnin elinkaaren vaiheiden osuus ympäristökuormituksista

Herkkyystarkastelut

Vitrifioinnin osalta herkkyystarkasteluilla arvioidaan kvartsin määrän sekä energiankulutuksen muutosten vaikutusta kokonaisympäristökuormitukseen (liite VI, sivut 10-11). Kvartsin kulutuksen muutoksia arvioidaan louhinnan ja kuljetusten aiheuttamien kuormitusten osalta. Kvartsin määrän vaikutusta itse käsittelyprosessin energiankulutukseen tai käsitellyn tuotteen liukoisuusominaisuuksiin ei tässä kuitenkaan arvioida. Perustapauksessa kvartsia lisätään käsiteltävään tuhkaan kvartsi-tuhkasuhteessa 20-80 ja kvartsi louhitaan ja kuljetetaan tuhkan käsittelylaitokselle 160 km:n päästä. Herkkyystarkasteluissa tutkitaan tilannetta, jossa käsiteltävään tuhkaan ei lisätä lainkaan kvartsia tai jos kvartsi-tuhkasuhde on 30-70.

Kun oletetaan, ettei kvartsia lisätä tuhkaan ollenkaan eli raaka-aineiden hankintavaiheen ympäristökuormituksia ei synny, vähenee energiaresurssien kokonaiskulutus 0,7 %:a perustapauksesta. Ilmapäästöistä eniten vähenevät typenoksidipäästöt, noin 7 %:lla sekä hiilidioksidipäästöt 2 %:lla. Merkittävimmin tarkasteltavista ympäristövaikutuksista muuttuu luonnonraaka-aineiden kulutus, koska noin 260 kg:n kvartsin kulutus poistuu. Jos kvartsi-tuhkasuhde on 30-70, lisääntyy puolestaan luonnonvarojen kulutus noin 46 %:lla perusti-

lanteeseen verrattuna kun kvartssia käytetään 450 kg. Ilmapäästöistä eniten kasvavat ty-
penoksidipäästöt, noin 5 %:lla.

Toisena herkkyystarkastelukohteena arvioidaan energiankulutuksen muutosten vaikutusta kokonaiskuormituksiin. Vitrifioinnin energiankulutuksen on raportoitu vaihtelevan välillä 700-1200 kWh/t_t. Perustapauksessa oletettiin energiankulutukseksi 1000 kWh/t_t ottaen huomioon lisäksi vitrifioinnissa syntyvien savukaasujen puhdistuksesta aiheutuvan APC-jätteen määrän lisäksi, joten energiankulutuksen aiheuttamat ympäristökuormitukset arvioitiin 1050 kWh:lle sähköä. Herkkyystarkasteluissa ympäristökuormitukset lasketaan 700 ja 1200 kWh:n energiankulutukselle. Jos energiankulutus on 700 kWh, vähenee energiaressurssien kulutus noin kolmanneksella verrattuna perustilanteeseen. Samoin kaikki tarkasteltavat ilmapäästöt vähenevät noin kolmanneksella, mutta raaka-aineiden kulutus ainoastaan noin 10 %:lla. Jos energiankulutus sen sijaan on 1200 kWh, kasvavat energiaressurssien käyttö ja ilmapäästöt noin 14 %:lla. Raaka-aineiden kulutus kasvaa puolestaan ainoastaan vajaalla 5 %:lla.

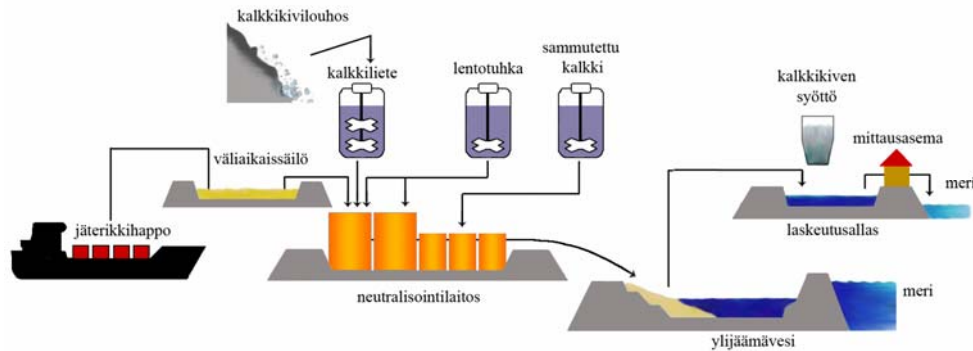
5.7 Kuljetus Norjaan loppusijoituslaitokselle

Langøyen-saarella Norjassa sijaitsee rikkihappoa loppusijoittava laitos, jonka prosessissa voidaan hyödyntää jätteenpolton tuhkia. Käsitellyt materiaalit sijoitetaan saaren vanhojen kalkkikivilouhosten täytteeksi. Näin ollen tuhkien sijoittaminen Langøyassa luetaan hyötykäytöksi ja myös Suomesta on laitokselle kuljetettu sijoitettavaksi jätteenpolton tuhkia. Tässä työssä Suomessa syntyvien tuhkien kuljetusta ja sijoitusta laitokselle tarkastellaan muita vaihtoehtoja suppeammin ja laskennallisia ympäristökuormituksia esitetään ainoastaan laivakuljetusten osalta.

5.7.1 Käsittely- ja loppusijoitusprosessi

Pääasiallinen käsittelyprosessi Langøyassa on rautapitoisen jäterikkihapon neutralointi kalkkikivellä. Kalkkikiveä kuitenkin korvataan prosessissa yhä enemmän jätteenpolton alkalisilla tuhkillä. (Laine-Ylijoki 2004, 8) Laitoksen käsittelyprosessi on esitetty kuvassa 15. Prosessissa tuhka sekoitetaan ensin veden kanssa ja liete pumpataan hiertimen läpi, jossa suuremmat kappaleet saadaan poistettua. Tämän jälkeen liete sekoitetaan happoa ja

kalkkikiveä sisältävän seoksen kanssa, jossa kipsi saostuu joidenkin raskasmetallien kanssa muodostaen hydroksideja. Kolmannessa vaiheessa seokseen lisätään sammutettua kalkkia, jolla nostetaan pH noin 8-9:ään ja samalla saadaan saostettua jäljellä olevat raskasmetallit. Lopuksi seos pumpataan täytteeksi vanhaan kalkkikivilouhokseen. (ISWA 2003a, 20)



Kuva 15. Langøyen stabilointiprosessi (mukaiillen NOAH AS 2004)

Langøyen käsittelylaitoksen omistava NOAH AS ilmoittaa saarella sijaitsevien louhosten riittävän loppusijoitustarpeelle noin vuoteen 2030 asti (Laine-Ylijoki 2004, 8). Tuhkien käsittelyn ja sijoittamisen kustannus on noin 50 €/t, joka ei sisällä kuljetuksesta aiheutuvia kustannuksia (ISWA 2003a, 21).

Norjan valtio hyväksyy tuhkien käytön neutralointiprosessissa hyötykäyttönä. Kalkin korvaaminen tuhkillä vähentää kalkin louhintatarvetta ja näin ollen säästää luonnonvaroja ja pidentää kalkkikaivoksen käyttöikä. (ISWA 2003a, 21) Hyötykäyttö-määritelmän nojalla jätteenpolton tuhkia voidaan kuljettaa saarelle myös ulkomailta. Tämä määräys voi kuitenkin muuttua, jonka lisäksi kuljetukselle voi ilmaantua myös muita esteitä. Näin ollen Norjaan kuljettamista ei voida pitää pitkän aikavälin tapana huolehtia haitallisista tuhista.

5.7.2 Norjaan kuljetuksen ympäristökuormitukset

Tässä työssä Norjaan sijoituksen ympäristövaikutuksia arvioidaan laskennallisesti ainoastaan laivakuljetuksen osalta. Kuormitusten laskenta on esitetty liitteessä VI (sivu 12).

Laivakuljetus

Kuljetuksen ympäristökuormitus arvioidaan MELI-ohjelmassa käytettyjen laivakuljetusten tietojen perusteella (Laine-Ylijoki et al. 2000; Eskola 2001), jolloin arviointi vastaa semen-

tin valmistukseen käytettävien raaka-aineiden laivakuljetuksista aiheutuvien kuormitusten arviointitapaa. Tuhkat oletetaan kuljetettavan Norjaan Oslon edustalla sijaitsevalle saarelle laivalla, jonka kantavuus on 6000 t ja kuljetusmatkan pituus noin 1600 km. Kuljetuksesta aiheutuvat ympäristökuormitukset on esitetty taulukossa 30.

Taulukko 30. Laivakuljetuksesta aiheutuva ympäristökuormitus

Energiaresurssien kulutus	MJ	185,3
Päästöt ilmaan		
- CO ₂	g	31 915,7
- CO	g	51,5
- NO _x	g	720,7
- VOC	g	20,6
- hiukkaset	g	15,4

Laivakuljetuksen energiaresurssien kulutus tarkoittaa polttoaineen kulutusta, eikä siinä ole huomioitu polttoaineen valmistuksen aiheuttamaa kuormitusta kuten muiden kuljetusten energiaresurssien kulutuksessa. Tonni tuhkaa vastaa vain noin 0,02 %:a laivan kokonaislastista, eivätkä kuljetuksen päästöt näin ollen ole huomattavan suuria. Vertailua helpottamaan tuhkatonnin 1600 km:n laivamatka aiheuttaa yhtä paljon hiilidioksidipäästöjä kuin vastaavan tuhkatonnin kuljettaminen maantiellä noin 308 km:ä. Muita ilmapäästöjä 1600 km:n laivakuljetus aiheuttaa sen sijaan vähemmän kuin 308 km:n maantiekuljetus.

Muut vaikutukset

Neutralointiprosessissa raskasmetalleja pyritään saostamaan ja sitomaan kalkkiin. Tällä voidaan pidättää metalleja, mutta pitkällä aikavälillä ei käsittelyn katsota vähentävän raskasmetallien vapautumista. (ISWA 2003a, 20) Näin ollen loppusijoituksesta vapautuu ympäristöön haitta-aineita, joiden määrää tai tuhkien osuutta niistä ei kuitenkaan pystytä arvioimaan. Lisäksi prosessista aiheutuu ympäristökuormitusta muun muassa energiankulutuksesta, jonka suuruutta ja aiheuttamaa ympäristökuormitusta ei tässä pystytä arvioimaan.

Koska Langøyen käsittelyprosessissa jätteenpolton tuhkillä korvataan kalkkia, muodostuu tästä positiivinen ympäristövaikutus luonnonraaka-aineen kulutuksen pienentymisestä. Tonnilla jätteenpolton tuhkia voidaan korvata 200 kg saaren kalkkikaivoksilta louhittavaa kalkkia. Tuhkien käytön seurauksena kuitenkin laitoksen pintavesien raskasmetallipitoisuudet ovat kohonneet. (ISWA 2003a, 21)

6 KÄSITTELYTEKNIKOIDEN YMPÄRISTÖNÄKÖKOHDAT

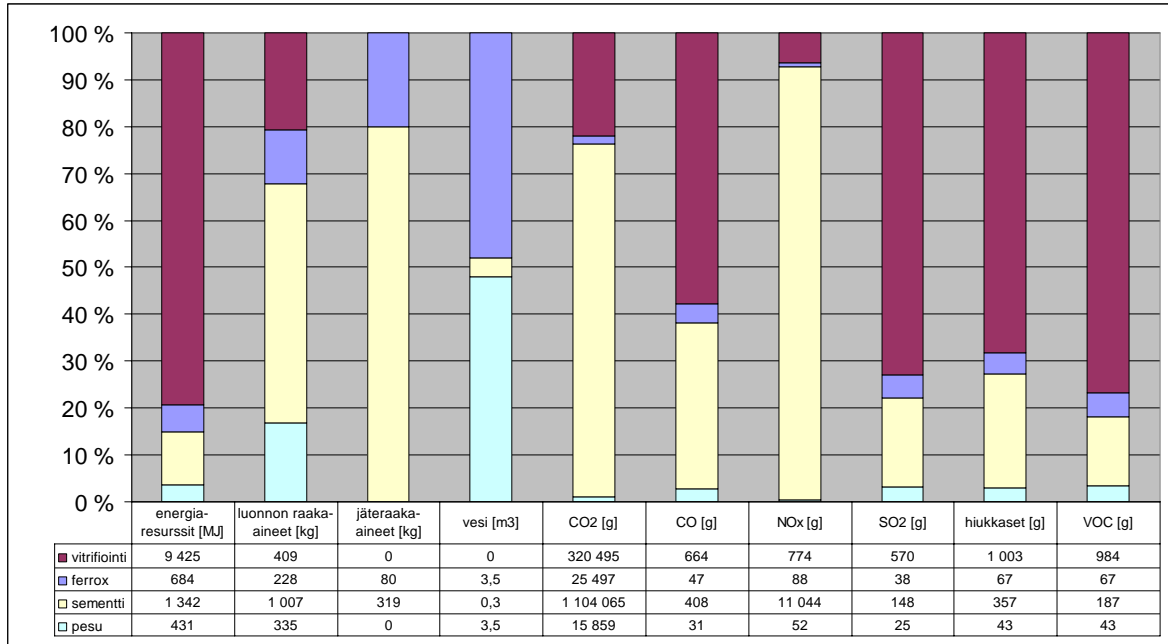
Työssä tarkasteltavien tuhkien käsittelyvaihtoehtojen ympäristökuormituksia on selvitetty edellisissä kappaleissa. Osa ympäristövaikutuksista on arvioitu elinkaariarvioinnin periaatteita hyödyntäen laskennallisesti ja osaa kuormituksista on tarkasteltu ainoastaan sanallisesti. Eri vaihtoehdoista aiheutuvat kuormitukset ovat hyvin erilaisia, mutta käsittelymenetelmää valittaessa tulisi erilaisia ympäristönäkökohtia sekä muita menetelmän käyttöön vaikuttavia seikkoja kuitenkin pystyä vertailemaan parhaan vaihtoehdon löytämiseksi.

6.1 Käsittelytekniikoiden elinkaaren aikaisten ympäristökuormitusten vertailu ja tulosten arviointi

Elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset selvitettiin laskennallisesti neljälle käsittelytekniikalle ja tietyistä elinkaaren osista myös Norjaan kuljettamiselle. Tarkasteluissa keskityttiin erityisesti raaka-aineiden kulutuksen ja ilmapäästöjen arviointiin. Ympäristökuormitukset kuitenkin sisältävät epävarmuuksia sekä laskennassa tehdyistä oletuksista että laskennan lähtötietojen arvioinnista johtuen.

6.1.1 Elinkaaren aikaisten ympäristökuormitusten vertailu

Tarkasteltujen neljän käsittelymenetelmän ympäristökuormitukset suhteessa toisiinsa on esitetty kuvassa 16. Kuormituksia on vertailtu luonnon- ja jäteraaka-aineiden, energiaressurssien ja veden kulutuksen sekä tärkeimpien ilmapäästöjen osalta. Niitä ilmapäästöjä, joiden kuormitustietoja ei ole saatavissa merkittävimmistä prosesseista, ei ole huomioitu vertailussa.



Kuva 16. Käsittelytekniikoiden ympäristökuormitusten vertailu

Kuvan 16 perusteella voidaan todeta, että tarkastelluista vaihtoehdoista suurimmat ympäristökuormitukset aiheuttavat sementtikiinteytys ja vitrifiointi. Sementtikiinteytys tuottaa paljon varsinkin hiilidioksidi ja typenoksidipäästöjä. Vitrifiointi sen sijaan kuluttaa paljon energiaresursseja, ja näin ollen aiheuttaa myös paljon ilmapäästöjä. Vettä kuluu eniten sen sijaan pesussa ja Ferrox-prosessissa, jonka yhtenä vaiheena pesu on. Näiden menetelmien muut kuormitukset ovat suhteessa sementtikiinteytykseen ja vitrifiointiin pieniä, pesun kuormitukset edelleen huomattavasti Ferrox-prosessia pienempiä. Luonnon raaka-aineita kulutetaan kaikissa menetelmissä suhteellisen tasaisesti. Sementtikiinteytyksessä niiden kulutus on kuitenkin muita suurempi johtuen sementin käytön lisäksi myös loppusijoitettavan materiaalin suuresta määrästä, joka vaatii enemmän kaatopaikkarakenteita.

Kuvaa 16 tulkittaessa on syytä huomioida, että vitrifioinnissa syntyvien savukaasujen koostumusta ei työssä pystytty selvittämään vaan sen aiheuttamat ilmapäästöt ovat peräisin ainoastaan energiankulutuksesta. Näin ollen vitrifioinnin osuuden muun muassa hiilidioksidin- ja typenoksidipäästöistä tulisi olla kuvassa näkyvää suurempi. Lisäksi joissain menetelmissä (pesu ja Ferrox-prosessi) syntyy jätevesiä, joiden osalta on huomioitu ainoastaan niiden käsittelyn energiankulutuksen aiheuttamat kuormitukset. Lisäksi tulee muistaa, että kuvassa eri menetelmien kuormituksia on vertailtu toisiinsa, eikä niinkään arvioitu eri kuormitusten absoluuttista suuruutta.

Liitteessä VIII on esitetty ympäristökuormitustiedot tarkasteltujen menetelmistä eri elinkaaren vaiheista. Raaka-aineiden hankinnan osalta sementtikiinteytys aiheuttaa ehdottomasti suurimmat päästöt. Sementin valmistus kuluttaa myös eniten luonnonvaroja, ja vaikka vitrifioinnin luonnonvarojen kulutus on lähes yhtä suuri, ovat sen aiheuttamat päästöt kuitenkin huomattavasti pienemmät. Pesusta ja kuljettamisesta Norjaan ei raaka-aineiden hankintavaiheesta aiheudu ollenkaan kuormituksia.

Käsittelyprosessivaiheen kuormitukset muodostuvat käsittelyn energiankulutuksesta sekä jätevesien puhdistuksen energiankulutuksesta. Tästä elinkaaren vaiheesta ehdottomasti eniten kuormitusta aiheutuu vitrifioinnista, jossa syntyy esimerkiksi hiilidioksidipäästöjä 15-kertaisesti verrattuna toiseksi kuormittavimpaan prosessivaiheeseen eli Ferroprosessiin. Kokonaisuudessaan eniten muun muassa hiilidioksidipäästöjä aiheuttava sementtikiinteytys aiheuttaa niitä tarkastelluista vaihtoehdoista vähiten itse käsittelyprosessista. Taulukoissa on Norjaan kuljettamisesta aiheutuvat päästöt luokiteltu kuuluvan elinkaaren vaiheista loppusijoitukseen, mutta Norjaan kuljetuksen hiilidioksidipäästöt ovat noin kymmenesosan vitrifiointiprosessin energiankulutuksen aiheuttamasta kuormituksesta.

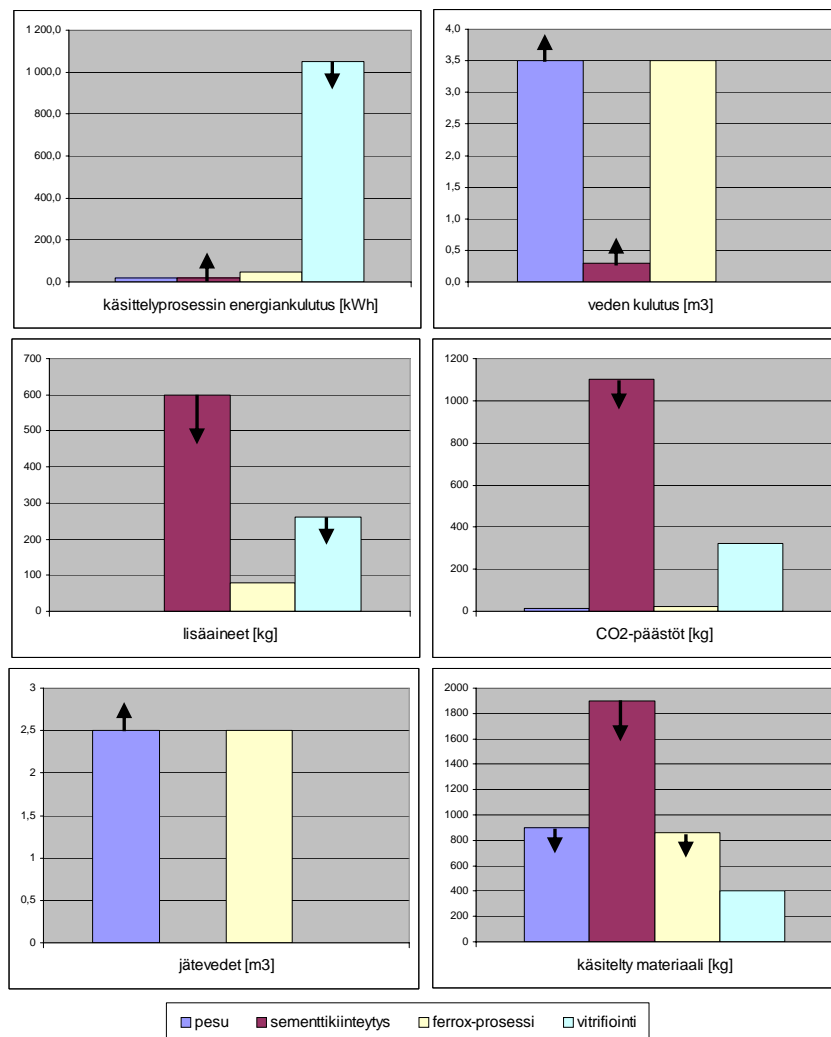
Loppusijoituksen aiheuttamat ympäristökuormitukset ovat kaikissa menetelmissä pieniä suhteessa muihin elinkaaren vaiheisiin lukuun ottamatta luonnon raaka-aineiden kulutusta. Tämän perusteella voidaan arvioida, että jos tuhkaa voitaisiin sijoittaa kaatopaikalle ilman käsittelyä, olisi myös siitä aiheutuvat kuormitukset ilmapäästöjen osalta pieniä verrattuna käsittelyssä syntyviin päästöihin. Vertailtaessa eri vaihtoehtojen loppusijoitus-vaiheen kuormituksia, aiheutuu niitä eniten sementtikiinteytyksestä johtuen kasvaneesta loppusijoitettavan materiaalin määrästä sekä osittain myös ongelmajätteen kaatopaikan muita luokkia paksumpien rakenteiden muodostamisesta. Vitrifioinnin loppusijoitus-vaiheen kuormitukset ovat sen sijaan hyvin pieniä verrattuna muihin menetelmiin.

