



Kirsi Korpijärvi, Ulla-Maija Mroueh, Elina Merta,
Jutta Laine-Ylijoki, Harri Kivikoski, Eliisa Järvelä,
Margareta Wahlström & Esa Mäkelä

Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön

Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön

Kirsi Korpijärvi, Ulla-Maija Mroueh, Elina Merta,
Jutta Laine-Ylijoki, Harri Kivikoski, Eliisa Järvelä,
Margareta Wahlström & Esa Mäkelä

ISBN 978-951-38-7317-2 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7318-9 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2009

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4374

Toimitus Mirjami Pullinen

Edita Prima Oy, Helsinki 2009

Kirsi Korpijärvi, Ulla-Maija Mroueh, Elina Merta, Jutta Laine-Ylijoki, Harri Kivikoski, Eliisa Järvelä, Margareta Wahlström & Esa Mäkelä. Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön. [Processing of fly ash for earth construction]. Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2499. 75 s. + liitt. 19 s.

Avainsanat fly ash, classification, earth construction, productisation

Tiivistelmä

Tutkimuksen tavoitteena oli jalostaa energiantuotannon tuhkista tuotteita maarakennuskäyttöön. Esimerkkivoimalaitoksilta kerättyjen tuhkanäytteiden avulla selvitettiin tuhkien ympäristökelpoisuutta ja teknistä soveltuvuutta maarakennuskäyttöön sekä mahdollisuuksia ko. ominaisuuksien parantamiseen jalostamalla. Projektissa tarkasteltiin myös tuhkien jalostamisen ekotehokkuutta ja tuotteistamis-mahdollisuuksia.

Mikään tutkituista tuhkanäytteistä ei sellaisenaan täyttänyt Valtioneuvoston antaman asetuksen ”Eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa” (VNa 591/2006) vaatimuksia. Lähes vaatimusten mukaisia olivat turvepuutuhkat, jotka valittiin tarkempien tutkimusten kohteeksi. Näiden tuhkien jalostukseen käytettiin tutkimuksessa ilmaluokittelua. Ilmaluokittelulla voidaan erottaa pienet, paljon haitallisia aineita sisältävät partikkelit karkeammasta tuhka-jakeesta. Luokittelu paransi tuhkan ympäristökelpoisuutta ja teknistä soveltuvuutta maarakennuskäyttöön.

Kustannustarkastelussa havaittiin tuhkan luokittelun olevan todennäköisesti taloudellisesti kannattavaa, mikäli vaihtoehtona on koko tuhkamäärän sijoittaminen kaatopaikalle. Vuotuiset kokonaiskustannukset tuhkan jalostamiselle ovat noin puolet kaatopaikkasijoituksen kustannuksista, kun karkean jakeen saanto on 60 %. Kehitetyn käsittelykonseptin elinkaaren aikaisia ympäristökuormituksia arvioitiin vertailemalla erilaisia tierakennevaihtoehtoja, joissa karkeaa lentotuhkajakeetta ja luokittelematonta lentotuhkaa on hyödynnetty eri tavoin. Vertailukoh-tana käytettiin luonnonmateriaalirakennetta. Lentotuhkavaihtoehtoisissa säästy i luonnonmateriaaleja ja polttoainetta, mutta energian kulutus ja päästöt ilmaan olivat suurempia. Elinkaaritarkastelun perusteella tutkittuja tierakenteita ei voida laittaa selkeään paremmuusjärjestykseen. Vertailun tulos määräytyy sen perusteella, mitä vaikutuksia päättäjä pitää merkittävimpinä.

Työssä tarkasteltiin lisäksi mahdollisuuksia helpottaa tuhkien hyötykäyttöä tuotteistamalla ne EY:n uuden jättepuitedirektiivin (2008/98/EY) mahdollistaman *End of Waste* -menettelyn (EOW) mukaisesti. Koska tuotteiden käyttö ei ole samanlaisen viranomaisvalvonnan alaista kuin jätteen hyödyntäminen, tuotteen on oltava turvallinen sille osoitetuissa käyttökohteissa. Siksi tuotteistaminen tulee tuskin ainakaan lieventämään tuhkien maarakennuskäytön ympäristökriteereitä nykyisestä. Tuotteistaminen ei myöskään poista laadunvalvonnan tarvetta. Jos tuhista pystytään kohtuullisin kustannuksin jalostamaan tuotevaatimukset täyttävä materiaali ja samalla parantamaan myös teknisiä käyttöominaisuuksia, tuotteistaminen parantaisi niiden asemaa markkinoilla. Kaatopaikkakustannusten kasvu tekisi jalostuksesta nykyistä kannattavampaa ja tukisi näin hyötykäyttöä. Osalle tuhista voidaan löytää maarakennusta kustannustehokkaampia käyttökohteita, joihin ne kannattaa ensi sijassa ohjata.

Kirsi Korpijärvi, Ulla-Maija Mroueh, Elina Merta, Jutta Laine-Ylijoki, Harri Kivikoski, Eliisa Järvelä, Margareta Wahlström & Esa Mäkelä. Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön. [Processing of fly ash for earth construction]. Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2499. 75 p. + app. 19 p.

Keywords fly ash, classification, earth construction, productisation

Abstract

The aim of this project was to refine energy production ashes to high-quality products for earthworks. Fly ash samples were collected from different power plants and their environmental and technical applicability for earthworks were determined. Also the possibilities to improve properties of ashes by refining were investigated.

None of the analysed ash samples fulfilled the requirements of Government Degree (591/2006) concerning the recovery of certain wastes in earth construction. Peat-wood ashes were close to the limit values and they were selected for further investigations. Refining of peat-wood ashes was performed by air classification. In air classification process the small particles that contain high concentration of harmful substances are separated from the coarser ash fraction. Classification improved the environmental and technical applicability of ash for earthworks.

Calculation of costs indicated that the classification of ash can be economically profitable if the alternative is the landfilling of the entire ash amount of a power plant. Annual total costs for ash refining are about half of the landfilling costs, if the yield of coarser ash fraction is 60 %. Life cycle environmental load of the developed ash refining concept was estimated by comparing road structures, in which coarse ash fraction and untreated ash are used in various ways. A road structure made of natural materials was used as a reference. In road structures including fly ash the need for natural materials and fuel was reduced, but the energy consumption and emissions to air were increased. On the basis of life cycle survey the studied road structures can not be arranged into a particular order. The result of comparison is determined according to the effects which the decision-maker considers to be the most significant.

The possibilities to facilitate recycling of ashes by productisation according to *End of Waste* -procedure, enabled by EU's new waste directive (2008/98/EC), were also reviewed in this project. The usage of products is not officially supervised equally to waste recycling and a product must be safe when used according to instructions for use. Therefore productisation of ashes will probably not reduce existing environmental criteria for earth construction. Productisation does not remove the need for quality control either. If ash material, that fulfils the product requirements and has adequate technical properties, can be produced with reasonable costs the productisation can improve the position of ashes on the market. Increase in landfill costs would make the refining more profitable and would support recycling that way. Utilisation of ashes in earth construction is not the only opportunity. It could be possible to find more profitable ways to utilize portion of ashes other than earth construction.

Alkusanat

Tämä *Tuhkan UUMA-tuotteistus* -tutkimushanke (TUUMA) toteutettiin VTT:n vetämänä *Infrarakentamisen uusi materiaaliteknologia UUMA* -kehitysohjelmassa vuosina 2006–2008. Tutkimuksessa selvitettiin energiantuotannon tuhkien soveltuvuutta maarakennuskäyttöön VNa 591/2006:n mukaisesti ilmoitusmenettelyllä sekä mahdollisuuksia tuhkien ympäristö- ja teknisten ominaisuuksien parantamiseen jalostamalla. Lisäksi tarkasteltiin tuhkien jalostamisen ekotehokkuutta ja tuotteistamismahdollisuuksia.

Tutkimuksen rahoittivat Ympäristöministeriö, Jyväskylän Energiantuotanto Oy, Kotkan Energia Oy, Metso Power Oy, Rudus Oy, Ekokem-Palvelu Oy, Lassila-Tikanoja Oyj ja VTT. Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt:

Anna-Maija Pajukallio, Ympäristöministeriö, puheenjohtaja
Hannu Harju, Pertti Mielonen ja Harri Kaakinen, Jyväskylän Energiantuotanto Oy
Hannu Suortti, Kotkan Energia Oy
Juha Roppo, Metso Power Oy
Antti Määttä, Rudus Oy
Martti Keppo, Olli Hurme ja Pasi Virtanen, Lassila-Tikanoja Oyj
Jan Österbacka, Ekokem-Palvelu Oy
Erkki Alasaarela, Oulun Yliopisto
Helena Dahlbo, Suomen Ympäristökeskus
Esa Mäkelä, VTT
Kirsi Korpijärvi, VTT, sihteeri.

Tutkimuksen vastuullisena johtajana toimi Esa Mäkelä (VTT) ja projektipäällikkönä 05/2007 asti tutkija Saara Isännäinen ja 06/2007 alkaen tutkija Kirsi Korpijärvi. Tutkimusryhmään VTT:llä kuuluivat tutkija Eliisa Järvelä, erikoistutkija Jutta Laine-Ylijoki, tutkija Tuulikki Lindh, tutkija Elina Merta, erikoistutkija Ulla-Maija Mroueh, erikoistutkija Margareta Wahlström ja erikoistutkija Harri Kivikoski.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	5
Alkusanat	7
Symboliluettelo	10
1. Johdanto	11
2. Tuhkien hyödyntämisen toimintaympäristö.....	13
2.1 Lainsäädäntö, vaatimukset ja toimintakonseptit	13
2.2 Tuhkien tuotanto, keskeiset ominaisuudet ja jalostus.....	16
2.2.1 Tuhkien laatu.....	16
2.2.2 Tuhkien jalostusmahdollisuudet	20
2.3 Potentiaaliset hyötykäyttökohteet	22
3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus	25
3.1 Esimerkkituhkat.....	25
3.2 Tutkimussuunnitelma	25
3.2.1 Käsittelytekniikat.....	26
3.2.2 Karakterisointitutkimukset	27
3.2.3 Tekninen soveltuvuus.....	29
3.2.4 Ekotehokkuus.....	29
3.3 Tuhkien ominaisuudet ja käsittelyn toimivuus.....	31
3.3.1 Tuhkien ympäristöominaisuudet.....	31
3.3.2 Tuhkien laatuvaihtelun tutkimukset	35
3.3.3 Käsittelyjen vaikutus tuhkien ominaisuuksiin	37
3.3.4 Tekniset ominaisuudet	43
3.4 Ekotehokkuuslaskelmat	45
3.4.1 Kustannustarkastelu.....	46
3.4.2 Ympäristökuormitusten tarkastelu.....	49
4. Tuhkien tuotteistamismahdollisuudet.....	56
4.1 Tuotteistamisen lähtökohdat.....	56

4.2	Tuhkien tuotteistamisen erityispiirteet.....	58
4.3	Hankkeen esimerkituote.....	60
4.3.1	Jätevirran analyysi.....	60
4.3.2	EOW-arviointiperusteet ja tutkimusmenetelmät.....	62
4.3.3	Vaikutusarvio.....	66
4.3.4	Johtopäätökset.....	69
5.	Tuhkien hyödyntämisen tulevaisuudennäkymät.....	71
	Lähdeluettelo.....	73

Liitteet

Liite A: Meli-ohjelman tietopohja

Liite B: Tuhkanäytteiden koostumustietoja

Liite C: Tuhkanäytteiden kaksivaiheisten ravistelutestien tulokset kumulatiivisessa L/S-suhteessa 10

Liite D: Puu-turve-REF-biolietetuhkien laatuvaihtelu

Liite E: Teknisen soveltuvuuden tutkimukset

Liite F: Ekotehokkuuslaskelmassa tarkasteltujen tierakennevaihtoehtojen ympäristökuormitukset elinkaarivaiheittain

Symboliluettelo

CIRU	<i>Centre for Industrial Residue Utilization</i>
<i>End of Waste, EOW</i>	EU:n uuden jätedirektiivin mukainen menettely, jonka avulla voidaan täsmentää, milloin tiettyyn jätevirtaan kuuluva jäte ei ole enää jätettä
Mara-asetus	Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (591/2006)
Meli	VTT:n laatima ohjelma tie- ja maarakenteiden ja niihin sijoitettavien sivutuotteiden elinkaaren aikaisten ympäristökuormitusten arviointiin

1. Johdanto

Tuhkat ovat merkittävästi kaatopaikkoja kuormittava jätejäte. Jätelainsäädännön ja jätesuunnitelmien tavoitteiden mukaan ne pitäisi ensisijaisesti hyödyntää, jos se on turvallista ja teknisesti mahdollista eikä aiheuta kohtuuttomia kustannuksia jätteen muuhun käsittelyyn verrattuna. Kivihiilituhkia voidaan hyödyntää maarakentamisessa, betonin tai sementin seosaineena, sementin raaka-aineena, asfaltin täytejauheena sekä maa- ja pohjarakenteiden stabiloinnissa. Turve-puutuhkia voidaan käyttää maarakenteissa sekä kaatopaikkojen pinta- ja maisemointitöissä. Puhtaat puutuhkat ovat erinomaista lannoitetta suometsille. Vaikka hyötykäyttömahdollisuuksia on teoriassa paljon, käytännössä vain noin puolet tuhista hyödynnetään. Sopivien hyötykäyttökohteiden löytyminen etenkin seostuhkille on usein vaikeaa.

Maarakentamisessa tuhkia on hyödynnetty koeluontoisesti jo pitkään, mutta käyttö ei ole yleistynyt. Merkittävimmiksi tuhkien maarakennuskäytön esteiksi on koettu käyttäjien epävarmuus materiaalin ympäristökelpoisuudesta ja teknisestä soveltuvuudesta. Myös käyttöön liittyvät hallinnolliset menettelyt, kuten tuhkien määrittely jätteeksi ja hyötykäyttöön liittyvä ympäristölupavollisuus on koettu käytön esteiksi. Suurin osa tuhista syntyy talvikaudella ja hyödyntäminen maarakenteissa on mahdollista vain kesäkaudella. Tuhkat täytyy vähintään peittää varastoinnin ajaksi, jotta sitoutumisominaisuudet eivät heikkene. Lisäksi maarakentamisessa tarvitaan kerralla suuria tuhkamääriä, mikä voi aiheuttaa varastointiongelmia. Myös kuljetusmatkat voivat olla pitkiä, sillä mahdolliset hyötykäyttökohteet sijaitsevat harvoin voimalaitoksen läheisyydessä.

Tuhkien maarakennuskäyttöä on yritetty helpottaa Valtioneuvoston asetuksella eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (591/2006). Kivihiilen, turpeen ja puun polton tuhkia voidaan hyödyntää tietyissä maarakennuskohteissa ilmoitusmenettelyllä, mikäli asetuksessa esitetyt perustutkimusten ja laadunvalvonnan raja-arvot haitallisten aineiden kokonaispitoisuuksille ja liukoisuuksille

1. Johdanto

alittuvat. Ympäristölainsäädäntö ei aseta velvoitteita materiaalin teknisille ominaisuuksille. Tekninen soveltuvuus käyttökohteeseen on kuitenkin tärkeä hyötykäytön edellytys, koska huonolaatuisten tuotteiden on vaikea kilpailla markkinoilla vastaavien luonnonmateriaaleista valmistettujen tuotteiden kanssa.

Läheskään kaikki tuhkat eivät sellaisenaan täytä maarakennusasetuksen kokonaispitoisuus- ja liukoisuusraja-arvoja. Tuhkien laadun parantaminen erilaisin käsittelymenetelmin on yksi vaihtoehto niiden hyötykäyttöasteen parantamiseksi. Yksinkertaisimpia menetelmiä ovat luokittelut, jotka voidaan tehdä kuivalle materiaalille. Liukoisia aineita voidaan poistaa erilaisilla pesuilla, ja raskasmetallien poistoon soveltuvat erilaiset kuumennusmenetelmät.

Luonnonmateriaalien saatavuuden heiketessä ja kaatopaikkasijoituksen vaikeutuessa yleisesti hyväksytty selkeä toimintamalli ja kriteerit uusiomateriaalien tuotehyväksyntään voisivat parantaa uusiomateriaalien käytön edellytyksiä. Käyttäjälle tuotehyväksyntä on tae materiaalin ympäristöturvallisuudesta ja teknisestä soveltuvuudesta.

2. Tuhkien hyödyntämisen toimintaympäristö

Kaikessa jätteiden hyötykäytössä lähtökohtana on lainsäädännön velvoitteiden täyttyminen. Käyttö ei saa aiheuttaa maaperän tai pohjaveden pilaantumisen vaaraa tai muuten vaarantaa terveyttä tai ympäristöä. Koko käyttöketjun aikaiset ympäristövaikutukset täytyy huomioida: ne kattavat tuhkien esikäsitteilyn, kuljetukset, mahdollisen välivarastoinnin, käytön ja käytön jälkeiset toiminnot. Ympäristölainsäädäntö ei aseta velvoitteita materiaalien teknisille ominaisuuksille. Uusiomateriaalin on kuitenkin vaikea kilpailla markkinoilla, jos se soveltuu vain alempitaisoihin käyttökohteisiin, joihin usein löytyy käyttökohteen lähetyviltä ominaisuuksiltaan yhtä hyviä tai parempia luonnonmateriaaleja. Huonolaatuisen materiaalin käyttö voi myös aiheuttaa lisäkustannuksia ja ympäristökuormituksia, jos rakenne joudutaan korjaamaan ennen aikaisesti.

2.1 Lainsäädäntö, vaatimukset ja toimintakonseptit

Merkittävimpiä lakeja ja säädöksiä, jotka on otettava huomioon tuhkien hyötykäytössä, ovat ympäristönsuojelulaki (86/2000) ja ympäristönsuojeluasetus (169/2000) sekä jätelaki (1072/1993) ja jäteasetus (1390/1993). Jätteen maarakennuskäyttöön, kuten kaikkeen jätteen laitosmaiseen tai ammattimaiseen hyötykäyttöön, tarvitaan eräitä poikkeuksia lukuun ottamatta ympäristönsuojelulain (86/2000) 28 §:n mukainen ympäristölupa. Ympäristölupaa haetaan kunnan ympäristölupaviranomaiselta, jos vuosittain käsiteltävä tai hyödynnettävä määrä on alle 5 000 tonnia, ja alueelliselta ympäristökeskukselta, jos määrä on 5 000 tonnia tai enemmän. Valtioneuvoston asetuksella eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (591/2006) on yritetty helpottaa kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lento- ja pohjatuhkien käyttöä maarakentamisessa. Asetus mahdollistaa tuhkien maarakennuskäytön ilmoitusmenettelyllä, kun tietyt ehdot

2. Tuhkien hyödyntämisen toimintaympäristö

täyttyvät. Lisäksi erityisesti turvetuhkien käytössä tulisi muistaa myös säteilyturvakeskuksen ohje ”Rakennusmateriaalien ja tuhkan radioaktiivisuus” (ST 12.2), jossa rakennusmateriaaleille ja tuhkan käsittelylle esitetään aktiivisuusindeksin avulla arvioitavat toimenpidearvot sekä ohjeita käyttökohteille ja loppusijoitukselle.

Tuhkien käyttö maarakenteissa asetuksen mukaisesti edellyttää, että materiaalin tuottaja tai jalostaja valvoo tuotteen laatua asetuksen edellyttämällä tavalla ja asetuksessa tuhkille esitetyt perustutkimusten ja laadunvalvonnan raja-arvot alittuvat. Asetuksen mukaiset raja-arvot on esitetty taulukossa 1. Lisäksi käyttökohteen tulee kuulua asetuksen soveltamisalaan sekä täyttää muut kohteelle ja rakenteelle asetetut ehdot. Hyödyntämisestä on tehtävä ilmoitus ympäristönsuojelun tietojärjestelmään. Ilmoituksen tekee hyödyntämispaikan haltija tai jätteen tuottaja hyödyntämispaikan haltijan valtuuttamana.

Ilmoitusmenettely koskee ainoastaan asetuksen soveltamisalassa määritettyjä käyttökohteita, joita ovat yleiset tiet kadut, pyörätiet ja jalkakäytävät, pysäköintialueet, ratapihat, urheilukentät sekä varastointikentät ja tiet teollisuusalueilla. Käyttökohde ei voi olla tärkeällä tai muulla vedenhankintaan soveltuvalla pohjavesialueella (pohjavesialueiden suojeluluokat I ja II).

Jätettä sisältävän rakenteen enimmäispaksuus voi olla 150 cm, ja jätettä sisältävä rakenne on joko peitettävä tai päällystettävä. Rakenteen paksuutta rajoittamalla on haluttu estää hallitsemattomien läjitysalueiden syntyminen. Paksummille rakenteille voi kuitenkin hakea tarvittaessa ympäristölupaa. Päällystetyille kohteille on esitetty väljemmät liukoisuuden raja-arvot kuin peitetyille. Peittämisellä tarkoitetaan peittämistä vähintään 10 cm kerroksella soraa, hiekkaa tai vastaavaa materiaalia ja päällystämistä päällystämistä asfaltilla tai muulla heikosti vettä läpäisevällä materiaalilla.

Jos tuhkien käyttökohde ei kuulu asetuksen soveltamisalaan tai jäte ei täytä kyseiselle materiaalille asetettuja raja-arvoja, sen käyttö on edelleen mahdollista luvanvaraisena. Tällöin lupaviranomainen päättää hyödyntäjän tekemän lupahakemuksen perusteella kohdekohtaisesti käytön hyväksyttävyydestä.

Ympäristökelpoisuuden lisäksi maarakenteissa käytettävien tuhkien tulee olla teknisesti soveltuvia käyttökohteisiinsa. Maarakennuskäytön kannalta tuhkien geoteknisistä ominaisuuksista tärkeimmät ovat optimivesipitoisuus, maksimikuivatilavuuspaino, lujuus ja routivuus (Finergy 2000). Tuhkien rakeisuus puolestaan vaikuttaa muun muassa optimivesipitoisuuteen, tiivistyvyyteen, routivuuteen, vedenläpäisevyyteen ja kapillaarisuuteen. Rakeisuuskäyriin perustuvien routivuuskriteerien perusteella tuhkat oletetaan usein routiviksi.

2. Tuhkien hyödyntämisen toimintaympäristö

Taulukko 1. Haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet ilmoitusmenettelyn kautta hyödynnettäville kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineen polton lento- ja pohjatuhkille (VNa 591/2006).

Haitallinen aine	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta Perustutkimukset [†]			Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta Laadunvalvontatutkimukset ¹		
	Pitoi- suus	Liukoisuus (L/S = 10 l/kg) Peitetty rakenne	Liukoisuus (L/S = 10 l/kg) Päällystetty rakenne	Pitoi- suus	Liukoisuus (L/S = 10 l/kg) Peitetty rakenne	Liukoisuus (L/S = 10 l/kg) Päällystetty rakenne
PCB ²	1,0					
PAH ³	20/40 ⁴					
DOC ⁵		500	500			
Antimoni (Sb)		0,06	0,18			
Arseeni (As)	50	0,5	1,5	50		
Barium (Ba)	3 000	20	60	3 000		
Kadmium (Cd)	15	0,04	0,04	15		
Kromi (Cr)	400	0,5	3,0	400	0,5	3,0
Kupari (Cu)	400	2,0	6,0	400		
Elohopea (Hg)		0,01	0,01			
Lyijy (Pb)	300	0,5	1,5	300	0,5	1,5
Molybdeeni (Mo)	50	0,5	6,0	50	0,5	6,0
Nikkeli (Ni)		0,4	1,2			
Vanadiini (V)	400	2,0	3,0	400	2,0	3,0
Sinkki (Zn)	2 000	4,0	12	2 000		
Seleen (Se)		0,1	0,5		0,1	0,5
Fluoridi (F ⁻)		10	50		10	50
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)		1 000	10 000		1 000	10 000
Kloridi (Cl ⁻)		800	2 400		800	2 400

¹ Katso VNA 591/2006 liitteessä 2 oleva kohta 2.

² Polyklooratut bifenyylit, kongeneerien 28, 52, 101, 118, 138, 153 ja 180 kokonaismäärä.

³ Polyaromaattiset hiilivedyt, yhdisteiden (antraseeni, asenafteneeni, asenaftyyleeni, bentso(a)antraseeni, bentso(a)pyreeni, bentso(b)fluoranteeni, bentso(g,h,i)peryleeni, bentso(k)fluoranteeni, dibentso(a,h)antraseeni, fenantreeni, fluoranteeni, fluoreeni, indeno(1,2,3-cd)pyreeni, naftaleeni, pyreeni, kryseeni) kokonaismäärä.

⁴ Peitetty rakenne / päällystetty rakenne.

⁵ Liunnut orgaaninen hiili.

Lentotuhka lujittuu, kun siihen lisätään vettä ja se tiivistetään, koska tuhkan sisältämä vapaa kalkki reagoi veden kanssa muodostaen oksideista lujittuvia yhdisteitä. Lentotuhkan lujittumista heikentävät muun muassa sen sisältämät epäpuhtaudet, välivarastointi kosteana ja lujittumisvaiheen alhainen lämpötila. Lujittumista voidaan parantaa lisäämällä tuhkaan esimerkiksi kalkkia tai sementtiä. Luonnonkivimateriaaleihin verrattuna lentotuhka on tyypillisesti kevyempää ja jonkin verran lämpöeristävämpää (Tiehallinto 2007).

2.2 Tuhkien tuotanto, keskeiset ominaisuudet ja jalostus

Vuonna 2006 syntyi Suomessa 1 600 000 tonnia tuhkia, joista noin miljoona tonnia syntyi kivihiilen poltossa. Puun- ja turpeen polton tuhkia syntyy vuosittain noin 500 000 tonnia, josta suurin osa on seostuhkaa. Puhdasta turvetuhkaa syntyy noin 50 000 tonnia vuodessa, ja puhdasta puutuhkaa on arvioitu syntyvän 50 000–100 000 tonnia vuodessa. Valtaosa seospolton tuhista syntyy leijukerospolttoa hyödyntävissä laitoksissa.

2.2.1 Tuhkien laatu

Poltossa syntyvän tuhkan kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet sekä määrät riippuvat käytettävän polttoaineen koostumuksesta ja laadusta. Polttotekniikalla ja -parametreilla, kuten lämpötilalla, palamisnopeudella ja ilman syötöllä, sekä kattiloiden kunnolla ja tuhkan talteenottojärjestelmillä on myös vaikutusta tuhkan laatuun. Kivihiilen lentotuhka on fysikaaliselta olomuodoltaan hienojakoista. Sen tyypillinen raekoko vaihtelee välillä 2–100 μm . 10–20 % hiukkasista on alle 10 μm :n pienhiukkasia ja noin 5 % alle 2,5 μm :n hiukkasia (Sloss et al. 1996). Turpeen ja puun polton seostuhka on yleensä jonkin verran kivihiilen lentotuhkaa karkeampaa ja alkalisempaa. Raekooltaan seostuhkat vastaavat silttiä ja hienoa hiekkaa. Pohjatuhkat ovat lentotuhkia huomattavasti karkearakeisempia, ja teknisiltä ominaisuuksiltaan ne vastaavat luonnon hiekkaa ja soraa. Esimerkiksi kivihiilen pohjatuhkan raekoko on 1,5–5 mm.

Kivihiilen ja turpeen lentotuhkan pääkomponentit ovat piin, alumiinin ja raudan oksidit. Puun tuhka sisältää suurimmaksi osaksi kalsiumoksidia. Pääkomponenttien lisäksi lentotuhkat sisältävät magnesium-, kalium- ja natriumoksideja, raskasmetalleja ja palamatonta hiiltä (Palola 1998). Pohjatuhka muodostuu pääasiassa alumiinisilikaateista, jotka ovat myös maaperän pääainesosia (Walsh 1997). Tuhkat sisältävät myös pieniä määriä raskasmetalleja. Kivihiilituhkassa on selvästi korkeammat raskasmetallipitoisuudet kuin puun ja turpeen tuhkassa. Puutuhkan kriittisin raskasmetalli on kadmium, joka saattaa rajoittaa ravinteikkaan puutuhkan käyttöä lannoitteena. Puutuhkan laatu vaihtelee myös puun eri osien välillä. Metallipitoisuudet ovat energiasisältöä kohti suuremmat kuoressa ja oksissa kuin runkokuoreissa. Myös maaperän alkuainepitoisuudet vaihtelevat ajan ja paikan mukaan, mikä vaikuttaa muodostuvan tuhkan laatuun. Metsäteollisuuden lietteiden ja kuoren polton tuhkat sisältävät muun muassa arseenia, kromia, kadmiumia, lyijyä ja nikkeliä. Lietteperäisiä hivenaineita ovat myös kupari,

2. Tuhkien hyödyntämisen toimintaympäristö

mangaani, molybdeeni, sinkki, koboltti ja vanadiini. Biolietteellä on lähinnä laimentava vaikutus tietyllä polttoaineseoksella muodostuvan tuhkan koostumukseen (Laine-Ylijoki et al. 2002). Erityisesti turvetuhka voi olla myös radioaktiivista. Eri tuhkien raskasmetallipitoisuuksia on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Kirjallisuudessa esitettyjä tietoja turpeen ja puun tuhkan metallipitoisuuksista (mg/kg) (Nilsson & Timm 1983, Isännäinen & Huotari 1994, Wahlström & Pohjola 1987, Laine-Ylijoki et al. 2002).