6.1.2 Lähtötietojen luotettavuuden arviointi

Ympäristökuormitusten laskennassa on pyritty käyttämään eri menetelmistä toisiinsa nähden vertailukelpoisia tietoja, jotta voidaan tarkastella eroja eri menetelmien välillä. Arvioinnin luotettavuutta kuitenkin heikentää se, että tietoja on kerätty lukuisista eri lähteistä eikä niihin sisältyviä kaikkia erityispiirteitä ole voitu huomioida. Esimerkiksi prosessin

energiankulutukseen liittyvissä tiedoissa voi eroja esiintyä niiden kattavuudessa. Joissain energiankulutusarvioissa on mukana koko laitoksen energiankulutus mukaan lukien materiaalien syötöstä ja erilaisista kuljettimista aiheutuvan kulutuksen, toisissa arvioissa on sen sijaan huomioitu ainoastaan itse käsittely-yksikön kulutus. Lähtötietojen alkuperä on esitetty käsittelyvaihtoehtoja tarkastelevissa kappaleissa kunkin tiedon lähdeviitteessä, jonka lisäksi ne on koottu taulukkoon liitteessä III. Lähtötietojen vaikutusta kokonaiskuormitukseen arvioitiin myös käsittelytekniikoita tarkastelevissa kappaleissa herkkyytarkasteluilla.

Kuvassa 17 on vertailtu tiettyjä käsittelyvaihtoehtojen ympäristökuormitukseen vaikuttavia tietoja. Kuvassa pylväillä on esitetty arvioitavan tiedon suuruus. Nuolet pylväiden kohdalla kertovat siitä onko tieto luultavasti arvioitu liian pieneksi (↑) vai suureksi (↓). Nuolet on merkitty ainoastaan suurimpien epävarmuuksien osalta.



Kuva 17. Käsittelyvaihtoehtojen kuormitus ja lähtötietojen luotettavuus

Sementtikiinteytysprosessin energiankulutus sisältää paljon epävarmuutta ja se on luultavasti arvioitu liian pieneksi. Sen sijaan vitrifioinnin kokonaisenergiankulutus on oikealla tasolla, mutta se on oletettu kokonaisuudessaan sähköksi, eikä siinä ole huomioitu vitrifiointilämmön tuottamista esimerkiksi suoraan polttoaineilla tai hyödyntämällä toisten prosessien, esimerkiksi jätteenpolttolaitoksen, tuottamaa lämpöä. Veden kulutuksesta suurimmat epävarmuudet liittyvät sementtikiinteytyksen veden kulutukseen, joka on arvioitu tarkastelussa pieneksi. Lisäaineilla tässä tarkoitetaan käsittelyssä tuhkaan sekoitettavia raaka-aineita sisältäen sekä luonnon raaka-aineet että jäteraaka-aineet. Lisäaineiden määrä sementtikiinteytyksessä todellisuudessa vaihtelee huomattavasti. Tarkastelussa se on arvioitu suhteellisen suureksi, josta aiheutuvat myös suuret hiilidioksidi- ja muut ilmapäästöt. Lisäaineiden määrä vaikuttaa sementtikiinteytyksessä suoraan käsitellyn tuhkan määrään, joka myös sisältää siis paljon epävarmuutta. Myös pestyn ja Ferro-käsitellyn tuhkan määrät sisältävät epävarmuuksia suojojen poistumisesta ja käsitelyyn tuhkaan jäävän veden määrästä johtuen.

6.2 Käsittelyvaihtoehtojen ympäristönäkökohtien arviointi

Käsittelyvaihtoehtojen ympäristönäkökohtia arvioidaan kappaleessa 5.1.3 esitellyn arviointitaulukon avulla, joka kootaan kaikista tarkastelluista kuudesta vaihtoehdosta. Kunkin osan alueen kohdalla on merkitty arviointiasteikkoon oranssilla käsittelyvaihtoehdon siitä saamat pisteet, jotka on laskettu yhteen taulukon alaosassa. Yhteispistemäärä vaihtelee siis välillä -4...+4. Arviointi on hyvin karkea ja eri vaikutusten painottaminen yhteistuloksessa kuvaa niiden tärkeyttä ainoastaan suurpiirteisesti. Arviointipisteiden on kuitenkin tarkoitus helpottaa eri menetelmien vertailua ja ottaa huomioon kaikki kolme tarkasteltua näkökulmaa.

6.2.1 Sijoittaminen kaatopaikalle ilman käsittelyä

Myös vaihtoehtoa sijoittaa jätteenpolton lentotuhkaa ja APC-jätettä kaatopaikalle ilman käsittelyä tarkastellaan arviointitaulukon avulla (taulukko 31), vaikka aiemmin todettiin ettei se kaatopaikkalainsäädännön mukaan yleensä ole mahdollista.

Taulukko 31. Arviointitaulukko kaatopaikkasijoittamiselle ilman käsittelyä

KAATOPAIKKASIJOTTAMINEN ILMAN KÄSITTELYÄ						
elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset						
a) luonnonvarojen ja energia-resurssien kulutus b) ilmapäästöt c) jätevesipäästöt	a-c) Menetelmässä syntyvä elinkaaren aikainen ympäristökuormitus ilmapäästöjen osalta on pieni. Ympäristövaikutuksia syntyy maaperään liukenevien haitta-aineiden lisäksi ainoastaan tuhkan kuljettamisesta ja läjittämisestä kaatopaikalle sekä kaatopaikkarakenteiden muodostamisesta.					
		---	--	-	0	
käsitellyn materiaalin ominaisuudet ja loppusijoittaminen						
a) liukoisuusominaisuudet b) muut ominaisuudet c) kaatopaikkavaatimukset	a) Liukoisuusominaisuudet pysyvät samoina, eli tuhkasta liukenee maaperään huomattavan paljon haitta-aineita, erityisesti suoloja. b) Materiaalin määrä ei muutu. c) Käsittelemätön tuhka ei tyypillisesti alita edes ongelmajätteen kaatopaikan kolminkertaistettuja raja-arvoja, eikä sitä näin ollen voida sijoittaa edes erityisillä suojarakenteilla vahvistetulla ongelmajätteen kaatopaikalle.					
				0	+	++ +++
tekniikan käyttö						
a) tekniikan saatavuus b) käyttökokemus ja käsittelyn varmuus c) kustannukset	a) Lainsäädäntö rajoittaa paljon haitta-aineita sisältävien materiaalin sijoittamista. b) Kolminkertaistettujen raja-arvojen käyttöä ja sen edellyttämää riskinarviointia ollaan tutkimassa. c) Suojarakenteiden kustannuksia ei ole työssä arvioitu.					
				-	0	+
arviointipisteet yhteensä: -2						

Tuhkien sijoittamiseen kaatopaikoille käyttäen kolminkertaistettuja raja-arvoja sisältää vielä paljon epävarmuutta. Toisaalta monet jätteenpolton lentotuhkat ja APC-jätteet eivät täytä edes kolminkertaistettuja arvoja, vaan niitä joudutaan käsittelemään jollain tasolla joka tapauksessa. Vaihtoehto ei synnytä sijoitusvaiheessa huomattavaa ympäristökuormitusta, mutta haitta-aineet jäävät sijoitettavaan materiaaliin ja mahdollisesti liukenevat siitä ympäristöön tulevaisuudessa.

6.2.2 Pesu

Yhteenveto ja arviointi pesu-menetelmän ympäristönäkökohdista ja muista käyttöön vaikuttavista tekijöistä on koottu taulukkoon 32.

Taulukko 32. Pesu-menetelmän arviointitaulukko

PESU	
elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset	
a) luonnonvarojen ja energia-resurssien kulutus b) ilmapäästöt c) jätevesipäästöt	a) Menetelmä kuluttaa vain vähän energiaa ja raaka-aineista ainoastaan vettä. b) Ilmapäästöt ovat pienet johtuen pienestä energiankulutuksesta sekä vähäisistä kuljetuksista. c) Menetelmässä syntyy jätevesiä, jotka sisältävät raskasmetalleja sekä korkeita pitoisuuksia suoloja.

käsittelyn materiaalin ominaisuudet ja loppusijoittaminen	
a) liukoisuusominaisuudet b) muut ominaisuudet c) kaatopaikkavaatimukset	a) Käsittely poistaa tuhkasta tehokkaasti liukenevia suoloja, mutta raskasmetallien sitominen on sen sijaan huonoa. b) Materiaalin määrä pienenee vähän. c) Pesty tuhka voidaan tyypillisesti sijoittaa ongelmajätteen kaatopaikalle.
	0
tekniikan käyttö	
a) tekniikan saatavuus b) käyttökokemus ja käsittelyn varmuus c) kustannukset	a) Tekniikka on tunnettua ja helposti saatavilla. b) Menetelmä on paljon käytetty. c) Käsittelystä aiheutuvat kustannukset ovat tyypillisesti noin 10 €/t _r .
	-
arviointipisteet yhteensä: +1	

Pesussa syntyvistä jätevesistä aiheutuvaa ympäristökuormitus selvitettiin työssä ainoastaan niiden käsittelyn energiankulutuksen osalta, eikä käsittelyssä syntyvän kiintoainekakun tai puhdistettuihin jätevesiin jäävien haitta-aineiden määriä arvioitu. Näiden vertailu muihin, lähinnä ilmapäästöistä koostuviin kuormituksiin, on vaikeaa. Kuitenkin pesulla pystytään parantamaan tuhkan ominaisuuksia ja se kuluttaa vain vähän luonnonvaroja ja aiheuttaa ilmapäästöjä verrattuna muihin tarkasteltuihin käsittelytekniikoihin. Lisäksi pesun kustannukset ovat pienet.

6.2.3 Sementtikiinteytys

Sementtikiinteytyksen ympäristönäkökohtia ja muita menetelmän käyttöön vaikuttavia tekijöitä on koottu yhteen taulukkoon 33.

Taulukko 33. Sementtikiinteytyksen arviointitaulukko

SEMENTTIKIINTEYTYS	
elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset	
a) luonnonvarojen ja energia-resurssien kulutus b) ilmapäästöt c) jätevesipäästöt	a) Menetelmä kuluttaa paljon raaka-aineita ja energiaa sementin valmistuksessa ja kaatopaikkarakenteiden muodostamisessa. b) Ilmapäästöt ovat suuret johtuen sementin valmistuksesta. c) Menetelmässä ei synny jätevesiä.
	--- -- - 0
käsitellyn materiaalin ominaisuudet ja loppusijoittaminen	
a) liukoisuusominaisuudet b) muut ominaisuudet c) kaatopaikkavaatimukset	a) Käsittely vähentää haitta-aineiden ja veden kosketuspintaa ja samalla liukenevien aineiden määrää, mutta ajan mittaan ja matriisin hajotessa sekä raskasmetallien että erityisesti suolojen vapautuminen voimistuu. b) Lisättäessä tuhkaan sementtiä jätemateriaalin määrä kasvaa huomattavasti. c) Kiinteytetty tuhka voidaan sijoittaa ongelmajätteen kaatopaikalle, jos kloridin raja-arvo voidaan kaksinkertaistaa.
	0 + ++ +++
tekniikan käyttö	
a) tekniikan saatavuus b) käyttökokemus ja käsittelyn varmuus c) kustannukset	a) Tekniikka on tunnettua ja paljon käytössä. b) Menetelmää käytetään hyvin paljon myös jätteenpolton lentotuhkien ja APC-jätteiden käsittelyssä. c) Menetelmän kustannukset ovat noin 25 €/t _e .
	- 0 +
arviointipisteet yhteensä: 0	

Sementtikiinteytyksen ympäristövaikutuksia leimaa sementin valmistuksesta aiheutuvat suuret ympäristökuormitukset. Toisaalta menetelmä on kuitenkin paljon käytetty, sen saatavuus on helppoa ja käsittelytulokseen voidaan vaikuttaa sementin määrää vaihtelemalla.

6.2.4 Ferrox-prosessi

Ferrox-prosessin ympäristövaikutuksia sekä muita käyttöön vaikuttavia tekijöitä on koottu taulukkoon 34.

Taulukko 34. Ferrox-prosessin arviointitaulukko

FERROX-PROSESSI	
elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset	
a) luonnonvarojen ja energiaresurssien kulutus b) ilmapäästöt c) jätevesipäästöt	a) Menetelmä kuluttaa kohtuullisen vähän luonnonvaroja ja energiaresursseja. Prosessissa hyödynnetään stabilointiaineena toisen prosessin sivutuotteena syntyvää materiaalia. b) Menetelmässä syntyy suhteellisen vähän ilmapäästöjä, koska energiankulutus ja kuljetusmäärät eivät ole kovin suuria. c) Menetelmässä syntyy raskasmetalleja ja erityisesti suoloja sisältäviä jätevesiä.

	--
	-
	0
käsittelyn materiaalin ominaisuudet ja loppusijoittaminen	
a) liukoisuusominaisuudet b) muut ominaisuudet c) kaatopaikkavaatimukset	a) Menetelmä poistaa tuhkasta suoloja sekä sitoo raskasmetallit tehokkaasti. Käsittelyn materiaalin liukoisuusominaisuuksien oletetaan pysyvän hyvinä myös pitkällä aikavälillä. b) Käsittely pienentää tuhkan tilavuutta hieman. c) Käsittely tuhka voidaan sijoittaa tavanomaisen jätteen kaatopaikalle.
	0
	+
	++
	+++
tekniikan käyttö	
a) tekniikan saatavuus b) käyttökokemus ja käsittelyn varmuus c) kustannukset	a-b) Menetelmää on tutkittu puoli-teollisessa mittakaavassa ja se on suunniteltu myös laitospäivä, mutta yhtään Ferrox-prosessia käyttävää laitosta ei ole vielä toiminnassa. Tulokset menetelmän toimivuudesta ovat kuitenkin olleet lupaavia. c) Menetelmän kustannukset ovat noin 65 €/t.
	-
	0
	+
arviointipisteet yhteensä: 0	

Kuten pesussa, myös Ferrox-prosessissa syntyy jätevesiä, joiden ympäristökuormituksen suhteuttaminen muihin on vaikeaa. Menetelmällä saadaan poistettua tehokkaasti suolat ja sidottua raskasmetallit, joten käsittelyn tuotteen liukoisuusominaisuudet ovat suhteellisen hyvät. Vaikka käsittelystä on hyviä tuloksia ja menetelmää tarjotaan markkinoilla, ei yhtään Ferrox-laitosta ole vielä toiminnassa.

6.2.5 Vitrifiointi

Vitrifioinnin ympäristövaikutuksia ja käyttöä on arvioitu taulukossa 35.

Taulukko 35. Vitrifioinnin arviointitaulukko

VITRIFIOINTI	
elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset	
a) luonnonvarojen ja energia- resurssien kulutus b) ilmapäästöt c) jätevesipäästöt	a) Menetelmä kuluttaa erittäin paljon energiaa ja lisäksi lasin- muodostaja-aineen osalta luonnonvaroja. b) Koska menetelmän energiankulutus on suurta, ovat myös ilmapäästöt huomattavan suuria. Lisäksi vitrifioinnissa syntyy savukaasuja, jotka sisältävät paljon haitta-aineita. Ne oletetaan kuitenkin pystyttävän puhdistamaan, joka edelleen muodostaa lisää käsittelyä vaativaa APC-jätettä. c) Menetelmässä ei synny jätevesiä.
	--- -- - 0
käsittelyn materiaalin ominaisuudet ja loppusijoittaminen	
a) liukoisuusominaisuudet b) muut ominaisuudet c) kaatopaikkavaatimukset	a) Liukoisuus vitrifioidusta tuotteesta on erittäin pientä sekä suolojen että raskasmetallien osalta. b) Käsittely pienentää jättemateriaalin määrää noin puoleen alkuperäisestä c) Vitrifioitu tuote voidaan sijoittaa pysyvän jätteen kaatopai- kalle.
	0 + ++ +++
tekniikan käyttö	
a) tekniikan saatavuus b) käyttökokemus ja käsitte- lyn varmuus c) kustannukset	a-b) Tekniikka on paljon käytössä esimerkiksi Japanissa, mut- ta Euroopassa sen käyttö on harvinaisempaa. c) Menetelmä on kallis, 100-500 €/t.
	- 0 +
arviointipisteet yhteensä: -1	

Vitrifiointi tuottaa huomattavan suuret ympäristökuormitukset käsittelyn aikana johtuen pääosin sen suuresta energiankulutuksesta. Käsittelyssä syntyy myös savukaasuja, jotka sisältävät paljon tuhkista höyrystyneitä haitta-aineita ja vaativat puhdistusta. Koska näiden savukaasujen koostumuksesta ei ole saatavilla paljoa tietoa, huomioitiin ympäristökuormitusten arvioinnissa ainoastaan niiden puhdistuksesta syntyvän APC-jätteen kierrätys takaisin vitrifiointiprosessiin. Näin ollen ilmapäästöt ovat jopa tässä laskettuja suuremmat. Vitrifioinnilla voidaan kuitenkin tuottaa erittäin pysyvässä muodossa olevaa materiaalia, jonka tilavuus vastaa tyypillisesti vain noin puolta käsittelyyn syötettävän tuhkan määrästä. Näin ollen vitrifioitu tuhka voidaan loppusijoittaa suhteellisen turvallisesti eikä se vaadi paljoa

sijoitustilaa. Menetelmä on yleisesti käytössä Japanissa, mutta Euroopassa sen käyttö on vähäisempää ja menetelmä on muihin tarkasteltuihin vaihtoehtoihin nähden kallis.

6.2.6 Kuljettaminen Norjaan käsittely- ja loppusijoituslaitokselle

Jätteenpolton tuhkia neutralointiprosessissaan hyödyntävälle käsittely- ja loppusijoituslaitokselle kuljetuksen ympäristökuormituksia arvioitiin työssä neljää varsinaista käsittelytekniikkaa suppeammin. Ympäristönäkökohtia muiden tekijöiden ohella on kuitenkin tarkasteltu arviointitaulukon avulla myös tästä vaihtoehdosta (taulukko 36).

Taulukko 36. Norjaan kuljettamisen arviointitaulukko

KULJETTAMINEN NORJAAN KÄSITTELY- JA LOPPUSIJOITUSLAITOKSELLE	
elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset	
a) luonnonvarojen ja energiaresurssien kulutus	a) Menetelmässä pyritään jätteenpolton tuhkillä korvaamaan luonnonmateriaalia, jolla voidaan katsoa olevan positiivinen ympäristövaikutus. Käsittelyn energiankulutuksesta ei ole tietoja, mutta sen oletetaan olevan kohtuullinen. Myös laivakuljetus kuluttaa energiaresursseja kohtuullisesti.
b) ilmapäästöt	b) Ilmapäästöt ovat suhteellisen pienet johtuen energiankulutuksesta ja laivakuljetuksesta.
c) jätevesipäästöt	c) Käsittelyprosessissa ei tiettävästi synny jätevesiä.
	--- -- - 0
käsittelyn materiaalin ominaisuudet ja loppusijoittaminen	
a) liukoisuusominaisuudet	a) Tuhkien liukoisuusominaisuuksien ei oleteta paranevan pitkällä aikavälillä. Tuhkilla käsiteltävän rikkihapon ominaisuuksien muuttumiseen ei työssä oteta kantaa.
b) muut ominaisuudet	b) -
c) kaatopaikkavaatimukset	c) -
	0 + ++ +++
tekniikan käyttö	
a) tekniikan saatavuus	a) Jätteiden kuljetusta koskeva lainsäädäntö voi muuttua eikä käsittelylaitoksen toiminnan jatkuvuudesta ole varmaa tietoa. Kyseessä ei ole siis pitkän aikavälin ratkaisu tuhkien käsitte-lyyn ja sijoittamiseen.
b) käyttökokemus ja käsitte-lyn varmuus	b) Tuhkien ominaisuuksien parantumisesta ei ole tietoa.
c) kustannukset	c) Kustannukset ovat tällä hetkellä kohtuulliset, mutta koska kyse on yhdestä kaupallisilla periaatteilla toimivasta laitokses-ta, kustannusten muutokset voivat olla äkillisiä.
	- 0 +
arviointipisteet yhteensä: -2	

Arviointitaulukossa elinkaaren aikaisessa ympäristökuormituksessa huomioituja päästöjä syntyy Norjaan kuljettamisessa vain vähän tehtyjen oletusten perusteella. Jos tarkastelussa kuitenkin huomioitaisiin myös esimerkiksi laitoksen neutralointiprosessin energiankulutus, nousisivat kuormitukset merkittävästi. Loppusijoittavan tuhkan ominaisuuksien ei katsota käsittelyssä paranevan ainakaan pitkällä aikavälillä. Lisäksi louhoksesta, jonne neutraloitua massa sijoitetaan, voi päästä haitta-aineita vapautumaan ympäristöön. Suomessa syntyvien tuhkien kuljetus laitokselle tulevaisuudessa on myös epävarmaa niin lainsäädännöstä kuin käsittelylaitoksestakin riippuen. Vaihtoehtoa ei voida siis katsoa kestäväksi tavaksi huolehtia jätteenpolton tuhista.

6.2.7 Yhteenveto ympäristönäkökohdista

Tarkastelluista käsittelyvaihtoehdoista parhaaseen käsittelytulokseen päästään vitrifioinnilla, mutta samalla se aiheuttaa hyvin paljon ilmapäästöjä. Hiilidioksidipäästöjen osalta sementtikiinteytys aiheuttaa vitrifiointiakin enemmän päästöjä. Kiinteytyksellä ei kuitenkaan päästä yhtä hyvin käsittelytuloksiin kuin vitrifioinnilla tai Ferrox-prosessilla, mutta se on jätteenpolton tuhkien käsittelyssä yleisesti hyväksytty ja paljon käytössä oleva menetelmä. Lisäksi sementtikiinteytyksen kustannukset ovat Ferrox-prosessia ja vitrifiointia alhaisemmat. Toisaalta pesu tuottaa Ferrox-prosessiakin vähemmän ilmapäästöjä, mutta sen käsittelytehokkuus on tätä huonompi.

Tarkastelluista neljästä varsinaisesta käsittelytekniikoista pesu tuotti vähiten ilmapäästöjä ja kulutti myös vähiten luonnonvaroja ja energiaresursseja vettä lukuun ottamatta. Vaikka pesulla käsitellyn tuhkan ominaisuudet ovat joihinkin menetelmiin verrattuna heikompia, voidaan sillä erottaa tuhkasta suoloja tehokkaasti. Näin ollen sitä käytetäänkin tyypillisesti yhdistettynä muihin käsittelymenetelmiin, jonka vuoksi on oleellista, että myös sen ympäristökuormitukset ovat pienet. Pesun, kuten myös Ferrox-prosessin, ongelmana ovat käsittelyssä syntyvät jätevedet. Niistä tarkasteltiin tässä työssä ainoastaan jätevesien sisältämiä haitta-ainemääriä ennen jätevesien käsittelyä sekä niiden käsittelyn energiankulutuksesta aiheutuvia ympäristökuormituksia. Jätevesien käsittelyn aiheuttamia muita kuormituksia tai käsittelyssä syntyvän lietteen haitta-ainepitoisuuksia ei työssä pystytty tarkastelemaan.

Käsittelyvaihtoehdoista esitettyjen arviointitaulukoiden (taulukot 31-36) pisteytyksen mukaan parhaaseen kompromissiratkaisuun päästäisiin käyttämällä tuhkan käsittelyyn ainoas-

taan pesu-menetelmää. Tähän vaikuttaa erityisesti se, että pesu aiheuttaa hyvin vähän ympäristökuormituksia. Toiseksi arvioinnissa sijoittuivat sementtikiinteytys ja Ferroprosessi. Sementtikiinteytys aiheuttaa paljon ympäristökuormituksia, mutta koska se on paljon käytössä oleva ja yleisesti hyväksytty menetelmä, on se helppoa ottaa käyttöön. Ferroprosessi sen sijaan aiheuttaa sementtikiinteytystä huomattavasti vähemmän ympäristökuormituksia, mutta se on vasta kehitetty tekniikka, joka ei ole vielä täysimittaisesti käytössä. Liukoisuusominaisuuksiltaan Ferrox-tuote on tuhka-sementtimatriisia parempi, mutta toisaalta Ferroprosessissa syntyy jätevesiä, jotka aiheuttavat kuormituksia, joita ei sementtikiinteytyksessä synny. Huonoimmiksi vaihtoehtoiksi arviointitaulukoiden perusteella jäivät sijoittaminen ilman käsittelyä, vitrifiointi ja kuljettaminen Norjaan käsiteltäväksi ja loppusijoitettavaksi. Vitrifiointi tuottaa huomattavan paljon ympäristökuormituksia suuresta energiankulutuksesta johtuen. Menetelmällä pystytään muuntamaan käsiteltävä tuhka hyvin pysyvään muotoon samalla pienentäen loppusijoitettavan materiaalin määrää noin puoleen. Vitrifiointi on kuitenkin kallis ja Euroopassa vain vähän käytössä oleva menetelmä. Sekä sijoittaminen ilman käsittelyä että kuljettaminen Norjaan tuottavat ennen materiaalin sijoittamista vain vähän päästöjä, mutta sijoitetun tuhkan haitallisuus siirtyy maaperään ja mahdollisesti leviää ympäristöön. Lisäksi molemmat vaihtoehdot sisältävät paljon epävarmuuksia muun muassa toiminnan luvanvaraisuudesta jatkossa.

6.3 Tulosten tarkastelu ja pohdinta

Työssä suoritettu ympäristökuormitusten tarkastelu sisältää paljon oletuksia ja epävarmuuksia, koska siinä tutkitaan käsittelytapoja yleisesti eikä tietyn laitoksen tiettyä olemassa olevaa käsittelyprosessia. Näin ollen laskennalliset ympäristökuormitukset ovat ainoastaan suuntaa-antavia. Tarkastelun tulosten perusteella voidaan kuitenkin huomata, että eri prosessien aiheuttamat ympäristökuormitukset vaihtelevat huomattavasti. Samalla myös niillä saavutetut liukoisuusominaisuuksien parannukset vaihtelevat. Erilaisten menetelmien kuormitusten ja ympäristövaikutusten suuruuden välillä ei kuitenkaan ole riippuvuutta, jonka perusteella parempien liukoisuusominaisuuksien saavuttamiseksi vaadittaisiin yhä enemmän ympäristökuormituksia. Tämä voi yksittäisen menetelmän kohdalla tosin olla mahdollista, jos esimerkiksi parempien ominaisuuksien saavuttaminen vaatii aina enemmän lisäaineita, joiden hankinta aiheuttaa edelleen lisää ympäristöhaittoja.

Sen lisäksi, että tarkastelun avulla voidaan huomata eri menetelmien aiheuttamat päästöt erisuuruiseksi, voidaan myös todeta ne hyvin erilaisiksi. Toiset menetelmät kuluttavat paljon luonnonvaroja, toiset taas aiheuttavat ilmapäästöjä ja kolmannet jätevesiä. Listaan voidaan toki lisätä vielä käsitellyn materiaalin sijoittamisesta maaperälle aiheutuvat haitat. Näitä erilaisia kuormituksia ei tässä työssä pyritty vertailemaan eikä laittamaan tärkeysjärjestykseen, vaan ainoastaan toteamaan niiden olemassa olo ja suuruus. Erilaisten ympäristökuormitusten vertailemiseksi toteutetaan varsinaisissa elinkaariarvioinneissa usein vaikutusten arviointi, jossa erilaisia kuormituksia painotetaan niiden tärkeyden mukaan ja pyritään muuntamaan ne toisiinsa vertailukelpoiseen muotoon. Tämä voisi tässä työssä helpottaa erilaisten kaasumaisten päästöjen arviointia esimerkiksi ilmastonmuutoksen aiheuttajina, mutta suoraa ratkaisua erilaisten ilmaan, veteen ja maaperään kohdistuvien päästöjen vertailuun se ei kuitenkaan antaisi. Edelleen kysymykseksi jäisi kuitenkin erilaisten ympäristövaikutusten, kuten ilmastonmuutoksen ja maaperän saastumisen, vertailu.

Työssä tarkastelluista käsittelymenetelmistä merkittävimmät ympäristökuormitukset aiheutuivat tyypillisesti joko raaka-aineiden hankinnasta tai itse käsittelyprosessista. Sen sijaan loppusijoituksesta aiheutuvien ympäristökuormitusten osuus oli pieni tarkasteltaessa energiasurssien kulutusta ja ilmapäästöjä. Maaperään vapautuvien haitta-aineiden osalta tilanne on tietysti toinen. Myös kaatopaikkarakenteiden osuus tuhkatonnin käsittelyn ja loppusijoituksen kuormituksesta oli tarkastelun perusteella pieni lukuun ottamatta kaatopaikkarakenteisiin vaadittavien luonnonvarojen kulutusta. Kuljetusten aiheuttamiin kuormituksiin vaikuttaa niin kuljetusmatka kuin kuljetettavan materiaalin määrä. Erilaisista kuljetustavoista työssä tarkasteltiin ainoastaan maantiekuljetuksia sekä muutamassa tapauksessa laivakuljetusta, mutta myös kuljetustavalla on suuri merkitys aiheutuviin kuormituksiin.

Käsittelyssä tarvittavilla raaka-aineilla on ympäristökuormituksiin hyvin suuri merkitys. Jos käsittelyssä pystytään hyödyntämään toisen prosessin sivutuotteena syntyvää materiaalia tai muuta jätemateriaalia, aiheutuu ympäristökuormituksia ainoastaan materiaalin kuljetuksista. Jos sen sijaan käsittelyyn tarvittava lisäaine joudutaan valmistamaan luonnon raaka-aineista, aiheutuu ympäristökuormituksia lisäaineen raaka-aineiden hankinnasta, lisäaineen valmistusprosessista sekä valmiin lisäaineen kuljetuksesta tuhkan käsittelylaitokselle. Tarkastelussa tämä näkyi selvästi sementtikiinteytyksen osalta, josta aiheutui huomattavasti sekä raaka-aineiden kulutusta että ilmapäästöjä. Sementin valmistus kuitenkin itsessään

aiheuttaa poikkeuksellisen paljon ympäristökuormituksia, eikä voida olettaa että ne kaikkien lisäaineiden valmistuksen kohdalla olisivat yhtä suuria.

Koska työssä tarkasteltiin prosesseja, joiden tarkoituksena on parantaa materiaalin ominaisuuksia, tulee erityistä huomiota kiinnittää lopputuotteen ominaisuuksiin. Käsittelystä aiheutuvia ympäristökuormituksia sekä materiaalin ominaisuuksien parantumista tulisikin tarkastella aina yhdessä. Jos huomioidaan ainoastaan käsittelyn aiheuttamat ympäristökuormitukset, tullaan tulokseen, jossa tuhkaa ei tulisi käsitellä ollenkaan. Jos sen sijaan tarkastellaan ainoastaan käsitellyn tuhkan ominaisuuksia, tulisi käsittelyä jatkaa lopputuotteen jättämiseen jos sillä päästään aina parempaan ja parempaan käsittelytulokseen. Jollakin näiden tekijöiden yhdistelmällä päästään kuitenkin kompromissiin, jossa saavutetaan riittävän hyvä käsittelytulos kohtuullisilla käsittelyn aiheuttamilla ympäristökuormituksilla. Juuri tätä on työssä pyritty havainnollistamaan arviointitaulukon avulla.

Tuhkien käsittelyn ja loppusijoituksen vertailun ongelmana kokonaisympäristövaikutusten kannalta ovat erilaiset ja mahdollisesti eri ajankohtina tapahtuvat ja vaikuttavat ympäristökuormitukset. Erilaiset kuormitukset voivat aiheuttaa ympäristöhaittoja eri tasoilla, paikallisesti, alueellisesti tai globaalisti, ja näiden eritasoisten vaikutusten vertailu ja arviointi on hankalaa. Ongelma tuhkien ympäristövaikutusten tarkastelussa on samankaltainen kuin esimerkiksi pohdittaessa ydinvoiman roolia energiantuotannossa ja ilmastonmuutoksen hillinnässä. Korvattaessa ydinvoimalla fossiilisia polttoaineita pystytään vähentämään kasvihuonekaasujen muodostumista. Ydinvoimasta kuitenkin muodostuu radioaktiivisia jätteitä, jotka aiheuttavat säteilyä vielä monien satojen vuosien kuluttua. Jätteenpolton tuhkien kohdalla käsittelystä aiheutuu usein ympäristökuormitus välittömästi raaka-aineiden ja energian käytön sekä ilma- ja jätevesipäästöjen muodossa. Käsittelyllä voidaan kuitenkin vähentää loppusijoitettavan materiaalin haitallisuutta ja ympäristölle haitallisten aineiden vapautumista siitä maaperään ja vesistöihin pitkällä aikavälillä. Toisaalta, jos tuhkaa käsitellään vähemmän tai ei lainkaan, ja se sijoitetaan paremmin suojattuun loppusijoituskohteeseen, vähenevät ennen loppusijoitusta aiheutuvat ympäristökuormitukset huomattavasti. Myös paremmin suojatun loppusijoituspaikan rakentamisesta aiheutuvat kuormitukset ovat luultavasti pieni verrattuna monien käsittelytekniikoiden aiheuttamiin kuormituksiin. Enemmän haitta-aineita sisältävän materiaalin sijoittaminen kuitenkin aiheuttaa riskin siitä, että haitalliset aineet pääsevät ajan mittaan vapautumaan ympäristöön.

6.4 Jatkotutkimusaiheet

Työn tavoitteena oli tutkia tuhkien käsittelyn ympäristönäkökohtia esiselvityksen tapaan, koska aihe on vasta hyvin vähän tutkittu ja erilaisia käsittelyvaihtoehtoja on lukuisia erilaisia. Näin ollen myös jatkotutkimusmahdollisuuksia teeman ympärillä on paljon. Ympäristökuormituksia arvioitiin työssä neljästä käsittelytekniikasta ja kahdesta muusta loppusijoitusvaihtoehdosta. Tarkasteltavista vaihtoehdoista rajattiin tarkemman arvioinnin ulkopuolelle joitakin prosessin osia ja tarkastelussa tehtiin paljon oletuksia. Lisäksi työn ulkopuolelle rajattiin pohjatuhkan ja –kuonan arviointi, jota ei huomioida myöskään jatkotutkimusmahdollisuuksia ajateltaessa. Ympäristökuormitusten laskennassa käytettiin lähtötietoina paljon keskimääräisiä arvoja ja tietoja, jotka sisältävät paljon epävarmuutta. Näin ollen jatkotutkimuksia voitaisiin tehdä sekä tarkastellen useampia erilaisia käsittelyvaihtoehtoja että keskittyen tarkemmin tiettyjen menetelmien arviointiin tutkien prosesseja tarkemmin ja käyttäen luotettavuudeltaan parempia lähtötietoja.

Kaatopaikkasijoitusta käsiteltiin työssä ainoastaan pääpiirteittäin ja materiaalista liukenevista aineista arvioitiin ainoastaan liukoisuustestien tuloksia, ei liukenevien haitta-aineiden määrää pitkällä aikavälillä kaatopaikkaympäristössä. Jätteenpolton tuhkien loppusijoituksesta aiheutuvasta haitta-aineiden leviämisestä maaperään on esitetty joitain tutkimuksia, mutta myös se yhdistettynä muuhun elinkaariarviointiin voisi olla yksi jatkotutkimuksen aihe. Lisäksi erilaisten kaatopaikkarakenteiden, niiden uusimisen ja huollon sekä suoto-vesien käsittelyn ympäristökuormituksia voisi arvioida tarkemmin yhdessä käsittelymenetelmien kanssa. Työssä selvitettiin ympäristökuormituksia pääosin ilmapäästöjen sekä raaka-aineiden ja energiaressurssien kulutuksen osalta. Tarkempaa arviointia voisi suorittaa maaperään liukenevien yhdisteiden lisäksi myös käsittelyprosessissa syntyvien savukaasujen ja jätevesien osalta. Jätevesien käsittelystä jää jäljelle lietettä, johon on sitoutunut haitta-aineita ja joka edelleen aiheuttaa ympäristöhaittoja jatkokäsittelystä ja loppusijoituksesta. Tarkasteluun voidaan ottaa mukaan ympäristövaikutuksia myös laajemmin huomioiden esimerkiksi käsittelyn aiheuttama melu, pöly, maan käyttö ja vaikutukset vesistöihin.

Työssä ei toteutettu varsinaista, standardeihin perustuvaa elinkaariarviointia, joka voisi myös olla yksi jatkotarkastelun aihe. Työssä koettiin ongelmalliseksi erityisesti erilaisten ympäristökuormitusten vertailu, jota voitaisiin elinkaariarvioinnin ”vaikutusten arviointi” –vaiheen periaatteiden mukaisesti pyrkiä selvittämään. Sen lisäksi, että tuhkien käsittelyä

voidaan tarkastella erillisenä prosessina elinkaariarvioinnissa, voidaan sen tarkastelu integroida osaksi jätteenpolton tai koko jätteenkäsittelyketjun tarkastelua.

Eri käsittelymenetelmien lisäksi voidaan tarkastella myös mahdollisuuksia vaikuttaa tuhkien ominaisuuksiin jo ennen niiden muodostumista esimerkiksi jätepolttoaineen esikäsitteilyllä ja poltto- ja savukaasujen puhdistustekniikoilla. Myös erilaisten loppusijoituskohteiden sekä eri tasolla käsiteltyjen tuhkien sijoittamisen ympäristökuormituksia voidaan arvioida. Tuhkien mahdollista hyötykäyttöä ei työssä tarkasteltu, koska lentotuhkan ja APC-jätteiden osalta se ei ole vielä ajankohtaista. Hyötykäyttötapojen mahdollisesti lisääntyessä tulevaisuudessa antaa se mielenkiintoisen uuden tarkastelunäkökulman tuhkien käsittelyn ja loppusijoittamisen rinnalle.

7 YHTEENVETO

Jätteenpolttolaitosten rakentamiseksi on lukuisia. Jätteenpolton haittoiksi koetaan tyypillisesti kierrätyksen väheksymisen lisäksi savukaasupäästöt niin polttolaitokselta kuin jätekuljetuksista sekä kuljetusten aiheuttama melu. Polttoprosessin savukaasut pystytään nykytekniikalla puhdistamaan tehokkaasti, joten uudeksi tarkastelun aiheeksi ovat nousseet poltossa syntyvät tuhkat, jotka sisältävät huomattavia määriä loppusijoittamisen ja hyötykäytön kannalta haitallisia aineita. Jätelainsäädäntö asettaa kaatopaikoille sijoitettavien materiaalien ominaisuuksille raja-arvoja, joista jätteenpolton tuhkia koskevat erityisesti raskasmetallien ja suolojen liukoisuutta koskevat rajoitukset. Näiden yhdisteiden liukoisuus jätteenpolton tuhkista on tyypillisesti niin suurta, ettei niitä voida sijoittaa kaatopaikoille ilman käsittelyä. Tuhkille onkin kehitetty lukuisia erilaisia käsittelytekniikoita, joilla niistä pyritään poistamaan haitta-aineita tai saattamaan ne mahdollisimman pysyvään muotoon, jotta turvallinen loppusijoittaminen tai jopa hyötykäyttö olisi mahdollista. Käsittely vaatii kuitenkin aina energiaa ja raaka-aineita. Lisäksi käsittelyssä voi syntyä uusia jätevirtoja, jotka aiheuttavat haittaa ympäristölle ja vaativat puhdistusta. Näin ollen arvioitaessa käsittelyllä saavutettavia hyötyjä, tulee huomioida myös käsittelyprosessista aiheutuvat ympäristökuormitukset.

Tämän työn tavoitteena oli selvittää jätteenpolton tuhkien käsittelyn aiheuttamia ympäristövaikutuksia. Työssä keskityttiin tarkastelemaan jätteenpoltossa syntyvistä tuhkista ongelmallisimpia ja eniten käsittelyä vaativia, eli lentotuhkaa ja savukaasujen puhdistus- eli APC-jätteitä. Koska erilaisia käsittelytapoja on olemassa kymmeniä, valittiin tarkasteluun neljä varsinaista käsittelytekniikkaa sekä kaksi muuta vaihtoehtoa tuhkien hallintaan. Käsittelytekniikoista työssä tarkasteltiin pesua, sementtikiinteytystä, Ferrox-prosessia sekä vitrifointia. Lisäksi ympäristövaikutuksia arvioitiin tuhkan sijoittamisesta kaatopaikalle ilman käsittelyä sekä kuljettamisesta käsiteltäväksi ja loppusijoitettavaksi Norjassa sijaitsevalle neutralointilaitokselle. Menetelmien ympäristövaikutuksia arvioitiin osittain laskennallisesti ja osittain ainoastaan sanallisesti. Ympäristökuormituksia tarkasteltiin ns. koko tuhkien käsittelyn elinkaaren ajalta, eli ottaen huomioon menetelmissä tarvittavien raaka-aineiden hankinnasta, energiankulutuksesta, kuljetuksista sekä käsittelyssä syntyvistä päästöistä aiheutuvat kuormitukset. Lisäksi arvioitiin loppusijoittamisesta aiheutuvia kuormituksia. Ympäristövaikutuksista keskityttiin tarkastelemaan erityisesti raaka-aineiden ja energieresurssien kulutusta sekä syntyviä ilmapäästöjä. Lisäksi tarkasteltiin loppusijoi-

tettavan materiaalin ominaisuuksia, joista kiinnitettiin erityistä huomiota kaatopaikkasijoituksen kannalta olennaisiin liukoisuusarvoihin. Ympäristökuormitusten tarkastelun tulosten perusteella eri käsittelyvaihtoehtoja pyrittiin vertaamaan toisiinsa sekä nostamaan esille eri menetelmille ominaisia kuormituksia.

Jos tuhkat pystyttäisiin kaatopaikkalainsäädännön raja-arvojen puitteissa sijoittamaan kaatopaikalle ilman käsittelyä, olisivat niiden loppusijoittamisesta aiheutuvat ympäristövaikutukset luonnonvarojen kulutuksen ja ilmapäästöjen osalta hyvin pienet verrattuna käsittelyn aiheuttamiin kuormituksiin. Samalla aiheutettaisiin kuitenkin riski tuhkan sisältämien haitta-aineiden vapautumisesta ympäristöön pitkällä aikavälillä.

Pesulla pystytään erottamaan tuhkasta erityisesti liukenevia suoloja, mutta raskasmetallien erotusteho on huono. Yleisesti voidaan olettaa, että pesty tuhka voidaan sijoittaa ongelmajätteen kaatopaikalle. Prosessi ei kuluta veden lisäksi muita raaka-aineita ja myös sen energiankulutus on suhteellisen pientä. Ongelman kuitenkin aiheuttavat prosessissa syntyvät jätevedet, jotka sisältävät raskasmetalleja ja suoloja ja vaativat puhdistusta. Tämä lisää menetelmän aiheuttamia ympäristökuormituksia, jotka kuitenkin kokonaisuudessaan jäävät pieniksi.

Sementtikiinteytys on hyvin yleisesti jätteenpolton tuhkien käsittelyssä käytetty menetelmä, jolla pystytään vähentämään haitta-aineiden ja veden kosketuspintaa ja näin ollen vähentämään haitta-aineiden vapautumista. Suolojen liukeneminen on kuitenkin kiinteytetystä tuhka-sementtimatriisista huomattavaa, eikä sitä voida tyypillisesti sijoittaa ongelmajätteenkään kaatopaikalle ilman raja-arvojen kolminkertaistamista. Sementin valmistus vaatii paljon luonnonvaroja ja energiaa, ja aiheuttaa näin ollen paljon ilmapäästöjä. Sementin lisäyksen vuoksi loppusijoitettavan materiaalin määrä kasvaa huomattavasti, jonka vuoksi kaatopaikkasijoituksen kuormitukset ovat muita tarkasteltuja vaihtoehtoja suuremmat. Kokonaisuudessaan menetelmä on helppo ottaa käyttöön sen yleisyyden vuoksi, mutta sen ympäristökuormitukset ovat huomattavan suuret.

Ferrox-prosessi on lupaavia testituloksia antanut menetelmä, jossa yhdistetään pesu ja kemiallinen stabilointi. Se on kuitenkin vasta kehitetty menetelmä, eikä sitä hyödyntäviä laitoksia ole vielä toiminnassa. Menetelmällä pystytään erottaa suolat ja sitomaan raskasmetallit tehokkaasti, joten käsitellyt tuhkat voidaan sijoittaa raja-arvojen mukaan tavanomai-

sen jätteen kaatopaikalle. Menetelmässä hyödynnetään stabilointiaineena toisen prosessin sivutuotetta, joten sen hankinnasta aiheutuvat kuormitukset jäävät pieniksi. Menetelmän energiankulutus ei ole huomattavan suurta, joten myös ilmapäästöt ja luonnonvarojen kulutus ovat suhteellisen pieniä. Menetelmässä syntyy kuitenkin pesun vuoksi jätevesiä, jotka vaativat puhdistusta ja lisäävät näin ollen ympäristöhaittoja.