	Turpeen ja puun lentotuhka	Puutuhka	Puunkuori-liete-lentotuhka ¹⁾	Kivihiilen lentotuhka	VNa 591/2006 raja-arvot	
					Perustutkimukset	Laadunvalvonta
Arseeni	30–120	1–60	11–26	2,3–6 300	50	50
Barium	150–2 200	200–1 300			3 000	3 000
Kadmium	0,5–5	6–40	3,7–14	0,1–130	15	15
Koboltti	10–50	3–200		40–100	–	–
Kromi	43–130	40–250	50–230	3,6–900	400	400
Kupari	60–200	50–300	52–85	14–2 200	400	400
Elohopea	0,3–2	0,02–1	0,004–1,1	0,005–12	–	–
Molybdeeni	10–50	15		1,2–236	50	50
Nikkeli	30–700	20–100	38–89	1,8–43 000	–	–
Lyijy	150–1 000	3–1 100	34–72	3–2 120	300	300
Seleeni	<10–26			0,2–134	–	–
Vanadiini	20–500	20–30		12–1 180	400	400
Sinkki	50–2 200	200–2 000	790–3 700	14–3 500	2 000	2 000

¹⁾ Liete tarkoittaa biolietettä, jonka seassa on mahdollisesti kuorimo- ja kuitulietettä.

Monesti tuhkissa esiintyy yllättävän korkeita pitoisuuksia haitallisia aineita, vaikka polttoaineen pitäisi periaatteessa olla puhdasta. Esimerkiksi pieni määrä kyllästettyä puuta puupolttoaineiden joukossa nostaa huomattavasti lentotuhkan kromi, kupari ja arseenipitoisuuksia. Taulukkoon 3 on kerätty mahdollisia haitallisten aineiden lähteitä.

2. Tuhkien hyödyntämisen toimintaympäristö

Taulukko 3. Alkuaineiden lähteitä jäteperäisissä polttoaineissa (Vainikka 2006, Kaartinen et al. 2007).

Alkuaine	Lähde (käyttötarkoitus)
Arseeni, As	kyllästys, (painomuste (vanh.), parkitusaine, korroosionesto)
Kadmium, Cd	pigmentti, muovien (kuten PVC) lämpö- ja valostabilaattori
Kloori, Cl	PVC-muovi, suola
Kromi, Cr	metalliseokset, värit (keltainen, vihreä), kyllästys, kromaus, parkitusaine
Kupari, Cu	metalli, messinki, kyllästysaine, katalyytti, pigmentti
Elohopea, Hg	katalyytti muoveissa, uretaanivaaho
Nikkeli, Ni	metalli (niklaus), metalliseokset, katalyytti, pigmentti
Lyijy, Pb	metalli, messinki, juotostina, pigmentti, tiiviste, muovistabilaattori (PVC), polymeerikatalyytti, lyijysilikaatit
Antimoni, Sb	metalliseokset, palonestoaine, maaliväri (keltainen, oransi), vulkanointiaine, kyllästys-/peittäysaine
Sinkki, Zn	metalli (sinkitys), messinki, kyllästys, palonesto, vulkanointi, pigmentti, öljyjen kovetin, ruosteenesto, stabilaattori

Haitallisten aineiden höyrystyminen ja pysyminen kiinteässä muodossa vaikuttavat monien aineiden muodostamiin yhdisteisiin ja aineiden sitoutumiseen tuhkaan. Metallit höyrystyvät eri lämpötiloissa riippuen metallin esiintymismuodosta ja siitä, onko klooria palamisessa mukana. Haitalliset aineet voidaan jakaa höyrystymis- ja sitoutumiskäyttäytymisensä mukaisesti kolmeen ryhmään. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat höyrystyvät aineet, jotka ovat höyrystyneinä vielä savukaasujen ulosmenolämpötilassa ja poistuvat siis höyrymuodossa savukaasujen mukana. Toisen ryhmän raskasmetallit höyrystyvät polton aikana mutta tiivistyvät takaisin kiinteisiin hiukkasiin. Tämän ryhmän alkuaineet rikastuvat pienimpiin lentotuhkahiukkasiin tiivistymisen vuoksi. Kolmannen ryhmän aineet eivät höyrsty poltossa. Nämä aineet liittyvät tuhkan yli mikrometrin kokosiin hiukkasiin eivätkä siis rikastu aivan hienoimpaan lentotuhkaan.

Mahdollinen tuhkien hyötykäyttö edellyttää myös haitallisten aineiden liukoisuuden tuntemista. Kivihiilen lentotuhkista on olemassa melko paljon liukoisuustutkimuksia, joissa on yleensä keskitytty arseenin, kromin, molybdeenin, seleenin ja vanadiinin liukoisuuksiin. Muiden metallien liukoisuudet kivihiilen lentotuhkista on todettu melko pieniksi. Seospolton tuhkat vastaavat yleensä

liukoisuudeltaan tyypillisiä kivihiilen ja turpeen lentotuhkia. Turvetuhkista on usein havaittu molybdeenin ja seleenin liukoisuutta. Turpeen ja puun tuhkan kohdalla on havaittu merkittäviä vaihteluja erityisesti muun muassa lyijyn, seleenin, molybdeenin ja fluoridin kokonaispitoisuuksissa ja liukoisuuksissa (Harju et al. 2001).

Prosessiolosuhteet, kuten kattilakuormitus, vaikuttavat seospolton tuhkissa ainakin molybdeenin liukoisuuteen siten, että suuremmilla kattilakuormituksilla liukoisuus kasvaa. Puun tai hakkeen suuri osuus polttoaineessa ja sitä kautta tuhkan korkea kalsiumpitoisuus lisäävät tuhkien emäksisyyttä, mikä voi näkyä esimerkiksi lyijyn liukoisuuden kasvuna. Puutuhkista liukenee myös suurempia kalsium- ja sulfaattimääriä kuin turvetuhkista. Bariumin liukoisuus korreloi sulfaatin liukoisuuden kanssa. Suuri sulfaattipitoisuus pienentää bariumin liukoisuutta todennäköisesti bariumsulfaatin saostumisen vuoksi. Myös tukipolttoaineiden kuten öljyn käyttö lisää muun muassa vanadiinin ja koboltin liukoisuuksia.

pH-muutokset tuhkassa tai käyttö- tai sijoitusolosuhteissa vaikuttavat myös liukoisuusominaisuuksiin. Polttoaineiden seossuhteella ei tässä yhteydessä ole havaittu olevan merkittävää vaikutusta, vaan eri tuhkien liukoisuuskäyttäytyminen on melko samankaltaista. Emäksissä olosuhteissa liukenee lähinnä kromia, lyijyä ja molybdeenia sekä neutraaleissa olosuhteissa lähinnä molybdeeniä, kromia, seleeniä ja vanadiinia. Happamissa pH-olosuhteissa (pH alle 5) liukenee taas lähinnä kadmiumia ja sinkkiä. Sen sijaan suolojen (Na, K, Ca, sulfaatti) liukoisuudet olivat lähes riippumattomia pH-arvosta. Taulukkoon 4 on koottu esimerkkejä turpeen ja puun sekä kivihiilen lentotuhkan liukoisuusominaisuuksista. (Laine-Ylijoki et al. 2002.)

2. Tuhkien hyödyntämisen toimintaympäristö

Taulukko 4. Esimerkkejä turpeen ja puun sekä kivihiilen lentotuhkan liukoisuusominaisuuksista L/S-suhteessa 10. Testimenetelmänä kaksivaiheinen CEN-testi EN 12457-3 tai läpivirtaustesti (prCEN/TS 14405, NEN7343).

	Kivihiilen lentotuhkan liukoisuustuloksia			Puun ja turpeen lentotuhkan liukoisuustuloksia			VNa 591/2006 raja-arvot			
	Keskiarvo	Min	Max	Keskiarvo	Min	Max	Perustukimukset peitetty rakenne	päällystetty rakenne	Laadunvalvonta peitetty rakenne	päällystetty rakenne
Sulfaatti	4 000	65	30000	9000 (16000)	1	46000 (130000)	1 000	10 000	1 000	10 000
Kloridi	75	6	4200	2 800 (4000)	2	19000 (28000)	800	2 400	800	2 400
Fluoridi	20	3	90	120	7	600	10	50	10	50
Antimoni	0,1	0,01	0,5	0,1	0,001	0,2	0,06	0,18	-	-
Arseni	0,15	0,02	2	0,1	0,001	0,6	0,5	1,5	-	-
Barium	45	1	106	15	0,6	120	20	60	-	-
Kadmium	0,01	0,001	0,02	0,02	0,003	0,5	0,04	0,04	-	-
Kromi	1,5	0,02	10	3,5	0,02	34	0,5	3,0	0,5	3,0
Kupari	0,1	0,01	1	0,08	0,01	0,4	2,0	6,0	-	-
Elohopea	0,003	0,002	0,004	0,01	0,001	0,02	0,01	0,01	-	-
Molybdeeni	4 (8)	0,3 (2)	13 (50)	2,5	0,05	7,5	0,5	6,0	0,5	6,0
Nikkeli	0,03	0,01	0,1	0,1	0,002	0,2	0,4	1,2	-	-
Lyijy	0,2	0,02	0,4	3	0,001	90	0,5	1,5	0,5	1,5
Seleeni	0,3	0,05	0,5	0,45	0,05	5	0,1	0,5	0,1	0,5
Vanadiini	1,5	0,2	5	0,2	0,002	1,5	2,0	3,0	2,0	3,0
Sinkki	0,2	0,01	9	6	0,02	60	4,0	12	-	-
Alumiini	20	2	40	68	2,0	510	-	-	-	-
DOC	7	7	8	60	8,0	210	500	500	-	-

2.2.2 Tuhkien jalostusmahdollisuudet

Tuhkien ympäristöominaisuuksien ja teknisen soveltuvuuden parantamiseksi on olemassa useita erilaisia menetelmiä, joista valtaosa on kehitetty jätteenpolton tuhkien käsittelyyn kaatopaikkakelpoisiksi. Useat menetelmistä olisivat kuitenkin sovellettavissa myös energiantuotannon lentotuhkien jalostamiseen.

Kaikkein yksinkertaisinta olisi lentotuhkien käsittely kuivana, sillä tuhkan kastelu tuo vedenpoiston vuoksi lisää prosessivaiheita ja kustannuksia. Kuivana tuhkille voidaan tehdä lähinnä luokittelua eli jakaa tuhkia partikkelikoon ja ominaispainon perusteella erilaisiin jakeisiin. Reaktiivisia, liukoisia aineita sekä raskasmetalleja on suhteessa eniten pienissä hiukkasissa, jotka siis täytyy erottaa karkeimmasta tuhkakakeesta. Lentotuhkat ovat hienojakoisia, ja alle 20 µm:n partikkeleita voidaan erottaa lähinnä ilmaluokittelulla sekä mahdollisesti myös ultraäänivärähtelijöillä varustetuilla seuloilla. Tehokas pölyämisen hallinta on tuhkien hienojakoisuuden takia tärkeää.

Poltossa höyrystyvät raskasmetallit kondensoituvat tuhkapartikkelien pinnoille, jolloin raskasmetallien konsentraatio tulee kaikkein suurimmaksi pienissä partikkeleissa. Savukaasujen sähkösuodatinpuhdistuksessa suurimmat partikkelit

jäävät ensimmäiseen kenttään ja pienet kulkeutuvat viimeisiin kenttiin. Voimailaitoksella jo olevaa sähkösuodatinta voitaisiin käyttää luokittelijana, jos ensimmäisen kentän puhtaampi tuhka erotetaan muusta tuhkavirrasta. Usein valtaosa tuhkasta päätyy kuitenkin sähkösuodattimen ensimmäiseen kenttään, eikä muun tuhkavirran erottamisella tällöin ole kovin suurta vaikutusta hyötykäytettävän tuhkakajeen raskasmetallien kokonaispitoisuuksiin. Tuhkan kertymiseen sähkösuodattimen eri kenttiin voidaan vaikuttaa sähkösuodatinta säätämällä.

Liukoisten aineiden poistoon on kehitetty erilaisia pesumenetelmiä. Helppo-liukoiset suolat erottuvat helposti pienellä vesilisäyksellä, mutta niukkaliukoiset yhdisteet, kuten raskasmetallit, voidaan suurillakin vesimäärillä erottaa yleensä vain osittain. Raskasmetallien liuottaminen onnistuu happopesulla, mutta jo luonnostaan korkean pH:n omaavan tuhkan neutralointiin kuluu paljon happoa, mikä lisää kustannuksia. Pesuja käytettäessä pitää myös huomioida jätevesien käsittely.

Tuhkan liukoisuusominaisuuksiin voidaan vaikuttaa myös varastoinnilla eli ikäännyttämisellä. Varastoitaessa tuhka reagoi ilman hiilidioksidin ja kosteuden kanssa. Tällöin esimerkiksi kalsiumoksidista muodostuu kalsiumkarbonaattia tai alumiini ja rikkiyhdisteiden läsnä ollessa jopa sementtimäisiä aineita, kuten etringiittiä. Tuhkan ikääntyessä sen pH laskee, mikä vaikuttaa liukoisuuteen aineesta riippuen positiivisesti tai negatiivisesti. Tuhkan luonnollista ikääntymistä voidaan tehostaa hiilidioksidin avulla.

Raskasmetalleja voidaan poistaa tuhkista termisillä menetelmillä. Kuumennusmenetelmissä puhdistettava tuhka syötetään reaktoriin, jonka lämpötila on riittävän korkea (1 300–1 500 °C) helposti haihtuvien aineiden höyryttämiseen ja poistamiseen prosessikaasujen mukana. Prosessikaasujen jäähtyessä tuhkasta höyrystyneet aineet kondensoituvat alle mikrometrin kokoisina partikkeleina, jotka voidaan ottaa talteen metalleina. Aineet, jotka eivät höyrysty kuumennuksessa, poistetaan prosessista sulatteena tai sintrattuna tuotteena. Kuumennus voidaan suorittaa joko hapettavissa tai pelkistävässä olosuhteissa, mikä vaikuttaa tuhkakajteen koostumukseen ja fysikaalisiin ominaisuuksiin. Eräässä menetelmässä käytetään kuumennuksen yhteydessä suolahappoa, jolloin raskasmetallit muodostavat helposti haihtuvia klorideja, jotka saadaan poistettua lähes täydellisesti noin 900 °C:ssa. Tällöin energiankulutus on pienempää kuin muissa lämpökäsittelyprosesseissa. Joissakin menetelmissä tuhka rakeistetaan lietteen kanssa ennen sintrausta pyörivässä uunissa. Yleisesti ottaen kuumennusmenetelmät ovat suuren energiankulutuksen vuoksi kalliita, eikä tuhka yleensä puhdistu täydellisesti. Myös raskasmetallikonsentraatti saattaa sisältää sen hyötykäyttöä rajoittavia aineita, kuten kadmiumia. (Wikman et al. 2003.)

2.3 Potentiaaliset hyötykäyttökohteet

Viime vuosina energiateollisuuden kivihiili-, turve- ja seospolton tuhkia on käytetty tie- ja kenttärakenteisiin sekä muihin maarakennuskohteisiin. Lisäksi niitä on hyödynnetty lannoitteena sekä betoni- ja sementtiteollisuuden raaka-aineena. Kivihiilituhkista on hyödynnetty 50–80 % vuodesta riippuen ja turpeen- ja seospolton tuhkista reilut 30 %. Massa- ja paperiteollisuuden tuhkien hyötykäyttöaste vuonna 2007 oli 65 %; kaatopaikkajätteistä tuhkia oli kuitenkin 33 % (79 000 t) (Metsäteollisuus ry 2008).

Tämän tutkimuksen tavoitteena on ollut tuhkan jalostaminen maarakennuskäyttöön, joten myös tässä luvussa keskitytään tuhkan käyttömahdollisuuksiin tie- ja katurakenteissa sekä meluvalleissa. Energiantuotannon tuhkille on olemassa myös muita hyötykäyttömahdollisuuksia. Kivihiilituhkia voidaan hyödyntää betonin valmistuksessa side- ja täyteaineena, mikäli lentotuhkastandardin SFS-EN 450-1 vaatimukset täyttyvät. Turve- ja puutuhkat voisivat soveltua myös betonin valmistukseen, mutta esimerkiksi kloridit ja rikkiyhdisteet rajoittavat käyttöä, ja polttoaineiden vaihtelusta johtuva tuhkan laatuvahtelu on kivihiilituhkia suurempaa. Kivihiilituhkia on hyödynnetty jo pitkään myös asfaltin täyteaineena. Puhtaat puutuhkat soveltuvat hyvin käytettäväksi metsälannoitteena suometsissä tai jopa peltolannoitteena, mikäli lannoiteasetuksen vaatimukset täyttyvät.

Tiet, kadut sekä piha- ja pysäköintialueet rakentuvat viidestä rakennekerroksesta. Jokaisella kerroksella on toiminnallinen tehtävä ja luokka, jotka vaikuttavat mitoittukseen ja materiaalivaatimuksiin. Mitoittavana tekijänä ovat kuormituskestävyys, routakestävyys tai geotekninen kantavuus. Rakenneosat asettavat käytetyille materiaaleille tietyt vaatimukset, kuten esimerkiksi riittävän kantavuuden tai tiivistysominaisuudet. Asianmukaisilla materiaali- ja rakenneratkaisuilla turvataan rakenneosien toimivuus ja kestävyys.

Päällysteen tehtävänä on toimia tasaisena ja kulumista kestävästä alustana liikenteelle sekä estää veden tunkeutuminen alempiin rakennekerroksiin. **Kantavan kerroksen** tulee kestää liikennekuormien aiheuttamat jännitykset ja muodonmuutokset sekä jakaa liikennekuormitus laajemmalle alueelle rakenteen alempiin kerroksiin. Lisäksi kerros muodostaa päällystekerrokselle tasaisen alustan sekä kuivattaa päällysteen läpi tulevan veden. **Jakava kerros** toimii kuormia jakavana kerroksena sekä lisää rakenteen kantavuutta ja routakestävyyttä. Lisäksi kerros johtaa pois päällysteen ja kantavan kerroksen läpi tulevan veden sekä toisaalta toimii kapillaarisen veden nousun katkaisijana. **Suodatinkerroksen**

tehtävänä on estää pohjamaan ja ylempien kerroksien sekoittuminen keskenään ja lisätä kantavuutta. Lisäksi kerros katkaisee kapillaarisen veden nousun yläpuolella oleviin rakennekerroksiin sekä vähentää roudan tunkeutumista alla oleviin kerroksiin. **Alusrakenne (pengertäyttö)** toimii tien tai kadun alusrakenteena, joka homogeenisuudellaan takaa mahdollisimman tasaiset routanousut sekä sulamisvaiheen siirtymät. (Mäkelä & Höynälä 2000.)

Lentotuhkaa voidaan käyttää sellaisenaan tierakenteen jakavassa tai alemmissä kerroksissa. Jakavassa kerroksessa käytettävän tuhkan tulee kuitenkin olla rakeisuudeltaan sellainen, että vaadittu routimattomuus ja vedenläpäisevyys saavutetaan. Materiaalilta edellytetään myös tiivistettävyyttä ja sulamisjäätymiskestävyyttä. Suodatinkerrokselta vaaditaan myös routimattomuutta, eikä kapillaarisen veden nousu saa ylittää sallittua arvoa. Suodatinkerroksessa tuhkaa voidaan käyttää kuivilla pohjamailla. Kosteilla ja heikoilla pohjamailla on syytä rakentaa kapillaarisen veden nousun katkaiseva suodatinkerros tuhkarakenteen alle. Lujittumatonta tai heikosti lujittuvaa kasavarastoitua tuhkaa voidaan käyttää pengertäytyessä varastointiajasta ja tuhkan ominaisuuksista riippuen. (Mäkelä & Höynälä 2000.)

Lentotuhkien käyttöä rajoittavat myös tuhkien aiheuttamat korroosioriskit. Haponkestävä teräs, lyijy, betoni ja useimmat muovit kestävät tuhkatäytössä, mutta valurauta, teräs ja alumiini syöpyvät voimakkaasti. Myös galvanoidut ja kuumasinkityt teräsrakenteet syöpyvät melko voimakkaasti tuhkassa. (Mäkelä & Höynälä 2000.)

Tiehallinto suosittelee turvetuhkaa käytettäväksi kokeilukohteissa ja kuivissa penkereissä, kun materiaalilta ei edellytetä routimattomuutta. Käytettävyys on selvitettävä tapauskohtaisesti. Metsäteollisuudesta saatavan puutuhkan laatu voi vaihdella, ja puutuhka voi kuivana olla reaktiivisempaa kuin kuiva kivihiihituhka. Metsäteollisuuden tuhkat soveltuvat käytettäväksi kuivissa penkereissä, kun materiaalilta ei edellytetä routimattomuutta. Kokeilukohteissa puutuhkien käytettävyys on selvitettävä ja arvioitava tapauskohtaisesti. (Tiehallinto 2007.)

UUMA-inventaarihankkeessa on kerätty tietoa tiekohteista, joiden peruskorjauksessa ja parantamisessa on käytetty lentotuhkaa. Rakenteet, joissa lentotuhkaa on käytetty jakavassa tai kantavassa kerroksessa, ovat yleensä toimineet teknisesti hyvin, eikä niistä ole koitunut ympäristöhaittoja. Kohteissa käytettävän tuhkan varastointiin ja säilytykseen on kuitenkin kiinnitettävä erityisesti huomiota, sillä kasavarastoituu tuhka voi menettää suuren osan aktiivisuudestaan, jolloin rakenteen kantavuus- ja lujuusominaisuudet saattavat jäädä huonoiksi. Joissakin vanhoissa kohteissa ongelmana on ollut lentotuhkarakenteen pinnan

2. Tuhkien hyödyntämisen toimintaympäristö

pehmeneminen. Tämä voidaan ratkaista sideainelisäyksellä, jolloin tuhkarakenteiden jäätymis-sulamiskestävyys paranee. Tuhkarakentamisessa on myös varmistuttava rakenteen riittävästä kallistumisesta, jotta rakenteen pinnalle kulkeutuva vesi pääsee poistumaan sivulle. Lentotuhkarakenteen alhainen vedenläpäisevyys saattaa muussa tapauksessa kerryttää vettä tuhkerakenteen pinnalle, mikä vähitellen aikaansaa pehmenemistä tai muita haittavaikutuksia. (Maijala 2008.)

Melu- ja maavallirakenteet muodostuvat kolmesta rakenneosasta. **Pintakerros** toimii kasvualustana sekä eroosiosuojana alemmille kerroksille. **Täyttö** eli rakenteen runko toimii päälle tulevien rakenteiden alusrakenteena. Täytön pitää säilyttää sulamisvaiheessa lujuutensa. Täytteen materiaalilta vaaditaan riittävää vakavuutta, jäätymis-sulamiskestävyttä ja vedenläpäisevyyttä. **Pohja- tai alusrakenne** tasaa rakenteen painumia sekä toimii alustana tuleville rakenteille. Pohjarakenteessa käytettävältä materiaalilta vaaditaan riittävää vakavuutta ja kantavuutta.

Melu- ja maavallirakenteiden pintakerroksiin voivat soveltua kivihiilen pohjatuhkat ja -kuonat sekä turvetuhkat sekoitettuna muuhun maa-ainekseen. Täytemateriaaliksi ja pohjarakenteisiin puolestaan voivat soveltua lujittuvat tai stabiloidut lentotuhkat. (Mäkelä & Höynälä 2000.)

3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus

Tässä luvussa kuvataan tutkimusprojektin aikana hankituille tuhkanäytteille suoritettut tutkimukset ja niistä saadut tulokset.

3.1 Esimerkkituhkat

Tutkimuksessa käytetyt esimerkkituhkat pyrittiin valitsemaan siten, että eri polttoaineet ja polttoainesuhteet olisivat hyvin edustettuina tutkimuksessa. Esimerkkilaitokset ja niiden polttoaineet näytteenottojaksoilla on esitetty taulukossa 5. Tulosten tarkastelussa on hyvä ottaa huomioon, että voimalaitoksen 1 tuhkia ei voida hyödyntää Valtioneuvoston asetuksen (Eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa) mukaisesti, koska voimalaitos käyttää kierrätyspolttoainetta. Hankkeessa oli tarkoitus tarkastella myös esimerkiksi sähkösuodattimen avulla tehtävän luokittelun mahdollisuuksia voimalaitoksella. Tämän vuoksi tuhkanäytteitä pyrittiin ottamaan sähkösuodattimen eri kentistä, mikäli se oli mahdollista. Lisäksi yhden voimalaitoksen osalta oli mahdollisuus vertailla sähkösuodattimella ja letkusuodattimella talteen otettuja lentotuhkia. Näytteenottoon kiinnitettiin erityisesti huomiota, ja kokoomanäytteitä varten tuhkia kerättiin kultakin voimalaitokselta vähintään kolmen päivän ajan, kolme kertaa vuorokaudessa.

3.2 Tutkimussuunnitelma

Kaikkien tuhkanäytteiden tutkimukset aloitettiin lähtötietojen kartoituksella ja alustavien karakterisointitutkimusten suorittamisella. Tulosten perusteella arvioitiin alustavasti hyötykäyttömahdollisuuksia ja mahdollisesti tarvittavia käsittelytekniikoita ympäristökelpoisuuden ja teknisen soveltuvuuden parantamiseksi. Myös tuhkien laatuvaihtelua arvioitiin. Tuotteistustutkimukset muodostuivat

3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus

kolmesta osasta: ympäristökelpoisuuden, teknisen soveltuvuuden ja ekotehokkuuden määrittämisestä.

Taulukko 5. Esimerkkituhkat ja voimalaitosten polttoaineet näytteenottojaksojen aikana.

Laitos	Kattilatyypin ja savukaasujen puhdistustekniikka	Polttoaineet ja näytteenoton ajankohta	Näytteenotto-paikka	Näyte-merkintä
Laitos 1a	Kiertoleiju Sähkösuodatin	Kuori ja hakkuutähteet 60 % Turve 20 % Bioliete REF 20 % 02/2007	Tuhkasiilo Sähkösuodattimen 1., 2. ja 3. kenttä	Puu-turve-REF-biolietetuhka 1 ESP1, ESP2 ja ESP3
Laitos 1b	Kerrosleiju Letkusuodatin	Kuori ja hakkuutähteet 60 % Turve 20 % Bioliete REF 20 % 02/2007	Tuhkasiilo	Puu-turve-REF-biolietetuhka 2
Laitos 2	Kerrosleiju Sähkösuodatin	Turve 69 % Puupolttoaineet 31 % 09/2007	Sähkösuodattimen 1. tuhkalähetin	Turve-puutuhka
		Puupolttoaineet 53 % Turve 47 % 05/2008	Sähkösuodattimen 1. tuhkalähetin	Puu-turvetuhka
Laitos 3	Pölypoltto Sähkösuodatin	Kivihiili 02/2008	Tuhkasiilo	Kivihiilituhka

3.2.1 Käsittelytekniikat

Ilmaluokittelu

Ilmaluokittelulla voidaan jakaa tuhkapartikkelit ominaispainon perusteella karkeaan ja hienoon jakeeseen. Tietyn kokoisen partikkelin luokittumiseen hienoon tai karkeaan jakeeseen voidaan vaikuttaa luokitinpyörän kierrosnopeutta säätämällä. Tutkimuksessa ilmaluokitteluun käytettiin VTT:n Hosokawa Alpine Type 100 AFG/ZPS/ATP -laitteistoa (kuva 1).



Kuva 1. Tutkimuksessa käytetty VTT:n ATP-ilmaluokittelulaitteisto.

Ikäännyttäminen

Standardiin ASTM D 5744 -96 perustuvassa kosteuskammiotestissä pyritään materiaalin kiihdytettyyn ikäännyttämiseen puhaltamalla näytepatjan läpi sykleissä vuoroin kuivaa ja kosteaa ilmaa. Standardin mukaisessa menettelyssä näyte huuhdellaan vedellä kerran viikossa ja näytepatjan läpi valunut huuhteluvesi analysoidaan. Tässä yhteydessä huuhteluja ei tehdä vaan ikääntymisen vaikutusta materiaalin liukoisuusominaisuuksiin arvioidaan kaksivaiheisilla ravistelutesteillä ennen ja jälkeen kosteuskammiokäsittelyjen.

3.2.2 Karakterisointitutkimukset

Esimerkkituhtkien karakterisoinnissa käytetyt menetelmät on esitetty taulukossa 6.

3. Esimerkkituhiin ominaisuudet ja jalostus

Taulukko 6. Tuhiin karakterisointitutkimuksissa käytetyt menetelmät.