Vitrifioinnissa käsiteltävä tuhka sekoitetaan lasinmuodostaja-aineen kanssa ja ne sulatetaan korkeassa lämpötilassa hyvin stabiiliksi materiaaliksi. Vitrifioidun tuhkan liukoisuusominaisuudet ovat tyypillisesti niin hyvät, että se voidaan sijoittaa jopa pysyvän jätteen kaatopaikalle. Menetelmän energiankulutus on kuitenkin erittäin suurta ja näin ollen myös ilmapäästöjä syntyy runsaasti. Prosessissa syntyy lisäksi savukaasuja, jotka vaativat tehokasta puhdistusta ja näin ollen lisäävät käsittelyä tarvitsevan APC-jätteen määrää. Myös lasinmuodostaja-aineen hankinnasta aiheutuu kuormituksia. Käsittelyssä tuhkan määrä kuitenkin vähenee noin puoleen alkuperäisestä. Menetelmä on paljon käytössä esimerkiksi Japanissa, mutta se on kustannuksiltaan hyvin kallis. Vaikka tuhkien ominaisuuksia pystytään parantamaan erittäin paljon, aiheuttaa menetelmä kokonaisuudessaan kuitenkin merkittäviä ympäristövaikutuksia.

Tuhkien kuljettamista Norjassa sijaitsevalle käsittely- ja loppusijoituslaitokselle arvioitiin ainoastaan pääpiirteittäin. Vaihtoehdossa ympäristökuormituksia syntyy laivakuljetuksesta, itse käsittelyprosessista sekä loppusijoituksesta, koska prosessissa ei tuhkan sisältämiä haitta-aineiden pystytä kunnolla sitomaan. Laitoksella tuhkillä kuitenkin korvataan luonnonmateriaaleja ja se näin ollen luokitellaan hyötykäytöksi. Vaihtoehdon kuormituksia ei työssä pystytty kunnolla tarkastelemaan, mutta kokonaisuudessaan ne kuitenkin arvioidaan merkittäviksi.

Tarkastelluissa käsittelyvaihtoehdoissa raaka-aineiden hankinnan ja itse käsittelyprosessin energiankulutuksen huomattiin aiheuttavan merkittävimmät ympäristökuormitukset ilmapäästöjen osalta. Lisäksi on kuitenkin huomioitava sekä jätevesistä että loppusijoitettavasta materiaalista liukenevista aineista aiheutuvat kuormitukset. Kokonaiskuormituksia voidaan pienentää esimerkiksi kuljetusmatkoja lyhentämällä tai mahdollisuuksien mukaan hyödyntämällä käsittelyn lisäaineina toisten prosessien sivutuotteita.

Työssä suoritettu ympäristökuormitusten arviointi on tehty karkealla tasolla ja se sisältää paljon epävarmuuksia. Työn tuloksista voidaan kuitenkin huomata, että erilaiset käsittely- ja loppusijoitusvaihtoehdot tuottavat hyvin erilaisia ympäristökuormituksia ja kuormitusten suuruudet vaihtelevat huomattavasti. Lisäksi eri tekniikoilla saadaan aikaan hyvin erilaisia käsittelytuloksia. Näiden erilaisten ympäristövaikutusten vertailu on vaikeaa, eikä yksiselitteisesti voida sanoa mikä tarkastelluista käsittelyvaihtoehdoista on paras ja mikä huonoin. On tärkeää kuitenkin tiedostaa erilaisista vaihtoehdoista syntyvät ympäristövaikutukset ja pyrkiä ottamaan ne huomioon käsittelyvaihtoehtoja arvioitaessa.

Jätteenpolton tuhkien käsittelyn ympäristövaikutukset ovat vasta vähän tarkasteltu tutkimusaihe ja jatkotutkimuskohteita löytyy lukemattomia. Lisätutkimusta tarvitaan sekä eri menetelmien tarkemmista ympäristökuormituksista että tuhkien käsittelyn osuudesta koko jätteenkäsittelyketjun ympäristövaikutuksiin.

LÄHDELUETTELO

Birgisdóttir H., Pihl K.A., Bhandar G., Hauschild M.Z. ja Christensen T.H. 2006. Environmental assessment of roads constructed with and without bottom ash from municipal solid waste incineration. *Transport research part D*, vol. 11. S. 358-368.

Bollinger Dominique ja Pictet Jacques. 2006. Multiple criteria decision analysis of treatment and land-filling technologies for waste incineration residues. *Omega – The International Journal of Management Science*, vol. 36. S. 418-428.

Brereton Clive. 1996. Municipal solid waste – incineration, air pollution control and ash management. *Resources, conservation and recycling*, vol. 16. S. 227-264.

Burgess A.A. ja Brennan D.J. 2001. Application of life cycle assessment to chemical processes. *Chemical Engineering Science*, vol. 56. S. 2589-2604.

Chandler A.J., Eighmy T.T., Hartlén J., Hjelm O., Kosson D., Sawell S., van der Sloot H. ja Vehlow J. 1997. *Municipal solid waste incinerator residues*. Amsterdam: Elsevier. 974 s. *Studies in environmental science 67*. ISBN 0-444-82563-0.

Chang Ying-His, Chen W.C. ja Chang Ni-Bin. 1998. Comparative evaluation of RDF and MSW incineration. *Journal of hazardous materials*, vol. 58. S. 33-45.

Consonni S., Giugliano M. ja Grosso M. 2005. Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste, Part A: Mass and energy balances ja Part B: emissions and cost estimates. *Waste management*, vol. 25. S. 123-148.

Diaz R. ja Warith M. 2006. Life-cycle assessment of municipal solid wastes: development of the WASTED model. *Waste management*, vol. 26. S. 886-901.

Electrowatt-Ekono Oy. 2005. Vapo Oy – jätteenpolttolaitos ja tuhkan läjitysalue, ympäristövaikutusten arviointiselostus. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 16.04.2007]. Vapo Oy. 155 s. + 3 liitettä. Saatavissa: www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=48412&lan=FI

Enprima Oy. 2004. Ympäristövaikutusten arviointiselostus, Jyväskylän Energiantuotanto Oy, Rauhalahden voimalaitos, jätteen energiahyötykäyttöhanke. [verkkajulkaisu]. [Viitattu 19.2.2007]. Fortum Oyj. 85 s. + 7 liitettä. Saatavissa: www.fortum.fi/attachment.asp?path=14020;14028;14030;14047;14553;14558;17358;29023;29035

Eskola Paula ja Mroueh Ulla-Maija. 1998. Kivihiilivoimalan sivutuotteiden maarakennuskäytön elinkaariarviointi. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 82 s. + 5 liitettä. (VTT tiedotteita 1898). ISBN 951-38-5288-1.

Eskola Paula. 2001. Maabetonin lisääminen MELI-ohjelmaan ja sementin ympäristökuormitustietojen tarkistaminen, ohjelmaan tehdyt muutokset. 7 s. VTT Kemianteekniikka. (julkaisematon)

Ettala Matti. 1998. Kaatopaikkavesien käsittely haihdutustekniikalla täysmittakaavan laitoksessa. Vesitalous 1/1998. S. 12-15.

European Commission. 2006. Reference document on the best available techniques for waste incineration. [verkkajulkaisu]. [Viitattu: 26.2.2007]. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau. 488 s + 5 liitettä. Saatavissa: <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>

Geologian tutkimuskeskus (GTK). 2003. Retkeilijän kiviopas; teollisuusmineraaleja. [verkkajulkaisu]. Saatavissa: <http://www.gtk.fi/aineistot/kiviopas/teolmi1.htm>

Hakala Harri ja Välimäki Jari. 2003. Ympäristön tila ja suojele. 2. painos. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, Gaudeamus. 446 s. ISBN 951-662-875-3.

Helsingin vesi. 2007. Vesitietoa – viemäriin johdettavien jätevesien määrän ja laadun rajoitukset. [verkkajulkaisu]. [Viitattu: 27.03.2007]. Saatavissa: <http://www.helsinginvesi.fi/index.asp?id=128&menupath=128&language=1&klik=2>

Helynen Satu. 2007. Future large scale bioenergy technologies. [verkkojulkaisu]. Päivitetty 02.03.2007. [Viitattu: 27.03.2007]. Saatavissa: www.bioenergia2007.com/presentations/08-VTT.pdf

Hjelmar Ole. 1996. Disposal strategies for municipal waste incinerator residues. *Journal of hazardous materials*, vol. 47. S. 345-368.

Hjelmar Ole, Holm Jesper, Bendz David, Suer Pascal, Rosqvist Håkan, Wahlström Margareta ja Laine-Ylijoki Jutta. 2005. Development of criteria for acceptance of monolithic waste at landfills, final report for the NMR landfill group Nordic council of ministers (draft). 54 s. + 6 liitettä. (julkaisematon)

Huhtinen Markku, Kettunen Arto, Nurminen Pasi ja Pakkanen Heikki. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. painos. Helsinki: Oy Edita Ab. 379 s. ISBN 951-37-3360-2.

Huhtinen Kaarina, Lilja Raimo, Runsten Suvi, Salmenperä Hanne ja Laura Sokka. 2007. Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2016 – taustaraportti. [verkkojulkaisu]. Julkaistu: 23.1.2007. [Viitattu 12.6.2007]. Suomen ympäristökeskus (SYKE). 127 s. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=20556&lan=fi>

IEA, International Energy Agency, Bioenergy Thermal Conversion Activity. 2004. The management of residues from thermal processes. [verkkojulkaisu]. Julkaistu 24.3.2004. [Viitattu 1.2.2007]. International Energy Agency (IEA). 69 s. + 1 liite. Saatavissa: http://www.ieabioenergytask36.org/publications_iea_bioenergy_task_36.html

ISWA, International Solid Waste Association -WG Thermal Treatment of Waste, subgroup APC residues from WTE-plants. 2003a. Management of APC residues from WTE Plants, an overview of important management options. Copenhagen: International Solid Waste Association (ISWA). 47 s.

ISWA, International Solid Waste Association. 2003b. Position paper on handling of APC residues. [Verkkojulkaisu]. Julkaistu 4.6.2003. [Viitattu 28.2.2007]. 9 s. Saatavissa: http://www.iswa.org/c/portal/layout?p_1_id=PUB.1.31

Kaartinen Tommi, Laine-Ylijoki Jutta ja Wahlström Margareta. 2007. Tuhkien ja kuonien uudet tehokkaat käsittelytekniikat – loppuraportti (luonnos). 34 s + 8 liitettä. (Ilmestyy VTT tiedotteita –sarjassa syksyllä 2007)

Kaartinen Tommi. 2005. Kaatopaikan elinkaaren aikaisten vaikutusten arviointi (luonnos). 22 s. + 2 liitettä. VTT. (Julkaisematon)

Kautto Petrus, Heiskanen Eva ja Melanen Matti. 2001. Pyrkimys ympäristömyönteisiin tuotteisiin, tapaustutkimus viidestä kansainvälisestä suomalaisyrityksestä. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 88 s. (Suomen ympäristö 530). ISBN 952-11-1047-3. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=54894&lan=FI>

Krozert J. ja Vis J.C. 1998. How to get LCA in the right direction? Journal of cleaner production, vol. 6. S. 53-61.

Laine-Ylijoki Jutta, Mroueh Ulla-Maija, Wellman Kari ja Mäkelä Esa. 2000. Maarakentamisen elinkaariarviointi, ympäristövaikutusten laskentaohjelma. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 43 s. + 9 liitettä. (VTT tiedotteita 2014). ISBN 951-38-5636-4.

Laine-Ylijoki Jutta. 2004. Matkakertomus - Pohjoismaiden tutustumismatka 22.-24.9.2004. 9 s. VTT Prosessit. (julkaisematon)

Laine-Ylijoki Jutta, Mroueh Ulla-Maija, Vahanne Pasi, Wahlström Margareta, Vestola Elina, Salonen Sakari ja Havukainen Jorma. 2005. Yhdyskuntajätteiden termisen käsittelyn kuonista ja tuhkista hyötykäytettäviä ja loppusijoitettavia tuotteita, kansainvälinen esiselvitys. Helsinki: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 83 s. + 1 liite. (VTT tiedotteita 2291). ISBN 951-38-6546-0.

Lewin Kathy ja Young Chris. 2004. Characterisation of air pollution control residues from MSW energy-from-waste facilities. Resource recovery forum. 97 s. + 9 liitettä.

Linnanen Lassi, Boström Paula ja Miettinen Pauli. Ympäristöjohtaminen, elinkaariajattelu yrityksen toiminnassa. Juva: WSOY. 252 s. ISBN 951-35-5859-2.

Lundström Yrjö (Helsingin vesi, ympäristöpäällikkö). 2007. Vast: kloridin raja-arvot [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: kirsi.koivunen@vtt.fi. Lähetetty: 22.03.2007 klo 09.24.

Lundtorp Kasper. 2001. The Ferrox-process in an industrial scale. Väitöskirja. Technical university of Denmark, Department of environmental science and engineering. Kgs. Lyngby. 76 s + 6 liitettä. Saatavissa: www2.er.dtu.dk/publications/fulltext/2001/MR2001-221.pdf

Maskuniitty Hannu. 2002. Arinapoltto. Teoksessa: Poltto ja palaminen: Raiko Risto et a. (toim.) 2. painos. Helsinki: International Flame Research Foundation. s. 466-489. ISBN 951-66-604-3.

Mangialardi T., Paolini A.E., Poletini A. ja Sirini P. 1999. Optimization of the solidification/stabilization process of MSW fly ash in cementitious matrices. Journal of hazardous materials, vol. B70. S. 53-70.

Mendes Mara Regina, Aramaki Toshiya ja Hanaki Keisuke. 2004. Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in São Paulo City as determined by LCA. Resources, conservation and recycling, vol. 41. S. 47-63.

Miettinen Pauli ja Hämäläinen Raimo P. 1997. How to benefit from decision analysis in environmental life cycle assessment (LCA). European Journal of Operational Research, vol. 102. S. 279-294.

Mulder Evert. 1996. Pre-treatment of MSWI fly ash for useful application. Waste Management, vol. 16. S. 181-184.

Myllymaa Tuuli, Tohka Antti, Dahlbo Helena ja Tenhunen Jyrki. 2006. Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2016, Taustaselvitys, Osa III: Jätteen energia- ja materiaali-hyödyntämisen vahvuudet ja heikkoudet ympäristön kannalta. [verkkojulkaisu]. Päivitetty 27.7.2006. [Viitattu 16.11.2006]. Suomen ympäristökeskus. 61 s. + 4 liitettä. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=19533&lan=fi>

Mäkelä Kari. 2000. TYKO 1999 – työkoneiden päästömalli. [verkkajulkaisu]. Päivitetty 9.9.2002. [Viitattu: 1.6.2007]. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 49 s. + 5 liitettä. (VTT tutkimusraportti 546/2000). Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/tyko/malli.htm>

Mäkelä Kari. 2005a. TRALCA, excel-pohjainen ympäristöprofiilien laskentajärjestelmä kuljetusten ja polttomoottorikäyttöisten työkoneiden elinkaari päästöjen laskentaan. VTT (julkaisematon).

Mäkelä Kari. 2005b. Lipasto, liikenteen päästöjen investointi. [verkkajulkaisu]. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/>

NOAH AS. 2004. A presentation of NOAH-Langøya. 14 esityskuvaa. Tekesin Streamsteknologiaohjelman Pohjoismaiselle tutustumismatkalle osallistujille Langøyassa 24.9.2004 pidetyn esitelmän kalvot.

Nieminen Marika ja Nurminen Elina. 2002. Metallien kemiaa – titaanidioksidi ja rautasulfaatti. [verkkajulkaisu]. Julkaistu: 29.04.2002. [Viitattu: 26.02.2007]. Helsingin yliopisto, kemian laitos. Saatavissa: <http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/aineistot/metallit/>

Olsson Susanna, Kärrman Erik ja Gustafsson Jon Petter. 2006. Environmental systems analysis of the use of bottom ash from incineration of municipal waste for road construction. *Resources, conservation & recycling*, vol. 48. S. 26-40.

Park Young Jun ja Heo Jong. 2001. Vitrification of fly ash from municipal solid waste incinerator. *Journal of Hazardous Materials*, vol. B91. S. 83-93

Saastamoinen Jarkko. 2002. Kiinteän polttoaineen palaminen ja kaasutus. Teoksessa: *Poltto ja palaminen: Raiko Risto et a. (toim.) 2. painos*. Helsinki: International Flame Research Foundation. S. 186-232. ISBN 951-66-604-3.

Sabbas T., Poletini A., Pomi R., Astrup T., Hjelmar O., Mostbauer P., Cappai G., Magel G., Salhofer S., Speiser C., Heuss-Assbichler S., Klein R. ja Lechner P. 2003. Management of municipal solid waste incineration residues. *Waste Management*, vol. 23. S. 61-88.

Sakai Shin-ichi ja Hiraoka Masakatsu. 2000. Municipal solid waste incinerator residue recycling by thermal processes. *Waste Management*, vol. 20. S. 249-258.

ScanArc (Plasma technologies Ab). 2005. VitroArc, stabilisation and detoxification of fly ash from waste incineration. [verkkodokumentti]. [viitattu 31.5.2007]. Saatavissa: <http://www.scanarc.se/pages/vitroarc.asp>

Setac, Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Life-cycle assessment (LCA). [www-sivu]. Julkaistu 2005 [viitattu 27.2.2007]. Saatavissa: http://www.setac.org/htdocs/who_intgrp_lca.html

van der Sloot H.A., Kosson D.S. ja Hjelmar O. 2001. Characteristics, treatment and utilization of residues from municipal waste incineration. *Waste Management*, vol. 22. S. 753-765.

Suomen ympäristökeskus. 2001. Kaatopaikkojen lopettamisopas. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 69 s. + 8 liitettä. (Ympäristöopas 89) ISBN 952-11-1022-8.

Tattari Kai. 2004. Sähkön ja kaukolämmön ympäristöprofiilit vuonna 2002 hyödynjakomenetelmällä. 9 s. VTT rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. (julkaisematon)

Tilastokeskus. 2006. Yhdyskuntajätteet vuonna 2005. [verkkodokumentti]. Päivitetty 13.12.2006. [viitattu: 10.1.2007]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/jate/2005/jate_2005_2006-12-13_tie_001.html

Vahanne Pasi ja Vestola Elina. 2007. TBT-BAT MANUAL – organotinapitoisten sedimenttien ruoppaus ja käsittely, menettelytapaohje. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 76 s. + 1 liite. (VTT tiedotteita 2371) ISBN 978-951-38-6900-7.

Vesanto Petri. 2006. Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä, jätteenpolton BREF 2006. [verkkopublication]. Julkaistu: 14.8.2006. [viitattu 11.1.2006]. Suomen ympäristökeskus. 99 s. (Suomen ympäristö 27/2006). ISBN 952-11-2309-5. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=196331&lan=FI>

Wahlström Margareta, Eskola Paula, Laine-Ylijoki Jutta, Leino-Forsman Hilikka, Mäkelä Esa, Olin Markus ja Juvankoski Markku. 1999. Maarakentamisessa käytettävien teollisuuden sivutuotteiden riskinarviointi. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 79 s. + 5 liitettä. (VTT tiedotteita 1995) ISBN 951-38-5604-6.

Wahlström Margareta, Laine-Ylijoki Jutta, Eskola Paula, Vahanne Pasi, Mäkelä Esa, Vikman Minna, Venelampi Olli, Hämäläinen Jyrki ja Frilander Reetta. 2004. Kaatopaikkojen tiivistysrakennemateriaaleina käytettävien teollisuuden sivutuotteiden ympäristökelpoisuus. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 84 s. + 6 liitettä. (VTT tiedotteita 2246) ISBN 951-38-6470-7.

Wahlström Margareta, Laine-Ylijoki Jutta, Vestola Elina, Vaajasaari Kati ja Joutti Anneli. 2006. Jätteiden kaatopaikkakelpoisuuden toteaminen. Helsinki: Ympäristöministeriö. 47 s. + 3 liitettä. (Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2006) ISBN 952-11-2335-4.

Weidema Bo Pedersen. 1997. Environmental assessment of products – a textbook on life cycle assessment. Helsinki: Tekniikan akateemisten liitto. 95 s. ISBN 952-5005-25-9.

Wilén Carl, Salokoski Pia, Kurkela Esa ja Sipilä Kai. 2004. Finnish expert report on best available techniques in energy production from solid recovered fuels. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 55 s. (Suomen ympäristö 688) ISBN 952-11-1662-5.

Wiles Carlton C. 1996. Municipal solid waste combustion ash: State-of-the-knowledge. Journal of hazardous materials, vol. 47. S. 325-344.

Ympäristölupapäätös LOS-2005-Y-321-111

Ympäristölupapäätös LOS-2004-Y-1048-111

Ympäristölupapäätös LOS-2004-Y-1106-121

Ympäristöministeriö. 2003. Biojätestrategiatyöryhmän ehdotus kansalliseksi biojätestrategiaksi sekä sihteeristön muistio perusteluista. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 21.11.2006]. Ympäristöministeriö. 63 s. + 1 liite. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=14819&lan=FI>

YTV. 2004. Pääkaupunkiseudun kotitalouksien sekajätteen määrä ja laatu. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 27.2.2007]. YTV. 77 s. (Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 2004:13). Saatavissa: http://www.ytv.fi/FIN/tietoa_ytv/julkaisusarja/2004/etusivu.htm

Lait ja säädökset

VNp 4.9.1997/861. Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista. FINLEX – Valtion säädöstietopankki]. [Viitattu: 31.5.2007]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1997/19970861>

VNa 23.3.2006/202. Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista annetun valtioneuvoston päätöksen muuttamisesta. [FINLEX – Valtion säädöstietopankki]. [Viitattu: 31.5.2007]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20060202>

VNa 15.3.2003/362. Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta. [FINLEX - Valtion säädöstietopankki]. [Viitattu: 12.6.2007]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2003/20030362>

Ympäristöministeriön asetus 22.11.2001/1129. Ympäristöministeriön asetus yleisimpien jätteiden sekä ongelmajätteiden luettelosta. [FINLEX – Valtion säädöstietopankki]. [Viitattu 12.6.2007]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2001/20011129>

LIITELUETTELO

- Liite I Jätteenpolton tuhkien käsittelyssä ja kaatopaikoilla syntyvien jätevesien hallinta
- Liite II Tuhkien kaatopaikkasijoitusta koskeva lainsäädäntö
- Liite III Ympäristökuormitusten laskennassa käytetyt lähtötiedot
- Liite IV Päästökertoimet
- Liite V Ympäristökuormitusten laskentaesimerkki
- Liite VI Tarkasteltavien käsittelyvaihtoehtojen ympäristökuormitukset
- Liite VII Kaatopaikkarakenteiden muodostamisen ympäristökuormitukset
- Liite VIII Yhteenveto käsittelyvaihtoehtojen ympäristökuormituksista

JÄTTEENPOLTON TUHKIEN KÄSITTELYSSÄ JA KAASTOPAIKOILLA SYNTYVIEN JÄTEVESIEN HALLINTA

Monissa tuhkien käsittelytekniikoissa käytetään vesiliuoksia erityisesti suolojen poistamiseksi käsiteltävästä tuhkasta. Näin ollen käsitellyn tuotteen ominaisuudet paranevat, mutta samalla syntyy uusi ongelma jätevesistä. Myös kaatopaikoilla syntyy ns. suoto- tai kaatopaikkavesiä, joihin on sijoitetusta materiaaleista liuennut haitta-aineita. Jätteenpolton tuhkia sijoittavien kaatopaikkojen suotovedet sisältävät tyypillisesti kohonneita pitoisuuksia suoloja ja raskasmetalleja.

Joissain tapauksissa voi olla mahdollista johtaa tuhkien käsittelyssä ja kaatopaikoilla syntyvät jätevedet erillisellä sopimuksella viemäriverkkoon kunnallisen jätevedenpuhdistuksen piiriin. Taulukossa I-1 on listattu Helsingin veden asettamia rajoituksia viemäriverkkoon laskettaville teollisuuden jätevesille.

Taulukko I-1. Kunnalliseen jäteveden puhdistukseen sallitut raja-arvot (Helsingin vesi 2007)

metallit	pitoisuus (mg/l)
arseeni (As)	0,1
elohopea (Hg)	0,01
hopea (Ag)	0,2
kadmium (Cd)	0,01
kokonaiskromi (Cr)	1,0
kromi VI (Cr ⁶⁺)	0,1
kupari (Cu)	2,0
lyijy (Pb)	0,5
nikkeli (Ni)	0,5
sinkki (Zn)	3,0
tina (Sn)	2,0
muut ainekohtaiset raja-arvot	
pH	6,0-11,0
lämpötila [°C]	40
sulfaatti, tiosulfaatti, sulfiitti (summa-arvo) [mg/l]	400
kokonaissyaniidi [mg/l]	0,5

Raja-arvojen lisäksi jätevesiverkkoon ei saa laskea sellaisia aineita, jotka vahingoittavat viemäreiden, pumppaamoiden tai puhdistamojen toimintaa, puhdistamolietteen käsittelyä ja hyötykäyttöä tai purkuvesistöä (Helsingin vesi 2007). Jätteenpolton lentotuhkan ja APC-jätteiden kanssa kosketuksissa olleet jätevedet sisältävät usein huomattavia määriä klori-

diyhdisteitä. Liukoisten klooriyhdisteiden määrää ei viemäriverkkoon laskettavissa jätevesissä ole rajoitettu (Lundström sähköpostiviesti 22.03.2007). Suoloja sisältävät vedet voidaan laskea mereen, koska merivesi sisältää luonnostaan jo paljon suolaa. Esimerkiksi itämeren sulfaattipitoisuus vaihtelee välillä 300-1000 mg/l ja kloridipitoisuus välillä 500-4000 mg/l. Molemmat yhdisteet kuitenkin esimerkiksi aiheuttavat korroosiota vesijohdoissa. (Wahlström et al. 1999, 49)

Jos jätevesiä ei voida tai haluta laskea viemäriverkkoon tai mereen, on niiden käsittelemiseksi lukuisia erilaisia vaihtoehtoja. Metalleja ja suoloja sisältäville jätevesille soveltuvia käsittelymenetelmiä ovat muun muassa ioninvaihto, kemiallinen saostus, kalvosuodatus, aktiivihiiisorptio, kemiallinen hapetus sekä haihdutus. Erilaisia puhdistusmenetelmiä voidaan myös yhdistää, kun vedet ovat pilaantuneet monilla erilaisilla yhdisteillä. (Suomen ympäristökeskus 2001, 44 ja liite 5) Vesien puhdistus on kuitenkin aina suunniteltava tapauskohtaisesti, koska kaatopaikkavesien laatuun vaikuttavat monet tekijät. Eräs käyttökelpoinen menetelmä kaatopaikkojen suotovesien ja tuhkien käsittelyn jätevesien puhdistukseen on haihdutus, jonka energiankulutukseksi voidaan arvioida noin 10 kWh/m³_{vettä} (Ettala 1998, 13). Huomioimalla jätevesien käsittelyprosessin energiankulutus, saadaan vesienkäsittelystä huomioitua ympäristökuormitukset, joita voidaan vertailla muista käsitelymenetelmistä ja elinkaaren osista aiheutuviin kuormituksiin ja näin ollen huomioida jätevesien puhdistus sitä vaativien menetelmien kokonaiskuormituksessa. Jätevesien käsittelystä syntyy lisäksi yleensä kiintoainekakku, johon haitalliset aineet ovat konsentroituneet ja joka tulee käsitellä ja/tai loppusijoittaa turvallisesti.

TUHKIEN KAATOPAIKKASIJOTUSTA KOSKEVA LAINSÄÄDÄNTÖ

Taulukko II-1. Kelpoisuusvaatimukset jätteiden sijoittamiseksi kaatopaikoille (VNa 23.3.2006/202)

aine/muuttuja	raja-arvo [mg/kg kuiva-ainetta]		
	pysyvän jätteen kaatopaikat	tavanomaisen jätteen kaatopaikat ¹⁾	ongelmajätteen kaatopaikat
liukoisuusominaisuudet (L/S=10 l/kg)			
arseeni (As)	0,5	2	25
barium (Ba)	20	100	300
kadmium (Cd)	0,04	1	5
kromi yhteensä (Cr _{kok})	0,5	10	70
kupari (Cu)	2	50	100
elohopea (Hg)	0,01	0,2	2
molybdeeni (Mo)	0,5	10	30
nikkeli (Ni)	0,4	10	40
lyijy (Pb)	0,5	10	50
antimoni (Sb)	0,06	0,7	5
seleeni (Se)	0,1	0,5	7
sinkki (Zn)	4	50	200
kloridi (Cl)	800	15 000	25 000
fluoridi (F)	10	150	500
sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	1 000	20 000	50 000
fenoli-indeksi	1		
liuennut orgaaninen hiili (DOC)	500	800	1 000
liuenneiden aineiden kokonaisuusmäärä (TDS)	4 000	60 000	100 000
kokonaispitoisuudet			
orgaanisen hiilen kokonaisuusmäärä (TOC)	30000	5 %	6 %
bentseeni, tolueni, etyleeni-bentseeni ja ksyleenit (BTEX)	6		
polyklooratut bifenyylit (PCB)	1		
mineraaliöljy	500		
polyaromaattiset hiilivedyt	40		
heikutushäviö (LOI)			10 %
muut ominaisuudet			
pH		vähintään 6,0	
haponneutralointikapasiteetti (ANC)		aina tutkittava ja arvioitava	aina tutkittava ja arvioitava

1) raja-arvot tavanomaisen jätteen ja vakaan reagoimattoman ongelmajätteen sijoittamiseksi yhdessä

Maaperän ja vesien suojelemiseksi valtioneuvoston päätöksessä kaatopaikoista (VNp 4.9.1997/861, liite I) on kaatopaikkarakenteille asetettu vaatimuksia eri kerrosten paksuudesta ja maaperän vedenläpäisevyydestä (K). Jos kaatopaikan maaperän tiiveys ei vastaa esitettyjä vaatimuksia, tulee sinne rakentaa tiivistyskerros vastaavan suojatason saavuttamiseksi. Kaatopaikkaveden keräämiseksi tulee maaperän tai tiivistyskerroksen päälle rakentaa ongelma- ja tavanomaisen jätteen kaatopaikoilla lisäksi keinotekoinen eristekerros sekä kuivatus- eli salaojakerros. Vaatimukset eri kerrosten paksuudelle ja vedenläpäisevyydelle on koottu taulukkoon II-2. Kaatopaikan saavuttaessa lopullisen korkeutensa rakennetaan sen päälle pintakerros, joka sisältää rakennekerrokset taulukossa II-3 esitetystä järjestyksessä.

Taulukko II-2. Kaatopaikkojen maaperälle ja pohjarakenteille asetetut vaatimukset (VNp 4.9.1997/861, liite I)

kerros	kaatopaikkaluokka		
	ongelmajätteen kaatopaikka	tavanomaisen jätteen kaatopaikka	pysyvän jätteen kaatopaikka
maaperä	paksuus ≥ 5 m, K = $1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s	paksuus ≥ 1 m, K = $1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s	paksuus ≥ 1 m, K = $1,0 \cdot 10^{-7}$ m/s
rakennettu tiivistyskerros (mikäli vaaditaan)	paksuus $\geq 1,0$ m	paksuus $\geq 0,5$ m	paksuus $\geq 0,5$ m
keinotekoinen eriste	vaaditaan	vaaditaan	määrätään tapauskohtaisesti
kuivatuskerros	vaaditaan, paksuus $\geq 0,5$ m	vaaditaan, paksuus $\geq 0,5$ m	määrätään tapauskohtaisesti

Taulukko II-3. Kaatopaikkojen pintarakenteet (VNp 4.9.1997/861, liite I)

kerros	kaatopaikkaluokka	
	tavanomaisen jätteen kaatopaikka	ongelmajätteen kaatopaikka
pintakerros ≥ 1 m	vaaditaan	vaaditaan
kuivatuskerros $\geq 0,5$ m	vaaditaan	vaaditaan
tiivistyskerros $\geq 0,5$ m	vaaditaan	vaaditaan
keinotekoinen eriste	ei vaadita	vaaditaan
kaasunkeräyskerros	vaaditaan	tarpeen mukaan

YMPÄRISTÖKUORMITUSTEN TARKASTELUSSA KÄYTETYT LÄHTÖTIEDOT

YLEISET LÄHTÖTIEDOT

Energiantuotanto	
	Energiankulutuksen ympäristökuormitukset arvioidaan Suomen keskimääräisiä sähköntuotannon ympäristökuormitustietoja käyttäen. Päästökertoimet on esitetty kappaleessa IV.1. Ne kattavat myös sähköntuotantoon käytettävien polttoaineiden hankinnasta aiheutuvat kuormitukset. lähde: Tattari 2004
Kuljetukset	
maantiekuljetukset	Kuljetusten aiheuttamat ympäristökuormitukset määritetään TRALCA-ohjelmalla olettaen kaikki autokuljetukset maantiekuljetuksiksi. TRALCA on järjestelmä, jota pyritään käyttämään yhdenmukaisuuden vuoksi kaikissa VTT:n tekemissä elinkaariarvioinneissa kuljetusten osalta. Käytettävä autokuljetusten ympäristöprofiili on esitetty kappaleessa IV.2. lähde: Mäkelä 2005a (TRALCA)
laivakuljetukset	Tuhkan laivauksesta Norjaan aiheutuvat kuormitukset lasketaan MELI-ohjelmalla samoilla päästökertoimilla, joilla lasketaan sementin valmistukseen käytettävien raaka-aineiden laivakuljetusten päästöt. Laivakuljetuksen ympäristöprofiili ja päästöjen laskenta on esitetty kappaleessa IV.4. lähde: Laine-Ylijoki et al. 2000 (MELI)
Jätevedet	
	Arvio käsittelyn energiankulutuksesta on kaatopaikkojen suotovesien arvioitu kaatopaikan suotovesien erään haihdutusprosessin energiankulutuksesta. Jätevesien käsittelytapoja tuhka-jätevesille on lukuisia erilaisia, joten oikean käsittelyn energiankulutuksen määrittäminen on vaikeaa, ja voidaan olettaa että käytetty arvio kuvaa keskimääräistä energiankulutusta. Muita jätevesien käsittelyn ympäristökuormituksia, kuten mahdollisten käsittelykemikaalien hankintaa ja käsittelyssä syntyvää lietettä, ei huomioida tarkastelussa. lähde: Ettala 1998 (energiankulutus)
Läjitys kaatopaikalle	
	Materiaalin levittämiseksi kaatopaikoille oletetaan käytettävän puskutraktoreita vastaavasti kuin MELI-ohjelmassa on käytetty. Puskutraktorien tiedot ja ympäristökuormitusten laskenta on esitetty kappaleessa IV.3. lähde: Laine-Ylijoki et al. 2000 (MELI)
Kaatopaikkarakenteet	
	Kaatopaikkarakenteiden muodostamisesta aiheutuvat kuormitukset on arvioitu Kaartisen (2005) esittämien periaatteiden mukaisesti ja niiden laskenta pohjautuu MELI-ohjelmaan. Kaatopaikkarakenteiden kuormitusten laskenta on esitetty liitteessä VII. lähde: Kaartinen 2005 ja Laine-Ylijoki et al. 2000 (MELI)

PESU

Käsittelyprosessi	
veden kulutus	Veden kulutus on VTT:n laboratoriotestien tiedoista. lähde: Kaartinen et al. 2007
jätevedet	Jätevesien määrä ja haitta-aineiden pitoisuudet ovat VTT:n laboratoriotestien tuloksista. lähde: Kaartinen et al. 2007
energiankulutus	Energiankulutus on arvioitu muiden prosessien energiankulutustietojen perusteella, olettaen että pesu käyttää energiaa hieman vähemmän kuin Ferrox-prosessi. Arvio on siis hyvin epätarkka.
Loppusijoitus	
liukoisuus käsitellystä tuotteesta	Liukoisuustiedot ovat VTT:n laboratoriotestien tuloksista, joista myös suurin osa muista tarkastelun tiedoista pesun osalta on peräisin. Tarkastelussa oletetaan kuitenkin, että pesulla ei keskimäärin päästä yhtä hyviin tuloksiin tutkimuksessa on raportoitu. lähde: Kaartinen et al. 2007
materiaalin tiheys	Tiheys on arvioitu APC-jätteiden ja Ferrox-tuotteen tiheyksien avulla. lähde: Chandler et al. 1997 ja Lundtorp 2001

SEMENTTIKIINTEYTYS

Raaka-aineiden hankinta	
raaka-aineen määrä	Määrä on keskimääräinen arvio erään sementtikiinteytysprosessin tiedoista lähde: Österbacka sähköpostiviesti 27.3.2007
raaka-aineen valmistus	Sementin valmistuksen kuormitus arvioidaan MELI-laskentaohjelmalla. Arviossa huomioidaan sementin raaka-aineiden oton ja kuljetuksen sekä sementin valmistusprosessin aiheuttamat kuormitukset. lähde: Laine-Ylijoki et al. 2000 ja Eskola 2001 (MELI)
kuljetusmatka	Suomessa sijaitsee kaksi sementin tuotantolaitosta, joista valittiin lähempänä oletettua tuhkan käsittelylaitosta sijaitseva (Parainen-Helsinki noin 170 km). Herkkyystarkasteluissa on arvioitu sementin kuljetusmatkan vaikutusta kokonaiskuormitukseen.
Käsittelyprosessi	
veden kulutus	Veden kulutus on sementtikiinteytyslaitokselta saatu tieto. lähde: Österbacka sähköpostiviesti 27.3.2007
energiankulutus	Energiankulutus vaihtelee huomattavasti tapauskohtaisesti. Tieto energiankulutuksesta on keskimääräinen arvio sementtikiinteytyslaitokselta saaduista tiedoista. lähde: Österbacka sähköpostiviesti 27.3.2007
Loppusijoitus	
liukoisuus käsitellystä tuotteesta	Käsittelyn tuhka-sementtimatriisin liukoisuustiedot ovat keskimääräisiä tietoja sementtikiinteytyslaitokselta saaduista sekä kirjallisuudessa esitetyistä tiedoista. Ne vaihtelevat kuitenkin huomattavasti riippuen tuhkan ominaisuuksista sekä lisättävien sementin ja muiden lisäaineiden määrästä. lähde: Österbacka sähköpostiviesti 27.3.2007 ja Hjelmar et al. 2005
materiaalin tiheys	Tiheys oletetaan samaksi kuin sementin tiheys. lähde: Laine-Ylijoki et al. 2000 (MELI)

FERROX-PROSESSI

Raaka-aineiden hankinta	
raaka-aineen määrä	Määrä on keskimääräinen tieto prosessiin lisättävästä ferrosulfaatin määrästä. lähde: Lundtorp 2001 ja Kaartinen et al. 2007
raaka-aineen valmistus	Ferrosulfaattia muodostuu toisen prosessin sivutuotteena, jolloin valmistuksen kuormitusta ei elinkaariarvioinneissa tyypillisesti huomioida.
kuljetusmatka	Ferrosulfaattia syntyy yhdellä tehtaalla Suomessa, joka sijaitsee Porissa (Helsinki-Pori noin 250 km) lähde: Nieminen ja Nurminen 2002
Käsittelyprosessi	
veden kulutus	Veden kulutus on VTT:n laboratoriotestien tuloksista. lähde: Kaartinen et al. 2007
jätevedet	Jätevesien määrä ja haitta-aineiden pitoisuudet ovat VTT:n laboratoriotestien tuloksista. lähde: Kaartinen et al. 2007
energiankulutus	Energiankulutustiedot ovat Ferrox-prosessia tarkastelevasta väitöskirjasta ja kulutus kattaa koko käsittelylaitoksen energiankulutuksen. lähde: Lundtorp 2001
Loppusijoitus	
liukoisuus käsitellystä tuotteesta	Ferrox-tuotteen liukoisuusarvot ovat VTT:n laboratoriotestien tuloksista lähde: Kaartinen et al. 2007
materiaalin tiheys	Ferrox-tuotteet tiheys on prosessia tarkastelevasta väitöskirjasta. lähde: Lundtorp 2001

VITRIFIOINTI

Raaka-aineiden hankinta	
kvartsin määrä	Vitrifiointia on tutkittu erilaisilla lisäaineilla ja niiden määrillä. Tarkastelussa on oletettu käytettäväksi lisäaineeksi kvartsi ja kvartsi-tuhka –suhteeksi 20 % kvartsia – 80 % tuhkaa. lähde: Park ja Heo 2002
raaka-aineen valmistus	Kvartsin louhinnasta aiheutuvat päästöt arvioidaan MELI-ohjelman avulla. lähde: Laine-Ylijoki et al. 2000 (MELI)
kuljetusmatka	Kvartsia louhitaan neljästä paikasta Suomessa, joista valitaan lähimpänä oletettua käsittelylaitosta sijaitseva; kuljetusmatka noin 160 km. lähde: GTK 2003
Käsittelyprosessi	
veden kulutus	Prosessissa ei kuluteta vettä merkittävästi, eikä sitä ole tarkastelussa huomioitu.
savukaasut	Tietoja savukaasujen koostumuksesta ei ole saatavilla, mutta arvioiden mukaan käsittelyprosessin savukaasuista syntyy APC-jätettä noin 5-10 % vitrifioitavan materiaalin määrästä. Tämä määrä oletetaan kierrätettävän takaisin käsittelyprosessiin eikä savukaasujen puhdistuksesta aiheutuvaa muuta ympäristökuormitusta huomioida tarkastelussa. lähde: Chandler et al. 1997
energiankulutus	Arvo valittu esitetystä vaihteluvälistä 700-1200 kWh/ t _i . lähde: ISWA 2003a
Loppusijoitus	
liukoisuus käsitellystä tuotteesta	Tiedot ovat kahdesta lähteestä, joista toinen vitrifiointilaitteistojen valmistajan ja toinen vitrifiointia tutkiva artikkeli. lähteet: ScanArc 2005 ja Sakai ja Hiraoka 2000
materiaalin tiheys	Käytetty tieto on keskiarvo esitetystä vaihteluvälistä. lähde: ISWA 2003a

KULJETTAMINEN NORJAAN KÄSITTELY- JA LOPPUSIJOITUSLAITOKSELLE

Raaka-aineiden hankinta	
raaka-aineen määrä	-
raaka-aineen valmistus	-
kuljetusmatka	Kartan perusteella oletettu laivamatkan pituus Helsinki- Langøya 1600 km.

PÄÄSTÖKERTOIMET

IV.1 SÄHKÖN TUOTANNON YMPÄRISTÖPROFIILI

Energiankulutuksen ympäristökuormituksen laskennassa käytetään Suomen sähköntuotannon keskimääräisiä päästötietoja, jotka on esitetty taulukossa IV-1.

Taulukko IV-1. Sähkön tuotannon ympäristöprofiili (Tattari 2004)

sähkön tuotannon päästöt Suomessa (kohti käytettyä kilowattituntia)		
uusiutumattomat raaka-aineet		
- kivihiili	g	58
- öljy	g	10
- maakaasu	g	15
- turve	g	41
- uraani-235	g	54 x 10 ⁻⁶
= yhteensä	g	124
energiaressit		
- uusiutuva	MJ	1,7
- uusiutumaton	MJ	7,2
= yhteensä	MJ	8,9
päästöt ilmaan		
- CO ₂	g	299
- CO	mg	624
- NO _x	mg	678
- N ₂ O	mg	33
- SO ₂	mg	541
- VOC	mg	933
- hiukkaset	mg	953
- raskasmetallit	µg	137

Sähkön tuotannon päästökertoimilla määritetään raaka-aineiden ja energiaresurssien kokonaiskulutus sekä ilmapäästöt. Uusiutumattomien raaka-aineiden sekä energiaresurssien kulutuksesta arvioidaan ainoastaan yhteismäärä, eikä yksittäisiä raaka-aineita tai energiamuotoja.

IV.2 AUTOKULJETUSTEN YMPÄRISTÖPROFIILI

Taulukossa IV-2 on esitetty kuljetusten päästöistä ne tiedot, jotka arvioinnissa huomioidaan. Päästökertoimet sisältävät myös polttoaineen valmistuksesta aiheutuvat kuormitukset. Kertoimet on esitetty taulukossa 2-4 desimaalin tarkkuudella, mutta kuormitusten laskennassa on käytetty tarkkoja arvoja, jotka on esitetty alkuperäisessä lähteessä.

Taulukko IV-2. Maantiekuljetusten ympäristöprofiili (Mäkelä 2005a)

Pitkän matkan kuljetuksen päästöt keskimäärin		
luonnon raaka-aineiden kulutus	g/tkm	31,22
energian kulutus	MJ/tkm	1,44
päästöt ilmaan		
- CO ₂	g/tkm	103,52
- CO	g/tkm	0,031
- NO _x	g/tkm	0,88
- N ₂ O	g/tkm	0,0033
- SO ₂	g/tkm	0,011
- NMVOC	g/tkm	0,022
- CH ₄	g/tkm	0,0011
- hiukkaset	g/tkm	0,010

Kuljetuksista aiheutuvat päästöt lasketaan ensin määrittämällä kuljetuksen määrä (tkm) ja sitten kertomalla se päästökertoimilla.

IV.3 MATERIAALIN LÄJITTÄMISEKSI KAASTOPAIKALLE KÄYTETTÄVIEN TYÖKONEIDEN PÄÄSTÖT

Materiaalin läjittämiseksi kaatopaikalle oletetaan käytettävän puskutraktoreita, joiden ympäristöprofiili on esitetty taulukossa IV-3. Puskutraktorien käyttöteholla tarkoitetaan sitä osaa nimellistehosta, joka keskimäärin käytetään koneen työskennellessä (Mäkelä 2000, 15).