Tutkimus	Menetelmä
Metallien kokonaispitoisuudet	<p>ICP-analyysi. Näytteiden esikäsitteily suoritettiin käyttämällä standardin SFS-EN 13656 mukaista happouuttoa (HF-HCl-HNO₃) ja mikroalouunihajotusta.</p> <p>Käytetyt määrittymenetelmät olivat</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ca, K, As, Ba, Cr, Cu, Pb, MO, V, Zn, Se, Sb: plasma-atomiemissiospektrometrisesti (ICP-AES) ▪ Cd: atomiabsorptiospektrometrisesti grafiittiuuniteknikalla (GFAAS). <p>Puolikvantitatiivinen röntgenfluoresenssianalyysi (XRF) suoritettiin Philips PW2404 röntgenspektrometrillä ja puolikvantitatiivisella SemiQ-ohjelmalla.</p> <p>Tutkimusnäytteistä määritettiin fluori (F) ja sitä raskaammat alkuaineet lukuun ottamatta jalokaasuja. Menetelmän määrittymen raja on tyypillisesti luokkaa 0,01 %.</p> <p>Laatuvaihtelua selvitetessä kokonaispitoisuudet mitattiin PANalyticalin Mini-Pal 4 analyysilaitteella ja -ohjelmalla Kvantitatiivinen EDXRF-analyysi (<i>Energy-dispersive X-ray fluorescence</i>). Standardien (ASTM, ISO ja DIN) vaatimusten mukaisella laitteella voidaan mitata kvantitatiivisesti alkuaineet natriumista uraaniin. Tässä tutkimuksessa analysoidut alkuaineet olivat K, Ca, V, Cr, Cu, Zn, As, Mo, Cd ja Ba. Kalibroinnissa käytettiin laitoksen 1 tuhiin suoritetuista ICP-analyysijä.</p>
Haitta-aineiden liukoisuus	<p>Kaksivaiheisessa CEN-ravistelutestissä (EN12457-3) kiinteää materiaalia ravistellaan kuusi tuntia ionivaihdetun veden kanssa siten, että L/S-suhde eli testissä käytettävän vesimäärän (L) suhde kiinteän materiaalin määrään (S) on 2. Ravistelun jälkeen näyte suodatetaan, minkä jälkeen kuivaamatonta materiaalia ravistellaan vielä 18 tuntia L/S-suhteessa 8. Kumulatiivinen L/S-suhde on 10. Suodoksista tutkitaan halutut parametrit.</p> <p>Liukoisuustestien suodokset analysoidiin seuraavasti:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ As-, Ba-, Cd-, Co-, Cr-, Cu-, Mo-, Ni-, Pb-, Sb-, Se-, V- ja Zn pitoisuudet plasmamassaspektrometrisesti (ICP-MS) tai plasma-atomiemissiospektrometrisesti (ICP-AES) ▪ Hg-pitoisuudet atomiabsorptiospektrometrisesti kylmähöyrymenetelmällä (CVAAS) tai atomifluoresenssispektrometrisesti (CV-AFS) ▪ Kloridi-, fluoridi- ja sulfaattipitoisuudet ionikromatografisesti (IC) ▪ DOC-pitoisuudet akkreditoitulla standardin SFS-EN1484:1997 mukaisella menetelmällä. <p>Läpivirtaustestissä (CEN/TS 14405) happamaksi tehtyä vettä (pH4) pumpataan alakautta tutkittavalla näytteellä pakattuun kolonniin ja kolonnin yläosasta kerätään vesifraktiot. Testin aikana kerätään seitsemän vesifraktiota kumulatiiviseen L/S suhteeseen 10. Testiaika riippuu konnissa käytetystä vesivirtauksesta, mutta sen tulee olla vähintään kuukausi.</p>
Palamattomien määrä	<p>Orgaanisen hiilen kokonaismäärä, TOC (SFS-EN 13137). Menetelmässä näyte poltetaan happivirrassa (1400 °C) ja poltossa muodostuneen hiilidioksidin pitoisuus määritetään IR-detektorilla. Ennen polttoa näyte hapotetaan fosforihapolla mahdollisen epäorgaanisen hiilen poistamiseksi.</p> <p>Hehkutushäviö, LOI. Näytettä hehkutetaan lämpötilassa 550 °C.</p>
Raekokojakauma	<p>Raekokojakauman mittaukseen käytettiin VTT:n Malvern 2600 C partikkelikokoanalysaattoria sekä muutaman näytteen mittauksessa Malvern Mastersizer 2000 -laitteistoa.</p>
pH-staattinen testisarja	<p>pH-olosuhteiden vaikutusta haitta-aineiden liukoisuuteen tutkittiin pH-staattisella testillä (prCEN/TS 14997). Testissä näytteen ja veden seoksen pH-arvo pidetään halutulla tasolla happo- tai emäslisäyksellä 48 tuntia automaattista titrauslaitteistoa käyttäen. Testissä pyritään lopulliseen L/S-suhteeseen 10, ja kokeen jälkeen seos suodatetaan ja suodoksesta tutkitaan halutut parametrit.</p>

3.2.3 Tekninen soveltuvuus

Maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus määritettiin Proctor-kokeella. Kapillaarisuus määritettiin SAHI-kapillarimetrillä.

Vedenläpäisevyyskokeessa näyte tehtiin 92 % Proctor-tiiviyteen optimivesipitoisuudessa. Kokeen alussa näytteiden annettiin kyllästyä alapäässä sijaitsevan huokoskiven kautta nostamalla vedenpintaa hitaasti portaittain näytteen yläpinnan tasolle.

Routanousukokeet suoritettiin ns. avoimina kokeina. Avoimessa kokeessa näytteellä on mahdollisuus saada lisävettä ulkopuolisesta vesilähteestä. Routanousukokeilla määritettiin segregaatiopotentiaalin suuruus, joka kuvaa materiaalin kykyä imeä vettä routarajalle routarajan ollessa paikallaan.

Sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet määritettiin laboratoriossa yksisondimenetelmällä (lämmönjohtavuustikku) (Kivikoski et al. 2001). Lämmönjohtavuuden mittausmenetelmä ja muut teknisen soveltuvuuden määrittämiseksi suoritettut laboratoriokokeet on kuvattu tarkemmin liitteessä E.

3.2.4 Ekotehokkuus

Hankkeessa arvioitiin puuta ja turvetta polttavien laitosten lentotuuhkien jalostuksen ja maarakennushyötykäytön ekotehokkuutta. Ekotehokkuus on yhdistelmä sanoista ekologinen tehokkuus. Sillä tarkoitetaan suhdelukua, jossa verrataan tuotteen tai palvelun tuottamiseksi ja kuluttamiseksi tarvittavia luonnonvaroja (materiaaleja ja energiaa) sekä aikaansaatuja (haitallisia) päästöjä ja jätteitä saatavaan hyötyyn eli tuote- tai palveluysikköön. Lyhyesti ekotehokkuus voidaan siis määrittellä panoksien ja hyötyjen suhteeksi. Ekotehokkaassa toiminnassa raaka-aineita, materiaaleja, energiaa ja teknologiaa käytetään mahdollisimman tehokkaasti ja tarkoituksenmukaisesti. Ekotehokkuuden toteutumista voidaan mitata erilaisilla tunnusluvuilla. Seurattavia parametreja voivat olla esimerkiksi raaka-aineiden ja energian käyttö suhteessa tuotantoon, päästöt, tuotteiden laadun paraneminen, hyvinvointi tai kaupallinen kilpailukyky. Seuranta voidaan toteuttaa monilla tasoilla, esimerkiksi kansainvälisesti, kansallisesti, teollisuusaloittain tai yrityskohtaisesti. (Rissa 2001.)

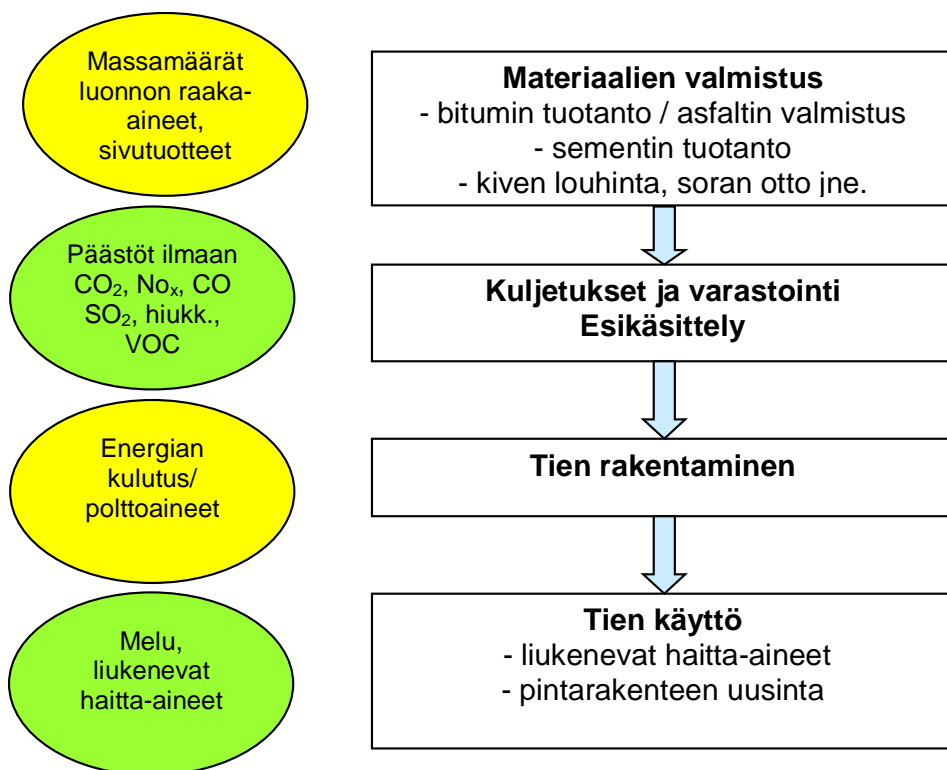
Tarkasteltavaksi tuhkan jalostusmenetelmäksi valittiin ilmaluokittelu. Ekotehokkuustarkastelu koostui ympäristökuormitusten ja kustannusten laskennasta. Laskelmien perustana käytettiin hankkeen esimerkkivoimalaitoksen tuhkan laatu- ja määrätietoja.

3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus

Ympäristökuormitusten laskennassa hyödynnettiin VTT:ssä kehitettyä Meli-ohjelmaa (Maarakentamisen elinkaariarviointi – Ympäristövaikutusten laskenta-ohjelma). Ohjelmalla voidaan nopeasti arvioida tierakentamisen elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset. Ohjelma soveltuu muun muassa suunnittelijoille rakenne- ja materiaalivaihtoehtojen vertailuun. Materiaalien tuottajat voivat ohjelman avulla toimittaa asiakkaille tiedot tuotteidensa käytön ympäristökuormituksista tai antaa vertailevia tietoja eri tuotevaihtoehtojen ympäristökuormituksista. Meli-ohjelma valmistui tutkimuksessa, johon VTT:n lisäksi osallistuivat Tielaitos, uusiomateriaalituottajat sekä rahoittajana Tekes.

Meli-ohjelma ottaa huomioon maarakenteiden elinkaaren aikana merkittävimmiksi arvioidut ympäristökuormitukset. Tarkasteltavia ympäristökuormituksia ovat raaka-aineiden käyttö, joka on jaettu luonnonmateriaalien ja uusiotuotteiden käyttöön, energian ja polttoaineiden käyttö, päästöt ilmaan (hiilidioksidi [ei hiilidioksidiekvivalenteja], typen oksidit, rikkidioksidi, hiukkaset, haihtuvat orgaaniset aineet ja hiilimonoksidi), maaperään liukenevat päästöt ja melu. Lisäksi esitetään kuljetusmatkat tarkasteltua rakennetta tai rakennosaa kohti. Ympäristökuormitustiedot voidaan tulostaa myös jaoteltuina materiaalien tuotannon, kuljetusten, rakentamisen ja rakenteen kunnostuksen ympäristökuormituksiin. Melissä huomioitavat elinkaaren vaiheet sekä ympäristökuormituslajit esitetään kuvassa 2. Tuhkien osalta lähtökohtana on, että niiden tuotantovaiheessa (energian tuotantoprosessissa) syntyviä kuormituksia ei lasketa mukaan tarkasteluun, koska tuhka syntyy prosessin jätteenä. Sen sijaan kaikki tuhkien jatkokäsittelyn ja jalostuksen kuormitukset ovat mukana. Meli-ohjelman tietopohja esitetään liitteessä A.

Tämän projektin ekotehokkuustarkasteluun valittiin vertailurakenteen (ei lentotuhkaa) lisäksi kolme rakennetta, joissa hyödynnetään lentotuhkaa eri rakennekerroksissa. Tierakenteen elinkaari-vaikutusten lisäksi huomioitiin tuhkan käsittelystä sekä ylijäämätuhkan kaatopaikkakuljetuksista aiheutuvat ympäristökuormitukset. Tuloksena saadut ympäristökuormitukset ovat yleisten elinkaari-laskennan rajoitusten vuoksi suuntaa antavia.



Kuva 2. Tierakenteen elinkaaren vaiheet sekä ympäristökuormituslajit Meli-ohjelmassa.

Kustannuslaskentaa tehtäessä huomioitiin tuhkan käsittelylaitteiston investointikustannukset poistoina sekä energiakustannukset, kuljetuskustannukset ja kaatopaikkakustannukset. Lentotuhkan kaatopaikkasijoituksen kustannusten määrittämisessä hyödynnettiin jätteenkäsittelykeskusten antamia tietoja. Laskelmat tehtiin kahdelle eri saantoskenaariolle, joissa oletettiin erisuuruinen saanto jalostetulle, hyötykäytettävälle tuhkalta. Vertailukohtana käytettiin kaatopaikkasijoitusta koko tuhkamäärälle.

3.3 Tuhkien ominaisuudet ja käsittelyn toimivuus

3.3.1 Tuhkien ympäristöominaisuudet

Tutkitut lentotuhkat vastasivat rakeisuudeltaan hienoa hiekkaa ja silttiä. Keskimääräiset partikkelikoot on esitetty taulukossa 7. Kivihiilituhkan partikkelikokojakaumaa ei määritetty.

3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus

Taulukko 7. Kokoomanäytteistä määritetyt keskimääräiset partikkelikoot lentotuhkanäytteille.

	D(v, 0,1), µm	D(v, 0,5), µm	D(v, 0,9), µm
Puu-turve-REF-biolietetuhka 1	6,4	46,8	248,0
Puu-turve-REF-biolietetuhka 1, ESP 1	5,9	33,3	184,7
Puu-turve-REF-biolietetuhka 1, ESP 2	4,9	22,1	104,0
Puu-turve-REF-biolietetuhka 1, ESP 3	3,0	11,9	70,0
Puu-turve-REF-biolietetuhka 2	7,6	88,7	364
Turve-puutuhka	6,2	30,8	151,6
Puu-turvetuhka	10,9	38,1	161,1

Taulukossa 8 on esitetty tutkittujen tuhkien kokonaispitoisuudet ja taulukossa 9 palamattomien määrät. Laajemmat koostumustiedot sekä XRF- ja ICP-menetelmien välinen vertailu on esitetty liitteessä B. Kyseisessä liitteessä on esitetty myös laitoksen 1a sähkösuodattimen eri kentistä otettujen tuhkanäytteiden kokonaispitoisuuksien vertailu. Esimerkkituhkien liukoisuustulokset on esitetty taulukossa 10 ja turve-puutuhkalle suoritettun pH-staattisen testisarjan tulokset kuvassa 3. Laajemmat tulokset liukoisuuskoikeista on esitetty liitteessä C.

Taulukko 8. Tutkittujen lentotuhkien koostumustietoja, analyysimenetelmänä ICP ja kivihiilituhkien osalta XRF. Tuhkanäytteiden esikäsitteily ICP-analysia varten suoritettiin standardin SFS-EN 13656 mukaisesti. Pitoisuudet on ilmoitettu yksikössä mg/kg kuiva-ainetta. Puu-turve-REF-bioliete- ja kivihiilituhkanäytteet on otettu tuhkasiilosta ja turvepuu- ja puu-turvetuhkanäytteet ensimmäiseltä tuhkalähtimeltä.

	Puu-turve-REF-biolietetuhka 1	Puu-turve-REF-biolietetuhka 2	Turve-puutuhka	Puu-turve-tuhka	Kivihiilituhka	Raja-arvo VNa 591/2006
As	56	45	50	110	<100	50
Ba*	920	1000	690	340	1800	3000
Cd	14	11	3,1	5,5	<100	15
Cr	230	200	68	110	200	400
Cu	1600	1000	130	250	100	400
Pb	520	420	85	200	<100	300
Mo	13	10	16	15	<100	50
V	84	70	700	120	200	400
Zn	1600	1500	130	1400	200	2000

* Huom. Ba:n saanto ICP:llä käytettäessä HF-HCl-HNO₃ -hajotusta: Validointitesteissä on havaittu, että Ba:n saanto esim. BCR 176 -tuhkasta on ollut vain 47–61 %.

3. Esimerkkituokien ominaisuudet ja jalostus

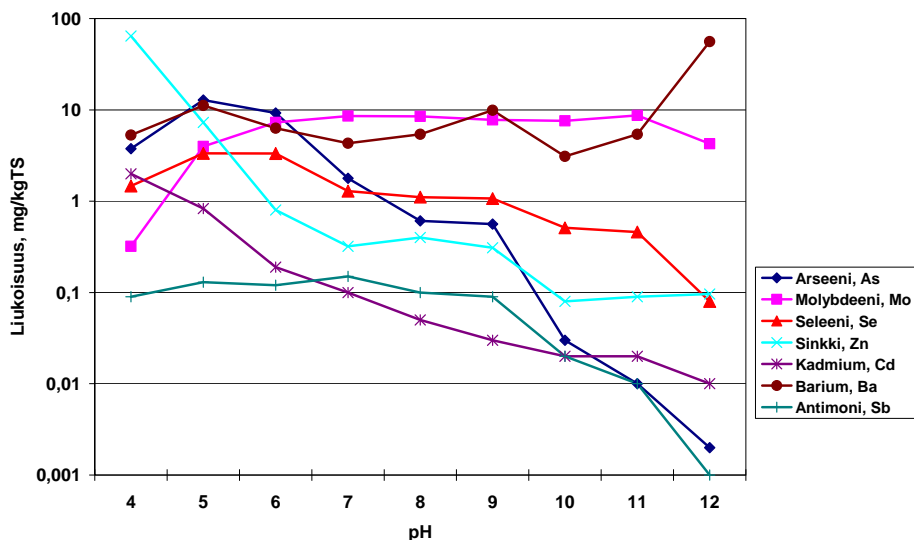
Taulukko 9. Palamattomien määrä tutkituissa lentotuhkanäytteissä.

Voimalaitos	TOC (%)	LOI (%)
Turve-puu-REF-biolietetuhka 1	1,9	2,80
Turve-puu-REF-biolietetuhka 2	0,67	0,14
Turve-puutuhka	1,0	
Puu-turvetuhka	0,45	
Kivihiilituhka		osanäytteissä 9,1–12,1

Taulukko 10. Tutkittujen lentotuhkien liukoisuudet kaksivaiheisella ravistelutestillä määritettynä, kumulatiivisessa L/S suhteessa 10. Kivihiilituhkan liukoisuus määritettiin myös läpivirtaustestillä. Liuenneiden aineiden pitoisuudet on ilmoitettu yksikössä mg/kg kuiva-ainetta.

	Puu- turve- REF- bioliete- tuhka 1	Puu- turve- REF- bioliete- tuhka 2	Turve- puu- tuhka	Puu- turve- tuhka	Kivihiilituhka		VNa 591/ 2006 peitetty	VNa 591/ 2006 päälly- tetty
					Ravis- telu- testi	Läpi- virtaus- testi		
Suo- doksen pH	12,3	12,6	12,6	12,8	11,4	10,8– 11,5		
Sb	0,01	0,01	<0,03	<0,02	0,22	0,07	0,06	0,18
As	<0,02	0,04	<0,01	<0,02	0,94	0,20	0,5	1,5
Ba	2,0	2,4	64	2,5	4,0	17	20	60
Cd	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04
Cr	6,2	3,6	0,36	3,7	0,34	0,02	0,5	3,0
Cu	0,10	0,53	0,02	<0,02	<0,01	0,03	2,0	6,0
Hg	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01	0,01
Pb	1,4	19	0,33	2,1	<0,01	<0,01	0,5	1,5
Mo	3,0	1,9	4,3	6,0	6,3	7,0	0,5	6,0
Ni	<0,03	<0,03	<0,01	0,09	0,02	0,02	0,4	1,2
V	0,05	0,01	<0,01	<0,01	2,9	2,6	2,0	3,0
Zn	1,1	2,4	0,17	0,92	0,02	0,05	4,0	12
Se	0,25	<0,1	0,22	0,54	0,64	0,27	0,1	0,5
F ⁻	27	31	18	16	39	18	10	50
SO ₄ ²⁻	13 900	14 700	3 418	12 630	1 200	970	1 000	10 000
Cl ⁻	2 800	7 900	653	1 750	<4,1	<5,2	800	2 400
DOC	27,8	26,30	15	<5,5	<6,6	<6,6	500	500

3. Esimerkkituuhkien ominaisuudet ja jalostus



Kuva 3. pH:n vaikutus eräiden aineiden liukoisuuteen turve-puutuhkanäytteestä. Tuhkan oma pH-arvo oli noin 12.

Mikään tutkituista tuhista ei sellaisenaan soveltunut maarakennuskäyttöön ilmoitusmenettelyllä. Laitoksen 1 kummankin kattilan tuhkissa kupari- ja lyijypitoisuudet ylittivät VNa 591/2006:n raja-arvot. Raja-arvot ylittyivät myös kaikissa sähkösuodattimen eri kentiltä otetuissa näytteissä. Tämän lisäksi sulfaatin, kloridin ja lyijyn liukoisuudet siilotuhkissa olivat yli asetuksen raja-arvojen. Korkeat haitta-ainepitoisuudet johtunevat kierrätyspolttoaineesta ja sen mahdollisesti sisältämästä kyllästetystä puusta. Sulfaatin suuri liukoisuus on yleensä tyypillistä kuorelle ja hakkuutähteille, etenkin niiden vihreälle osalle. Lyijyn liukoisuus on puolestaan herkkä tuhkan pH-arvolle. Mitä suurempi on puun osuus polttoaineista, sitä korkeampi on tuhkan pH-arvo.

Turve-puulentotuhka täytti lähes maarakennusasetuksen vaatimukset ensimmäisen näytteenottojakson (09/2007) perusteella. Kokonaispitoisuuksista arseni oli raja-arvolla, ja ainoastaan bariumin liukoisuus ylitti päällystetyn rakenteen raja-arvon. Sijoituspaiikalla mahdollisesti tapahtuvat pH-muutokset voivat vaikuttaa merkittävästi tuhkan käyttökelpoisuuteen. Suoritetun pH-staattisen testisarjan tulosten perusteella tuhkan puskurikapasiteetti on melko suuri, mutta esimerkiksi seleenin ja molybdeenin liukoisuudet kasvavat ympäristökelpoisuuden kannalta kriittisiksi jo pH-arvossa 11 materiaalin oman pH-arvon ollessa noin 12. Näin ollen erityisesti em. aineiden liukoisuuksien lisääntymistä voidaan pitää mahdollisena, mikäli tuhka on kosketuksissa happamien materiaalien tai suotovesien kanssa.

Käsittelykonseptin kehittämistä ja tuotteistustutkimuksia varten järjestettiin voimalaitoksella toinen tuhkanäytteenotto (05/2008). Toisella näytteenottojaksoilla polttoainesuhteet olivat muuttuneet ja laitoksella oli menossa puhtaan kiertäyspuun polttokokeilu. Puun suurempi osuus ja ilmeisesti kyllästetyn puun joutuminen kiertäyspuun joukkoon näkyivät tämän näytteenottojakson tuhkissa kohonneina arseeni-, kromi-, kupari- ja lyijypitoisuuksina. Kromin, lyijyn, seleenin ja sulfaatin liukoisuudet ylittivät päällystetyn rakenteen raja-arvot, seleenin liukoisuus jopa tavanomaisen epäorgaanisen jätteen kaatopaikkaraja-arvon. Turve-puutuhkan tuotteistaminen maarakennuskäyttöön nähtiin kuitenkin mahdolliseksi ja tutkimuksia päätettiin jatkaa käsittelykonseptin kehittämällä.

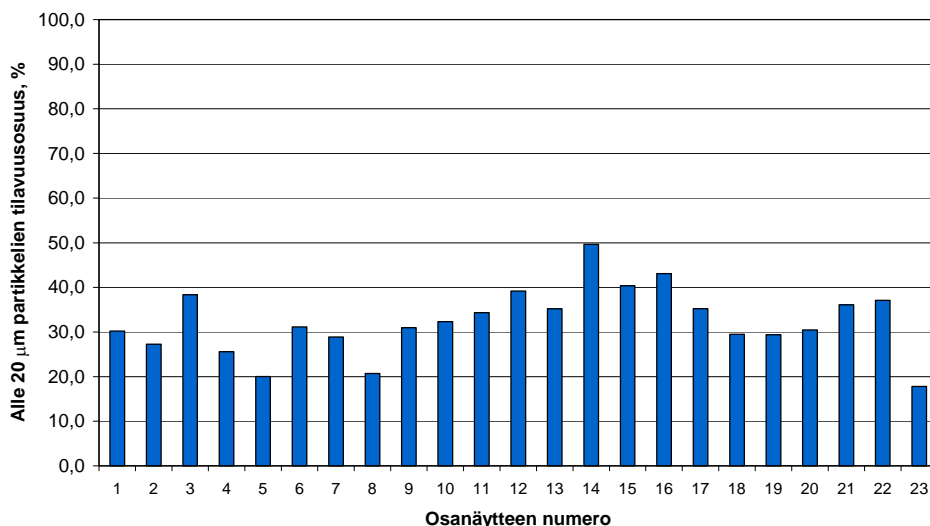
Kivihiilituhka oli kokonaispitoisuuksien osalta soveltuvaa maarakennuskäyttöön, mutta antimonin, molybdeenin ja seleenin liukoisuudet ylittivät päällystetyn rakenteen raja-arvot. Myös palamattoman aineksen määrä tuhkassa oli korkea. Antimonin ja seleenin korkeat liukoisuudet yllättivät, sillä nämä aineet eivät yleensä ole olleet kivihiilituhtien ongelma. Tulokset viittaavat siihen, että poltetun kivihiilen laatu ja alkuperä poikkeavat selvästi aiemmin tutkituista tuhkista. Tutkittu kivihiilituhka ei siis sovellu sellaisenaan maarakennuskäyttöön ilmoitusmenettelyllä. Tässä projektissa ei tutkittu kivihiilituhkan laadun parantamista jalostamalla.

3.3.2 Tuhkien laatu vaihtelun tutkimukset

Puu-turve-REF-biolietetuhtille 1 ja 2 laatu vaihtelua arvioitiin mittaamalla eräiden aineiden kokonaispitoisuuksia osanäytteistä XRF-menetelmällä. Puu-turve-REF-biolietetuhtien ongelma oli kuparin, kromin, arseenin ja lyijyn korkeat pitoisuudet. Pitoisuuksissa esiintyi jonkin verran vaihtelua eri päivinä otettujen osanäytteiden välillä. Yksikään tutkituista osanäytteistä ei kuitenkaan täyttänyt maarakennusasetuksen vaatimuksia, sillä kuparin pitoisuus ylitti kokonaispitoisuuden raja-arvon kaikissa näytteissä. Tulokset puu-turve-REF-biolietetuhtien laatu vaihtelututkimuksista on esitetty liitteessä D.

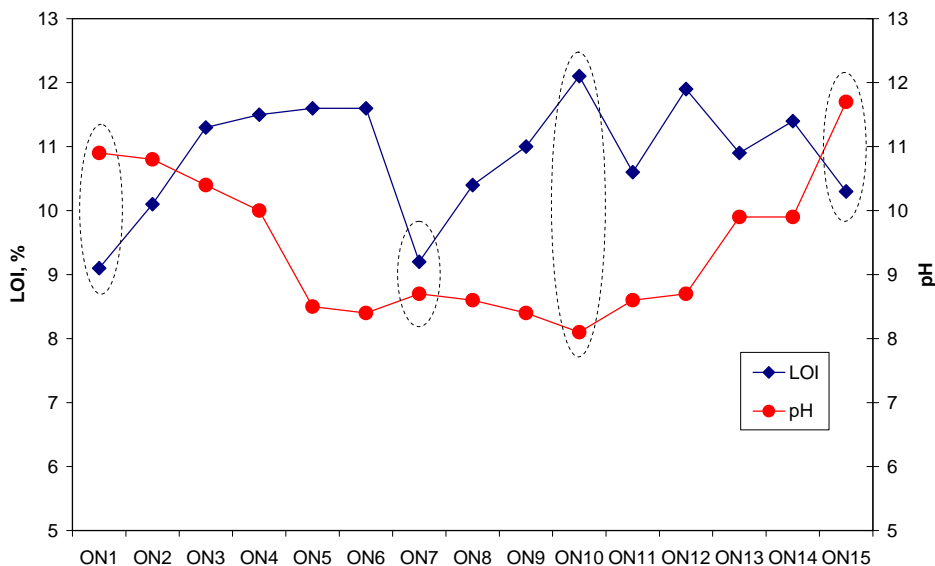
Puu-turvetuhkan laatu vaihtelua arvioitiin mittaamalla partikkelikokojakaumat osanäytteistä. Ympäristökelpoisuuden ja teknisen soveltuvuuden kannalta haitallisimpia ovat pienet, alle 20 μm :n partikkelit, joiden määrä eri osanäytteissä on esitetty kuvassa 4. Alle 20 μm :n partikkelien määrä vaihteli reilun viikon näytteenottojakson aikana 20–50 %:iin. Näin suuri vaihtelu pienten partikkelien määrässä aiheuttaa vaihtelua myös tuhkan jalostamiseen mahdollisesti käytettävän ilmaluokittelun karkean jakeen saannossa.

3. Esimerkkituhtkien ominaisuudet ja jalostus



Kuva 4. Pienten partikkelien osuus puu-turvetuhkan osanäytteissä. Näytteet otettiin kolme kertaa vuorokaudessa, kolmen vuorokauden ajan.

Kivihiilituhkan laatuvahtelua arvioitiin mittaamalla osanäytteiden LOI ja pH, joiden perusteella valittiin neljä osanäytettä liukoisuustestiin (kuva 5). Liukoisuustutkimusten tulokset on esitetty taulukossa 11.