Taulukko IV-3. Läjitykseen käytettävien työkoneiden ympäristöprofiili (Laine-Ylijoki et al. 2000)

Työkone		Puskutraktori
Työvuorokapasiteetti K3	m ³ (itd)/h	100
Rakennetyyppi		Kerrospengerrys
Nimellisteho	kW	112
Käyttöteho	%	40
Ominaiskulutus	kg/kWh	0,261
Päästökerroin CO ₂	g/kWh	5,8
Päästökerroin NO _x	g/kWh	11
Päästökerroin CO ₂	g/kWh	841
Päästökerroin VOC	g/kWh	2,646

Työkoneiden ympäristökuormituksen määrittämiseksi, lasketaan ensin materiaalmäärän läjitykseen tarvittavat työtunnit yhtälöllä

$$työtunnit (h) = \frac{V (m^3)}{työvuorokapasiteetti (m^3 / h)}, \quad (1)$$

jossa V on tilavuus.

Työtuntien avulla voidaan selvittää työkoneen energiankulutus yhtälöllä

$$energiankulutus (kWh) = nimellisteho (kW) \cdot käyttöteho \cdot työtunnit (h). \quad (2)$$

Tietyn materiaalmäärän läjityksestä aiheutuvat päästöt voidaan laskea edelleen energiankulutuksen avulla yhtälöllä

$$päästö_x (g) = energiankulutus (kWh) \cdot päästökerroin_x (g / kWh) \quad (3)$$

jossa x on tarkasteltava päästö.

IV.4 LAIVAKULJETUKSEN PÄÄSTÖT

Laivakuljetuksen päästöt lasketaan MELI-ohjelman tiedoilla sekä sementin valmistukseen käytettävien raaka-aineiden että Norjaan kuljetettavan tuhkan osalta. Käytettävät päästökerroimet ja muut laivan tiedot on esitetty taulukossa IV-4.

Taulukko IV-4. Laivakuljetuksen ympäristöprofiili (Laine-Ylijoki et al. 2000)

Laivan kantavuus	kg	6 000 000
Laivan moottoriteho	kW	5 019
Laivan nopeus	km/h	26
Polttoaineen kulutus	g/kWh	180
Päästökerroin CO ₂	g/kWh	620
Päästökerroin CO	g/kWh	1
Päästökerroin NO _x	g/kWh	14
Päästökerroin hiukkaset	g/kWh	0,3
Päästökerroin VOC	g/kWh	0,4

Laivakuljetuksen kuormituksen määrittämiseksi lasketaan ensin kuljetettavan materiaalin laivaamiseksi tarvittavien lastien määrä yhtälöllä

$$\text{lastien määrä} = \frac{\text{kuljetettavan materiaalin määrä (kg)}}{\text{laivan kantavuus (kg)}} \quad (4)$$

Tämän jälkeen selvitetään kuljetuksen energiankulutus kohti tonnia kuljetettavaa materiaalia yhtälöllä (5) ja edelleen tarkasteltavan materiaalmäärän kuljettamiseksi tarvittava energiamäärä yhtälöllä (6). On huomioitava, että yhtälöissä laivan kantavuus ja kuljetettavan materiaalin määrä ilmaistaan yksikössä tonni (t).

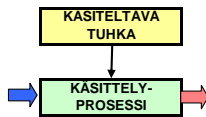
$$\text{energiankulutus (kWh/t)} = \frac{\text{laivan moottoriteho (kW)} \cdot \text{laivamatkan pituus (km)}}{\text{laivan kantavuus (t)} \cdot \text{laivan nopeus (km/h)}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \text{käytetty energia (kWh)} \\ & = \text{kuljetettavan materiaalin määrä (t)} \cdot \text{energiankulutus (kWh/t)} \end{aligned} \quad (6)$$

Laivakuljetuksen päästöt voidaan laskea edelleen käytetyn energian avulla yhtälöllä

$$\text{päästö}_x \text{ (g)} = \text{energiankulutus (kWh)} \cdot \text{päästökerroin}_x \text{ (g/kWh)} \quad (7)$$

jossa x on tarkasteltava päästö.



käsiteltävän tuhkan määrä kg

käsittelyn raaka-aineet	<input type="text" value="0"/> kg		
(Raaka-aineiden valmistuksen kuormitukset lasketaan erikseen.)			
kuljetusmatka	<input type="text" value="0"/> km		
<i>kuljetusmäärä (tkm) = kuljetettavan raaka-aineen määrä (t) · kuljetusmatka</i>			
<i>raaka-aineen kuljetuksen kuormitus (g tai MJ) = kuljetusmäärä (tkm) · päästökerroin [(g tai MJ)/tkm]</i>			
		kuljetusmäärä	<input type="text" value="0"/> tkm
maantiekuljetuksen päästökerroimet		raaka-aineen kuljetuksen ympäristökuormitus	
luonnonvarojen kulutus	31,2 g/tkm	luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="0,0"/> g
energiaresurssien kulutus	1,4 MJ/tkm	energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="0,0"/> MJ
päästöt ilmaan		päästöt ilmaan	
CO ₂	103,516 g/tkm	CO ₂	<input type="text" value="0,0"/> g
CO	0,031 g/tkm	CO	<input type="text" value="0,0"/> g
NO _x	0,881 g/tkm	NO _x	<input type="text" value="0,0"/> g
N ₂ O	0,003 g/tkm	N ₂ O	<input type="text" value="0,0"/> g
SO ₂	0,011 g/tkm	SO ₂	<input type="text" value="0,0"/> g
VOC	0,023 g/tkm	VOC	<input type="text" value="0,0"/> g
hiukkaset	0,010 g/tkm	hiukkaset	<input type="text" value="0,0"/> g
raskasmetallit	-	raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> -

veden kulutus m³

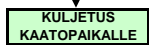
energiansyöttö	<input type="text" value="0"/> kWh		
<i>energiansyötön ympäristökuormitus (g, mg tai MJ) = energiansyöttö (kWh) · päästökerroin [(g, mg tai MJ)/kWh]</i>			
energiansyötön päästökerroimet		energiansyötön ympäristökuormitus	
luonnonvarojen kulutus	124 g/kWh	luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="0,0"/> g
energiaresurssien kulutus	8,9 MJ/kWh	energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="0"/> MJ
päästöt ilmaan		päästöt ilmaan	
CO ₂	299 g/kWh	CO ₂	<input type="text" value="0,0"/> g
CO	624 mg/kWh	CO	<input type="text" value="0,0"/> mg
NO _x	678 mg/kWh	NO _x	<input type="text" value="0,0"/> mg
N ₂ O	33 mg/kWh	N ₂ O	<input type="text" value="0,0"/> mg
SO ₂	541 mg/kWh	SO ₂	<input type="text" value="0,0"/> mg
VOC	933 mg/kWh	VOC	<input type="text" value="0,0"/> mg
hiukkaset	953 mg/kWh	hiukkaset	<input type="text" value="0,0"/> mg
raskasmetallit	137 µg/kWh	raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> µg

prosessissa syntyvät jätevedet	<input type="text" value="0"/> m ³	jätevesien käsittelyn energiansyöttö	
määrä		<input type="text" value="0"/> kWh	
<i>haitta-ainepitoisuudet</i>			
Cd	<input type="text" value=""/>	energiansyötön ympäristökuormitus	
Cu	<input type="text" value=""/>	luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="0,0"/> g
Pb	<input type="text" value=""/>	energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="0,0"/> MJ
Zn	<input type="text" value=""/>	päästöt ilmaan	
Cl-	<input type="text" value=""/>	CO ₂	<input type="text" value="0,0"/> g
(SO ₄) ²⁻	<input type="text" value=""/>	CO	<input type="text" value="0,0"/> mg
(Jätevesien käsittelyn energiansyötön ympäristökuormitus lasketaan vastaavasti kuin tuhkan käsittelyprosessin energiansyötön kuormitus.)			
		NO _x	<input type="text" value="0,0"/> mg
		N ₂ O	<input type="text" value="0,0"/> mg
		SO ₂	<input type="text" value="0,0"/> mg
		VOC	<input type="text" value="0,0"/> mg
		hiukkaset	<input type="text" value="0,0"/> mg
		raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> µg

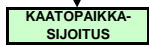


käsitellyn materiaalin määrä kg
tiheys kg/m³

tilavuus m³



käsitellyn materiaalin kuljetus kaatopaikalle	<input type="text" value="0"/> km	kuljetusmäärä	<input type="text" value="0"/> tkm
kuljetusmatka		raaka-aineen kuljetuksen ympäristökuormitus	
(Käsitellyn materiaalin kuljetuksesta kaatopaikalle aiheutuvat ympäristökuormitukset lasketaan vastaavasti kuin raaka-aineiden kuljetuksesta aiheutuvat kuormitukset.)			
(Kaatopaikkarakenteiden muodostamisesta aiheutuvat kuormitukset määritetään erikseen.)			
		luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="0,0"/> g
		energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="0,0"/> MJ
		päästöt ilmaan	
		CO ₂	<input type="text" value="0,0"/> g
		CO	<input type="text" value="0,0"/> g
		NO _x	<input type="text" value="0,0"/> g
		N ₂ O	<input type="text" value="0,0"/> g
		SO ₂	<input type="text" value="0,0"/> g
		VOC	<input type="text" value="0,0"/> g
		hiukkaset	<input type="text" value="0,0"/> g
		raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> -



käsitellyn materiaalin läjitys kaatopaikalle			
<i>läjitykseen käytettävät työtunnit (h) = tilavuus (m³) / työvuorokapasiteetti (m³/h)</i>			
<i>energiansyöttö (kWh) = nimellisteho (kW) · käyttöteho · työtunnit (h)</i>			
<i>läjityksen ympäristökuormitus (g) = energiansyöttö (kWh) · päästökerroin (g/kWh)</i>			
puskutraktorin ympäristöprofiili		läjityksen ympäristökuormitus	
työvuorokapasiteetti	100 m ³ /h	työtunnit	<input type="text" value="0,0000"/> h
nimellisteho	112 kW	energiansyöttö	<input type="text" value="0,00"/> kWh
käyttöteho	40 %	päästöt ilmaan	
päästöt ilmaan		CO ₂	<input type="text" value="0,0"/> g
CO ₂	841 g/kWh	CO	<input type="text" value="0,0"/> g
CO	5,8 g/kWh	NO _x	<input type="text" value="0,0"/> g
NO _x	11 g/kWh	VOC	<input type="text" value="0,0"/> g
VOC	2,646 g/kWh	hiukkaset	<input type="text" value="0,0"/> g
		raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> -

laivakuljetuksen päästöt

kuljetettavan materiaalin määrä		kg
kuljetusmatka		km
energiankulutus (kWh/t) = [laivan moottoriteho (kW) · kuljetusmatka (km)]/[laivan kantavuus (t) · laivan nopeus (km/h)]		
käytetty energia (kWh) = kuljetettavan materiaalin määrä (t) · energiankulutus (kWh/t)		
laivakuljetuksen ympäristökuormitus (g) = päästökertoimien (g/kWh) · käytetty energia (kWh)		
<i>laivan ympäristöprofiili</i>		
kantavuus	6 000 000 kg	
moottoriteho	5 019 kW	
nopeus	26 km/h	
polttoaineen kulutus	180 g/kWh	
päästöt ilmaan		
CO ₂	620,0 g/kWh	
CO	1,0 g/kWh	
NO _x	14,0 g/kWh	
VOC	0,4 g/kWh	
hiukkaset	0,3 g/kWh	
		<i>laivakuljetuksen ympäristökuormitus</i>
		energiankulutus
		käytetty energia
		<i>päästöt ilmaan</i>
		CO ₂
		CO
		NO _x
		VOC
		hiukkaset

**TARKASTELTAVIEN KÄSITTELYVAIHTOEHTOJEN YMPÄRIS-
TÖKUORMITUKSET**

PESU-PROSESSIN YMPÄRISTÖKUORMITUSTEN LASKENTAkäsitteltävän tuhkan määrä kg

käsittelyn raaka-aineet	<input type="text" value="1000"/> kg		
(Raaka-aineiden valmistuksen kuormitukset lasketaan erikseen.)			
kuljetusmatka	<input type="text" value=""/>	km	
kuljetusmäärä (tkm) = kuljetettavan raaka-aineen määrä (t) · kuljetusmatka			
raaka-aineen kuljetuksen kuormitus (g tai MJ) = kuljetusmäärä (tkm) · päästökerroin [(g tai MJ) /tkm]			
		kuljetusmäärä	<input type="text" value="0"/> tkm
maantiekuljetuksen päästökertoimet		raaka-aineen kuljetuksen ympäristökuormitus	
luonnonvarojen kulutus	31,2 g/tkm	luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="0,0"/> g
energiaresurssien kulutus	1,4 MJ/tkm	energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="0,0"/> MJ
<i>päästöt ilmaan</i>		<i>päästöt ilmaan</i>	
CO ₂	103,516 g/tkm	CO ₂	<input type="text" value="0,0"/> g
CO	0,031 g/tkm	CO	<input type="text" value="0,0"/> g
NO _x	0,881 g/tkm	NO _x	<input type="text" value="0,0"/> g
N ₂ O	0,003 g/tkm	N ₂ O	<input type="text" value="0,0"/> g
SO ₂	0,011 g/tkm	SO ₂	<input type="text" value="0,0"/> g
VOC	0,023 g/tkm	VOC	<input type="text" value="0,0"/> g
hiukkaset	0,010 g/tkm	hiukkaset	<input type="text" value="0,0"/> g
raskasmetallit	-	raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> -

veden kulutus m³

energiankulutus	<input type="text" value="20,00"/> kWh		
energiankulutuksen ympäristökuormitus (g, mg tai MJ) = energiankulutus (kWh) · päästökerroin [(g, mg tai MJ)/kWh]			
energiankulutuksen päästökertoimet		energiankulutuksen ympäristökuormitus	
luonnonvarojen kulutus	124 g/kWh	luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="2 480,0"/> g
energiaresurssien kulutus	8,9 MJ/kWh	energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="178,0"/> MJ
<i>päästöt ilmaan</i>		<i>päästöt ilmaan</i>	
CO ₂	299 g/kWh	CO ₂	<input type="text" value="5 980,0"/> g
CO	624 mg/kWh	CO	<input type="text" value="12 480,0"/> mg
NO _x	678 mg/kWh	NO _x	<input type="text" value="13 560,0"/> mg
N ₂ O	33 mg/kWh	N ₂ O	<input type="text" value="660,0"/> mg
SO ₂	541 mg/kWh	SO ₂	<input type="text" value="10 820,0"/> mg
VOC	933 mg/kWh	VOC	<input type="text" value="18 660,0"/> mg
hiukkaset	953 mg/kWh	hiukkaset	<input type="text" value="19 060,0"/> mg
raskasmetallit	137 µg/kWh	raskasmetallit	<input type="text" value="2 740,0"/> µg

prosessissa syntyvät jätevedet			
määrä	<input type="text" value="2,5"/> m ³	jätevesien käsittelyn energiankulutus	<input type="text" value="25"/> kWh
haitta-ainepitoisuudet		energiankulutuksen ympäristökuormitus	
Cd	<input type="text" value="0,2"/> mg/l	luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="3 100,0"/> g
Cu	<input type="text" value="0,4"/> mg/l	energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="222,5"/> MJ
Pb	<input type="text" value="26,0"/> mg/l	<i>päästöt ilmaan</i>	
Zn	<input type="text" value="3,4"/> mg/l	CO ₂	<input type="text" value="7 475,0"/> g
Cl-	<input type="text" value="52 000"/> mg/l	CO	<input type="text" value="15 600,0"/> mg
(SO ₄) ₂₋	<input type="text" value="1 400"/> mg/l	NO _x	<input type="text" value="16 950,0"/> mg
		N ₂ O	<input type="text" value="825,0"/> mg
		SO ₂	<input type="text" value="13 525,0"/> mg
		VOC	<input type="text" value="23 325,0"/> mg
		hiukkaset	<input type="text" value="23 825,0"/> mg
		raskasmetallit	<input type="text" value="3 425,0"/> µg

käsittelyn materiaalin määrä kg
tilavuus m³
tiheys kg/m³

käsittelyn materiaalin kuljetus kaatopaikalle			
kuljetusmatka	<input type="text" value="25"/> km	kuljetusmäärä	<input type="text" value="20"/> tkm
(Käsittelyn materiaalin kuljetuksesta kaatopaikalle aiheutuvat ympäristökuormitukset lasketaan vastaavasti kuin raaka-aineiden kuljetuksesta aiheutuvat kuormitukset.)		raaka-aineen kuljetuksen ympäristökuormitus	
(Kaatopaikkarakenteiden muodostamisen kuormitukset lasketaan erikseen.)		luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="624,4"/> g
		energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="28,7"/> MJ
		<i>päästöt ilmaan</i>	
		CO ₂	<input type="text" value="2 070,3"/> g
		CO	<input type="text" value="0,6"/> g
		NO _x	<input type="text" value="17,6"/> g
		N ₂ O	<input type="text" value="0,1"/> g
		SO ₂	<input type="text" value="0,2"/> g
		VOC	<input type="text" value="0,5"/> g
		hiukkaset	<input type="text" value="0,2"/> g
		raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> -

käsittelyn materiaalin läjitys kaatopaikalle

<i>läjitykseen käytettävät työtunnit (h) = tilavuus (m³) / työvuorokapasiteetti (m³/h)</i>			
<i>energiankulutus (kWh) = nimellisteho (kW) · käyttöteho · työtunnit (h)</i>			
<i>läjityksen ympäristökuormitus (g) = energiankulutus (kWh) · päästökerroin (g/kWh)</i>			
puskutraktorin ympäristöprofiili		läjityksen ympäristökuormitus	
työvuorokapasiteetti	100 m ³ /h	työtunnit	<input type="text" value="0,0067"/> h
nimellisteho	112 kW	energiankulutus	<input type="text" value="0,30"/> kWh
käyttöteho	40 %	<i>päästöt ilmaan</i>	
CO ₂	841 g/kWh	CO ₂	<input type="text" value="251,2"/> g
CO	5,8 g/kWh	CO	<input type="text" value="1,7"/> g
NO _x	11 g/kWh	NO _x	<input type="text" value="3,3"/> g
VOC	2,646 g/kWh	VOC	<input type="text" value="0,8"/> g

HERKKYYSTARKASTELUT - pesu

		PERUSTAPAU				
ympäristövaikutus		raaka-aineiden hankinta	käsittely- prosessi	loppu- sijoittaminen	yhteensä	kokonaiskuormituksen muutos
energiaresurssien kulutus	MJ	0,0	400,5	30,1	430,6	-
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	0,0	5,6	329,2	334,8	-
luonnon raaka-aineet	kg	0,0	5,6	329,2	334,8	-
jätäraaka-aineet	kg	0,0	0,0	0,0	0,0	-
veden kulutus	m3	0,0	3,5	0,0	3,5	-
päästöt ilmaan						
CO2	g	0,0	13 455,0	2 404,0	15 859,0	-
CO	g	0,0	28,1	2,9	31,0	-
Nox	g	0,0	30,5	22,0	52,5	-
SO2	g	0,0	24,3	0,2	24,6	-
VOC	g	0,0	42,0	1,5	43,5	-
N2O	g	0,0	1,5	0,1	1,6	-
hiukkaset	g	0,0	42,9	0,2	43,1	-
raskametallit	mg	0,0	6,2	0,0	6,2	-

		KÄSITTELYLAITOS KAATOPAIKAN YHTEYDESSÄ				
ympäristövaikutus		raaka-aineiden hankinta	käsittely- prosessi	loppu- sijoittaminen	yhteensä	kokonaiskuormituksen muutos
energiaresurssien kulutus	MJ	0,0	400,5	1,4	401,9	-6,7 %
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	0,0	5,6	328,6	334,2	-0,2 %
luonnon raaka-aineet	kg	0,0	5,6	328,6	334,2	-0,2 %
jätäraaka-aineet	kg	0,0	0,0	0,0	0,0	
veden kulutus	m3	0,0	3,5	0,0	3,5	0,0 %
päästöt ilmaan						
CO2	g	0,0	13 455,0	333,7	13 788,7	-13,1 %
CO	g	0,0	28,1	2,3	30,4	-2,0 %
Nox	g	0,0	30,5	4,4	34,9	-33,6 %
SO2	g	0,0	24,3	0,0	24,3	-0,9 %
VOC	g	0,0	42,0	1,0	43,0	-1,0 %
N2O	g	0,0	1,5	0,0	1,5	-4,2 %
hiukkaset	g	0,0	42,9	0,0	42,9	-0,5 %
raskametallit	mg	0,0	6,2	0,0	6,2	0,0 %

		KÄSITTELYLAITOKSELTA KAATOPAIKALLE 50 KM				
ympäristövaikutus		raaka-aineiden hankinta	käsittely- prosessi	loppu- sijoittaminen	yhteensä	kokonaiskuormituksen muutos
energiaresurssien kulutus	MJ	0,0	400,5	58,9	459,4	6,7 %
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	0,0	5,6	329,8	335,4	0,2 %
luonnon raaka-aineet	kg	0,0	5,6	329,8	335,4	0,2 %
jätäraaka-aineet	kg	0,0	0,0	0,0	0,0	
veden kulutus	m3	0,0	3,5	0,0	3,5	0,0 %
päästöt ilmaan						
CO2	g	0,0	13 455,0	4 474,3	17 929,3	13,1 %
CO	g	0,0	28,1	3,6	31,6	2,0 %
Nox	g	0,0	30,5	39,6	70,1	33,6 %
SO2	g	0,0	24,3	0,4	24,8	0,9 %
VOC	g	0,0	42,0	2,0	43,9	1,0 %
N2O	g	0,0	1,5	0,1	1,6	4,2 %
hiukkaset	g	0,0	42,9	0,4	43,3	0,5 %
raskametallit	mg	0,0	6,2	0,0	6,2	0,0 %