Kuva 5. Palamattomien määrä ja pH kivihiilituhkan osanäytteissä. Osanäytteet 1, 7, 10 ja 15 valittiin liukoisuustutkimuksiin. Osanäytteet kerättiin voimalaitokselta yhdeksän vuorokauden aikana.

3. Esimerkkituhtien ominaisuudet ja jalostus

Taulukko 11. Kivihiilituhkan osanäytteiden liukoisuuksia kaksivaiheisella ravistelutestillä määritettynä, kumulatiivisessa L/S suhteessa 10. Liuenneiden aineiden pitoisuudet on ilmoitettu yksikössä mg/kg kuiva-ainetta.

	Osanäyte 1	Osanäyte 7	Osanäyte 10	Osanäyte 15	VNa 591/2006 peitetty	VNa 591/2006 päällystetty
pH	11,8	11,2	9,9	12,0		
Sb	0,14	0,27	0,28	0,04	0,06	0,18
As	0,48	2,4	3,0	0,18	0,5	1,5
Ba	9,7	1,8	1,5	9,7	20	60
Cd	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04
Cr	0,43	0,37	0,36	0,48	0,5	3,0
Cu	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	2,0	6,0
Hg	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01	0,01
Pb	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,5	1,5
Mo	6,1	5,9	5,9	5,1	0,5	6,0
Ni	0,02	0,01	<0,01	<0,01	0,4	1,2
V	1,4	5,2	5,3	0,5	2,0	3,0
Zn	0,04	0,03	0,02	0,03	4,0	12
Se	0,48	0,81	0,83	0,39	0,1	0,5
F ⁻	30	26	40	31	10	50
SO ₄ ²⁻	1 200	1 200	1 100	1 300	1 000	10 000
Cl ⁻	5	5	5	9	800	2 400
DOC	6	7	10	8	500	500

3.3.3 Käsittelyjen vaikutus tuhtien ominaisuuksiin

Puu-turve-REF-biolietetuhkien ympäristökelpoisuuden parantamiseksi suoritettiin esikokeita seulomalla ja ilmauokittelulla. Esikokeiden perusteella havaittiin, että kupari on tasaisesti jakautunut eri partikkelikokoluokkiin ja suurimpienkin partikkelien kuparipitoisuus ylittää maarakennusasetuksen raja-arvon moninkertaisesti. Kupari- ja lyijypitoisuudet olivat melko samanlaisia sähkösuodattimen eri kentistä otetuissa tuhtinäytteissä, joten sähkösuodatinluokittelua ei voida käyttää tämän tuhtien laadun parantamiseen. Yksinkertaisilla erotusmenetelmillä tuhka ei siis saada tuotetta maarakennuskäyttöön. Tuhtien kuparipitoisuuden alentaminen on mahdollista lähinnä kuumentamalla tai happopesulla, mikä ei tule olemaan taloudellisesti kannattavaa. Täten päätettiin laitoksen 1 tuhtien tutkiminen tässä hankkeessa lopettaa.

3. Esimerkkituuhkien ominaisuudet ja jalostus

Turve-puutuhkalle suoritettiin kaksi ikäännyttämiskoetta, joista toisen pituus oli noin kymmenen viikkoa ja toisen kaksikymmentä viikkoa. Vertailukohtana käytettiin kaksikymmentä viikkoa muovipussissa, huoneenlämmössä varastoitua tuhkaa. Tuhkien liukoisuudet ennen ja jälkeen ikäännyttämisen on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Kaksivaiheisten ravistelutestin (EN 12457-3) tulokset kumulatiivisessa L/S-suhteessa 10 tuoreelle ja ikäännyttetylle turve-puutuhkalle. Liuenneiden haitta-aineiden määrät on ilmoitettu yksikössä mg/kg kuiva-ainetta (TS) kohti.

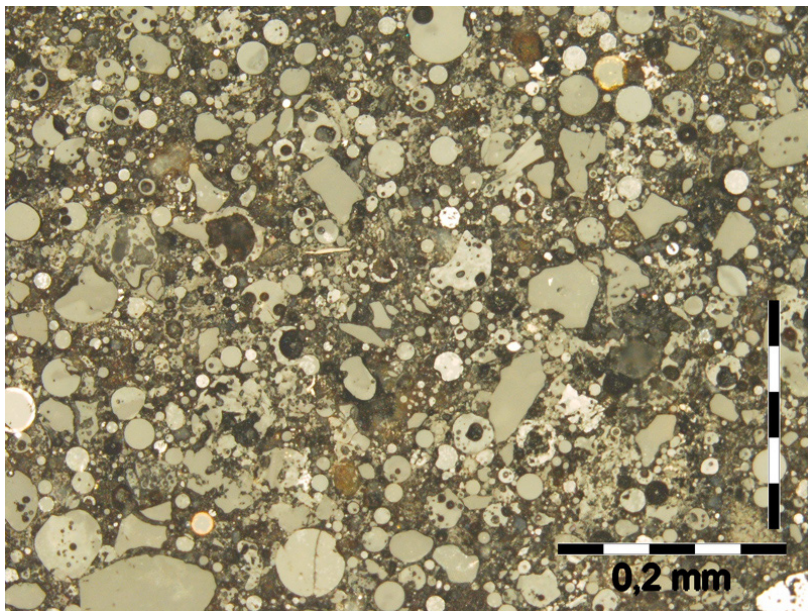
Näytteen tila	Tuore turvepuutuhka	Vanhennettu kosteuskammiossa * 10 viikkoa	Vanhennettu kosteuskammiossa * 20 viikkoa	Säilytetty muovipussissa huoneenlämmössä 20 viikkoa	VNa 591/2006 peitetty	VNa 591/2006 päällystetty
Suodoksen pH (L/S 8)	12,6	9,1	9,1	12,7		
As	<0,01	0,10	0,11	<0,01	0,5	1,5
Ba	64	0,75	0,73	15	20	60
Cd	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,04	0,04
Cr	0,36	0,45	0,11	0,71	0,5	3,0
Cu	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	2,0	6,0
Hg	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01	0,01
Mo	4,3	4,2	1,4	5,4	0,5	6,0
Ni	<0,02	0,02	0,05	0,12	0,4	1,2
Pb	0,33	<0,01	<0,01	0,40	0,5	1,5
Sb	<0,01	0,08	0,05	<0,01	0,06	0,18
Se	0,22	0,63	0,34	0,40	0,1	0,5
V	<0,01	0,14	0,13	<0,01	2,0	3,0
Zn	0,17	0,05	0,14	0,28	4,0	12
Al	1,1	6,8	2,7	0,43		
Cl ⁻	650	620	220	700	800	2 400
F ⁻	21	9,3	<10	19	10	50
SO ₄ ²⁻	3 400	12 000	9 700	3 600	1 000	10 000
DOC	15	27	24	12	500	500

* Kosteuskammioikäsitellyssä näyte pakattiin sylinterinmuotoiseen kammioon, jossa näytepatjan läpi johdettiin viikon mittaisissa sykleissä vuorotellen kuivaa ja vesikylläistä ilmaa.

Ikäännyttämisellä oli vaikutusta etenkin bariumin ja sulfaatin liukoisuuksiin. Kahdenkymmenen viikon ikäännyttämisen jälkeen turve-puutuhka täytti liukoisuuksien osalta maarakennusasetuksen vaatimukset päällystetylle rakenteelle.

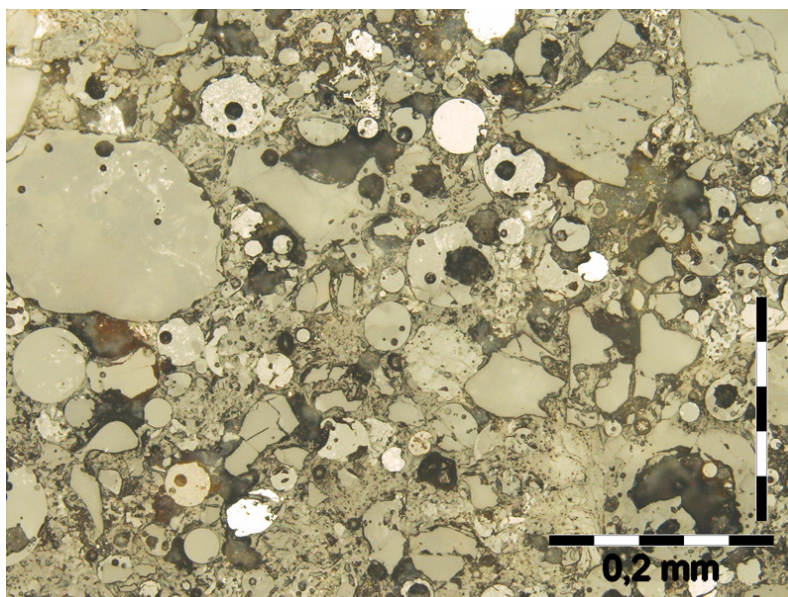
3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus

Turve-puu- ja puu-turvetuhkan ympäristö- ja teknisten ominaisuuksien parantamiseen käytettiin ilmaluokittelua. Turve-puu- ja puu-turvetuhkaa luokiteltiin useaan otteeseen, ja karkean jakeen saanto vaihteli eri luokituskerroilla 49–65 %:iin. Saantoon vaikuttivat todennäköisesti eniten erilaiset polttoainesuhteet voimalaitoksella ja tuhkien tuoreus. Luokittelussa käytettiin luokitinpyörän kierrosnopeutta 4 500 rpm, joka havaittiin hyväksi ensimmäisellä luokittelukerralla. Ilmaluokittelun parametreja ei optimoitu tutkimuksessa. Ilmaluokittelun vaikutus on selvästi nähtävissä kuvissa 6 ja 7 esitetyissä puu-turvetuhkan sekä kyseisestä tuhkasta luokitellun karkean jakeen mikroskooppivalokuvissa. Ilmaluokittelun vaikutus puu-turve- ja turve-puutuhkan partikkelikokojakaumaan on esitetty teknisten ominaisuuksien yhteydessä kappaleessa 3.3.4.



Kuva 6. Mikroskooppivalokuva puu-turvetuhkasta. Valokuvat on otettu CIRUn toimesta, kun tuhkia analysoitiin UUMA-ohjelman MINERALI-hankkeessa.

3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus



Kuva 7. Mikrokooppivalokuva ilmaluokitellun puu-turvetuhkan karkeasta jakeesta. Valokuvat on otettu CIRUn toimesta, kun tuhkia analysoitiin UUMA-ohjelman MINERALI-hankkeessa.

Taulukossa 13 on esitetty puu-turvetuhkasta luokitellun karkean jakeen kokonaispitoisuudet ja taulukossa 14 liukoisuudet. Laajemmat koostumus- ja liukoisuustiedot sekä turve-puutuhkan ilmaluokittelukokeiden tulokset on esitetty liitteissä B ja C.

Taulukko 13. Ilmaluokittelun vaikutus aineiden kokonaispitoisuuksiin puu-turvetuhkassa. Kokonaispitoisuudet on määritetty ICP-menetelmällä ja tulokset on esitetty yksikössä mg/kg kuiva-ainetta. Ilmaluokitteluun käytettiin VTT:n ilmaluokituslaitteistoa. Luokittelusta saatiin karkeaa jaeita 49 % alkuperäisen tuhkan määrästä.

Alku- aine	Puu-turvetuhka, käsit- telemätön	Ilmaluokitellun puu- turvetuhkan karkea jae	Raja-arvo Vna 591/2006
As	110	13	50
Ba*	340	680	3000
Cd	5,5	1,4	15
Cr	110	73	400
Cu	250	140	400
Pb	200	100	300
Mo	15	6,7	50
V	120	100	400
Zn	1400	460	2000

* Huom. Ba:n saanto ICP:llä käytettäessä HF-HCl-HNO₃-hajotusta: Validointitesteissä on havaittu, että Ba:n saanto esim. BCR 176 -tuhkasta on ollut vain 47–61 %.

3. Esimerkkituuhkien ominaisuudet ja jalostus

Taulukko 14. Ilmaluokitellun puu-turvetuhkan karkean jakeen liukoisuus kaksivaiheisella ravistelutestillä (EN 12457-3) määritettynä. Luokittelusta saatiin karkeaa jaetta 49 % alkuperäisen tuhkan määrästä. Liuenneiden haitta-aineiden määrät on ilmoitettu yksikössä mg/kg kuiva-ainetta (TS) kohti.

	Puu-turvetuhka, käsittelemätön	Ilmaluokitellun puu-turvetuhkan karkea jae	Raja-arvo VNa 591/2006 peitetty rakenne	Raja-arvo VNa 591/2006 päällystetty rakenne
Suodoksen pH	12,8	12,1		
Sb	<0,002	<0,001	0,06	0,18
As	<0,02	<0,01	0,5	1,5
Ba	2,5	5,2	20	60
Cd	0,01	0,003	0,04	0,04
Cr	3,7	0,76	0,5	3,0
Cu	<0,02	<0,03	2,0	6,0
Hg	<0,001	<0,001	0,01	0,01
Pb	2,1	1,7	0,5	1,5
Mo	6,0	1,7	0,5	6,0
Ni	0,1	0,02	0,4	1,2
V	<0,01	0,04	2,0	3,0
Zn	0,9	0,8	4,0	12
Se	0,54	<0,07	0,1	0,5
F ⁻	16	7,6	10	50
SO ₄ ²⁻	12 630	3 840	1 000	10 000
Cl ⁻	1 750	300	800	2 400

Haitallisten aineiden pitoisuudet ilmaluokitellun tuhkan karkeassa jakeessa olivat huomattavasti pienempiä kuin luokittelemattomassa tuhkassa. Esimerkiksi arseenipitoisuus oli laskenut lähes kymmenesosaan, ja maarakennusasetuksen raja-arvot alittuivat reilusti kaikilla aineilla. Kaksivaiheisessa ravistelutestissä liijyn liukoisuus karkeasta jakeesta ylitti edelleen päällystetyn rakenteen raja-arvon, joten karkea jae ei aivan täyttänyt asetuksen vaatimuksia. Saman voimailoksen ensimmäisen näytteenottojakson tuhkasta luokiteltu karkea jae oli sopivaa maarakennuskäyttöön asetuksen mukaisesti ilmoitusmenettelyllä.

Puu-turvetuhkan ja siitä luokitellun karkean jakeen mineralogiaa tutkittiin CIRUn (*Centre for Industrial Residue Utilization*) MINERALI-hankkeen yhteydessä. Tuhkanäytteille tehtiin analyysit XRD:lla ja mikroanalysaattorilla haitalliseksi havaittujen aineiden mineralogian ja tätä kautta liukoisuuden arvioimiseksi. Puu-turvetuhkan mineralogiasta saatiin jonkin verran tietoa, mutta liukoisuustestien perusteella kriittisiksi havaittujen aineiden mineralogiaa ei pystytty selvittämään.

3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus

tämään. Tämän arvellaan johtuvan haitta-aineiden melko pienistä pitoisuuksista, jolloin niiden muodostamia mineraaleja on vähän. Tästä johtuen mineraalit eivät erotu XRD-analyyseissä, ja elektronimikroskoopilla niitä on vaikea löytää. Lisäksi on mahdollista, että haitta-aineiden mineraalit ovat hyvin hienorakeisia, eikä niitä tämän vuoksi voida havaita SEM:llä tai analysoida mikroanalyysointilaitteilla. Kyseisiä menetelmiä ei siis voida käyttää tuhkien liukoisuuden arvioinnissa. Tutkittujen tuhkanäytteiden mineralogian on käsitelty tarkemmin CIRUn ja SYKEN MINERALI-projektin loppuraportissa. (CIRU 2009.)

Maarakennukseen tarkoitetun karkean jakeen lisäksi ilmaluokittelusta jää jäljelle hieno jae, johon tuhkan haitalliset aineet konsentroituvat. Turve-puutuhkan luokittelussa hienoa jaeetta syntyi 35–51 % alkuperäisen tuhkan määrästä. Mahdollista hienon jakeen hyötykäyttöä ja kaatopaikkakelpoisuutta arvioitiin kokonaispitoisuuksien ja liukoisuuksien määrittämisellä. Haitallisten aineiden liukoisuudet on esitetty taulukossa 15 ja kokonaispitoisuudet liitteessä B.

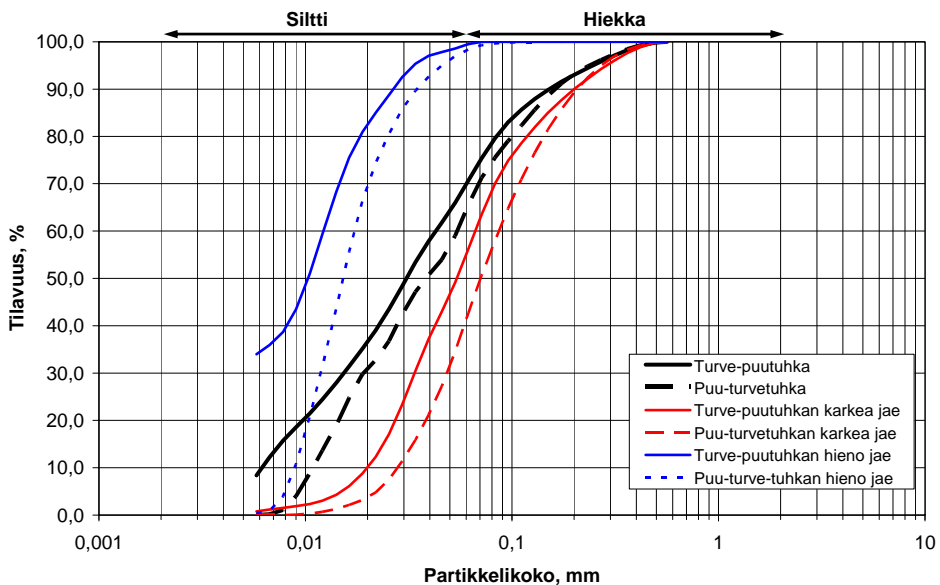
Taulukko 15. Laitoksen 2 puu-turvetuhkan (05/2008) ilmaluokittelun hienon jakeen liukoisuus ja kaatopaikkakelpoisuus. Hienoa jaeetta muodostui 51 % alkuperäisen tuhkan määrästä. Liukoisuudet on esitetty yksikössä mg/kg kuiva-ainetta.

Aine	Puu-turvetuhka, käsittelemätön	Ilmaluokitellun puu-turvetuhkan hieno jae	Raja-arvo, Tavanomaisen epäorgaanisen jätteen kaatopaikka, johon voidaan sijoittaa käsiteltyä ongelmajätettä
Sb	<0,002	<0,003	0,7
As	<0,02	<0,02	2
Ba	2,5	2,2	100
Cd	0,01	0,02	1
Cr	3,7	4,1	10
Cu	<0,02	<0,02	50
Hg	<0,001	<0,001	0,2
Pb	2,1	1,5	10
Mo	6,0	9,0	10
Ni	0,1	0,1	10
Zn	0,92	0,77	50
Se	0,54	0,95	0,5
F ⁻	16	16	150
SO ₄ ²⁻	12 630	17900	20 000
Cl ⁻	1750	3090	15 000

Seleenin liukoisuus hienosta jakeesta oli korkea, eikä ilmaluokittelun hieno tuhka-
 jae tämän vuoksi sovellu sijoitettavaksi tavanomaisen jätteen kaatopaikalle. Myös
 alkuperäisessä, käsittelemättömässä tuhassa seleenin liukoisuus ylitti kaatopaikka-
 raja-arvon. Saman voimalaitoksen ensimmäisellä näytteenottojaksolla kerätyn tuh-
 kan hieno jae ylitti kaatopaikkaraja-arvon bariumin liukoisuuden osalta.

3.3.4 Tekniset ominaisuudet

Turve-puutuhka vastasi partikkelikooltaan hienoa hiekkaa ja silttiä, kun taas
 puu-turvetuhka oli raekooltaan aavistuksen karkeampaa. Pienten, alle $20\ \mu\text{m}$:n,
 partikkelien osuus maarakennuskäyttöön ajatellussa tuhassa laski ilmaluokitte-
 lulla 30–40 %:sta 5–10 %:iin. Ilmaluokittelusta jäljelle jäänyt hieno jae vastasi
 rakeisuudeltaan silttiä ja 70–80 % partikkeleista oli kooltaan alle $20\ \mu\text{m}$. Partik-
 kelikokojakaumat on esitetty kuvassa 8. Rakeisuuskäyriin perustuvien routi-
 vuuskriteerien perusteella tutkitut tuhkat ovat routivia (Tammirinne et al. 1995).



Kuva 8. Turve-puu- ja puu-turvetuhkan sekä tuhista luokiteltujen karkean ja hienon jakeen partikkelikokojakaumat.

Teknisiä ominaisuuksia selvitettiin kolmelle eri tuhkanäytteelle, jotka olivat
 turve-puutuhka, turve-puutuhkan karkea jae ja puu-turvetuhkan karkea jae. Rou-
 tivuusmääritykset tehtiin turve-puutuhkalle ja turve-puutuhkan karkealle jakeel-

3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus

le. Muut seuraavassa esitetyt laboratoriokokeet tehtiin puu-turvetuhkan karkealle jakeelle. Yhteenvedo tutkittujen tuhkien teknisistä ominaisuuksista on esitetty taulukossa 16. Tarkemmat tiedot kokeista ja tuloksista on esitetty liitteessä E.

Taulukko 16. Yhteenvedo turve-puu- ja puu-turvetuhkalle sekä niistä ilmaluokitelluille karkeille jakeille suoritetuista teknisen soveltuvuuden tutkimuksista.

Ominaisuus	Tuhkanäyte	Tulos
Routivuus, segregaatiopotentiaali	Turve-puutuhka	SP = 1,0 mm ² /Kh
	Turve-puutuhkan karkea jae	SP = 0,5 mm ² /Kh
Proctor-koe: Maksimikuivatilavuuspaino Optimivesipitoisuus	Puu-turvetuhkan karkea jae	$\gamma_{dmax.} = 13,90 \text{ kN/m}^3$ $w_{opt.} = 22,4 \%$
Kapillaarisuus	Puu-turvetuhkan karkea jae	1,06–1,10 m
Vedenläpäisevyys	Puu-turvetuhkan karkea jae	Näyte 1 k = $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ Näyte 2 k = $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$
Lämmönjohtavuus	Puu-turvetuhkan karkea jae	Sula $\lambda = 0,80 \text{ W/mK}$ Jäätynyt $\lambda = 1,00 \text{ W/mK}$

Ilmaluokittelun vaikutus partikkelikokojakaumaan näkyi selvästi routanousukokeen tuloksissa. Segregaatiopotentiaalin (SP) suuruuteen perustuvan routivuusluokituksen perusteella turve-puutuhka oli lievästi routivaa ja turve-puutuhkasta luokiteltu karkea jae lievästi routivaa, lähes routimatonta. Kapillaarisuuteen perustuvan routivuskriteerin perusteella karkean jakeen havaittiin vastaavan lievästi routivaa materiaalia. Kirjallisuudessa esitettyihin kivihiili- ja turvetuhkan kapillaarisuuksiin verrattuna mitattu kapillaarisuus oli alhainen. Puu-turvetuhkasta erotettu karkea jae oli hyvin vettä läpäisevää, ja sen lämmönjohtavuus oli suurin piirtein sama kuin hiekalla. Lämmönjohtavuuden perusteella karkea jae ei ole hyvä eriste, joten kerrospaksuuksia ei voida tähän perustuen ohentaa.

Laboratoriotutkimusten perusteella turve-puutuhkan potentiaalisina käyttökohteina voidaan esittää erilaisia täyttöjä, kuten penkereitä, maa- ja meluvalleja,

maisemointeja sekä putkikaivantoja edellyttäen, että korroosioriski on poissuljettu. Rakennekerrosmateriaaliksi turve-puutuhka soveltuu suodatinkerrokseen kuivilla pohjamailla. Märillä pohjamailla suodatinkerroksen alle tarvitaan kapillaarikatko. Sideaineelle parannettuna mahdolliset käyttösovellukset laajenevat esimerkiksi jakavaan kerrokseen. Ilmaluokittelulla tuhkasta jalostetun karkean jakeen vedenläpäisevyys oli tutkimusten perusteella liian suuri tiivistemateriaaliksi.

3.4 Ekotehokkuuslaskelmat

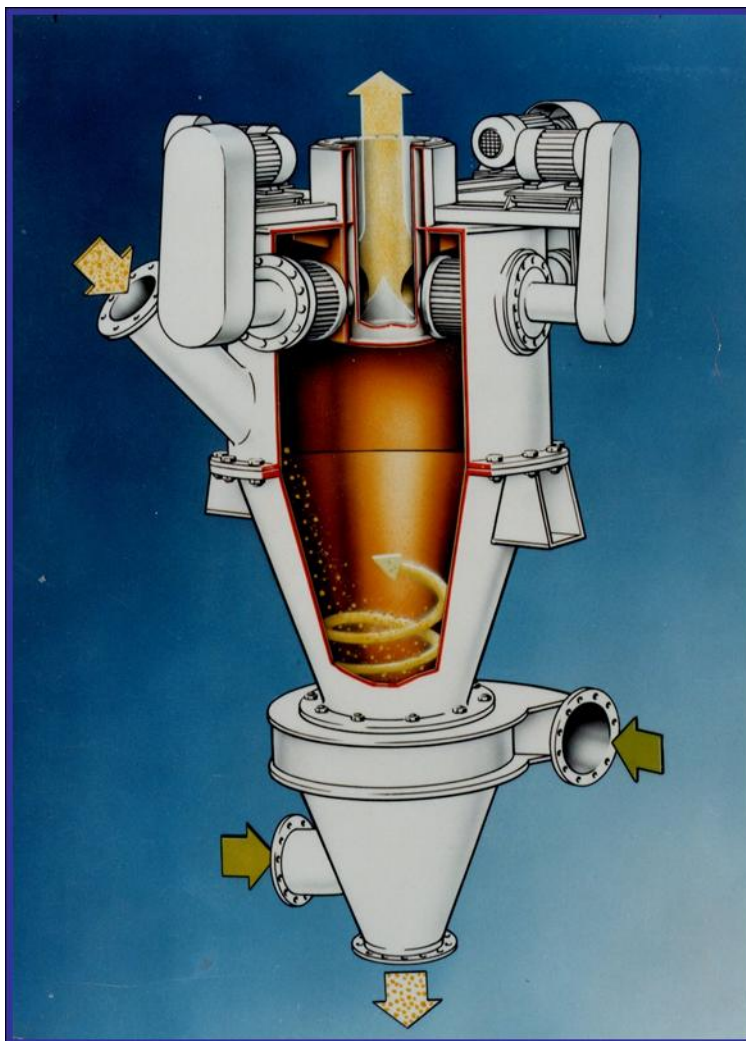
Puuta ja turvetta polttavien laitosten lentotuuhkien hyötykäyttömahdollisuuksia sekä hyötykäytön kustannustehokkuutta ja ympäristökuormituksia tarkasteltiin käyttäen pohjana hankkeen esimerkkivoimalaitoksen tuhkan laatu- ja määrätietoja. Laitos tuottaa lentotuhkaa noin 15 000 t/a. Koska laskelmat perustuvat ainoastaan yhden voimalaitoksen tuhkaa käyttäen tehtyyn tutkimukseen, ne ovat suuntaa antavia; yksityiskohtaiset laskelmat on tehtävä laitoskohtaisesti.

Tuhkan käsittelykonseptina laitoksella tarkasteltiin ilmaluokittelua. Luokittelu tapahtuu syklonilla, jossa karkea aines ja hienojae, alle 20 µm:n partikkelit, erottuvat toisistaan. Laboratoriomittakaavan luokituskokeissa karkean jakeen saannoksi on saatu 49–65 %. Täyden mittakaavan luokittimen mitoituksessa käytettiin seuraavia oletuksia:

- Koko muodostuva lentotuhkamäärä (15 000 t/a) luokitellaan.
- Luokittimen käyttöaika on 350 d/a, 24 h/d.

Soveltuva laitteisto on esimerkiksi Alpine Turboplex ATP 315, jonka rakenne esitetään kuvassa 9.

3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus



Kuva 9. Luokitinlaitteiston rakenne. Kuvan laitteistossa neljä luokitinpyörää. Tässä tarkastelussa laskelmat perustuvat yksipyöräisen luokittimen käyttöön.

3.4.1 Kustannustarkastelu

Turpeen ja puun poltossa syntyvän tuhkan luokittelun kannattavuutta tarkasteltiin kustannusarvion avulla. Vertailuun otettiin mukaan seuraavat kaksi saantoskenaariota:

3. Esimerkkituuhkien ominaisuudet ja jalostus

1. Luokittelussa syntyy karkeaa jaeetta 60 % (9 000 t/a) ja hienojaetta 40 % (6 000 t/a) tuhkan kokonaismäärästä.
2. Luokittelussa syntyy karkeaa jaeetta 80 % (12 000 t/a) ja hienojaetta 20 % (3 000 t/a) tuhkan kokonaismäärästä.

Luokittelun tuotteena saatava karkea aines soveltuu luokittelematonta lentotuhkaa paremmin maarakennuskäyttöön. Molemmissa skenaarioissa karkea jae käytetään kokonaisuudessaan tierakennukseen. Hienojae sijoitetaan kaatopaikalle sen ominaisuuksista riippuen joko tavanomaisena jätteenä tai ongelmajätteenä. Vertailukohtana tarkasteltiin koko tuhkamäärän kaatopaikkasijoitusta.

Alpine Turboplex ATP 315 -luokitinlaitteiston moottoriteho on valmistajan edustajan (IJP Oy) ilmoituksen mukaan noin 11 kW ja tarvittavan luokitusilmapuhaltimen teho noin 36 kW, joten esimerkkilaitoksen lentotuhkamäärällä energiankulutus on noin 26,30 kWh/t luokiteltavaa tuhkua. Laitteiston investointikustannus on noin 180 000 euroa. Energiamarkkinaviraston tilastojen perusteella sähkön maanlaajuinen keskimääräinen veroton (ei sisällä sähköveroja eikä alv-veroja) kokonaishinta keskiuudelle teollisuudelle (vuosikulutus 2 000 000 kWh) joulukuussa 2008 oli noin 7 snt/kWh (Energiamarkkinavirasto 2008). Luokittelun energiankulutuksesta syntyy näin ollen kustannuksia noin 27 600 €/a. Mikäli hienojae joudutaan loppusijoittamaan ongelmajätteenä, arvioidaan loppusijoituksen kustannuksen olevan noin 85 €/t. Kaatopaikkakelpoisen jätteen kaatopaikkamaksu puolestaan on noin 56 €/t, kun tuhka sijoitetaan voimalaitoksen ulkopuoliselle kaatopaikalle. Kaatopaikkamaksujen arvioinnissa käytettiin lähteenä neljältä eri jätteenkäsittelykeskukselta saatuja tietoja.

Käytettäessä tasapoisto- ja annuiteettimenetelmää (pitoaika 15 vuotta, korkokanta 6 %) investoinnin vuosikustannukseksi luokittimelle muodostuu 18 540 euroa. Hyötykäytettävästä jakeesta ei ole tässä tarkastelussa arvioitu saatavan tuottoa loppusijoituskohteessa. Mahdolliset tuotot lisäävät tuhkan luokittelun taloudellista kannattavuutta.

Kuljetuksien kustannukset riippuvat hyötykäyttökohteiden ja kaatopaikan sijainnista voimalaitokseen nähden. Sekä tuhkan kaatopaikkasijoitus että luokitellun tuhkan hyötykäyttö maarakennuksessa edellyttävät kuljettamista. Tosin luokitellun lentotuhkan tapauksessa voidaan olettaa vastaanottajan maksavan osan kuljetuskustannuksista, joten laskelmassa on käytetty pienempää arviota hyötykäytettävän jakeen kuljetuskustannuksille (4 €/t) kuin kaatopaikalle sijoitettavan jakeen kuljetuskustannuksille (8 €/t).

3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus

Edellä esitetyille karkean jakeen saantoskenaarioille saadaan taulukon 17 mukaiset vuotuiset kokonaiskustannukset (alv 0 %).

Taulukko 17. Vuotuiset kokonaiskustannukset eri skenaarioille. Hinnat ovat arvonlisäverottomia, sähköenergian hinta arvonlisäveroton ja sähköveroton.

	Saanto- skenaario 1	Saanto- skenaario 2	Kaatopaikka- sijoitus koko tuhkamäärälle
Investointikustannus (tasapoisto, annuiteetti, pitoaika 15 a, korkokanta 6 %)	18 540 €	18 540 €	
Energiankulutus	27 600 €	27 600 €	
Jättemaksut*, kun loppusijoitettava tuhka- ja on luokitukseltaan			
a. tavanomainen jäte n. 56 €/t	336 000 €	168 000 €	840 000 €
b. ongelmajäte n. 85 €/t	510 000 €	255 000 €	1 275 000 €
Kuljetukset 4–10 €/t (kuljetus hyötykäyttökohteeseen: 4 €/t, kuljetus kp-sijoitukseen: 8 €/t)	84 000 €	72 000 €	120 000 €
Tuotto loppusijoituskohteessa	0 €	0 €	
Yhteensä noin	466 000– 640 000 €	286 000– 373 000 €	960 000– 1 395 000 €

* Lentotuhkan kaatopaikkamaksujen määrittämisessä on tavanomaisen jätteen osalta hyödynnetty neljän eri jätteenkäsittelykeskuksen lentotuhkalle ilmoittamia maksuja, jotka ovat olleet voimassa 1.1.2009 alkaen (Pirkanmaan Jätehuolto Oy 2008, Mustankorkean jätteenkäsittelykeskus 2008, Kaunismäki 2008, Vuori 2008). Ongelmajätteen osalta vastaanottohinta on arvioitu.

Taulukon 17 kustannustarkastelun perusteella voidaan todeta, että molemmilla karkean jakeen saantoskenaarioilla tuhkan luokittelu on todennäköisesti taloudellisesti kannattavaa, mikäli vaihtoehtona on koko tuhkamäärän sijoittaminen kaatopaikalle. Tulevaisuudessa kaatopaikkamaksujen nousu tai muutokset tuhkan kaatopaikkasijoituksen verotuksessa voivat edelleen muuttaa tilannetta. On kuitenkin muistettava, että tehdyissä laskelmissa oletettiin koko karkean jakeen päätyvän hyötykäyttöön.

3.4.2 Ympäristökuormitusten tarkastelu

Puun ja turpeen poltossa syntyvän tuhkan hyötykäyttökonseptin ympäristökuormitusten tarkasteluun valittiin taulukossa 18 esitettävät tierakennevaihtoehdot, joissa karkeaa lentotuhkajaetta ja luokittelematonta lentotuhkaa on hyödynnetty eri tavoin. Kaikki vaihtoehdot ovat toteuttamiskelpoisia tierakenteita Keski-Suomen alueella.

Taulukko 18. Vertailtavat tierakenteet.

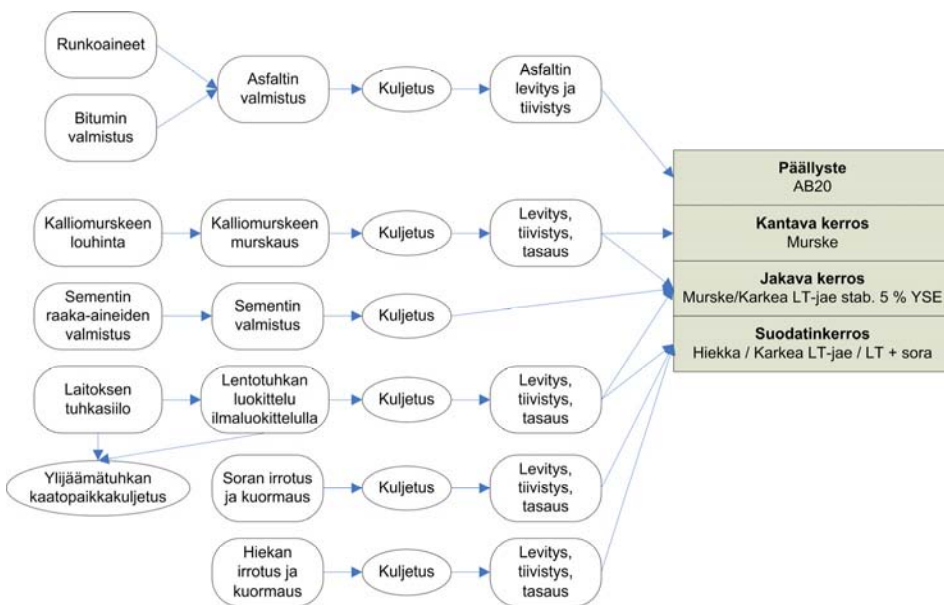
	Vertailurakenne		Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2		Vaihtoehto 3	
	Materiaali	Paksuus, m	Materiaali	Paksuus, m	Materiaali	Paksuus, m	Materiaali	Paksuus, m
Päällyste	AB20	0,05	AB20	0,05	AB20	0,05	AB20	0,05
Kantava kerros	Murske	0,2	Murske	0,2	Murske	0,2	Murske	0,2
Jakava kerros	Murske	0,3	Karkea LT-jae stab. 5 % YSE	0,3	Karkea LT-jae stab. 5 % YSE	0,3	Murske	0,3
Suodatinkerros	Hiekka	0,4	Karkea LT-jae	0,4	Luokittelematon LT-jae	0,4	Karkea LT-jae	0,4
					Sora	0,2		

Vertailurakenteena käytettiin tyypillistä tierakennettä ilman sivutuotekerroksia. Vaihtoehtoisissa rakenteissa lentotuhkan luokittelun karkeaa jaetta sementillä stabiloituna on käytetty jakavana kerroksena (vaihtoehdot 1 ja 2). Vaihtoehdossa 2 on lisäksi käytetty luokittelematonta lentotuhkaa suodatinkerroksessa yhdessä soran kanssa. Vaihtoehdoissa 1 ja 3 suodatinkerroksessa käytetään karkeaa lentotuhkajaetta ilman sementtistabilointia.

Ympäristökuormituslaskelmien tekemisessä hyödynnettiin VTT:ssä kehitettyä Meli-ohjelmaa (Maarakentamisen elinkaariarviointi – Ympäristövaikutusten laskenta-ohjelma). Ympäristökuormituslaskelmissa tarkastellun järjestelmän kuvaus esitetään kuvassa 10. Laskelmien perusyksikkönä oli tie, jonka pituus on 100 m ja leveys 8 m. Ympäristökuormitukset laskettiin tätä perusyksikköä kohti. Laskelmissa käytettiin kivihiihen lentotuhkan tiheyksiä ja massakertoimia sekä luokittelemattomalle lentotuhkalle.

3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus

Tierakenteiden elinkaarikuormitusten lisäksi ympäristökuormituksia aiheutuu myös ylijäävän hienojakeen kuljettamisesta kaatopaikalle, mikä on huomioitu laskelmassa. Sen sijaan kaatopaikan rakentamisen, käytön aikaiset ja sulkemisen jälkeiset ympäristökuormitukset on rajattu tämän tarkastelun ulkopuolelle. Kaatopaikan rakentamisen ja käytön aikaisia kuormituksia ovat muun muassa tuhka- ja suotoveden mukana ympäristöön kulkeutuvat liukenevat haitta-aineet, suotovesien käsittelyn energiankulutus ja päästöt sekä kaatopaikan maankäyttö. Myöskään tien käytön aikaisia ympäristökuormituksia, joita voi aiheutua rakenteen korjauksista, päällysteen uusinnasta, rakenteen kunnan vaikutuksista liikenteen päästöihin ja haitta-aineiden liukenemisestä käytön aikana, ei tarkasteltu tässä laskelmassa. Syynä tähän oli se, että käytännön kokemusten puutteen vuoksi ei tuhkien käytön mahdollista vaikutusta rakenteen kuntoon ja korjaustarpeeseen pystytty arvioimaan.



Kuva 10. Tierakennevaihtoehtojen elinkaariarvioinnissa käytetty rajaus.

Vertailtujen tierakenteiden rakentamisen aiheuttamiin kuormituksiin lisättiin tuhkan luokittelussa tierakenteen perusyksikköä kohti muodostuvan hienojakeen kaatopaikkakuljetuksien ympäristökuormitukset. Karkean, hyötykäytettävän jakeen saannoksi ilmaluokittelussa oletettiin ympäristökuormituslaskelmissa 60 % lu-

3. Esimerkkituhtien ominaisuudet ja jalostus

kiteltavan lentotuhkan kokonaismäärästä. Vertailurakenteen (luonnonmateriaali-rakenne) osalta oletettiin, että kaatopaikalle kuljetettaisiin koko se maksimituhkamäärä, joka vaihtoehtorakenteen 1 tuottamiseen tarvittaisiin. Taulukossa 19 esitetään yhteenvetona luokiteltavat, rakenteeseen sijoitettavat ja kaatopaikalle kuljetettavat lentotuhkamäärät eri tierakennevaihtoehdoissa

Taulukko 19. Lentotuhkamäärät vertailuissa tierakenteissa perusyksikköä kohti (LT = lentotuhka).

	Luokiteltava LT, t	Rakenteeseen sijoitettava LT (yht.), t	Rakenteeseen sijoitettava karkea jake, t	Rakenteeseen sijoitettava luokittelematon LT, t	Kaatopaikalle kuljetettava tuhkamäärä, t
Vertailurakenne	0	0	0	0	1 563
Vaihtoehtorakenne 1	1 563	938	938	0	625
Vaihtoehtorakenne 2	620	938	372	566	248
Vaihtoehtorakenne 3	943	566	566	0	377

Vaihtoehtoisina kuljetusmatkoina kaatopaikalle käytettiin 20 ja 50 kilometriä. Kuvista 11–13 nähdään erisuuruisten hienojakeen kaatopaikkakuljetusmatkojen vaikutus ympäristökuormitukseen.

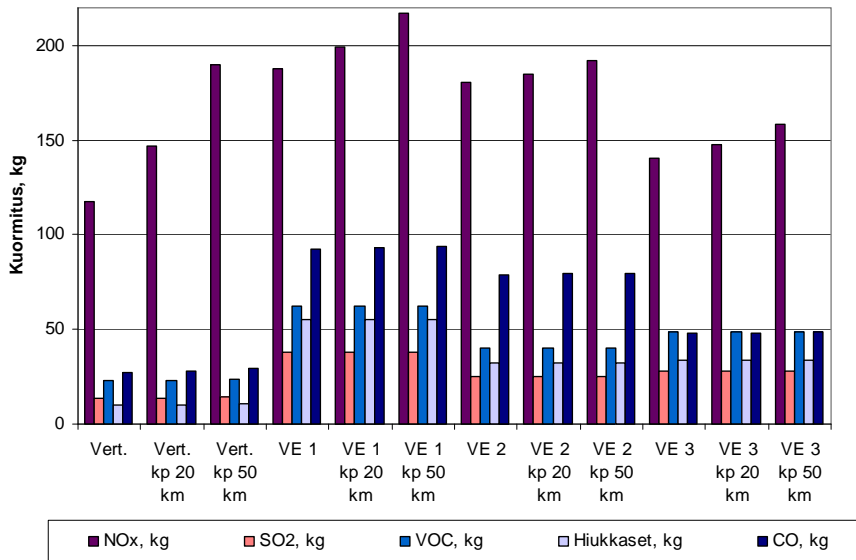
Yksi tarkasteltavista ympäristökuormituksista on energiankulutus. Tässä tarkastelussa energiankulutus koostuu pääosin työkoneiden ja kuljetuksen energiankäytöstä. Työssä on oletettu kaikkien työkoneiden ja kuljetusvälineiden toimivan dieselöljyllä, joten myös polttoaineenkulutus edustaa dieselöljyn käyttöä. Sähköenergiaa kuluu sementin ja asfaltin raaka-aineiden valmistuksessa sekä lentotuhkan ilmaluokittelussa. Luokittimen sähkönkulutuksen aiheuttamien ympäristökuormitusten laskennassa käytettiin Tattarin (2004) mukaisia päästökertoimia, ja laskelma tehtiin Meli-ohjelman ulkopuolella. Sähkönkulutuksen aiheuttamat kuormitukset ovat mukana kuvien 11–13 tiedoissa. Liukoisuustiedot jätettiin ympäristökuormituslaskelman ulkopuolelle. Tuhkamateriaalien liukoisuus- ja pitoisuustulokset sekä luokituksen vaikutus ominaisuuksiin esitetään luvuissa 3.3.2–3.3.3. Samassa yhteydessä käsitellään tulosten merkitystä tuhtien ympäristökelpoisuuden kannalta. Määrittelyissä käytetyt menetelmät esitetään luvussa 3.2.1.

Materiaalien kuljetusmatkoista käytettiin seuraavia oletuksia (kaikki maantieajoa):

3. Esimerkkituuhkien ominaisuudet ja jalostus

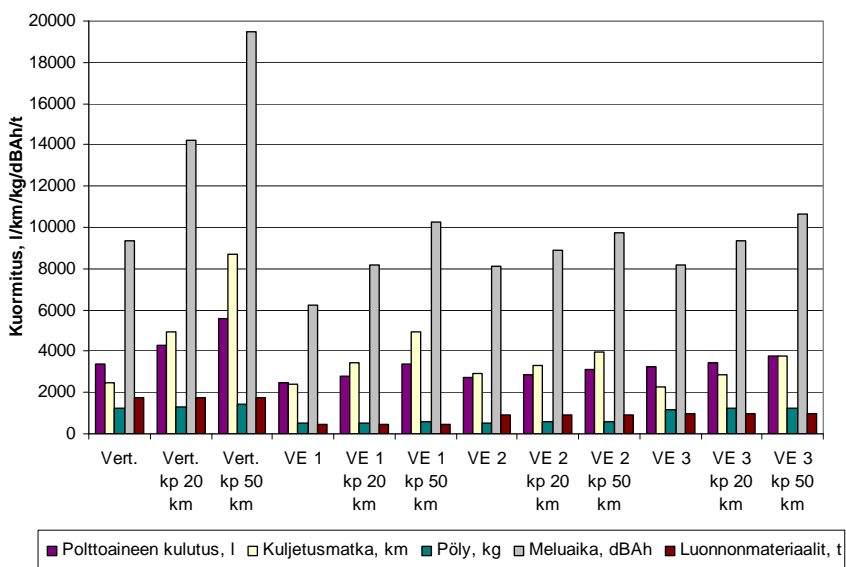
- AB20: 15 km
- murske: 15 km
- hiekka: 15 km
- lentotuhkat: 20 km.

Kuvissa 11–13 esitetään laskennan tuloksena saadut tierakenteiden ympäristökuormitukset laskennan perusyksikköä kohti (100 m pitkä ja 8 m leveä tie).

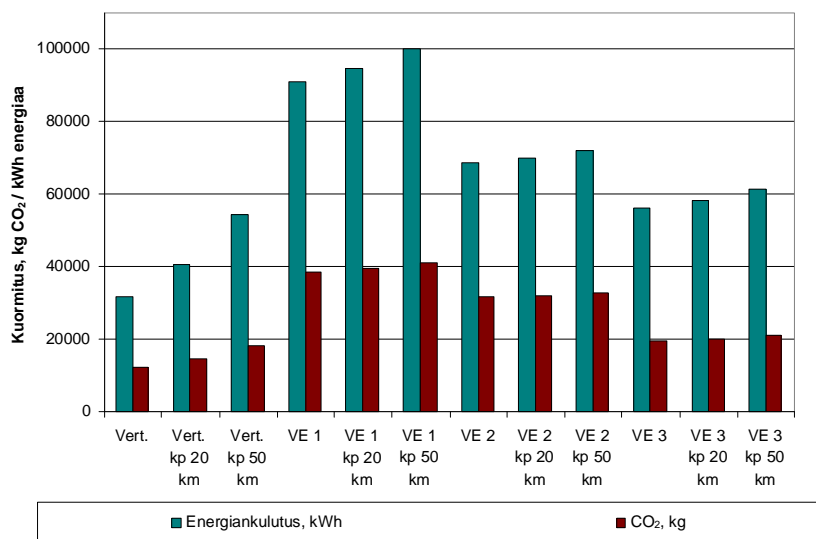


Kuva 11. Vertailurakenteen ja vaihtoehtoisten tierakenteiden laskennallisia ympäristökuormituksia. Vert. = Vertailurakenne, VE 1 = Vaihtoehtorakenne 1, VE 2 = Vaihtoehtorakenne 2, VE 3 = Vaihtoehtorakenne 3; Vert. kp 20 km = Vertailurakenne sisältäen ylijäämätuhkan kaatopaikkakuljetuksen 20 kilometrin päähän jne.

3. Esimerkkituhtien ominaisuudet ja jalostus



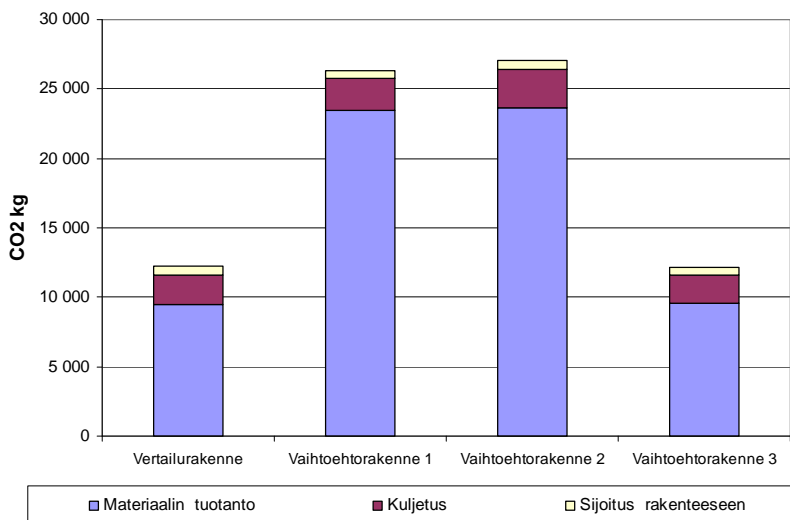
Kuva 12. Vertailurakenteen ja vaihtoehtoisten tierakenteiden laskennallisia ympäristökuormituksia. Huomaa eri kuormitusten yksiköt. Vert. = Vertailurakenne, VE 1 = Vaihtoehtorakenne 1, VE 2 = Vaihtoehtorakenne 2, VE 3 = Vaihtoehtorakenne 3; Vert. kp 20 km = Vertailurakenne sisältäen ylijäämätuhkan kaatopaikkakuljetuksen 20 kilometrin päähän jne.



Kuva 13. Vertailurakenteen ja vaihtoehtoisten tierakenteiden laskennallisia ympäristökuormituksia. Huomaa eri kuormitusten eri yksiköt. Vert. = Vertailurakenne, VE 1 = Vaihtoehtorakenne 1, VE 2 = Vaihtoehtorakenne 2, VE 3 = Vaihtoehtorakenne 3; Vert. kp 20 km = Vertailurakenne sisältäen ylijäämätuhkan kaatopaikkakuljetuksen 20 kilometrin päähän jne.

3. Esimerkkituhkien ominaisuudet ja jalostus

Rakenteiden hiilidioksidikuormitus eri elinkaarivaiheissa esitetään kuvassa 14. Muut ympäristökuormitukset elinkaarivaiheittain esitetään liitteessä F.



Kuva 14. Vertailurakenteen ja vaihtoehtoisten tierakenteiden laskennallinen hiilidioksidikuormitus eri elinkaarivaiheissa.

Vaihtoehdoissa 1 ja 2 lentotuhkaa sijoitetaan esimerkkirakenteeseen noin 940 t ja vaihtoehdossa 3 noin 560 t (taulukko 18). Kuvien 11–14 perusteella voidaan eri vaihtoehtojen ympäristökuormituksista todeta seuraavaa:

- Vaihtoehdoissa 1 ja 2, joissa lentotuhka on stabiloitu sementillä, energiankulutus sekä hiilidioksidi- ja hiilimonoksidipäästöt ovat selvästi suuremmat kuin vertailurakenteessa ja vaihtoehdossa 3. Suuremmat päästöt aiheutuvat materiaalin sisältämän sementin tuotannossa syntyneistä päästöistä.
- Luonnonmateriaalien kulutus ja pölypäästöt ovat suurimpia vaihtoehdossa 3 ja vertailurakenteessa.
- Kaikissa rakennevaihtoehdoissa materiaalin tuotanto kuormittaa tarkastelluista elinkaaren vaiheista eniten ympäristöä. Kaatopaikkakuljetusten huomioon ottaminen ja matkan piteneminen nostavat ympäristökuormituksia (NO_x- ja CO₂-päästöjä, polttoaineen kulutusta, kuljetusmatkaa, meluaikaa ja energiankulutusta) jyrkimmin vertailurakenteessa, jossa kaatopaikalle kuljetettavaa materiaalia on eniten (taulukko 18).

3. Esimerkkituuhkien ominaisuudet ja jalostus

- Vaihtoehtorakenteista vaihtoehdossa 1 kuormitukset kasvavat eniten kaatopaikkamatkan pidetessä. Vaihtoehdossa 1 kaatopaikalle kuljetetaan enemmän materiaalia kuin vaihtoehdoissa 2 ja 3 (taulukko 18).
- Mikäli kaatopaikkakuljetuksia ei huomioida, vaihtoehtorakenteiden 1 ja 2 välillä kuormituksissa on eroja lähinnä kuljetusvaiheessa, jossa vaihtoehtorakenteen 2 päästöt ovat pääsääntöisesti suuremmat kuin vaihtoehtorakenteen 1 (kuva 14 ja liite F).
- Vertailurakenteen sekä vaihtoehtorakenteen 3 kuormitukset ovat kuljetusten osalta tarkasteltuna jonkin verran matalampia kuin rakenteiden 1 ja 2.

Tarkasteltaessa edellä esitettyjä ympäristökuormituslaskelmia tulee ottaa huomioon elinkaarilaskelmien yleiset epävarmuustekijät. Valitut lähtötiedot ja rajaukset vaikuttavat lopputulokseen hyvin paljon, ja yleistysten tekemistä tuloksien pohjalta tulee välttää. Esimerkiksi tässä työssä jouduttiin laskelmissa käyttämään kivihiilen lentotuhkan fysikaalisia ominaisuuksia sekä luokitetulle että luokittelemattomalle puu-turvetuhkalle, sillä puu-turvetuhkan vastaavia ominaisuuksia ei ollut käytettävissä. Tämänkaltaisten tekijöiden vuoksi ympäristökuormituslaskelman tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina.

4. Tuhkien tuotteistamismahdollisuudet

4.1 Tuotteistamisen lähtökohdat

Jätteen tuotteistamisella tarkoitetaan menettelyä, jolla kierrätys- tai uusiomateriaaleilta pystytään poistamaan jätestatus. Tuotteistamisena voidaan pitää myös muita toimenpiteitä, joilla jätteen hyödyntämistä helpotetaan siten, että se voidaan hyödyntää tuotteenomaisesti.

Tuotteistamisen tavoitteena on lisätä uusiomateriaalien hyötykäyttöä poistamalla hyötykäytön esteitä sekä parantamalla uusiomateriaalien laatua ja käyttäjien tietoutta uusiomateriaalien tarjoamista mahdollisuuksista. Jätteiden maarakenuskäytössä merkittävimpiä hyötykäytön esteitä ovat muun muassa

- jätteiden hyötykäytön edellyttämä ympäristölupamenettely, erityisesti lupamenettelyn kesto, joka vaikeuttaa kilpailua lyhyellä varoitusajalla saatavissa olevien luonnonmateriaalien kanssa
- *jäte*-nimityksen aiheuttama mielikuva ympäristölle ja terveydelle haitallisesta huonolaatuisesta materiaalista, vaikka jätteeksi määritellään mikä tahansa käytöstä poistettu tuote tai materiaali haitallisuudesta ja laadusta riippumatta
- materiaalin laatu, jonka parantamista ei pidetä taloudellisesti kannattavana tai mahdollisena
- käyttäjien puutteellinen tietous materiaalin saatavuudesta ja ominaisuuksista
- hankintakäytännöt.

EY-lainsäädännössä ei aikaisemmin ole esitetty selkeää tuotteistamismenettelyä, mutta lainsäädäntö on tarjonnut mahdollisuuden menettelyihin, jotka käytännössä voidaan tulkita tuotteistamiseksi. Komission tiedonannossa jätteistä ja sivutuotteista (KOM(2007) 59 lopullinen) esitettiin käsitteet *jäännöstuote* ja *sivutuote*

sekä kaavio, jonka avulla sivutuotteet voidaan erottaa jätteistä (UUMA-katsaus 2008). Sivutuote on tuotettu osana jatkuvaa tuotantoprosessia, sen käyttö on varmaa eikä se tarvitse jatkojalostusta. Tulkinta perustuu EY-tuomioistuimen ratkaisuihin. Suomessa KHO on antanut vuonna 2005 ennakkoratkaisun ferrokromikuonien jättestatuksesta.

Hyötykäyttöä voidaan helpottaa myös vapauttamalla tietyt materiaalit lupamenettelystä erillisellä säädöksellä. Luvan korvaa tällöin kevyt ilmoitusmenettely. Tätä mahdollisuutta on käytetty sekä Suomessa (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa, ns. Mara-asetus, 591/2006) että useissa muissa Euroopan maissa. Tämän ratkaisun ongelmaksi on nähty muun muassa hyötykäyttökriteerien vaihtelu maiden välillä.

Vuonna 2008 hyväksytyt ja joulukuussa 2008 voimaan tulleet EY:n uusi jätepuitedirektiivi (2008/98/EY) tuo jätelainsäädäntöön uusia käsitteitä, *End of Waste* -menettelyn (EOW) ja sivutuotekäsitteen. Direktiivi on saatettava voimaan jäsenmaissa 12.12.2010 mennessä.

Jätedirektiivissä esitetään edellytykset, joiden perusteella materiaali voidaan luokitella sivutuotteeksi. Sivutuotekriteerit vastaavat pääosin edellä esitettyjä jäännöstuotekriteerejä. Tuhkia ei todennäköisesti voida luokitella sivutuotteeksi.

Direktiivin artiklan 6 jätteeksi luokittelun päättymisestä (EOW) mukaan tietyt jätteet lakkaavat olemasta jätteitä, kun ne ovat käyneet läpi hyödyntämistoimen kierrätystoimet mukaan lukien ja ovat seuraavien edellytysten perusteella laadittujen arviointiperusteiden mukaiset:

- Ainetta tai esinettä käytetään yleisesti tiettyyn tarkoitukseen.
- Aineelle tai esineelle on olemassa markkinat tai kysyntää.
- Aine tai esine täyttää tiettyjen tarkoitusten mukaiset tekniset vaatimukset ja on tuotteisiin sovellettavien olemassa olevien säännösten ja standardien mukainen.
- Aineen tai esineen käytöstä ei aiheudu haitallisia kokonaisvaikutuksia ympäristölle ja terveydelle.

EU-tasolla EOW-kriteerit annettaisiin käytännössä vain muutamille jättemateriaalille. Näihin voisivat kuulua myös eräät tuhkut ja kuonat (UUMA-katsaus 2008). Lisäksi jäsenmaat voisivat yhteisötason kriteerien puuttuessa tehdä tapauskohtaisia ratkaisuja, jotka olisi ennakoilmoitettava komissiolle.