SEMENTTIKIINTEYTYKSEN YMPÄRISTÖKUORMITUSTEN LASKENTAkäsiteltävän tuhkan määrä kg

käsitelyn raaka-aineet	<input type="text" value="300"/> kg		
(Raaka-aineiden valmistuksen kuormitukset lasketaan erikseen.)			
kuljetusmatka	<input type="text" value="170"/> km		
<i>kuljetusmäärä (tkm) = kuljetettavan raaka-aineen määrä (t) · kuljetusmatka</i>			
<i>raaka-aineen kuljetuksen kuormitus (g tai MJ) = kuljetusmäärä (tkm) · päästökerroin [(g tai MJ) /tkm]</i>			
		51	tkm
maantiekuljetuksen päästökertoimet		raaka-aineen kuljetuksen ympäristökuormitus	
luonnonvarojen kulutus	31,2 g/tkm	luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="1 592,3"/> g
energiaresurssien kulutus	1,4 MJ/tkm	energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="73,2"/> MJ
<i>päästöt ilmaan</i>		<i>päästöt ilmaan</i>	
CO2	103,516 g/tkm	CO2	<input type="text" value="5 279,3"/> g
CO	0,031 g/tkm	CO	<input type="text" value="1,6"/> g
NOx	0,881 g/tkm	NOx	<input type="text" value="44,9"/> g
N2O	0,003 g/tkm	N2O	<input type="text" value="0,2"/> g
SO2	0,011 g/tkm	SO2	<input type="text" value="0,6"/> g
VOC	0,023 g/tkm	VOC	<input type="text" value="1,2"/> g
hiukkaset	0,010 g/tkm	hiukkaset	<input type="text" value="0,5"/> g
raskasmetallit	-	raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> -

veden kulutus m3

energiankulutus	<input type="text" value="17,50"/> kWh		
<i>energiankulutuksen ympäristökuormitus (g, mg tai MJ) = energiankulutus (kWh) · päästökerroin [(g, mg tai MJ)/kWh]</i>			
energiankulutuksen päästökertoimet		energiankulutuksen ympäristökuormitus	
luonnonvarojen kulutus	124 g/kWh	luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="2 170,0"/> g
energiaresurssien kulutus	8,9 MJ/kWh	energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="155,75"/> MJ
<i>päästöt ilmaan</i>		<i>päästöt ilmaan</i>	
CO2	299 g/kWh	CO2	<input type="text" value="5 232,5"/> g
CO	624 mg/kWh	CO	<input type="text" value="10 920,0"/> mg
NOx	678 mg/kWh	NOx	<input type="text" value="11 865,0"/> mg
N2O	33 mg/kWh	N2O	<input type="text" value="577,5"/> mg
SO2	541 mg/kWh	SO2	<input type="text" value="9 467,5"/> mg
VOC	933 mg/kWh	VOC	<input type="text" value="16 327,5"/> mg
hiukkaset	953 mg/kWh	hiukkaset	<input type="text" value="16 677,5"/> mg
raskasmetallit	137 µg/kWh	raskasmetallit	<input type="text" value="2 397,5"/> µg

prosessissa syntyvät jätevedet		jätevesien käsittelyn energiankulutus	<input type="text" value="0"/> kWh
määrä	<input type="text" value="0"/> m3		
<i>haitta-ainepitoisuudet</i>			
Cd	<input type="text" value="0,0"/> mg/l	energiankulutuksen ympäristökuormitus	
Cu	<input type="text" value="0,0"/> mg/l	luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="0,0"/> g
Pb	<input type="text" value="0,0"/> mg/l	energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="0,0"/> MJ
Zn	<input type="text" value="0,0"/> mg/l	<i>päästöt ilmaan</i>	
Cl-	<input type="text" value="0"/> mg/l	CO2	<input type="text" value="0,0"/> g
(SO4)2-	<input type="text" value="0"/> mg/l	CO	<input type="text" value="0,0"/> mg
		NOx	<input type="text" value="0,0"/> mg
		N2O	<input type="text" value="0,0"/> mg
		SO2	<input type="text" value="0,0"/> mg
		VOC	<input type="text" value="0,0"/> mg
		hiukkaset	<input type="text" value="0,0"/> mg
		raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> µg
(Jätevesien käsittelyn energiankulutuksen ympäristökuormitus lasketaan vastaavasti kuin tuhkan käsittelyprosessin energiankulutuksen kuormitus.)			

käsitellyn materiaalin määrä kg
tiheys kg/m3tilavuus m3

käsitellyn materiaalin kuljetus kaatopaikalle		kuljetusmäärä	<input type="text" value="47,5"/> tkm
kuljetusmatka	<input type="text" value="25"/> km	raaka-aineen kuljetuksen ympäristökuormitus	
(Käsitellyn materiaalin kuljetuksesta kaatopaikalle aiheutuvat ympäristökuormitukset lasketaan vastaavasti kuin raaka-aineiden kuljetuksesta aiheutuvat kuormitukset.)		luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="1 483,0"/> g
(Kaatopaikkarakenteiden muodostamisen kuormitukset lasketaan erikseen.)		energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="68,2"/> MJ
		<i>päästöt ilmaan</i>	
		CO2	<input type="text" value="4 917,0"/> g
		CO	<input type="text" value="1,5"/> g
		NOx	<input type="text" value="41,8"/> g
		N2O	<input type="text" value="0,2"/> g
		SO2	<input type="text" value="0,5"/> g
		VOC	<input type="text" value="1,1"/> g
		hiukkaset	<input type="text" value="0,5"/> g
		raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> -

käsitellyn materiaalin läjitys kaatopaikalle*läjitykseen käytettävät työtunnit (h) = tilavuus (m3) / työvuorokapasiteetti (m3/h)**energiankulutus (kWh) = nimellisteho (kW) · käyttöteho · työtunnit (h)**läjityksen ympäristökuormitus (g) = energiankulutus (kWh) · päästökerroin (g/kWh)*

puskutraktorin ympäristöprofiili			
työvuorokapasiteetti	100 m3/h	läjityksen ympäristökuormitus	
nimellisteho	112 kW	työtunnit	<input type="text" value="0,0146"/> h
käyttöteho	40 %	energiankulutus	<input type="text" value="0,65"/> kWh
<i>päästöt ilmaan</i>		<i>päästöt ilmaan</i>	
CO2	841 g/kWh	CO2	<input type="text" value="550,7"/> g
CO	5,8 g/kWh	CO	<input type="text" value="3,8"/> g
NOx	11 g/kWh	NOx	<input type="text" value="7,2"/> g
VOC	2,646 g/kWh	VOC	<input type="text" value="1,7"/> g

SEMENTIN RAAKA-AINEIDEN JA VALMISTUKSEN YMPÄRISTÖKUORMITUKSET

Raaka-aineiden kulutus		
kalkkikiven määrä	t	0,264
hiekan määrä	t	0,001
kuonan määrä (sivutuote)	t	0,014
kipsin määrä	t	0,012
lentotuhkan määrä (sivutuote)	t	0,003
valssihilseen määrä (sivutuote)	t	0,001
diabaasin määrä	t	0,004
ferrosulfaatin määrä (sivutuote)	t	0,001

sementin päästöt yhteensä		valmistus	raaka-aineiden kuljetukset	yhteensä
CO	kg	0,00	0,389	0,39
Nox	kg	1,59	9,349	10,94
Part.	kg	0,20	0,137	0,34
SO2	kg	0,13	0,007	0,14
CO2	kg	335,17	752,734	1087,90
VOC	kg	0,01	0,160	0,17
Pöly	kg	0,07	22,210	22,28
Energia	kWh	286,85	2,556	289,40
Polttoaineen kulutus	l	0,00	0,510	0,51

HERKKYYSTARKASTELUT - sementtikiinteytys**1. tarkastelu: sementin määrän muutosten vaikutus**

		PERUSTAPAUS (300 kg sementtiä)				
ympäristövaikutus		raaka-aineiden hankinta	käsittely-prosessi	loppu-sijoittaminen	yhteensä	muutos
energiaresurssien kulutus	MJ	1 115,1	155,8	71,3	1 342,2	-
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	301,6	302,2	721,8	1 325,6	-
luonnon raaka-aineet	kg	282,6	2,2	721,8	1 006,6	-
jätäraaka-aineet	kg	19,0	300,0	0,0	319,0	-
veden kulutus	m3	0,0	0,3	0,0	0,3	-
päästöt ilmaan						
CO2	g	1 093 184,1	5 232,5	5 648,6	1 104 065,2	-
CO	g	390,6	10,9	6,5	408,0	-
Nox	g	10 981,1	11,9	51,4	11 044,4	-
SO2	g	138,3	9,5	0,5	148,3	-
VOC	g	167,7	16,3	3,4	187,4	-
N2O	g	0,2	0,6	0,2	0,9	-
hiukkaset	g	340,2	16,7	0,5	357,3	-
raskasmetallit	mg	0,0	2,4	0,0	2,4	-

		100 kg sementtiä				kokonaiskuormituksen muutos
ympäristövaikutus		raaka-aineiden hankinta	käsittely-prosessi	loppu-sijoittaminen	yhteensä	
energiaresurssien kulutus	MJ	371,7	155,8	63,8	591,3	-55,9 %
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	100,5	302,2	645,8	1 048,5	-20,9 %
luonnon raaka-aineet	kg	94,2	2,2	645,8	742,2	-26,3 %
jätäraaka-aineet	kg	6,3	300,0	0,0	306,3	-4,0 %
veden kulutus	m3	0,0	0,3	0,0	0,3	-0,2 %
päästöt ilmaan						
CO2	g	865 288,0	5 232,5	5 054,0	875 574,5	-20,7 %
CO	g	388,0	10,9	5,8	404,8	-0,8 %
Nox	g	9 872,0	11,9	46,0	9 929,9	-10,1 %
SO2	g	51,0	9,5	0,5	61,0	-58,9 %
VOC	g	162,2	16,3	3,0	181,5	-3,2 %
N2O	g	0,1	0,6	0,1	0,8	-14,2 %
hiukkaset	g	204,5	16,7	0,4	221,6	-38,0 %
raskasmetallit	mg	0,0	2,4	0,0	2,4	0,0 %

		500 kg sementtiä				kokonaiskuormituksen muutos
ympäristövaikutus		raaka-aineiden hankinta	käsittely-prosessi	loppu-sijoittaminen	yhteensä	
energiaresurssien kulutus	MJ	1 858,5	155,8	78,8	2 093,1	55,9 %
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	502,7	302,2	797,8	1 602,6	20,9 %
luonnon raaka-aineet	kg	471,0	2,2	797,8	1 271,0	26,3 %
jätäraaka-aineet	kg	31,7	300,0	0,0	331,7	4,0 %
veden kulutus	m3	0,0	0,3	0,0	0,3	0,2 %
päästöt ilmaan						
CO2	g	1 321 080,2	5 232,5	6 243,2	1 332 555,9	20,7 %
CO	g	393,1	10,9	7,2	411,3	0,8 %
Nox	g	12 090,2	11,9	56,8	12 158,9	10,1 %
SO2	g	225,6	9,5	0,6	235,6	58,9 %
VOC	g	173,3	16,3	3,7	193,4	3,2 %
N2O	g	0,3	0,6	0,2	1,0	14,2 %
hiukkaset	g	475,9	16,7	0,5	493,1	38,0 %
raskasmetallit	mg	0,0	2,4	0,0	2,4	0,0 %

2. tarkastelu: sementin kuljetusmatkan muutosten vaikutus

		TUHKAN KÄSITTELYLAITOS SEMENTIN TUOTANTOLAITOKSEN				
ympäristövaikutus		raaka-aineiden hankinta	käsittely-prosessi	loppu-sijoittaminen	yhteensä	muutos
energiaresurssien kulutus	MJ	1 041,9	155,8	71,3	1 268,9	-5,5 %
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	300,0	302,2	721,8	1 324,0	-0,1 %
luonnon raaka-aineet	kg	281,0	2,2	721,8	1 005,0	-0,2 %
jätäraaka-aineet	kg	19,0	300,0	0,0	319,0	0,0 %
veden kulutus	m3	0,0	0,3	0,0	0,3	-0,2 %
päästöt ilmaan						
CO2	g	1 087 904,8	5 232,5	5 648,6	1 098 785,9	-0,5 %
CO	g	389,0	10,9	6,5	406,4	-0,4 %
Nox	g	10 936,2	11,9	51,4	10 999,5	-0,4 %
SO2	g	137,8	9,5	0,5	147,7	-0,4 %
VOC	g	166,6	16,3	3,4	186,3	-0,6 %
N2O	g	0,0	0,6	0,2	0,7	-18,6 %
hiukkaset	g	339,7	16,7	0,5	356,8	-0,1 %
raskasmetallit	mg	0,0	2,4	0,0	2,4	0,0 %

FERROX-PROSESSIN YMPÄRISTÖKUORMITUSTEN LASKENTAkäsiteltävän tuhkan määrä **1000** kg

käsitelyn raaka-aineet	80 kg		
(Raaka-aineiden valmistuksen kuormitukset lasketaan erikseen.)			
kuljetusmatka	250 km		
<i>kuljetusmäärä (tkm) = kuljetettavan raaka-aineen määrä (t) · kuljetusmatka</i>			
<i>raaka-aineen kuljetuksen kuormitus (g tai MJ) = kuljetusmäärä (tkm) · päästökerroin [(g tai MJ) /tkm]</i>			
		kuljetusmäärä	20 tkm
maantiekuljetuksen päästökertoimet		raaka-aineen kuljetuksen ympäristökuormitus	
luonnonvarojen kulutus	31,2 g/tkm	luonnonvarojen kulutus	624,4 g
energiaresurssien kulutus	1,4 MJ/tkm	energiaresurssien kulutus	28,7 MJ
<i>päästöt ilmaan</i>		<i>päästöt ilmaan</i>	
CO ₂	103,516 g/tkm	CO ₂	2 070,3 g
CO	0,031 g/tkm	CO	0,6 g
NO _x	0,881 g/tkm	NO _x	17,6 g
N ₂ O	0,003 g/tkm	N ₂ O	0,1 g
SO ₂	0,011 g/tkm	SO ₂	0,2 g
VOC	0,023 g/tkm	VOC	0,5 g
hiukkaset	0,010 g/tkm	hiukkaset	0,2 g
raskasmetallit	-	raskasmetallit	0,0 -

veden kulutus **3,5** m³

energiankulutus	45 kWh		
<i>energiankulutuksen ympäristökuormitus (g, mg tai MJ) = energiankulutus (kWh) · päästökerroin [(g, mg tai MJ)/kWh]</i>			
energiankulutuksen päästökertoimet		energiankulutuksen ympäristökuormitus	
luonnonvarojen kulutus	124 g/kWh	luonnonvarojen kulutus	5 580,0 g
energiaresurssien kulutus	8,9 MJ/kWh	energiaresurssien kulutus	400,5 MJ
<i>päästöt ilmaan</i>		<i>päästöt ilmaan</i>	
CO ₂	299 g/kWh	CO ₂	13 455,0 g
CO	624 mg/kWh	CO	28 080,0 mg
NO _x	678 mg/kWh	NO _x	30 510,0 mg
N ₂ O	33 mg/kWh	N ₂ O	1 485,0 mg
SO ₂	541 mg/kWh	SO ₂	24 345,0 mg
VOC	933 mg/kWh	VOC	41 985,0 mg
hiukkaset	953 mg/kWh	hiukkaset	42 885,0 mg
raskasmetallit	137 µg/kWh	raskasmetallit	6 165,0 µg

prosessissa syntyvät jätevedet

määrä	2,5 m ³	jätevesien käsittelyn energiankulutus	25 kWh
<i>haitta-ainepitoisuudet</i>		energiankulutuksen ympäristökuormitus	
Cd	43 mg/l	luonnonvarojen kulutus	3 100,0 g
Cu	1 mg/l	energiaresurssien kulutus	222,5 MJ
Pb	2 mg/l	<i>päästöt ilmaan</i>	
Zn	150 mg/l	CO ₂	7 475,0 g
Cl ⁻	51 000 mg/l	CO	15 600,0 mg
(SO ₄) ²⁻	1 100 mg/l	NO _x	16 950,0 mg
		N ₂ O	825,0 mg
		SO ₂	13 525,0 mg
		VOC	23 325,0 mg
		hiukkaset	23 825,0 mg
		raskasmetallit	3 425,0 µg

(Jätevesien käsittelyn energiankulutuksen ympäristökuormitus lasketaan vastaavasti kuin tuhkan käsittelyprosessin energiankulutuksen kuormitus.)

käsitellyn materiaalin määrä **860** kg
tiheys **1500** kg/m³tilavuus **0,57** m³

käsitellyn materiaalin kuljetus kaatopaikalle		kuljetusmäärä	21,5 tkm
kuljetusmatka	25 km	raaka-aineen kuljetuksen ympäristökuormitus	
		luonnonvarojen kulutus	671,3 g
		energiaresurssien kulutus	30,9 MJ
		<i>päästöt ilmaan</i>	
(Käsitellyn materiaalin kuljetuksesta kaatopaikalle aiheutuvat ympäristökuormitukset lasketaan vastaavasti kuin raaka-aineiden kuljetuksesta aiheutuvat kuormitukset.)		CO ₂	2 225,6 g
		CO	0,7 g
		NO _x	18,9 g
		N ₂ O	0,1 g
		SO ₂	0,2 g
		VOC	0,5 g
		hiukkaset	0,2 g
		raskasmetallit	0,0 -

(Kaatopaikkarakenteiden muodostamisen kuormitukset lasketaan erikseen.)

käsitellyn materiaalin läjitys kaatopaikalle

<i>läjitykseen käytettävät työtunnit (h) = tilavuus (m³) / työvuorokapasiteetti (m³/h)</i>			
<i>energiankulutus (kWh) = nimellisteho (kW) · käyttöteho · työtunnit (h)</i>			
<i>läjityksen ympäristökuormitus (g) = energiankulutus (kWh) · päästökerroin (g/kWh)</i>			
puskutraktorin ympäristöprofiili		läjityksen ympäristökuormitus	
työvuorokapasiteetti	100 m ³ /h	työtunnit	0,0057 h
nimellisteho	112 kW	energiankulutus	0,26 kWh
käyttöteho	40 %	<i>päästöt ilmaan</i>	
<i>päästöt ilmaan</i>		CO ₂	216,0 g
CO ₂	841 g/kWh	CO	1,5 g
CO	5,8 g/kWh	NO _x	2,8 g
NO _x	11 g/kWh	VOC	0,7 g
VOC	2,646 g/kWh		

HERKKYYSTARKASTELUT - ferrox

ympäristövaikutus		PERUSTAPAU				kokonaiskuormituksen muutos
		raaka-aineiden hankinta	käsittely- prosessi	loppu- sijoittaminen	yhteensä	
energiaresurssien kulutus	MJ	28,7	623,0	32,0	683,7	-
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	80,6	8,7	218,4	307,7	-
luonnon raaka-aineet	kg	0,6	8,7	218,4	227,7	-
jätäraaka-aineet	kg	80,0	0,0	0,0	80,0	-
veden kulutus	m3	0,0	3,5	0,0	3,5	-
päästöt ilmaan						
CO2	g	2 070,3	20 930,0	2 496,3	25 496,6	-
CO	g	0,6	43,7	2,5	46,9	-
Nox	g	17,6	47,5	22,5	87,6	-
SO2	g	0,2	37,9	0,2	38,3	-
VOC	g	0,5	65,3	1,3	67,1	-
N2O	g	0,1	2,3	0,1	2,4	-
hiukkaset	g	0,2	66,7	0,2	67,1	-
raskasmetallit	mg	0,0	9,6	0,0	9,6	-

ympäristövaikutus		KÄSITTELYLAITOS FERROSULFAATIN SYNTYPAIKALLA				kokonaiskuormituksen muutos
		raaka-aineiden hankinta	käsittely- prosessi	loppu- sijoittaminen	yhteensä	
energiaresurssien kulutus	MJ	0,0	623,0	32,0	655,0	-4,2 %
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	80,0	8,7	218,4	307,1	-0,2 %
luonnon raaka-aineet	kg	0,0	8,7	218,4	227,1	-0,3 %
jätäraaka-aineet	kg	80,0	0,0	0,0	80,0	0,0 %
veden kulutus	m3	0,0	3,5	0,0	3,5	0,0 %
päästöt ilmaan						
CO2	g	0,0	20 930,0	2 496,3	23 426,3	-8,1 %
CO	g	0,0	43,7	2,5	46,2	-1,3 %
Nox	g	0,0	47,5	22,5	69,9	-20,1 %
SO2	g	0,0	37,9	0,2	38,1	-0,6 %
VOC	g	0,0	65,3	1,3	66,6	-0,7 %
N2O	g	0,0	2,3	0,1	2,4	-2,7 %
hiukkaset	g	0,0	66,7	0,2	66,9	-0,3 %
raskasmetallit	mg	0,0	9,6	0,0	9,6	0,0 %

ympäristövaikutus		KÄSITTELYLAITOS KAATOPAIKAN YHTEYDESSÄ				kokonaiskuormituksen muutos
		raaka-aineiden hankinta	käsittely- prosessi	loppu- sijoittaminen	yhteensä	
energiaresurssien kulutus	MJ	28,7	623,0	1,2	652,9	-4,5 %
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	80,6	8,7	217,7	307,0	-0,2 %
luonnon raaka-aineet	kg	0,6	8,7	217,7	227,0	-0,3 %
jätäraaka-aineet	kg	80,0	0,0	0,0	80,0	0,0 %
veden kulutus	m3	0,0	3,5	0,0	3,5	0,0 %
päästöt ilmaan						
CO2	g	2 070,3	20 930,0	270,7	23 271,0	-8,7 %
CO	g	0,6	43,7	1,9	46,2	-1,4 %
Nox	g	17,6	47,5	3,5	68,6	-21,6 %
SO2	g	0,2	37,9	0,0	38,1	-0,6 %
VOC	g	0,5	65,3	0,9	66,6	-0,7 %
N2O	g	0,1	2,3	0,0	2,4	-2,9 %
hiukkaset	g	0,2	66,7	0,0	66,9	-0,3 %
raskasmetallit	mg	0,0	9,6	0,0	9,6	0,0 %