4. Tuhkien tuotteistamismahdollisuudet

EU:n *Joint Research Centre* on tehnyt EOW-metodologiaa koskevan taustaselvityksen, jossa tarkastellaan pilotteina aggregaatteja (mineraaliset kiviainesta vastaavat materiaalit), kompostia ja romumetalleja (JRC 2008, Catarino 2008). Aggregaatit sisältävät rakennus- ja purkujätteen, rauta- ja teräskuonat sekä kivihiilen polton tuhkat. Ensimmäisten EOW-kriteerien toivotaan olevan käytettävissä samoihin aikoihin, kun uuden direktiivin on oltava kansallisesti toimeenpantu (UUMA-katsaus 2008).

4.2 Tuhkien tuotteistamisen erityispiirteet

Turpeen, puun ja kivihiilen polton tuhkat kuuluvat Mara-asetuksen soveltamisalaan. Näin ollen niitä on mahdollista hyötykäyttää asetuksen määrittelemissä kohteissa ilmoitusmenettelyn nojalla. Käytännössä kuitenkin vain osa tuhkista/käyttökohteista täyttää asetuksen vaatimukset. Tuhkia, jotka eivät sovellu asetuksen mukaiseen käyttöön, voidaan käyttää luvanvaraisina. EOW-menettelyn tuskin voidaan odottaa lieventävän ympäristökelpoisuusvaatimuksia Mara-asetuksessa esitetyistä. Koska tuotteiden käyttö ei ole samanlaisen viranomaisvalvonnan alaista kuin jätteen hyödyntäminen, tuotteen on oltava turvallinen kaikissa osoitetuissa käyttökohteissa.

Asetuksen taustamuistiossa esitettyä kuvausta jätteen soveltuvuuden osoittamiseksi tarvittavasta tietopohjasta sekä tietojen ja käyttökokemusten hankintaprosessin vaiheista voidaan pitää kuvauksena prosessista, jossa jätteestä kehitetään tuote. Tuotekehitysprosessin läpikäynti sinänsä ei vielä takaa, että materiaali täyttää myös tuotteelle asetettavat kriteerit eli tässä tapauksessa tuhkatuotteille mahdollisesti laadittavat EOW-kriteerit. Tuhkien tuotteistamiseen liittyykin haasteita, jotka eivät ole seurausta jätelainsäädännöstä vaan ensi sijassa materiaalin ja sen tuotantoprosessin luonteesta.

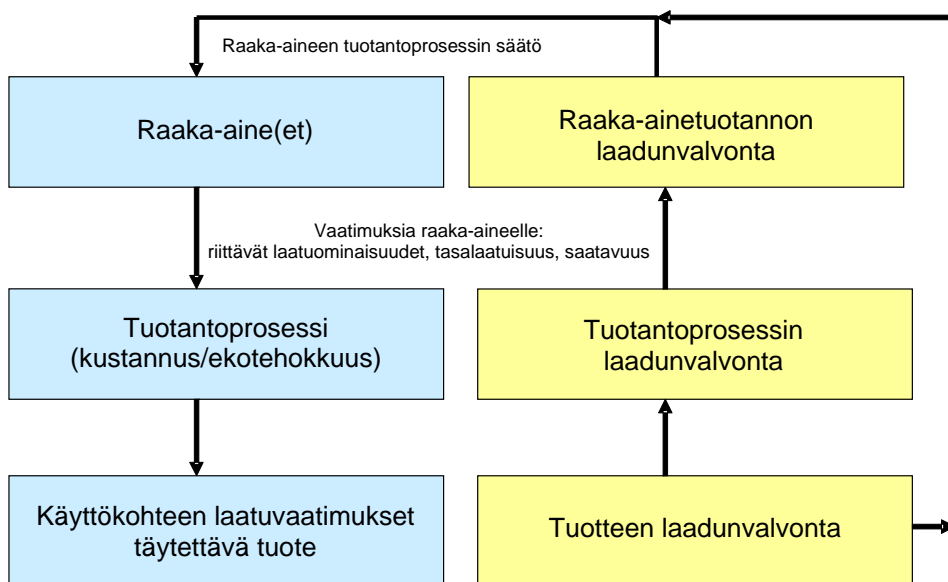
Vaikka tuhkista usein puhutaankin yhtenä tuoteryhmänä, kyseessä ei ole yksi yhtenäinen tuote, vaan useiden tuottajien erilaisista raaka-aineista erilaisissa prosesseissa tuottama joukko tuhkatuotteita. Samallakin polttolaitoksella syntyy useita tuhkia (lento- ja pohjatuhkat, ym.). Lisäksi polttoainejakauma ja polttoprosessi vaikuttavat voimakkaasti tuhkan tekniseen ja ympäristölaatuun. Siksi laitosten välisen vaihtelun lisäksi tuhkan laatu vaihtelee samallakin laitoksella. Biopolttainoiden käytön lisääntyessä polttoainevalikoima ja tämän mukana tuhkien laatu vaihtelu todennäköisesti kasvaa entisestään.

Tuotteen laatuun voitaisiin periaatteessa vaikuttaa myös ohjaamalla tuotantoprosessia ja vaikuttamalla sen raaka-aineiden laatuun, kuten yleensä päätuotteiden tuotantoprosessissa tapahtuukin (Kuva 15). Voimalaitoksilla tuhka on kuitenkin

ensisijaisesti energiantuotannon sivuvirta, jonka laadun parantamista prosessiin vaikuttamalla ei toistaiseksi ole katsottu kannattavaksi.

Maarakentaminen on merkittävä mutta ei ainoa tuhkien käyttökohde. Muita mahdollisuuksia ovat esimerkiksi käyttö sementin lisäaineena tai lannoitteina. Maarakennukseen käyttökohteena liittyy ominaisuuksia, jotka hankaloittavat tuhkien tuotekehitystä ja jalostamista korkealaatuisemmiksi tuotteiksi. Ilman jatkojalostusta lentotuhkat soveltuvat lähinnä alempitaisoiisiin käyttökohteisiin. Näissä kohteissa tuhkan merkittävimpänä kilpailuetuna nykyisessä liiketoimintaympäristössä on usein negatiivinen hinta tai nollahinta. Tämä ei kuitenkaan edistä liiketoimintaa eikä tuhkatuotteiden jalostusta. Maarakennuksessa katteet ovat yleensäkin usein pieniä, mikä ei innosta alaa tekniseen tuotekehitykseen.

Laatuvaihtelun ohella tuotteistamista ja tuotteen markkinointia vaikeuttaa se, että tuhkat syntyvät useissa eri tuottajien laitoksissa eri puolilla maata. Lisäksi merkittävä osa tuhkasta syntyy rakennuskauden ulkopuolella, eikä varastointikapasiteettia välttämättä ole riittävästi.



Kuva 15. Tuotteen laadunvalvonnan vaiheet.

Yksittäisten laitosten voimavarat ja tuhkamäärät eivät välttämättä riitä tuhka-tuotevalikoiman kehittämiseen, tuotteistamiseen ja markkinointiin. Koska EOW-menettely edellyttää teknisten vaatimusten ja ympäristökelpoisuuden lisäksi sitä,

4. Tuhkien tuotteistamismahdollisuudet

että tuotteella on markkinat, tärkeä kysymys on, pystytäänkö tuhista kehittämään kannattavaa liiketoimintaa, ja kuka voisi vastata tästä liiketoiminnasta.

Tuhkan maarakennuskäytön positiivisia puolia ovat luonnonmateriaalien ja kaatopaikkatilan säästö.

4.3 Hankkeen esimerkituote

Esimerkkinä tuotteistamismahdollisuuksista tarkastellaan turvetta ja puuta polttavan laitoksen 2 tuhkan sekä siitä tuotetun luokitellun karkean jakeen tuotteistamista maarakennuskäyttöön. Tuotteistamismahdollisuuksia arvioitiin JRC:n *End of Waste* -hankkeessa esittämän metodologian (JRC 2008) sekä hankkeessa tehtyjen tutkimusten ja seospolton tuhista saatavien taustatietojen pohjalta. Varsinaisia EOW-kriteerejä ei vielä ole esitetty millekään materiaalille. Siksi tuotteistamista voidaan tarkastella ainoastaan yleisellä tasolla.

4.3.1 Jätevirran analyysi

Materiaalin tuotteistaminen aloitetaan kokoamalla materiaalista tarvittavat taustatiedot. Ensimmäisessä vaiheessa arvioidaan jätevirran tunnistetietojen perusteella, onko materiaali riittävän merkittävä tuotteistettavaksi. Tuotteistaminen voi koskea joko tiettyä jätevirtaa (tässä tapauksessa seospolton tuhka) tai siitä tuotettua materiaalia, joka tässä tapauksessa on seospolton tuhkasta luokiteltu karkea jae. Mikäli materiaalin EU-laajuista tuotteistamista ei pidetä tarpeellisenä, on edelleen mahdollista edistää materiaalin käyttöä kansallisin tai paikallisin toimenpitein.

Taulukossa 20 esitetään lyhyt yhteenveto tuotteistamisprosessia varten tarvittavista taustatiedoista. Lähtöoletuksena on, että materiaalivirta tuotteistetaan ainoastaan Suomessa. Tässä tapauksessa myös tarkasteltava jätevirta on tyypillinen Suomelle, koska turpeen ja puun seospoltto ei ole kovin yleistä muualla Euroopassa. Seostuhkia syntyy kuitenkin puun ja jätteen tai puun ja fossiilisten polttoaineiden poltosta.

4. Tuhkien tuotteistamismahdollisuudet

Taulukko 20. Jätevirran analyysi.

	Taustatiedot
Jätevirran tunnistetiedot (tuotantomäärät Suomessa)	Puun ja turpeen seospolton lentotuhka 10 01 03 <ul style="list-style-type: none"> - laitoksella syntyvä määrä noin 15 000 t/a - koko maassa 300 000–400 000 t/a* - yli 5 000 t/a tuottavia laitoksia noin 22 kpl
Nykyiset ja potentiaaliset käyttötavat	<i>Tierakenteet</i> <ul style="list-style-type: none"> - pengerrakenteet - suodatinkerros - jakava kerros stabiloituna <i>Meluwallit</i> <ul style="list-style-type: none"> - pintakerrokset sekoitettuna - täyttö stabiloituna <i>Muut täyttömaakohteet</i> <ul style="list-style-type: none"> - kaatopaikkojen pintarakenteet - stabilointi (pilaantuneet sedimentit ja maat, tie- ja kenttä rakenteet ym.) - metsälannoitteet <i>Käyttö rakennusmateriaaleissa (potentiaalinen)</i> <ul style="list-style-type: none"> - sementti, tiili, kevytsora <i>Metallien, lannoitteiden ja kemikaalien raaka-aine (potentiaalinen)</i>
Sovellettavat prosessit	Ilmaluokittelu tuhkan erottamiseksi karkeaan ja hienoon jakeeseen (esimerkkitaapauksessa)
Keskeinen kansallinen ja kansainvälinen lainsäädäntö	Ympäristönsuojelulaki (86/2000) ja -asetus (169/2000). Jätelaki (1072/1993) ja -asetus (1390/1993) VNA:n eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (591/2006) Lannoitevalmistelaki (539/2006) ja asetus lannoitevalmisteista (MMM 12/07) Jätedirektiivi (2008/98/EY) EY:n rakennustuotedirektiivi CPD (89/106/ETY) Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999), laki ja asetus rakennustuotteiden hyväksynnästä (230/2003, 1245/2003) REACH-asetus (EY 1907/2006)
Olemassa olevat laatujärjestelmät	Laitoskohtaisia (Mara-asetus edellyttää laatujärjestelmää)
Standardit ja käytäjäspesifikaatiot	Kiviainesstandardit (SFS-EN) Rakennustuoteasetuksen nojalla annettavat standardit (tulevaisuudessa)
Markkinatilanne ja -arviot	Hyödyntämisaste <ul style="list-style-type: none"> - esimerkkilaitoksella korkea - koko maassa n. 30 % Hinta 0/negatiivinen

* Suomi on Euroopan suurin energiaturpeen käyttäjä, osuus noin kolmannes koko Euroopan turpeen energiakäytöstä (21,5 milj. t vuonna 1999). Muita merkittäviä käyttäjiä ovat Irlanti (n. 5 milj. t) ja Venäjä (n. 4 milj. t) (<http://www.peatsociety.fi/index.php?id=33>).

4.3.2 EOW-arviointiperusteet ja tutkimusmenetelmät

Seuraavassa käydään läpi JRC:n *End of Waste* -projektissa (JRC 2008) esitetyn EOW-määrittelymetodologian mukaiset arviointiperusteet sekä tarkastellaan, miten niitä on sovellettu hankkeen esimerkkituotteelle. Koska esimerkkimateriaalin tutkimuksissa keskityttiin ainoastaan maarakennuskäyttökelpoisuuden arviointiin, tarkastellaan seuraavassa vain tuotteistamista maarakennuskäyttöön. Käytännössä kuitenkin tuhalla voi olla myös muita, edellä luvussa 4.3.1 mainittuja käyttökohteita, joiden vaatimukset otetaan tuotteistettaessa tarpeen mukaan huomioon. Koska Mara-asetuksen mukainen käyttö maarakenteissa voidaan katsoa eräänlaiseksi tuotteistamiseksi ja koska tuotteelle ei toistaiseksi ole muita ympäristökelpoisuuskriteerejä, verrataan tuotteen ominaisuuksia ja tuotteesta saatavilla olevia tietoja asetuksen vaatimuksiin.

Lähtömateriaali

Tässä tapauksessa lähtömateriaalina on luokittelematon puun ja turpeen seospolton lentotuhka (10 01 03), jota voidaan myös käyttää sellaisenaan maarakennustuotteena. Lähtömateriaalin tuotannon laadunhallinnalla voidaan vaikuttaa merkittävästi tuotteen tekniseen soveltuvuuteen ja sen ympäristöominaisuuksiin. Tästä huolimatta JRC:n pilottitutkimuksessa lähdettiin siitä, että kivihiilituhkan laatuun ei nykyisin voida riittävästi vaikuttaa tuotantoprosessia ohjaamalla. Siksi EOW-määrittelyyn ei pilot-tapauksessa sisällytetty vaatimuksia tuotantoprosessin hallinnalle (Catarino 2008).

Sivuvirtojen merkitys päätuotteeseen verrattuna on ollut niin pieni, että tuhkan laadun parantamiseen ei ole juuri kiinnitetty huomiota. Tuhkan laadun ohjaus polttoainevalinnalla tai tuotantoprosessia ohjaamalla voi kuitenkin tulla ajankohittaiseksi loppusijoituskustannusten kasvaessa. Esimerkkilaitoksessa polttoainekauma vaihteli eri näytteenottokerroilla, ja sen havaittiin selvästi vaikuttavan tuhkan koostumukseen ja liukoisuusominaisuuksiin (ks. kohta 3).

Käsittely

Tässä tapauksessa päätuotevaihtoehtona on seospolton lentotuhkasta tuotettu maarakennusmateriaali, joka sisältää tuhkan karkeimman jakeen (60 % tuhkan kokonaismäärästä tai 80 % tuhkan kokonaismäärästä, ks. kohta 3.4.1). Käsittelymenetelmänä on ilmauokittelu. Vertailuvaihtoehtona tarkastellaan alkuperäistä tuhkaa luokittelemattomana sekä ikäännyttämällä prosessoitua tuhkaa. Suuntaa

4. Tuhkien tuotteistamismahdollisuudet

antava yhteenveto käsittelemättömien ja käsiteltyjen tuhkien ympäristöominaisuuksista on taulukossa 21. Taulukko perustuu laitoksen 2 kahdella eri näytteenotokerralla otetuista näytteistä tehtyihin tutkimuksiin, joiden tarkemmat tulokset on esitetty luvuissa 3.3.1 ja 3.3.3. Näytteiden pitoisuus- ja liukoisuustutkimusten tuloksia on taulukossa verrattu VNa 591/2006 päällystetyn rakenteen raja-arvoihin.

Tuotteen käyttökohteena ovat tie- ja kenttärakenteet ja niissä erityisesti pengerakenteet ja suodatinkerros. Stabiloituna tuote soveltuu myös jakavan kerroksen materiaaliksi. Stabilointia ei tarkastella tässä erillisenä prosessointimenetelmänä, koska hankkeessa ei tutkittu stabiloidun tuotteen ominaisuuksia.

Taulukko 21. Yhteenveto tutkittujen turve-puu- ja puu-turvetuhkien ympäristöominaisuuksista sellaisenaan ja jalostettuna. Näytteiden pitoisuus- ja liukoisuustutkimusten tuloksia on taulukossa verrattu VNa 591/2006 päällystetyn rakenteen raja-arvoihin. Vihreällä merkityissä ruuduissa mikään materiaalikohtaisista raja-arvoista ei ylittynyt. Punaisiin ruutuihin on merkitty ne haitta-aineet, joiden raja-arvot ylittyivät.

	Tuore, käsittelemätön tuhka		Ilmaluokittelu, karkea jae		Ikäännyttäminen		
	Kokonaispitoisuus	Liukoisuus	Kokonaispitoisuus	Liukoisuus	Liukoisuus		
					10 vk*	20 vk*	Säilytys 20 vk**
Turvepuutuhka		Ba			Se, SO ₄ ²⁻		
Puu-turvetuhka	As	Cr, Pb, Se, Mo, SO ₄ ²⁻		Pb			

* Tehostettu ikäännyttäminen kosteuskammiossa.

** Säilytys muovipussissa, huoneen lämpötilassa.

Ilmaluokittelu vaikuttaa tuhkan koostumukseen (haitta-ainepitoisuudet, raekokojakauma) ja haitta-aineiden liukoisuuteen tuhkasta. Koska laitoksen polttoainejakauma vaikuttaa lähtömateriaalin laatuun, ei pelkästään luokittelun prosessiparametreja säätämällä pystytä varmistamaan tuhkan laadun pysymistä tasaisena. Luokitteluparametrien optimitaso on kuitenkin löydettävissä tekemällä riittävä määrä luokittelukokeita eri kerroilla otetuista tuhkanäytteistä. Jos luokiteltu tuhka halutaan tuotteistaa, optimaaliset luokitteluparametrit tulisi määrittää prosessin laadunvalvontaa varten.

Myös ikäännyttäminen voidaan katsoa tuhkan laatuun vaikuttavaksi käsitelymenetelmäksi.

4. Tuhkien tuotteistamismahdollisuudet

Tuotevaatimukset ja laadunvalvonta

Tuotteen tekninen ja ympäristölaatu sekä laatuvaihtelu tulee tuntea, jotta tuotteen turvallinen käyttö ja hyväksyntä markkinoilla voidaan varmistaa. Tässä hankkeessa pystyttiin tekemään materiaaleille vain perusmäärittelytutkimukset. Yhteenveto tärkeimmistä tutkimusmenetelmistä on esitetty taulukossa 22. Koska tuotteille ei kehitetty laadunvalvontaohjelmaa, niille ei myöskään määritetty varsinaisia tuotevaatimuksia. Ilmaluokitellun tuhkan laadunvalvontaohjelmaa voidaan laatia luokittelun optimoinnin yhteydessä, kun luokitellun materiaalin laatuvaihtelu ja optimaaliset luokitteluolosuhteet tunnetaan paremmin.

Materiaalin **teknisen laadun** tulee täyttää eurooppalaisten ja kansallisten standardien vaatimukset sekä muut merkittävät kansalliset vaatimukset, kuten esimerkiksi tiehallinnon ohjeet. Eurooppalaisia teknisiä standardeja on valmisteltu CEN:n teknisessä komitean 154 alaisuudessa. Lisäksi rakennustuotedirektiivi määrittelee rakennustuotteille ns. olennaiset vaatimukset, joita ovat

1. mekaaninen lujuus ja kestävyys
2. turvallisuus tulipalon sattuessa
3. hygienia, terveys ja ympäristö
4. käyttöturvallisuus
5. melunsuojaus
6. energiatalous ja lämmöneristys.

Näiden pohjalta ollaan valmistelemaan harmonisoituja eurooppalaisia standardeja myös tien- ja maarakennustuotteille.

Tässä tapauksessa sovellettavissa olevia sitomattomien lentotuhkien tierakennuskäyttöä koskevia teknisiä vaatimuksia ei löytynyt eurooppalaisista kiviaines- tai rakennustuotestandardeista eikä myöskään kotimaisista standardeista. Tiehallinnon sivutuoteohjeessa (Tiehallinto 2007) esitetään yleisiä ohjeita tuhkien käytöstä, mutta se ei sisällä yksityiskohtaisia teknisiä vaatimuksia. Tällöin teknisen soveltuvuuden arvioinnin pohjana voivat olla lähinnä rakenteiden vaatimat ominaisuudet sekä käytettävissä olevat alan toimijoiden valmistelemaat tuhkaohjeet (Rudus 2008, Helsingin kaupunki 2001, Espoon kaupunki/Espoon Sähkö 2000, Finergy 2000, Finncao 2005). Finncaon raporttia lukuun ottamatta ohjeet keskittyvät pääosin kivihiilituhkien käyttöön.

Ensimmäinen, alustava arvio materiaalin soveltuvuudesta maarakennuskäyttöön voidaan yleensä tehdä raekokojakauman perusteella. Myös maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus kuuluvat materiaalista tarvittaviin perustietoihin.

4. Tuhkien tuotteistamismahdollisuudet

Käyttökohteen kannalta merkittävimpinä ominaisuuksina pidettiin tässä tapauksessa routivuutta sekä lämmönjohtavuutta. Raekokojakauman pohjalta tehtyä arvioita routivuudesta tarkennettiin muun muassa segregatiopotentiaaliin perustuvalla routanousukokeella. Muut käytetyt tutkimusmenetelmät ja tutkimusten tulokset on esitetty luvussa 3.3.4 ja liitteessä E.

Tuhkien ympäristötuotevaatimuksista tärkeimpänä mainitaan JRC:n tutkimuksessa liukoisuus. Ympäristövaikutusarviossa tulee kuitenkin ottaa huomioon koko elinkaaren aikaiset vaikutukset ympäristöön ja terveyteen. Ympäristöominaisuuksien tutkimusten osalta tuotteen karakterisoinnissa ja laadunvalvontaohjelman kehittämisessä voidaan seurata Mara-asetuksen taustaraportin (Mroueh et al. 2006) ohjeistusta, jonka mukaisesti tutkimukset on tässä raportissa tehty (ks. taulukko 6 luvussa 3.2.2). Koska eurooppalaisia vaatimustasoja liukoisuudelle ei vielä ole, voidaan toistaiseksi käyttää Mara-asetuksen raja-arvoja tai inertin jätteen kaatopaikalle sijoitettavan jätteen raja-arvoja, joiden on joissakin lähteissä arvioitu parhaiten soveltuvan myös EOW-kriteerien pohjaksi. Mara-asetuksessa inertin jätteen kaatopaikan raja-arvoihin on tehty joitakin lievennyksiä.

Taulukko 22. Teknisten ja ympäristöominaisuuksien tutkimusmenetelmiä.

Tutkittava ominaisuus	Tutkimusmenetelmä
Esikäsitelly metallien määrittäystä varten	SFS-EN 13656 (happoutto ja mikroaltohajotus) tai SFS-EN 13657 (<i>aqua regia</i> uutto)
Metallien kokonaispitoisuudet	Ensisijaisesti standardoidut menetelmät (ICP-MS, ICP-AES, AAS)
Haitta-aineiden liukoisuus	prCEN/TS 14405 (läpivirtaustesti) Laadunvalvonnassa myös SFS-EN 12457-3 (kaksivaiheinen ravistelutesti)
Palamattomien määrä	SFS-EN 13137 (Orgaanisen hiilen kokonaismäärä, TOC)
pH-muutosten vaikutus liukoisuuteen	prCEN/TS 14997 (pH-staattinen testi)
Haitallisten aineiden pitoisuus uuttoliuksissa	SFS-EN 12506 ja SFS -EN 13370
Rakeisuus	GLO-85 Geotekniset laboratorio-ohjeet
Routivuus	TPPT-menetelmäkuvaus. Routanousukoe. Routimiskertoimen (SP) määrittäminen laboratorioissa. http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/6-routanousukoe.pdf .
Maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus	ASTM D 1557-70
Lämmönjohtavuus	TPPT-menetelmäkuvaus. Lämmönjohtavuuden määrittäminen. http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/8-lammonjoht.pdf .

4. Tuhkien tuotteistamismahdollisuudet

Tutkimusten perusteella ilmaluokittelu paransi turpeen ja puun seospolton tuhkan karkean jakeen teknisiä ja ympäristöominaisuuksia alkuperäiseen tuhkaan verrattuna. Luokittelematon tuhka oli lievästi routivaa ja luokiteltu karkea jae segregaatiopotentiaalin perusteella hyvin lievästi routivaa tai lähes routimatonta. Useimpien haitta-aineiden pitoisuudet ja liukoisuudet olivat karkeassa jakeessa pienempiä kuin luokittelemattomassa tuhkassa.

Käyttöohjeet

Tuhkille käytettävissä olevia suunnittelu- ja rakentamishojeita on lueteltu edellä kohdassa *Tuotevaatimukset*. Ohjeet koskevat pääosin kivihiilituhkan käyttöä, mutta soveltuvien osin niitä voidaan käyttää myös seospolton tuhkille. Rakentamisen laadun, soveltuvien käyttökohteiden valinnan ja ympäristövaikutusten hallinnan varmistamiseksi käyttöohjeita tarvitaan, vaikka jatkossa tuhkille laadittaisiinkin esimerkiksi rakennustuotedirektiivin edellyttämät standardit. Olemassa olevien ohjeiden riittävyys tulisi arvioida ja tarvittaessa laatia täydentävä ohjeistus. Käyttöohjeiden lisäksi tuotteistaminen edellyttää myös käyttöturvatiiedotteen laadintaa.

4.3.3 Vaikutusarvio

Vaikutusarviolla tarkoitetaan tietyille materiaalille ehdotettujen *End of Waste*-kriteerien vaikutusten arviointia. Vaikutusarvioissa otetaan huomioon lainsäädäntö, talous, markkinat sekä yhteiskunta ja ympäristö. Arvion tavoitteena on varmistaa, että kriteerit täyttävät jätedirektiivin EOW-periaatteet. Jos periaatteet eivät täyty, ryhdytään tarpeellisiin toimenpiteisiin ehdotuksen muuttamiseksi tai korjaamiseksi. On myös mahdollista hylätä ehdotus kokonaan.

Ympäristö- ja terveystvaikutukset

Ympäristö- ja terveystvaikutusten analysoinnissa tarkastellaan hyötykäytön kokonaisvaikutuksia elinkaariperiaatteen mukaisesti. Elinkaariarvioinnissa tunnistetaan tuotteen merkittävimpien käyttövaihtoehtojen koko käyttöketjun aikaiset ympäristökuormitukset ja luonnonvarojen käyttö. Tuotteen hyötykäytön vaihtoehtona tarkastellaan myös luonnonmateriaalien käyttöä vastaavassa kohteessa.

Suuntaa antava elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten tarkastelu tehtiin VTT:n laatimaa Meli-ohjelmaa käyttäen (luvut 3.2.4 ja 3.4.2). Siinä verrattiin neljää teknisiltä ominaisuuksiltaan samantasoista tierakennevaihtoehtoa. Yhtenä vaihtoehtona oli pelkästään luonnonmateriaaleja käyttäen tehty rakenne. Kahdessa

muussa vaihtoehdossa jakavan kerroksen materiaalina oli lentotuhkan karkea jae sementillä stabiloituna ja suodatinkerroksen materiaalina lentotuhkan karkea jae tai luokittelematon tuhka. Kolmannessa vaihtoehdossa jakavan kerroksen materiaalina oli murske ja suodatinkerroksen materiaalina lentotuhkan karkea jae.

Tuhkan elinkaareen sisällytettiin kaikki vaiheet laitoksen tuhkasiilosta tierakentamiseen. Lisäksi kussakin vaihtoehdossa tarkasteltiin hienojakeen tai käyttämättä jäävän lentotuhkan kaatopaikkakuljetusten vaikutusta kokonaisympäristökuormitukseen. Muilta osin kaatopaikkasijoituksen vaikutuksia (tilantarve, kaatopaikan rakentaminen ja ylläpito, liukoisuudet) ei otettu huomioon. Tuloksia ei ole painotettu, vaan ne on esitetty ympäristökuormituslukuina. Meli-ohjelmassa on mahdollisuus laskea myös haitallisten aineiden elinkaaren aikainen liukoisuus rakenteista. Tässä tarkastelussa sitä ei tehty, vaan liukoisuuksia verrattiin ainoastaan hankkeessa tehtyjen liukoisuustutkimusten tulosten pohjalta.

Tarkastelluissa lentotuhkavaihtoehdoissa säästyivät luonnonmateriaaleja ja polttoainetta luonnonmateriaalirakenteeseen verrattuna, mutta energian kulutus ja päästöt ilmaan olivat suurempia. Suurin syy tähän oli sementin käyttö stabilointiaineena, mutta myös tuhkan luokittelun energiankäyttö vaikutti ilmapäästöihin. Jos laskelmissa otetaan huomioon myös käyttämättä jääneen tuhkan kaatopaikkasijoitus, luonnonmateriaalivaihtoehdon energian kulutus ja päästöt kasvavat suhteessa vaihtoehtoihin 2 ja 3, joissa jakava kerros ja suodatinkerros on rakennettu tuhkasta.

Liukoisuudet ovat suurimmat rakenteessa, jossa käytettiin luokittelematonta tuhkaa, ja pienimmät luonnonmateriaalirakenteessa. Kaatopaikkasijoituksen vaikutusten huomioiminen lisäisi kuitenkin eniten luonnonmateriaalivaihtoehdon liukenevia päästöjä. Lisäksi kaatopaikkatilankulutus olisi suurempi kuin muilla rakennevaihtoehdoilla.

Materiaaleja ei voida elinkaaritarkastelun perusteella asettaa selkeästi paremmuusjärjestykseen. Vertailun tulos määräytyy sen perusteella, mitä vaikutuksia päättäjällä pitää merkittävimpinä. On myös otettava huomioon, että vertailuun pystyttiin ottamaan vain rajoitettu määrä vaihtoehtoja eikä tuhkan käytön vaikutuksista rakenteen kestävyys ja käytön aikaiseen korjaustarpeeseen ollut saatavissa riittävä tietoa. Lentotuhkan käyttöä voitaisiin verrata myös heikkolaatuisten, stabilointia tai muuta käsittelyä vaativien luonnonmateriaalien käyttöön, jolloin luonnonmateriaalirakenteen päästöt ilmaan kasvaisivat suunnilleen samalle tasolle kuin stabiloitujen lentotuhkavaihtoehtojen. Lisäksi kussakin vaihtoehdossa käyttämättä jäävän tuhkan kaatopaikkasijoituksen vaikutukset on otettu vain rajoitetusti huomioon.

4. Tuhkien tuotteistamismahdollisuudet

Tuhkan käytön merkittävimpiä ympäristövaikutuksia ovat haitta-aineiden liukenemisesta aiheutuvat päästöt, pölypäästöt ja tuhkan laadunparantamisen energiankulutus sekä siitä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt. Jos luokiteltu tai luokittelematon tuhka tuotteistetaan, tuottajan on huolehdittava, että liukoisuudet eivät ylitä materiaalille asetettuja turvalliseksi katsottuja liukoisuusraja-arvoja. Näihin tuoteraja-arvoihin pääsy todennäköisesti edellyttää tuhkan käsittelyä, joka useimmissa vaihtoehdoissa lisää energiankulutusta ja kaasumaisia päästöjä.

Terveysvaikutusten hallitsemiseksi on tarpeen kiinnittää huomiota erityisesti tuhkan pölyämisen hallintaan luokittelun, sekoituksen ja rakentamisen aikana. Materiaalin tuotteistaminen ja hallittu liiketoiminta voi tuoda parannuksia työturvallisuuteen.

Taloudelliset vaikutukset

Tuotteistamisen taloudelliset vaikutukset voivat sisältää muun muassa seuraavia kustannus- ja tuloeria:

- hyötykäyttökettun eri vaiheiden investointi- ja käyttökustannukset
- tuotteen laadunvalvontakustannukset
- viranomaismenettelyjen kustannukset (lupavalmistelut ja -maksut, REACH ym.)
- tuotteen laadun ja statuksen paranemisesta johtuva tuotteen arvon kasvu
- muut EOW-menettelyn kustannukset.

Luvussa 3.4.1 on tarkasteltu kahden luokitellun tuhkatuotteen hyötykäyttöskenaarion taloudellisia vaikutuksia ja verrattu niitä kaatopaikkasijoituksen vaikutuksiin. Tavoitteena oli ensi sijassa jalostuksen kannattavuuden arviointi. Edellä mainituista kustannustekijöistä mukana ovat vain hyötykäyttökettun eri vaiheiden investointi- ja käyttökustannukset. Tuotteen hinnan oletetaan jalostuksesta huolimatta olevan edelleen nolla. Ympäristölupamaksu määräytyy käytetyn työajan mukaan. Tavallisesti se on muutamia tuhansia euroja, mutta hankalissa tapauksissa maksu voi olla huomattavasti suurempikin. Hakijan kustannuksiin lasketaan myös lupamenettelyyn käytetty oma työaika ja mahdolliset konsulttipalvelut. Nämä kustannukset ovat usein suuremmat kuin lupamaksu. Tuotteen laadunvalvontakustannuksista merkittävin kustannuserä on laadunvalvontajärjestelmän pystyttäminen.

Taulukosta ilmenee, että tuhkan jalostuksen kannattavuuteen vaikuttavat eniten vaihtoehtoisen sijoituksen kustannukset. Jos tuhkan kaatopaikkasijoituksesta joudutaan maksamaan eikä luokittelemattomalle tuhkalta löydy sijoituskohdetta, luokittelun kustannusvaikutus on positiivinen.

Vaikutus markkinoihin

Nykyisin pääosa seostuhkista sijoitetaan kaatopaikoille. Hyötykäytössä niiden arvo on nolla tai negatiivinen. Käytännössä siis näille tuhkillle ei nykyisin ole markkinoita. Tuhkien tuotteistamisella voisi olla markkinoihin muun muassa seuraavia vaikutuksia:

- Mahdollisella jalostamisella saadaan nykyistä parempilaatuinen tuote, jolla on paremmat edellytykset markkinoilla.
- Tietopohja tuhkien ominaisuuksista ja soveltuvuudesta kasvaa, mikä mahdollistaa käytön parhaiten soveltuvissa kohteissa.
- Tuotekriteerien täyttyminen ja laadunvalvontajärjestelmä parantaa käyttäjien luottamusta tuotteen laatuun.
- Hinnat määräytyvät markkinapohjaisesti, ja alalle syntyy aitoa liiketoimintaa.
- Tuhkien markkinointi tehostuu, jos yritystoiminta laajenee.

Säädökset ja lainsäädäntö

Nykyisin käytettävissä oleva vaihtoehto seospolton tuhkien tuotteistamiseen on Mara-asetus. Asetukseen verrattuna EOW-menettely tuskin tuo lievennyksiä maarakennuskäytön liukoisuusraja-arvoihin. Sen sijaan tuotestatus ja sen edellyttämä laadunhallinta voivat parantaa käyttäjien luottamusta tuhkatuotteisiin ja auttaa niiden markkinoinnissa. Kansallisten säädösten muutostarpeet ja asema suhteessa komission tietyille materiaaleille laatimiin EOW-kriteereihin selkiytyvät menettelyjen siirtyessä käytäntöön.

EOW tuo tuhkat REACHin ja tuotevastuulainsäädännön alaisiksi.

4.3.4 Johtopäätökset

Työssä tarkasteltiin mahdollisuuksia helpottaa tuhkien hyötykäyttöä tuotteistamalla ne EY:n uuden jättepuitedirektiivin (2008/98/EY) mukanaan tuoman *End*

4. Tuhkien tuotteistamismahdollisuudet

of Waste -menettelyn (EOW) mukaisesti. Tarkastelu rajattiin hankkeen päätöksimuskohteen perusteella puun ja turpeen seospolton tuhkaan ja siitä ilmaluokittelemalla tuotettuun karkeaan jakeeseen. Käytännössä tuhkille laadittavat EOW-kriteerit kattaisivat kuitenkin maarakentamisessa käytettävät tuhkat tätä laajemmin. Pilot-vaiheessa on tarkasteltu vain kivihiilituhkia.

Tuhkille on jo käytössä eräänlainen ”tuotteistamismenettely”, Mara-asetuksen mukainen ilmoitusmenettely. Tuotteistaminen ei sinänsä poista ilmoitusmenettelyn mukaisen käytön esteitä, joita ovat asetuksen raja-arvojen ylittyminen, tuhkien soveltuvuus jalostamatta vain alempiarvoisiin käyttökohteisiin, jalostamisen kannattamattomuus ja polttoaineen laatuvaihtelusta seuraava tuhkan laatuvaihtelu. Tuotteistaminen ei myöskään vähennä usein hankalana pidetyn laadunvalvonnan tarvetta.

Jos tuhkasta pystytään kohtuuhintaisin jalostustoimin tai polttoaineeseen/prosessiin vaikuttamalla tuottamaan ympäristökriteerit ja jatkossa rakennustuotedirektiivin pohjalta todennäköisesti laadittavat muut tuotevaatimukset täyttävä maarakennusmateriaali, tuotteistaminen parantaisi tuhkien asemaa markkinoilla. Etuja olisivat muun muassa käyttäjien luottamuksen lisääntyminen ja tietopohjan paraneminen, parempi markkinointi ja todennäköisesti myös ohjautuminen parhaiten soveltuviin kohteisiin. Jos kaatopaikkakustannukset samalla kasvaisivat, tulisi jalostuksesta nykyistä kannattavampaa. Osalle tuhkista voidaan löytää maarakennusta kustannustehokkaampia käyttökohteita, joihin ne kannattaa ensi sijassa ohjata.

5. Tuhkien hyödyntämisen tulevaisuudennäkymät

Tuhkien hyötykäyttömahdollisuuksia tutkitaan tällä hetkellä paljon eri maissa. Etenkin tuhkien käyttö betonivalmistuksessa, tuhkien vaikutukset betonituotteiden ominaisuuksiin ja uusien tuhkia sisältävien betonituotteiden kehittäminen ovat olleet useiden uusien tutkimusten kohteena. Luonnonvarojen ehtyessä tulevaisuudessa tuhkat tulevat olemaan haluttuja raaka-aineita. Tuhkien sisältämät ravinteet voidaan hyödyntää lannoitteiden valmistuksessa ja metallit kierrättää takaisin metalliteollisuuteen.

Tuhkien nykyiset käyttökohteet ovat herkkiä materiaalien hinnan vaihteluille. Lisäksi erityisesti infrarakentaminen on käyttöalue, jolla hintamarginaalit ovat pienet, mikä ei innosta materiaalien jalostamiseen eikä yleensäkään tutkimustoimintaan. Siksi tuhkat kannattaisi luokitella siten, että ne voitaisiin tehokkaasti ohjata parhaisiin mahdollisiin käyttökohteisiin, ja etsiä tuhkielle myös uusia mahdollisimman korkealaatuisia käyttökohteita.

Jätepuitedirektiivin mahdollistama *End of Waste* -menettely saattaa lähivuosina tuoda ainakin kivihiilen tuhkielle eurooppalaiset kriteerit, joiden perusteella tuhkat voidaan tuotteistaa. Näiden kriteerien vaikutusta tuhkien hyötykäyttöön on vielä vaikea arvioida.

Kaikkein eniten tuhkien laatuun vaikuttavat polttoaineet ja niiden mahdollisesti sisältämät epäpuhtaudet. Biopolttoaineiden käytön lisääntyessä polttoainevalikoima ja tämän mukana tuhkien laatu vaihtelu todennäköisesti kasvavat entisestään. Myös polttoaineena käytettävän kivihiilen laatu on muuttunut huonommaksi, mikä näkyy ongelmina muun muassa haitallisten aineiden kohonneina liukoisuuksina.

Mikäli pystytään kehittämään todellisia tuhkatuotteita, joilla on kysyntä ja markkinat, myös voimalaitokset saattavat ottaa tuhkan laadun paremmin huomioon polttoaineita valitessaan ja toimintaansa kehittäessään. Kaikkein edullisinta olisi,

5. Tuhkien hyödyntämisen tulevaisuudennäkymät

jos tuhkien laatuun vaikutettaisiin jo voimalaitoksella normaalin toiminnan yhteydessä. Tällöin ei tarvittaisi erillisiä, kustannuksia aiheuttavia prosesseja tuhkien jalostamiseksi.

Kaikenlainen tuhkien hyötykäyttö asettaa vaatimuksia laadunvalvonnalle. Ympäristölle haitallisten aineiden kokonaispitoisuuksien ja liukoisuuksien määritykseen kaivataan jatkossa nopeita, edullisia ja luotettavia menetelmiä. Kaikkein parasta olisi, jos haitallisten aineiden kokonaispitoisuuksien määrittäminen onnistuisi jatkuvatoimisesti voimalaitoksen tuhkavirrasta. Tällöin mahdolliset hyötykäyttöön kelpaamattomat erät voitaisiin heti erottaa hyötykäyttöön kelpaavista.

Nykyistä parempilaatuisten tuhkatuotteiden tuottamisen edellytyksenä on taloudellinen kannattavuus, johon vaikuttavat tuotteen laadun ja käyttökohteen lisäksi monet muut tekijät toimintaympäristössä. Näistä syistä myös hyötykäytön liiketoiminnallisiin edellytyksiin ja niiden parantamismahdollisuuksiin tulisi kiinnittää huomiota. Nykyisin tuottaja vastaa yleensä prosessin sivutuotteiden hyödyntämisestä, jolloin se usein jää pääliiketoiminnan varjoon. Hyötykäyttöliiketoiminnan kehittäminen säästäisi yksittäisten tuottajien resursseja ja tehostaisi hyötykäyttöä.

Lähdeluettelo

- Catarino, A. 2008. The methodology to define End of Waste criteria – aggregates case study. In: End of Waste for mineral residues – Aspects of Concern in Earth Construction. 25th November 2008, Espoo, Finland. <http://thule.oulu.fi/uuma/seminar/Catarino.pdf>.
- CIRU 2009. Mineralogiset tutkimukset jäännöstuotteiden ja jätteiden ympäristökelpoisuuden arvioinnissa. MINERALI-projektin loppuraportti. Lisätietoja: <http://www.cirucentre.com>.
- Energiamarkkinavirasto 2008. Sähkön verollisen kokonaishinnan kehitys vuodesta 1992 lähtien. Www-dokumentti. Viitattu 9.12.2008. <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Kehitys0810.pdf>.
- Espoon kaupunki, Espoon Sähkö Oy 2000. Tuhkarakentamishoje tie-, katu- ja kenttärakenteisiin.
- Finergy 2000. Tuhkarakentamishoje tie-, katu- ja kenttärakenteisiin.
- Finncao 2005. Metsäteollisuuden lentotuhkien käyttö tie-, katu- ja kenttärakenteissa. Suunnittelu- ja mitoitusohje. Finncao Oy 2005. <http://www.finncao.fi/attachments/mitoitusohje14032005.pdf>.
- Harju T., Tolvanen M., Wahlström M., Pihlajaniemi M., Helenius J., Salokoski P., Siltaloppi L. & Lehtovaara J. 2001. Turvevoimalaitoksen raskasmetallitase ja tuhkan sijoituskelppoisuus. VTT Tiedotteita 2073. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2073.pdf>.
- Helsingin kaupunki 2001. Helsingin kaupungin tuhkarakentamishoje.
- Isännäinen, S. & Huotari, H. 1994, Tuhkan ja metsäteollisuuden muiden jätejakeiden prosessointi lannoitekäyttöön soveltuvaksi. Esiselvitys. VTT Energia.
- JRC 2008. End of Waste Criteria. Final Report. JRC Scientific and Technical Reports. EUR xxxx EN 2008. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies. <http://susproc.jrc.ec.europa.eu/activities/waste/documents/Endofwastecriteriafinal.pdf>.
- Kaartinen, T., Laine-Ylijoki, J. & Wahlström, M. 2007. Jätteen termisen käsittelyn tuhkien ja kuonien käsittely- ja sijoitusmahdollisuudet. VTT Tiedotteita: 2411. VTT, Espoo. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2411.pdf>.
- Kaunismäki, J. 2008. YTV Jätehuolto. Suullinen tiedonanto 11.12.2008.
- Kivikoski, H., Saarelainen, S., Ahonen, M., Huttunen, E., Kujala, K. 2001. Lämmönjohtavuuden määrittäminen. TPPT, Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma, Menetelmäkuvaus TPPT 8. <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/8-lammonjoht.pdf>.

- Laine-Ylijoki, J., Wahlström, M., Peltola, K., Pihlajaniemi, M. & Mäkelä, E. 2002. Seospolton tuhkien koostumus ja ympäristölaadunvarmistusjärjestelmä. VTT Tiedotteita 2141. VTT Prosessit, Espoo. 51 s. + liitt. 59 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2141.pdf>.
- Majjala, A., 2008. UUMA-inventaariprojektin loppuraportti, UUMA-materiaalien ja -rakenteiden inventaari. Ramboll.
- Metsäteollisuus ry. 2008. Metsäteollisuuden ympäristötilastot vuodelta 2007.
- Mroueh, U-M., Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J. & Mäkelä, E. 2006. Tausta-aineistoa Valtioneuvoston asetuksen ”Eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa” valmistelua varten. VTT Projektiraportti. PRO3/P3013/05. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=54976>.
- Mustankorkean jätteenkäsittelykeskus 2008. Jätteenkäsittelymaksut 1.1.29009 alkaen. Isot kuormat / raskas kalusto. www-dokumentti. Viitattu 11.12.2008. http://www.mustankorkea.fi/filebank/135-Jatteenkasittelymaksut2009_isot_kuormat.pdf.
- Mäkelä, H. & Höynälä, H. 2000. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa, Materiaalit ja käyttökohteet. Tekes, Teknologia katsaus 91/2000.
- Nilsson, J. & Timm, B. 1983. Miljöeffekter av ved- och torvbränning. Statens naturvårdsverk PM 1708.
- Palola S.-K. 1998. Tuhkien ominaisuudet, hyötykäyttö sekä hyötykäytön edellytykset. Kirjallisuusselvitys, Vapo Oy / Tutkimusosasto, Jyväskylä.
- Pirkanmaan jätehuolto Oy 2008. Jätteenkäsittelymaksut 2009. Www-dokumentti. Viitattu 11.12.2008. [http://www.pirkanmaanjatehuolto.fi/dev/AKPMedia.nsf/Resources/Jatteenkasittelymaksut2009/\\$file/Jatteenkasittelymaksut_2009.pdf](http://www.pirkanmaanjatehuolto.fi/dev/AKPMedia.nsf/Resources/Jatteenkasittelymaksut2009/$file/Jatteenkasittelymaksut_2009.pdf).
- Rissa, K. 2001. Ekotehokkuus – enemmän vähemmästä. Ympäristöministeriö. Edita.
- Rudus Oy 2008. Lentotuhkaohje. Käyttöohje rakentamiseen ja suunnitteluun. 1/2008. <http://www.rudus.fi/fi/Toimialat/Kierr%c3%a4tys/Esitteet/>.
- Sloss, L., Smith, I. & Adams, D. 1996. Pulverised coal ash – requirements for utilisation. IEA Coal Research IEACR/88, London, UK.
- ST 12.2. Säteilyturvakeskus: Rakennusmateriaalien ja tuhkan radioaktiivisuus. <http://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/555001/16550>.

- Tammirinne M., Juvankoski M., Kivikoski H., Leivo M., Mroueh U.-M., Mäkelä E., Peltonen P., Pihlajamäki P. & Wahlström M. 1995. Uusiotuotteiden maarakennuskäytön edellyttämät tutkimukset laboratoriossa ja koerakenteilla. VTT, Espoo. Tutkimusraportti 278.
- Tattari, K. 2004. Sähkön ja kaukolämmön ympäristöprofiilit vuonna 2002 hyödynjakomenetelmällä.
- Tiehallinto 2007. Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa, suunnitteluvaiheen ohjaus. <http://www.tiehallinto.fi>.
- UUMA-katsaus. Osa 1. 2008. UUMA-materiaalien ympäristökelpoisuuden osoittaminen ja tuotteistaminen Suomessa. Katsaus ohjauskeinoihin. Luonnos 2.12.2008. http://thule.oulu.fi/uuma/UUMAkatsaus_osa1.pdf.
- Vainikka, P. 2006. Seospolton käytettävyysongelmien hallinta. Esitelmä, Jätehuollon energiapäivät, Vantaa 12.–13.12.2006.
- Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (591/2006). <http://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2006/20060591>.
- Vuori, T. 2008. Nurmijärven kunta, Metsä-Tuomelan jäteasema. Kirjallinen tiedonanto 12.12.2008.
- Wahlström, M. & Pohjola, V. 1987. Utlakning av metaller ur torflygaska. Espoo: VTT Tutkimuksia 483. 91 s. + liitt. 52 s.
- Walsh M. 1997. Kivihiili- ja turvevoimalaitosten sivutuotteet ja niiden hyötykäyttö. Energia-alan keskusliitto ry Finergy, tutkimusraportti nro 2.
- Wikman, K., Berg, M., Bjurström, H., Nordin, A. 2003. Termisk rening av askor. Värmeforsk, Raportti Q4-128.

Liite A: Meli-ohjelman tietopohja

Toimintavaihe	Tietolähde
Työkoneiden käyttö	Tyko – työkoneiden päästömalli 2005
Liikenne	Lipasto 2002
Lentotuhkan varastointi ja lastaus	Helsingin Energia (Oasmaa 1996)
Lentotuhkan kuljetukset ja sijoitus maarakenteisiin	Lohja Rudus (Rämö 1997)
Lentotuhkan sijoitus kaatopaikalle	Helsingin Energia (Oasmaa 1996) Blomster 1989 Markkanen 1996 Arovaara 1996
Kallion louhinta	Lemminkäinen (Ruosteoja 1996)
Hiekan ja soran otto	Lohja Rudus (Rasimus 1996)
Kiviainesten murskaus	Lemminkäinen (Ruosteoja 1996) Tielaitos 1994 ja 1995
Kiviainesten kuljetukset	Lohja Rudus (Rasimus 1998)
Tienrakennus	RIL 156 1995 Tielaitos (Uotinen 1998)
Masuunikuona	Rautaruukki (Mäkikyrö 1998 ja 1999)
Betonimurske	Lohja Rudus (Määttänen 1998)
Sementti	Häkkinen ja Mäkelä 1996 Finnsement (Lundstöm 1998)
Asfaltti	Häkkinen ja Mäkelä 1996 IVL (Stripple 1995) Asfalttinormit 1995 Tielaitos 1998 (Uotinen ja Reihe 1998)
Betoni	Häkkinen ja Mäkelä 1996 Lohja Rudus Oy (Kostiainen 1999)
Kalkki	Häkkinen ja Mäkelä 1996
Sahatavara	Häkkinen 1994
Raudoitusteräs	Häkkinen ja Mäkelä 1996
Uudelleenpäällystys	Tielaitos (Komulainen 1998)
Remixer	Tielaitos (Eerola, M. 1998) Päällysteiden suunnittelu / Tielaitos 1997 Elg- Yhtiö (Elg 1998)

Liite A: Meli-ohjelman tietopohja

	JJ_Asfaltti Oy (Karvonen 1999) Kalottikone Oy (Karvonen 1998) Valtatie Oy (Mannonen 1998) VTT Kemiantekniikka (Siltanen ja Lehtomäki 1998)
Liimaus	VTT Rakennustekniikka (Apilo 1998)
Paalutus	Betoni-Tekra Oy (Pietikäinen 1999)
Pystyöjitus	Kaitos Oy (Palolahti 1998) Geotechnics Holland BV (Cortlever 1998) Containerships (Nyman 1998)
Liukoisuus	VTT Kemiantekniikka (Wahlström et al. 1999)

Viitteet

Arovaara, H. 1996. Suullinen tiedonanto.

Betoni-Tekra Oy 1999. Pietikäinen, O.-H. Kirjallinen tiedonanto 13.1.1999.

Blomster, D. 1989. Pitkäsuon täyttösuunnitelma. Imatran Voima Oy. Vantaa. 9 s.

Containerships 1998. Nyman, M. Suullinen tiedonanto 27.4.1998.

Elg-Yhtiöt 1998. Elg, J. Suullinen tiedonanto 3.11.1998.

Finnsement 1998. Lundström, K. Suullinen tiedonanto.

Geotechnics Holland BV 1998. Cortlever, N. Kirjallinen tiedonanto 27.2.1998.

Helsingin Energia 1998. Oasmaa K. Suullinen tiedonanto.

Häkkinen, T. 1994. Environmental impact of building materials. VTT Research Notes 1590. Espoo. The Technical Research Centre of Finland. 38 s.

Häkkinen, T. ja Mäkelä, K. 1996. Environmental adaption of concrete. Environmental impact of concrete and asphalt pavements. VTT Research Notes 1752. Espoo. 61 s. + liitt. 32 s.

JJ-Asfaltti Oy 1999. Karvonen, J. Kirjallinen tiedonanto 29.1.1999.

Kaitos Oy 1998. Palolahti, A. Suullinen tiedonanto 26.2.1998.

Kalottikone Oy 1998. Karvonen, J. Kirjallinen tiedonanto 29.10.1998.

Lemminkäinen 1996. Ruosteoja, P. Kirjallinen tiedonanto.

Lipasto 2002. Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. VTT

Lohja Rudus 1997. Rämö, P. Kirjallinen tiedonanto 3.1.1997.

Lohja Rudus 1996. Rasimus, K. Suullinen tiedonanto.

- Lohja Rudus 1998. Rasimus, K. Suullinen tiedonanto.
- Lohja Rudus 1998. Määttänen, A. Kirjallinen tiedonanto 24.1.1998.
- Lohja Rudus Oy 1999. Kostiainen. Suullinen tiedonanto. 15.1.1999.
- Markkanen, T. 1996. Suullinen tiedonanto.
- Rautaruukki 1998. Mäkikyrö, M. Kirjallinen tiedonanto 4.2.1998.
- Rautaruukki 1999. Mäkikyrö, M. Kirjallinen tiedonanto 1999.
- RIL 156 1995. Maarakennus. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. Helsinki. 493 s.
- Stripple, H. 1995. Livscykelanalys av väg. En modellstudie för inventering. Institutet för Vatten- och Luftvårdsforskning. IVL B 1210. Göteborg. 105 s.
- Tielaitoksen selvityksiä 23/1997. Masuunikuonan käyttö päällysrakennekerroksissa. Oulu. 36 s.
- Tielaitos 1994. Asfalttiasemien ja kivenmurskaamojen ympäristönsuojelu 1994. Tuotannon palvelukeskus. Helsinki. 24 s.
- Tielaitos 1995. Asfalttiasemien, kivenmurskaamojen ja öljysora-aseman pöly- ja melumittaukset. Uudenmaan tiepiiri. Helsinki 31 s.
- Tielaitos 1998. Uotinen, V.-M. Kirjalliset tiedonannot 19.12.1998 ja 13.1.1999.
- Tielaitos 1998. Komulainen, K. Suullinen tiedonanto 16.9.1998.
- Tielaitos 1998. Eerola, M. Kirjalliset tiedonannot 9.11.1998 ja 22.12.1998.
- Teollisuusjätteiden kaatopaikkakelpoisuus (luonnos 9.11.1999).
- Tyko 2005. Työkoneiden päästömalli. VTT
- Valtatie Oy 1998. Mannonen, T. Kirjallinen tiedonanto 23.10.1998.
- VTT Rakennustekniikka 1999. Apilo, L. Kirjallinen tiedonanto 21.9.1998 ja suullinen tiedonanto 24.9.1998.
- VTT Kemiantekniikka 1998. Siltanen, T. Kirjallinen ja suullinen tiedonanto 17.12.1998.
- Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J., Mäkelä E., Walavaara, M. ja Vahanne, P. 1999.

Liite B: Tuhkanäytteiden koostumustietoja

Alkuaine	Puu-turve-REF- biolietetuhka 1 (letkustodatini)		Puu-turve-REF- biolietetuhka 2 ESP		Puu-turve-REF- biolietetuhka 2 ESP Kenttä 1		Puu-turve-REF- biolietetuhka 2 ESP Kenttä 2		Puu-turve-REF- biolietetuhka 2 ESP Kenttä 3		Puu-turve-REF- biolietetuhka 2 seulottu > 250µm	
	XRF	ICP	XRF	ICP	XRF	ICP	XRF	ICP	XRF	ICP	XRF	ICP
Natrium, Na	11 000		15 000									
Magnesium, Mg	18 000		21 000									
Alumiini, Al	57 000		75 000									
Pii, Si	150 000		150 000									
Fosfori, P	5 300		6 400									
Rikki, S	21 000		24 000									
Kloori, Cl	13 000		4 900									
Kalium, K	19 000	20 200	21 000	19 500	18 900	19 400	19 400	17 500	17 500	19 800	19 800	
Kalsium, Ca	140 000	22 800	110 000	32 000	37 500	40 000	40 000	67 200	67 200	27 700	27 700	
Titaani, Ti	6 000		7 300									
Vanadiini, V	100	70	100	84	89	100	100	110	110	81	81	
Kromi, Cr	300	200	300	230	220	250	250	270	270	220	220	
Mangaani, Mn	2 500		2 700									
Rauta, Fe	44 000		49 000									
Nikkeli, Ni	200		200									
Kupari, Cu	1 200	1 000	1 700	1 600	2 000	2 000	2 000	2 500	2 500	1 400	1 400	
Sinkki, Zn	1 500	1 500	1 600	1 600	1 700	1 800	1 800	2 200	2 200	1 600	1 600	
Arseni, As		45		56	59	89	89	140	140	45	45	
Bromi, Br	300		200									
Rubidium, Rb	100		100									
Strontium, Sr	300		400									
Zirkonium, Zr	200		200									
Tina, Sn	50		70									
Antimoni, Sb	100	120	200	160	170	220	220	370	370	150	150	
Barium, Ba	1 500	1 000	1 600	920	770	930	930	1 000	1 000	790	790	
Lyijy, Pb	400	420	500	520	570	700	700	800	800	510	510	
Kadmium, Cd		11		14	14	17	17	22	22	13	13	
Molybdeeni, Mo		10		13	17	18	18	25	25	12	12	
Seleeni, Se		<25		<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	

Liite B: Tuhkanäytteiden koostumustietoja

Alkuaine	Turve-puutuhka Tuhkalahetin I		Puu-turvetuhka Tuhkalahetin I		Turve-puutuhka karkea jae A		Turve-puutuhka karkea jae B		Puu-turvetuhka karkea jae		Turve-puutuhka hieno jae		Puu-turvetuhka hieno jae	
	XRF	ICP	XRF	ICP	XRF	ICP	XRF	ICP	XRF	ICP	XRF	ICP	XRF	ICP
Natrium, Na	12 000		16 000		16 000				17 000		12 000		15 000	
Magnesium, Mg	15 000		17 000		11 000				11 000		19 000		19 000	
Alumiini, Al	62 000		61 000		70 000				66 000		68 000		53 000	
Pii, Si	160 000		170 000		240 000				240 000		140 000		120 000	
Fosfori, P	15 000		14 000		11 000				8 500		21 000		17 000	
Rikki, S	9 300		16 000		3 700				5 100		16 000		22 000	
Kloori, Cl	1000		2 600		300				500		2 100		5 400	
Kalium, K	23 000	22 000	28 000	19 300	28 000	20 700		18 900	29 000	20 200	2 500	21 800	27 000	22 700
Kalium, Ca	120 000	49 000	150 000	45 200	88 000	23 300		27 500	93 000	26 400	180 000	58 300	210 000	42 800
Titaani, Ti	2 500		5 500		3 100				5 000		2 800		6 000	
Vanadiini, V	200	130	100	120	100	110		120	100	100	200	150	200	130
Kromi, Cr	100	68	200	110	100	67		66	100	73	200	96	200	150
Mangaani, Mn	5 400		6 900		4 000				3 500		9 000		10 000	
Rauta, Fe	71 000		83 000		74 000				78 000		87 000		95 000	
Nikkeli, Ni	100		200		100				100		200		200	
Kupari, Cu	200	130	300	250	100	71		79	200	140	300	200	400	320
Sinkki, Zn	800	700	2 000	1 400	300	220		280	700	460	1 800	1 300	3 200	2 300
Arseni, As	-	50	200	110		5,1		8,1		13	200	100	300	190
Bromi, Br	200		100								400		200	
Rubidium, Rb	100		100		100				100		100		100	
Strontium, Sr	900		1 100		800				800		1 300		1 400	
Yttrium, Y	70										100		100	
Zirkonium, Zr	100		200		300				300		100		200	
Tina, Sn														
Antimoni, Sb	<25			<25		<25		<25				<25		<25
Barium, Ba	1 700	690	2 500	340	1 500	560		630	2 200	680	2 400	510	3 000	840
Lyijy, Pb	<100	85	300	200		57		60	100	100	200	140	400	290
Kadmium, Cd		3,1		5,5		0,89		1,4		1,4		6,5		9,3
Molybdeeni, Mo		16		15		6,9		6,2		6,7		28		25
Seleni, Se	<25			<25		<25		<25		<25		<25		<25

Liite C: Tuhkanäytteiden kaksivaiheisten ravistelutestien tulokset kumulatiivisessa L/S-suhteessa 10

Liuenneiden aineiden määrät on ilmoitettu yksikössä mg/kg kuiva-ainetta.