VITRIFIOINNIN YMPÄRISTÖKUORMITUSTEN LASKENTA

käsiteltävän tuhkan määrä kg

käsitelyn raaka-aineet <input type="text" value="262,5"/> kg			
(Raaka-aineiden valmistuksen kuormitukset lasketaan erikseen.)			
kuljetusmatka <input type="text" value="160"/> km			
kuljetusmäärä (tkm) = kuljetettavan raaka-aineen määrä (t) · kuljetusmatka			
raaka-aineen kuljetuksen kuormitus (g tai MJ) = kuljetusmäärä (tkm) · päästökerroin [(g tai MJ)/tkm]			
		kuljetusmäärä	<input type="text" value="42"/> tkm
maantiekuljetuksen päästökertoimet		raaka-aineen kuljetuksen ympäristökuormitus	
luonnonvarojen kulutus	31,2 g/tkm	luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="1 311,3"/> g
energiaresurssien kulutus	1,4 MJ/tkm	energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="60,3"/> MJ
päästöt ilmaan		päästöt ilmaan	
CO ₂	103,516 g/tkm	CO ₂	<input type="text" value="4 347,7"/> g
CO	0,031 g/tkm	CO	<input type="text" value="1,3"/> g
NO _x	0,881 g/tkm	NO _x	<input type="text" value="37,0"/> g
N ₂ O	0,003 g/tkm	N ₂ O	<input type="text" value="0,1"/> g
SO ₂	0,011 g/tkm	SO ₂	<input type="text" value="0,5"/> g
VOC	0,023 g/tkm	VOC	<input type="text" value="1,0"/> g
hiukkaset	0,010 g/tkm	hiukkaset	<input type="text" value="0,4"/> g
raskasmetallit	-	raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> -

veden kulutus m³

energiankulutus <input type="text" value="1050"/> kWh			
energiankulutuksen ympäristökuormitus (g, mg tai MJ) = energiankulutus (kWh) · päästökerroin [(g, mg tai MJ)/kWh]			
energiankulutuksen päästökertoimet		energiankulutuksen ympäristökuormitus	
luonnonvarojen kulutus	124 g/kWh	luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="130 200,0"/> g
energiaresurssien kulutus	8,9 MJ/kWh	energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="9345"/> MJ
päästöt ilmaan		päästöt ilmaan	
CO ₂	299 g/kWh	CO ₂	<input type="text" value="313 950,0"/> g
CO	624 mg/kWh	CO	<input type="text" value="655 200,0"/> mg
NO _x	678 mg/kWh	NO _x	<input type="text" value="711 900,0"/> mg
N ₂ O	33 mg/kWh	N ₂ O	<input type="text" value="34 650,0"/> mg
SO ₂	541 mg/kWh	SO ₂	<input type="text" value="568 050,0"/> mg
VOC	933 mg/kWh	VOC	<input type="text" value="979 650,0"/> mg
hiukkaset	953 mg/kWh	hiukkaset	<input type="text" value="1 000 650,0"/> mg
raskasmetallit	137 µg/kWh	raskasmetallit	<input type="text" value="143 850,0"/> µg

prosessissa syntyvät jätevedet		jätevesien käsittelyn energiankulutus	
määrä <input type="text" value="0"/> m ³		<input type="text" value="0"/> kWh	
haitta-ainepitoisuudet		energiankulutuksen ympäristökuormitus	
Cd	<input type="text" value=""/> mg/l	luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="0,0"/> g
Cu	<input type="text" value=""/> mg/l	energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="0,0"/> MJ
Pb	<input type="text" value=""/> mg/l	päästöt ilmaan	
Zn	<input type="text" value=""/> mg/l	CO ₂	<input type="text" value="0,0"/> g
Cl-	<input type="text" value=""/> mg/l	CO	<input type="text" value="0,0"/> mg
(SO ₄) ₂₋	<input type="text" value=""/> mg/l	NO _x	<input type="text" value="0,0"/> mg
(Jätevesien käsittelyn energiankulutuksen ympäristökuormitus lasketaan vastaavasti kuin tuhkan käsittelyprosessin energiankulutuksen kuormitus.)		N ₂ O	<input type="text" value="0,0"/> mg
		SO ₂	<input type="text" value="0,0"/> mg
		VOC	<input type="text" value="0,0"/> mg
		hiukkaset	<input type="text" value="0,0"/> mg
		raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> µg

käsitellyn materiaalin määrä kg
tiheys kg/m³tilavuus m³

käsitellyn materiaalin kuljetus kaatopaikalle		kuljetusmäärä <input type="text" value="10"/> tkm	
kuljetusmatka <input type="text" value="25"/> km		raaka-aineen kuljetuksen ympäristökuormitus	
(Käsittelyn materiaalin kuljetuksesta kaatopaikalle aiheutuvat ympäristökuormitukset lasketaan vastaavasti kuin raaka-aineiden kuljetuksesta aiheutuvat kuormitukset.)		luonnonvarojen kulutus	<input type="text" value="312,2"/> g
(Kaatopaikkarakenteiden muodostamisen kuormitukset lasketaan erikseen.)		energiaresurssien kulutus	<input type="text" value="14,4"/> MJ
		päästöt ilmaan	
		CO ₂	<input type="text" value="1 035,2"/> g
		CO	<input type="text" value="0,3"/> g
		NO _x	<input type="text" value="8,8"/> g
		N ₂ O	<input type="text" value="0,0"/> g
		SO ₂	<input type="text" value="0,1"/> g
		VOC	<input type="text" value="0,2"/> g
		hiukkaset	<input type="text" value="0,1"/> g
		raskasmetallit	<input type="text" value="0,0"/> -

käsitellyn materiaalin läjitys kaatopaikalle

läjitykseen käytettävät työtunnit (h) = tilavuus (m ³) / työvuorokapasiteetti (m ³ /h)			
energiankulutus (kWh) = nimellisteho (kW) · käyttöteho · työtunnit (h)			
läjityksen ympäristökuormitus (g) = energiankulutus (kWh) · päästökerroin (g/kWh)			
puskutraktorin ympäristöprofiili		läjityksen ympäristökuormitus	
työvuorokapasiteetti	100 m ³ /h	työtunnit	<input type="text" value="0,0015"/> h
nimellisteho	112 kW	energiankulutus	<input type="text" value="0,07"/> kWh
käyttöteho	40 %	päästöt ilmaan	
CO ₂	841 g/kWh	CO ₂	<input type="text" value="56,9"/> g
CO	5,8 g/kWh	CO	<input type="text" value="0,4"/> g
NO _x	11 g/kWh	NO _x	<input type="text" value="0,7"/> g
VOC	2,646 g/kWh	VOC	<input type="text" value="0,2"/> g

HERKKYYSTARKASTELUT - vitrifiointi**1. tarkastelu: kvartsin määrän muutokset**

		PERUSTAPAUS (20-80 kvartsia ja tuhkaa, energiankulutus 1050 kWh)				
ympäristövaikutus		raaka-aineiden hankinta	käsittely-prosessi	loppu-sijoittaminen	yhteensä	kokonaiskuormituksen muutos
energiaresurssien kulutus	MJ	64,9	9 345,0	14,6	9 424,6	-
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	263,8	130,2	15,4	409,4	-
luonnon raaka-aineet	kg	263,8	130,2	15,4	409,4	-
jätäraaka-aineet	kg	0,0	0,0	0,0	0,0	-
veden kulutus	m3	0,0	0,0	0,0	0,0	-
päästöt ilmaan						
CO2	g	5 449,4	313 950,0	1 095,8	320 495,2	-
CO	g	7,6	655,2	0,7	663,5	-
Nox	g	52,5	711,9	9,6	774,0	-
SO2	g	1,7	568,1	0,1	569,9	-
VOC	g	3,6	979,7	0,4	983,7	-
N2O	g	0,1	34,7	0,0	34,8	-
hiukkaset	g	2,1	1 000,7	0,1	1 002,9	-
raskasmetallit	mg	0,0	143,9	0,0	143,9	-

		ei lisätä kvartsia				
ympäristövaikutus		raaka-aineiden hankinta	käsittely-prosessi	loppu-sijoittaminen	yhteensä	kokonaiskuormituksen muutos
energiaresurssien kulutus	MJ	0,0	9 345,0	14,6	9 359,6	-0,7 %
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	0,0	130,2	15,4	145,6	-64,4 %
luonnon raaka-aineet	kg	0,0	130,2	15,4	145,6	-64,4 %
jätäraaka-aineet	kg	0,0	0,0	0,0	0,0	
veden kulutus	m3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0 %
päästöt ilmaan						
CO2	g	0,0	313 950,0	1 095,8	315 045,8	-1,7 %
CO	g	0,0	655,2	0,7	655,9	-1,1 %
Nox	g	0,0	711,9	9,6	721,5	-6,8 %
SO2	g	0,0	568,1	0,1	568,2	-0,3 %
VOC	g	0,0	979,7	0,4	980,1	-0,4 %
N2O	g	0,0	34,7	0,0	34,7	-0,4 %
hiukkaset	g	0,0	1 000,7	0,1	1 000,8	-0,2 %
raskasmetallit	mg	0,0	143,9	0,0	143,9	0,0 %

		30-70 kvartsia ja tuhkaa				
ympäristövaikutus		raaka-aineiden hankinta	käsittely-prosessi	loppu-sijoittaminen	yhteensä	kokonaiskuormituksen muutos
energiaresurssien kulutus	MJ	111,3	9 345,0	14,6	9 470,9	0,5 %
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	452,2	130,2	15,4	597,9	46,0 %
luonnon raaka-aineet	kg	452,2	130,2	15,4	597,9	46,0 %
jätäraaka-aineet	kg	0,0	0,0	0,0	0,0	
veden kulutus	m3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0 %
päästöt ilmaan						
CO2	g	9 341,8	313 950,0	1 095,8	324 387,6	1,2 %
CO	g	13,0	655,2	0,7	668,9	0,8 %
Nox	g	90,1	711,9	9,6	811,6	4,8 %
SO2	g	2,9	568,1	0,1	571,1	0,2 %
VOC	g	6,2	979,7	0,4	986,3	0,3 %
N2O	g	0,2	34,7	0,0	34,9	0,3 %
hiukkaset	g	3,6	1 000,7	0,1	1 004,4	0,2 %
raskasmetallit	mg	0,0	143,9	0,0	143,9	0,0 %

2. tarkastelu: energiankulutuksen vaihtelu

ympäristövaikutus		energiankulutus 700 kWh					kokonaiskuormituksen muutos
		raaka-aineiden hankinta	käsittely-prosessi	loppu-sijoittaminen	yhteensä		
energiaresurssien kulutus	MJ	64,9	6 230,0	14,6	6 309,6		-33,1 %
raaka-aineiden kulutus	yhhteensä	263,8	86,8	15,4	366,0		-10,6 %
luonnon raaka-aineet	kg	263,8	86,8	15,4	366,0		-10,6 %
jäteraaka-aineet	kg	0,0	0,0	0,0	0,0		
veden kulutus	m3	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0 %
päästöt ilmaan							
CO2	g	5 449,4	209 300,0	1 095,8	215 845,2		-32,7 %
CO	g	7,6	436,8	0,7	445,1		-32,9 %
Nox	g	52,5	474,6	9,6	536,7		-30,7 %
SO2	g	1,7	378,7	0,1	380,5		-33,2 %
VOC	g	3,6	653,1	0,4	657,1		-33,2 %
N2O	g	0,1	23,1	0,0	23,3		-33,2 %
hiukkaset	g	2,1	667,1	0,1	669,3		-33,3 %
raskasmetallit	mg	0,0	95,9	0,0	95,9		-33,3 %

ympäristövaikutus		energiankulutus 1200 kWh					kokonaiskuormituksen muutos
		raaka-aineiden hankinta	käsittely-prosessi	loppu-sijoittaminen	yhteensä		
energiaresurssien kulutus	MJ	64,9	10 680,0	14,6	10 759,6		14,2 %
raaka-aineiden kulutus	yhhteensä	263,8	148,8	15,4	428,0		4,5 %
luonnon raaka-aineet	kg	263,8	148,8	15,4	428,0		4,5 %
jäteraaka-aineet	kg	0,0	0,0	0,0	0,0		
veden kulutus	m3	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0 %
päästöt ilmaan							
CO2	g	5 449,4	358 800,0	1 095,8	365 345,2		14,0 %
CO	g	7,6	748,8	0,7	757,1		14,1 %
Nox	g	52,5	813,6	9,6	875,7		13,1 %
SO2	g	1,7	649,2	0,1	651,0		14,2 %
VOC	g	3,6	1 119,6	0,4	1 123,6		14,2 %
N2O	g	0,1	39,6	0,0	39,8		14,2 %
hiukkaset	g	2,1	1 143,6	0,1	1 145,8		14,3 %
raskasmetallit	mg	0,0	164,4	0,0	164,4		14,3 %

NORJAAN KULJETUKSEN YMPÄRISTÖKUORMITUKSEN LASKENTA**LAIVAKULJETUKSEN PÄÄSTÖT**

kuljetettavan tuhkan määrä
laivamatkan pituus

1000	kg
1600	km

lastien lukumäärä
energian kulutus
energian kulutus
laivauksen päästöt

0,00017	kpl
51,5	kWh
185,3	MJ

CO₂
CO
NO_x
hiukkaset
VOC

31 916	g
51 477	mg
720 677	mg
15 443	mg
20 591	mg

KAATOPAIKKARAKENTEIDEN MUODOSTAMISEN YMPÄRIS- TÖKUORMITUKSET

pysyvän jätteen kaatopaikka

kaatopaikan pinta-ala, m2	10000				
jätetätön tilavuus, m3	200000				
Kerros	kuivatuskerros+ kaasunkeräyskerros+ pohjan salaoja	jätetätön välipeitot	tiivistyskerrokset (pinta+pohja)	pintakerros	yhteensä
Paksuus, m				1,0	
Materiaali	Sora	Hiekka	Savi	Moreeni (maa)	
Tilavuus, materiaali, m3rtd	0	0	0	10000	
Tilavuus, kuljetus, m3itd	0	0	0	13333	13333
	Levitys				
Työkone	Puskutraktori	Puskutraktori	Puskutraktori	Puskutraktori	
Työvuorokapasiteetti K3, m3 itd/h	100	100	100	100	
Rakennetyyppi	Kerrospengerrys	Kerrospengerrys	Kerrospengerrys	Kerrospengerrys	
Käytetty aika, h	0	0	0	133	
Nimellisteho, kW	112	112	112	112	
Käyttöteho, %	40	40	40	40	
Käytetty energia, kWh	0	0	0	5973	5973
Ominaiskulutus, kg/kWh	0,261	0,261	0,261	0,261	
Polttoaineen kulutus, l (0,85 tiheys: kevyt polttoöljy)	0	0	0	1834	1834
Päästökerroin CO, g/kWh	5,8	5,8	5,8	5,8	
Päästökerroin NOx, g/kWh	11	11	11	11	
Päästökerroin CO2, g/kWh	841	841	841	841	
Päästökerroin VOC, g/kWh	2,646	2,646	2,646	2,646	
CO, g	0	0	0	34645	34645
NOx, g	0	0	0	65707	65707
CO2, g	0	0	0	5023573	5023573
VOC, g	0	0	0	15805	15805
luonnon raaka-aineet, tiheydet (kg/m3itd)	1500	1500	1500	1500	
luonnonvarat yhteensä, kg	0	0	0	20 000 000	20 000 000

tavanomaisen jätteen kaatopaikka

kaatopaikan pinta-ala, m3	10000				
jätetätön tilavuus, m3	200000				
Kerros	kuivatuskerros+ kaasunkeräyskerros+ pohjan salaoja	jätetätön välipeitot	tiivistyskerrokset (pinta+pohja)	pintakerros	yhteensä
Paksuus, m	1,5			1,0	
Materiaali	Sora	Hiekka	Savi	Moreeni (maa)	
Tilavuus, materiaali, m3rtd	15000	0	10000	10000	
Tilavuus, kuljetus, m3itd	21429	0	15873	13333	
	Levitys				
Työkone	Puskutraktori	Puskutraktori	Puskutraktori	Puskutraktori	
Työvuorokapasiteetti K3, m3 itd/h	100	100	100	100	
Rakennetyyppi	Kerrospengerrys	Kerrospengerrys	Kerrospengerrys	Kerrospengerrys	
Käytetty aika, h	214	0	159	133	
Nimellisteho, kW	112	112	112	112	
Käyttöteho, %	40	40	40	40	
Käytetty energia, kWh	9600	0	7111	5973	22684
Ominaiskulutus, kg/kWh	0,261	0,261	0,261	0,261	
Polttoaineen kulutus, l (0,85 tiheys: kevyt polttoöljy)	2948	0	2184	1834	6965
Päästökerroin CO, g/kWh	5,8	5,8	5,8	5,8	
Päästökerroin NOx, g/kWh	11	11	11	11	
Päästökerroin CO2, g/kWh	841	841	841	841	
Päästökerroin VOC, g/kWh	2,646	2,646	2,646	2,646	
CO, g	55680	0	41244	34645	131570
NOx, g	105600	0	78222	65707	249529
CO2, g	8073600	0	5980444	5023573	19077618
VOC, g	25402	0	18816	15805	60023
luonnon raaka-aineet, tiheydet (kg/m3itd)	1500	1500	1500	1500	
luonnonvarat yhteensä, kg	32 142 857	0	23 809 524	20 000 000	75 952 381

ongelmajätteen kaatopaikka

kaatopaikan pinta-ala, m3	10000				
jätetätön tilavuus, m3	200000				
Kerros	kuivatuskerros+ kaasunkeräyskerros+ pohjan salaoja	jätetätön välipeitot	tiivistyskerrokset (pinta+pohja)	pintakerros	yhteensä
Paksuus, m	2,0	0,0	1,5	1,0	
Materiaali	Sora	Hiekka	Savi	Moreeni (maa)	
Tilavuus, materiaali, m3rtd	20000	0	15000	10000	
Tilavuus, kuljetus, m3itd	28571	0	23810	13333	
	Levitys				
Työkone	Puskutraktori	Puskutraktori	Puskutraktori	Puskutraktori	
Työvuorokapasiteetti K3, m3 itd/h	100	100	100	100	
Rakennetyyppi	Kerrospengerrys	Kerrospengerrys	Kerrospengerrys	Kerrospengerrys	
Käytetty aika, h	286	0	238	133	
Nimellisteho, kW	112	112	112	112	
Käyttöteho, %	40	40	40	40	
Käytetty energia, kWh	12800	0	10667	5973	29440
Ominaiskulutus, kg/kWh	0,261	0,261	0,261	0,261	
Polttoaineen kulutus, l (0,85 tiheys: kevyt polttoöljy)	3930	0	3275	1834	9040
Päästökerroin CO, g/kWh	5,8	5,8	5,8	5,8	
Päästökerroin NOx, g/kWh	11	11	11	11	
Päästökerroin CO2, g/kWh	841	841	841	841	
Päästökerroin VOC, g/kWh	2,646	2,646	2,646	2,646	
CO, g	74240	0	61867	34645	170752
NOx, g	140800	0	117333	65707	323840
CO2, g	10764800	0	8970667	5023573	24759040
VOC, g	33869	0	28224	15805	77898
luonnon raaka-aineet, tiheydet (kg/m3itd)	1500	1500	1500	1500	
luonnonvarat yhteensä, kg	42 857 143	0	35 714 286	20 000 000	98 571 429

pesu

tuhkan määrä	0,67	m3
osuus tuhkatäytöstä	0,00000333	
kaatopaikkaluokka	ongelmajäte	
luonnonvarat	329	kg
käytetty energia	0,35	MJ
CO2	82,53	g
CO	0,57	g
Nox	1,08	g
VOC	0,26	g

sementtikiinteytys

tuhkan määrä	0,95	m3
osuus tuhkatäytöstä	0,00000475	
kaatopaikkaluokka	ongelmajäte	
luonnonvarat	468	kg
käytetty energia	0,50	MJ
CO2	117,61	g
CO	0,81	g
Nox	1,54	g
VOC	0,37	g

ferrox

tuhkan määrä	0,57	m3
osuus tuhkatäytöstä	0,00000287	
kaatopaikkaluokka	tavanomainen jäte	
luonnonvarat	218	kg
käytetty energia	0,23	MJ
CO2	54,69	g
CO	0,38	g
Nox	0,72	g
VOC	0,17	g

vitriifiointi

tuhkan määrä	0,15	m3
osuus tuhkatäytöstä	0,00000075	
kaatopaikkaluokka	pysyvä jäte	
luonnonvarat	15,1	kg
käytetty energia	0,02	MJ
CO2	3,79	g
CO	0,03	g
Nox	0,05	g
VOC	0,01	g

**YHTEENVETO KÄSITTELYVAIHTOEHTOJEN YMPÄRISTÖ-
KUORMITUKSISTA**

raaka-aineiden hankinta						
		pesu	sementti- kiinteytys	ferrox- prosessi	vitrifointi	kuljettaminen Norjaan
energiaresurssien kulutus	MJ		1 115,1	28,7	64,9	
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg		301,6	80,6	263,8	
<i>luonnon raaka-aineet</i>	<i>kg</i>		<i>282,6</i>	<i>0,6</i>	<i>263,8</i>	
<i>jätäraaka-aineet</i>	<i>kg</i>		<i>19,0</i>	<i>80,0</i>	<i>0,0</i>	
veden kulutus	m3		0,0	0,0	0,0	
<i>päästöt ilmaan</i>						
CO2	g		1 093 184,1	2 070,3	5 449,4	
CO	g		390,6	0,6	7,6	
Nox	g		10 981,1	17,6	52,5	
SO2	g		138,3	0,2	1,7	
VOC	g		167,7	0,5	3,6	
N2O	g		0,2	0,1	0,1	
hiukkaset	g		340,2	0,2	2,1	
raskasmetallit	mg		0,0	0,0	0,0	

käsittelyprosessi						
		pesu	sementti- kiinteytys	ferrox- prosessi	vitrifointi	kuljettaminen Norjaan
energiaresurssien kulutus	MJ	400,5	155,8	623,0	9 345,0	
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	5,6	302,2	8,7	130,2	
<i>luonnon raaka-aineet</i>	<i>kg</i>	<i>5,6</i>	<i>2,2</i>	<i>8,7</i>	<i>130,2</i>	
<i>jätäraaka-aineet</i>	<i>kg</i>	<i>0,0</i>	<i>300,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	
veden kulutus	m3	3,5	0,3	3,5	0,0	
<i>päästöt ilmaan</i>						
CO2	g	13 455,0	5 232,5	20 930,0	313 950,0	
CO	g	28,1	10,9	43,7	655,2	
Nox	g	30,5	11,9	47,5	711,9	
SO2	g	24,3	9,5	37,9	568,1	
VOC	g	42,0	16,3	65,3	979,7	
N2O	g	1,5	0,6	2,3	34,7	
hiukkaset	g	42,9	16,7	66,7	1 000,7	
raskasmetallit	mg	6,2	2,4	9,6	143,9	

loppusijoittaminen						
		pesu	sementti- kiinteytys	ferrox- prosessi	vitrifointi	kuljettaminen Norjaan
energiaresurssien kulutus	MJ	30,1	71,3	32,0	14,6	185,3
raaka-aineiden kulutus yhteensä	kg	329,2	721,8	218,4	15,4	0,0
<i>luonnon raaka-aineet</i>	<i>kg</i>	<i>329,2</i>	<i>721,8</i>	<i>218,4</i>	<i>15,4</i>	<i>0,0</i>
<i>jätäraaka-aineet</i>	<i>kg</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>
veden kulutus	m3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>päästöt ilmaan</i>						
CO2	g	2 404,0	5 648,6	2 496,3	1 095,8	31 915,7
CO	g	2,9	6,5	2,5	0,7	51,5
Nox	g	22,0	51,4	22,5	9,6	720,7
SO2	g	0,2	0,5	0,2	0,1	0,0
VOC	g	1,5	3,4	1,3	0,4	0,0
N2O	g	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0
hiukkaset	g	0,2	0,5	0,2	0,1	15,4
raskasmetallit	mg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0