Näyte	Turve- puutuhka	Turve- puutuhka karkea jae	Turve- puutuhka hieno jae	Puu- turvetuhka	Puu- turvetuhka karkea jae	Puu- turvetuhka hieno jae
Suodoksen pH	12,6	11,8	12,6	12,8	12,1	12,8
Arseni, As	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02
Barium, Ba	64	9,9	290	2,5	5,2	2,2
Kadmium, Cd	<0,01	<0,01	0,011	0,01	0,003	0,02
Koboltti, Co	<0,002	<0,0003	<0,0005	<0,006	<0,001	<0,0067
Kromi, Cr	0,36	0,13	0,16	3,7	0,76	4,1
Kupari, Cu	0,02	0,03	<0,02	<0,02	<0,03	<0,02
Elohopea, Hg	<0,0005	<0,0005	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Molybdeeni, Mo	4,3	1,4	6,1	6,0	1,7	9,0
Nikkeli, Ni	<0,01	0,01	0,03	0,09	0,02	0,10
Lyijy, Pb	0,33	0,07	0,44	2,1	1,7	1,5
Antimoni, Sb	<0,003	<0,01	<0,004	<0,002	<0,001	<0,003
Seleeni, Se	0,22	0,06	0,43	0,54	<0,07	0,95
Vanadiini, V	<0,01	0,06	<0,01	<0,01	0,04	<0,01
Sinkki, Zn	0,17	0,09	0,23	0,92	0,79	0,77
Alumiini, Al	<1,0	106	<4,6	<0,11	<0,83	<0,17
Rauta, Fe	<0,5	<0,60	<0,39	<0,41	0,66	<0,30
Mangaani, Mn	0,03	0,01	<0,07	<0,09	0,01	<0,09
Kloridi, Cl	653	169	1 320	1 750	300	3 090
Fluoridi, F	18	6,7	18	16	7,6	16
Sulfaatti, SO₄²⁻	3 418	1 850	2 990	12 630	3840	17 900
Liuennut orgaaninen hiili, DOC	15	<8,1	9,0	<5,5	7,5	<6,2

Liite D: Puu-turve-REF-biolietetuhkien laatuvaihtelu

Puu-turve-REF-biolietetuhka 1 kokonaispitoisuuksien vaihtelu näytteenoton aikana

Näytteenotto pvm	klo	K mg/kgka	Ca mg/kgka	V mg/kgka	Cr mg/kgka	Cu mg/kgka	Zn mg/kgka	As mg/kgka	Mo mg/kgka	Cd mg/kgka	Ba mg/kgka	Pb mg/kgka
XRF, Minipal	6.2.2007	7:30	18 433	30 705	88	216	1 714	1 632	54	14	816	581
		12:00	17 589	30 202	87	215	1 602	1 627	67	15	829	566
		14:30	17 873	48 711	82	216	1 629	1 598	68	15	783	621
	7.2.2007	8:00	17 821	43 164	82	213	1 605	1 651	65	14	855	628
		11:00	17 784	20 390	81	218	1 705	1 638	58	15	953	418
		14:30	18 614	34 955	86	205	1 535	1 577	55	15	920	493
XRF, Minipal	8.2.2007	6:45	19 834	20 756	88	218	1 568	1 528	25	14	859	371
		11:00	18 485	49 079	84	221	1 870	1 871	76	15	1002	696
	15:20	18 452	48 592	86	230	1 915	1 869	75	15	957	649	
	Kokoomanäyte	18 480	31 177	84	214	1 581	1 617	60	14	989	548	
Vertailu muihin analyysimenetelmiin												
XRF	Kokoomanäyte		110 000	100	300	1 700	1 600	< 100	< 100	< 100	1600	500
ICP	Kokoomanäyte	19 500	32 000	84	230	1 600	1 600	56	13	14	920	520

Puu-turve-REF-biolietetuhka 2 kokonaispitoisuuksien vaihtelu näyttönoton aikana

	Näytteenotto pvm	klo	K mg/kgka	Ca mg/kgka	V mg/kgka	Cr mg/kgka	Cu mg/kgka	Zn mg/kgka	As mg/kgka	Mo mg/kgka	Cd mg/kgka	Ba mg/kgka	Pb mg/kgka
XRF, Minipal	6.2.2007	7:30	24 331	100 576	83	208	848	1 462	58	14	23	305	369
		12:00											
		14:30	19 080	74 353	80	219	776	1 297	36	14	14	358	296
		Päivänäyte 6.2.	24 177	105 072	82	209	870	1 340	48	14	18	344	337
	7.2.2007	8:00	16 135	92 348	79	202	900	1 379	47	14	19	336	354
		11:00	23 443	101 894	86	206	962	1 407	46	14	16	436	381
		14:30	24 026	96 292	85	210	923	1 681	49	14	19	322	354
		Päivänäyte 7.2.	16 965	106 810	81	209	876	1 456	50	14	21	311	367
	8.2.2007	6:45	18 566	101 043	86	208	1 110	1 564	69	14	23	401	481
		11:00	16 524	85 375	80	213	1 204	1 590	66	14	22	409	480
		15:20	16 750	94 535	80	218	1 066	1 419	54	14	19	497	366
		Päivänäyte 8.2.	17 342	90 613	83	210	1 000	1 589	64	14	20	435	428
		Kokoomanäyte	23 143	101 720	85	202	929	1 461	54	14	16	383	412
Vertailu muihin analyysimenetelmiin													
XRF	Kokoomanäyte		140 000	100	300	1 200	1 500	<100	<100	<100	<100	1 500	400
ICP	Kokoomanäyte	20 200	22 800	70	200	1 000	1 500	1 500	45	10	11	1 000	420

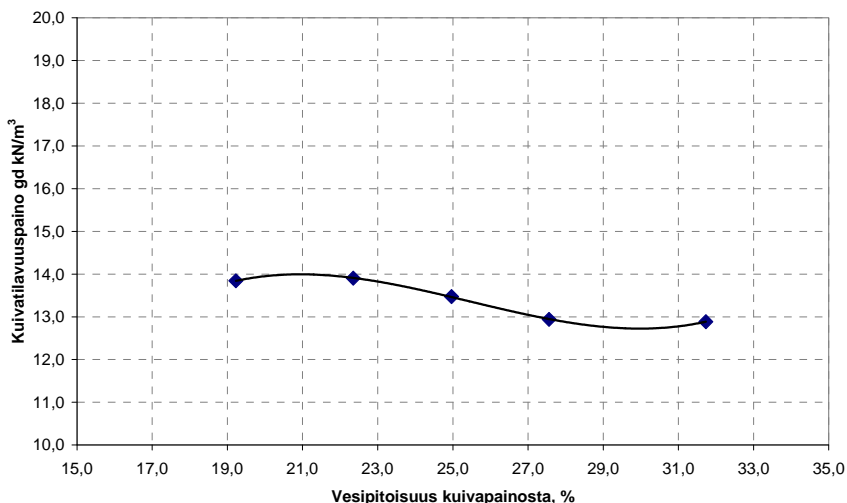
Liite E: Teknisen soveltuvuuden tutkimukset

Näytteet ja tehdyt laboratoriokeet

Turve-puutuhkanäytteille tehtiin laboratoriokeiteita kolmen eri rakeisuuden omaavalle lajikkeelle, joiden tunnuksot olivat *turve-puutuhka*, *turve-puutuhkan karkea jae* ja *puu-turvetuhkan karkea jae*. Routivuusmääritykset tehtiin lajikkeille *turve-puutuhka* ja *turve-puutuhkan karkea jae*. Muut seuraavassa esitettyt laboratoriokeet tehtiin lajikkeelle *puu-turvetuhkan karkea jae*.

Maksimi kuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus

Puu-turvetuhkan karkea jae -lajikkeelle tehtiin Proctor-kokeet, joissa maksimikuivatilavuuspainoksi saatiin $\gamma_{\text{dmax.}} = 13,90 \text{ kN/m}^3$ ja optimivesipitoisuudeksi $w_{\text{opt.}} = 22,4 \%$. Kuvassa E1 on esitetty *puu-turvetuhkan karkea jae* -lajikkeelle tehdyn Proctor-kokeen tulokset.



Kuva E1. Puu-turvetuhkan karkealle jakeelle suoritettun Proctor-kokeen tulokset.

Kapillaarisuus

Turve-puutuhkan kapillaarisuus määritettiin SAHI-kapillarimetrillä. Kapillaarinen nousukorkeus vaihteli kahdella kokeella määritettynä välillä 1,06–1,10 m. Taulukon E1 routivuuskriteerin /2/ perusteella turve-puutuhkan *karkea jae 0508* -lajikkeen kapillaarisuus vastasi lievästi routivaa materiaalia.

Taulukko E1. Routivuuskriteeri kapillaarisuuden perusteella /2/.

Routivuus	Kapillaarinen nousukorkeus, m
Routimaton	< 1
Lievästi routiva	1,0–1,5
Keskinkertaisesti routiva	1,5–2,0
Voimakkaasti routiva	> 2

Vedenläpäisevyys

Puu-turvetuhkan vedenläpäisevyyskokeen näytteet tehtiin 92 % Proctor-tiiviyteen optimivesipitoisuudessa. Vedenläpäisevyyskokeen alussa näytteiden annettiin kyllästyä alapäässä sijaitsevan huokoskiven kautta nostamalla vedenpintaa hitaasti portaittain näytteen yläpinnan tasolle. Vedenläpäisevyysmäärittä-

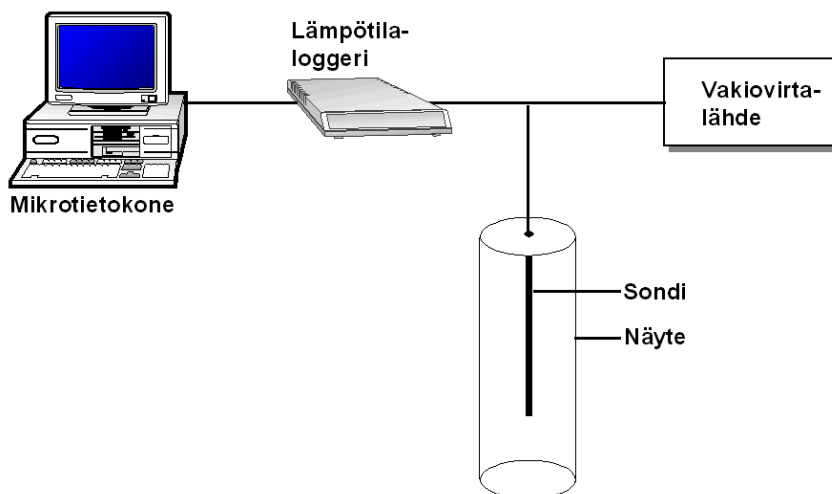
set tehtiin kahdella rinnakkaisnäytteellä. Taulukossa E2 on esitetty vedenläpäisevyyksiköiden tulokset puu-turvetuhkan karkealle jakeelle.

Taulukko E2. Puu-turvetuhkan karkea jae -lajikkeen vedenläpäisevyys rinnakkaisnäytteissä.

Näyte	Vedenläpäisevyys k, m/s
1	$1,0 \cdot 10^{-5}$
2	$1,8 \cdot 10^{-5}$

Lämmönjohtavuus sulana ja jäätyneenä

Puu-turvetuhkan lämmönjohtavuusnäyte rakennettiin 92 % Proctor-tiiviyteen optimivesipitoisuudessa. Sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet määritettiin laboratoriossa yksisondimenetelmällä (lämmönjohtavuustikku) /1/. Mittauslaitteistoon kuuluu vakiovirtalähde, lämpötilaloggeri ja tiedonkeruuyksikkö sekä näytteeseen asennettu haponkestävästä teräksestä valmistettu sondi (kuva E2).



Kuva E2. Periaatekuva lämmönjohtavuuden määrittämisestä lämmönjohtavuustikulla.

Lämmönjohtavuuden määrittäminen perustuu sondin keskipisteessä mitattavan lämmön nousun havaitsemiseen ajan suhteen. Lämmön nousu ja ajan logaritmi muodostavat suoran, jonka kulmakertoimen lämmönjohtavuus määrää kaavan (1) mukaisesti:

$$\lambda = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} (\ln t_2 - \ln t_1) \quad (1)$$

missä	λ on	lämmönjohtavuus (W/Km)
	q	lämmitysteho sondin pituusyksikköä kohti (W/m)
	T	lämpötila (°C)
	t	aika (s).

Lämmönjohtavuusmääritykset tehtiin sulana (lähtölämpötila +20 °C) ja jäätyneenä (lähtölämpötila -10 °C). Sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuus määritettiin kolmen mittaussarjan keskiarvona. Taulukossa E3 on esitetty mitatut lämmönjohtavuudet.

Taulukko E3. Puu-turvetuhkan karkea jae -lajikkeen sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuus.

	Lämmönjohtavuus, W/Km
Sula	0,80
Jäätynyt	1,00

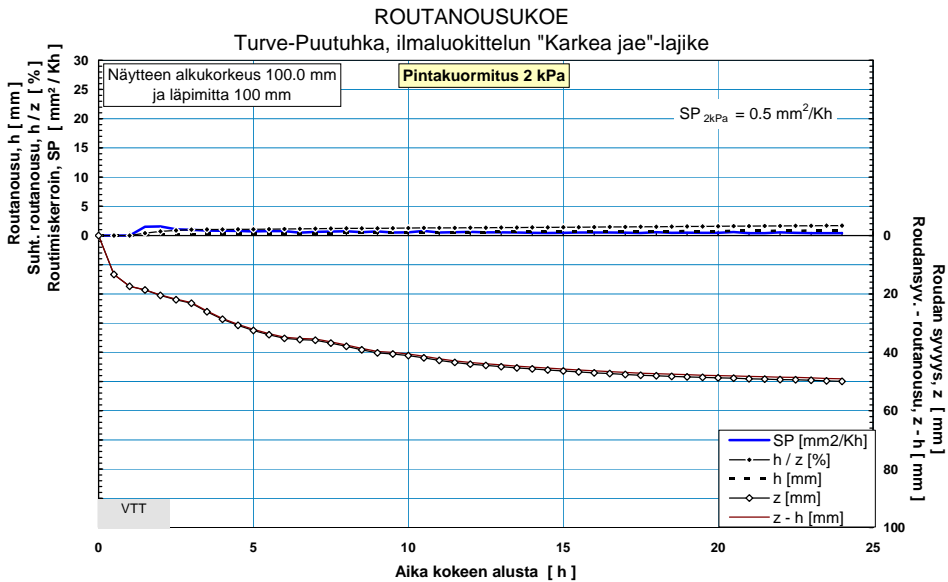
Routivuus

Kahdelle turve-puutuhkalle ja turve-puutuhkan karkealle jakeelle tehtiin routanousukokeet ns. avoimina kokeina. Avoimessa kokeessa näytteellä oli mahdollisuus saada lisävettä ulkopuolisesta vesilähteestä. Routanousukokeilla määritettiin turve-puu-tuhkanäytteiden segregatiopotentiaalin suuruus. Segregatiopotentiaali kuvaa materiaalin kykyä imeä vettä routarajalle routarajan ollessa paikallaan. Routanousukokeita tehtiin molemmille näytteille kaksi kappaletta. Kokeiden välissä näyte sulatettiin kuormituksella 20 kPa.

Turve-puutuhkanäytteisiin lisättiin vettä, jotta routanousunäytteet saatiin tiivistettyä muottiin. Routanousukokeet tehtiin ennen Proctor-kokeita, joten *turve-puutuhkan karkea jae* -näytteen optimivesipitoisuus ei vastannut Proctor-kokeiden tulosta (määritetty *puu-turvetuhkan karkea jae* -lajikkeelle). Routanousukokeessa vesipitoisuus oli 12 paino-% suurempi kuin optimivesipitoisuus Proctor-kokeessa. Turve-puutuhkan karkea jae -näytteen tiheys oli käytännössä sama kuin muissakin kokeissa (93 % maksimi kuivatilavuuspainosta).

Taulukossa E4 on esitetty *turve-puutuhka*- ja *turve-puutuhkan karkea jae* -lajikkeiden kuivatilavuuspainot ja vesipitoisuudet.

kuormituksella vaihteli välillä 0,8–0,9 mm (24 h) ja routanousun suhde jääty-missyvyyteen kokeen lopussa välillä 1,7–1,9 %.



Kuva E4. Turve-puutuhkan karkea jae -näytteen routanousukokeen tulokset 2 kPa:in kuormituksella.

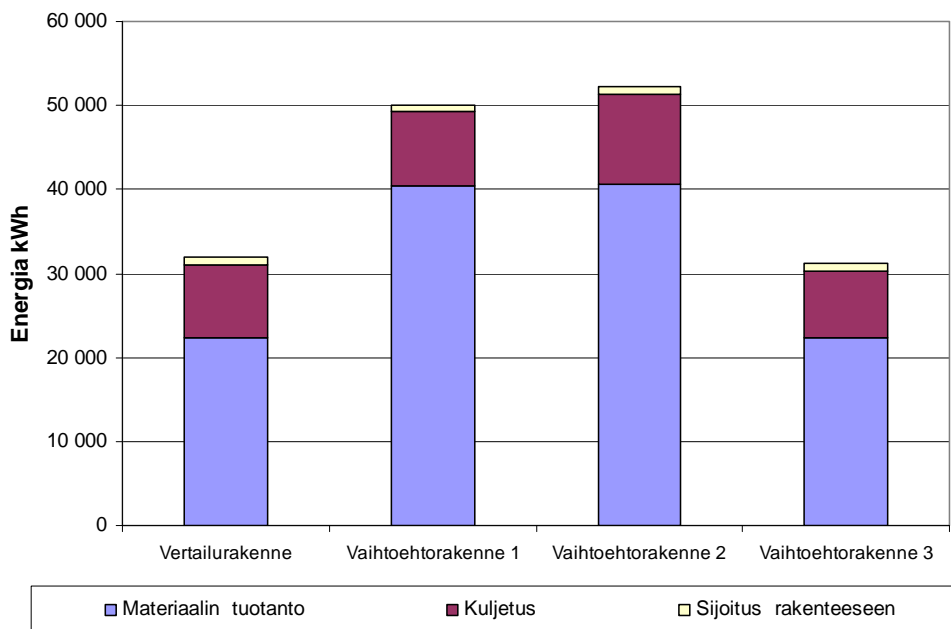
Segregaatiopotentiaalin (SP) suuruuteen perustuvan routivuusluokituksen /2/ perusteella *turve-puutuhkan karkea jae* -lajike oli lievästi routivaa, lähes routimatonta ($0,5 < SP < 1,5 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, kuormitus 2 kPa).

Kirjallisuus

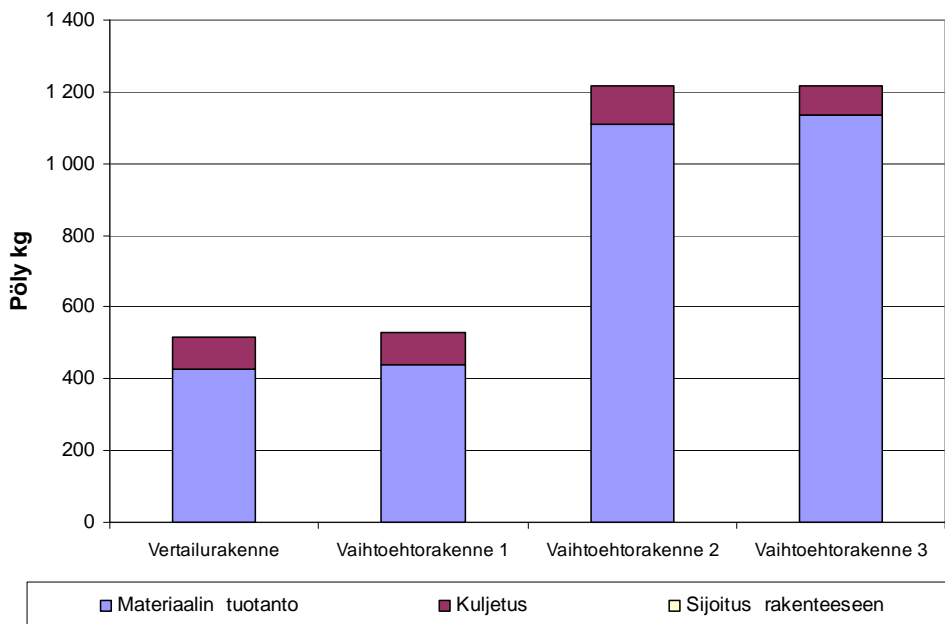
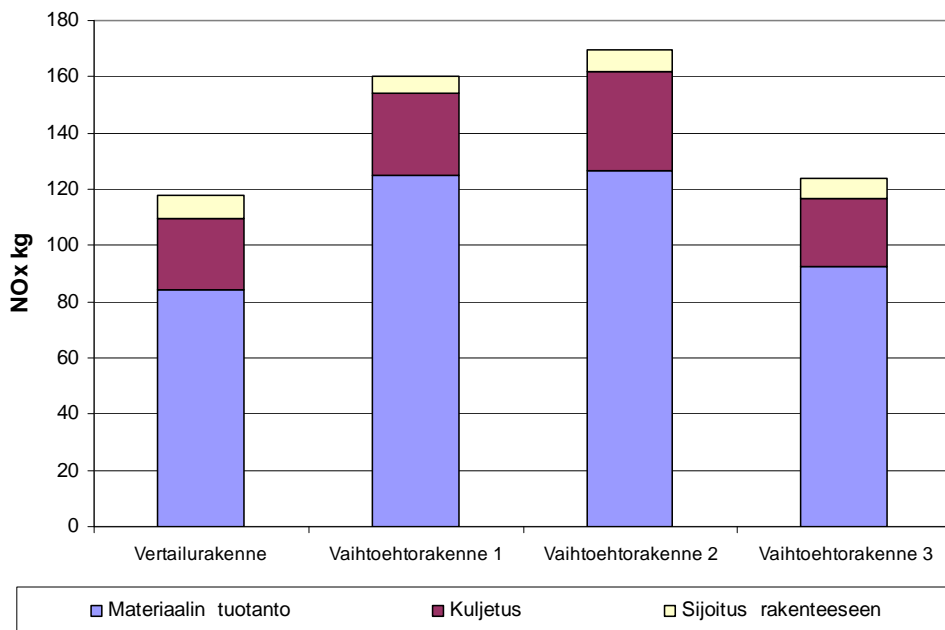
/1/ Kivikoski, H., Saarelainen, S., Ahonen, M., Huttunen, E., Kujala, K., Lämmönjohtavuuden määrittäminen. TPPT, Tien Pohja- ja Päällysrakenteet Tutkimusohjelma, Menetelmäkuvaus TPPT 8. 2001. 12 s. (<http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/8-lammonjoht.pdf>.)

/2/ ISSMFE Technical Committee on Frost, TC-8, Work Report 1985–1989. Frost in geotechnical engineering. Volume 1. VTT Symposium 94. Espoo 1989, pp. 15–25.

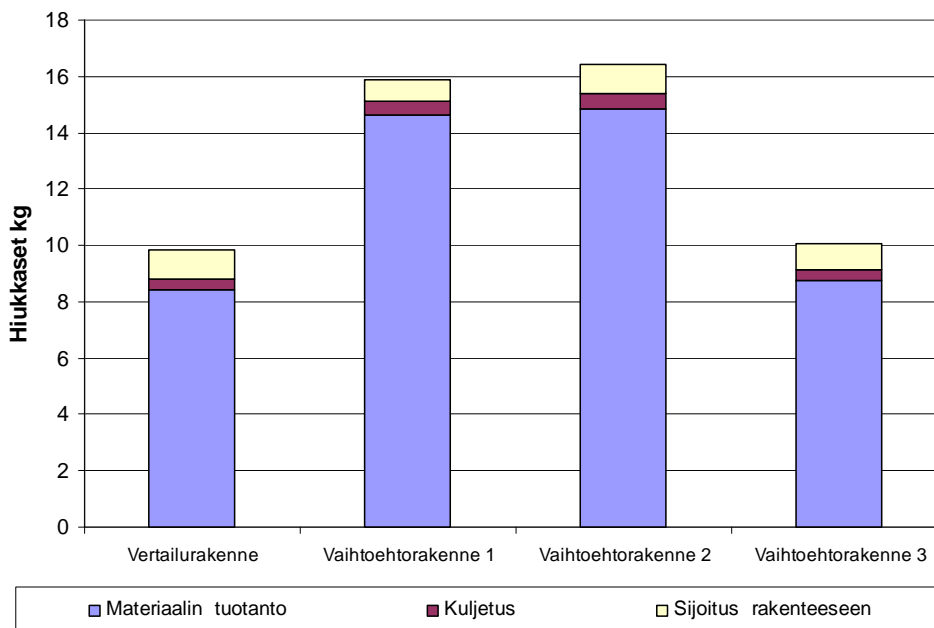
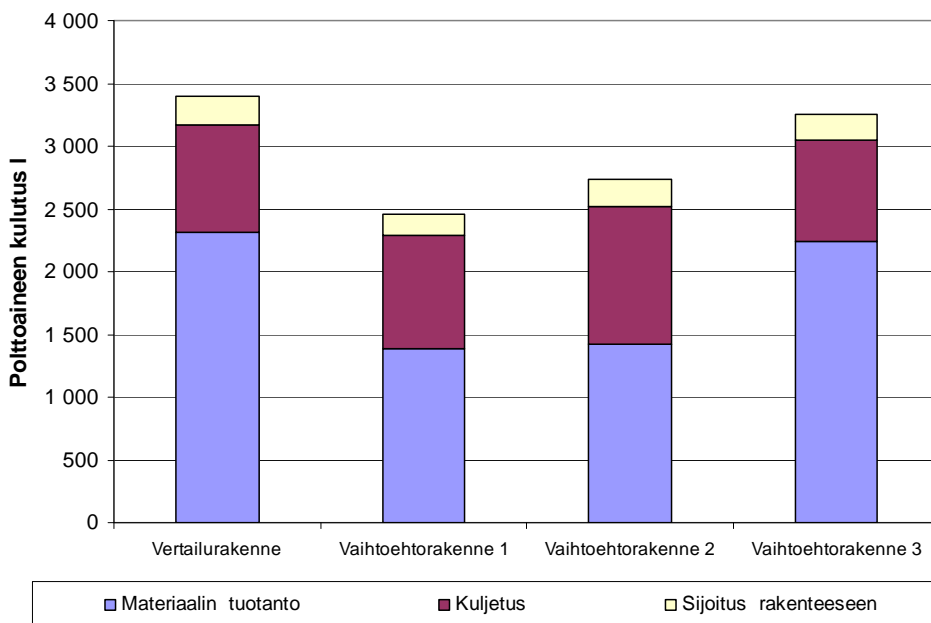
Liite F: Ekotehokkuuslaskelmassa tarkasteltujen tierakennevaihtoehtojen ympäristökuormitukset elinkaarivaiheittain



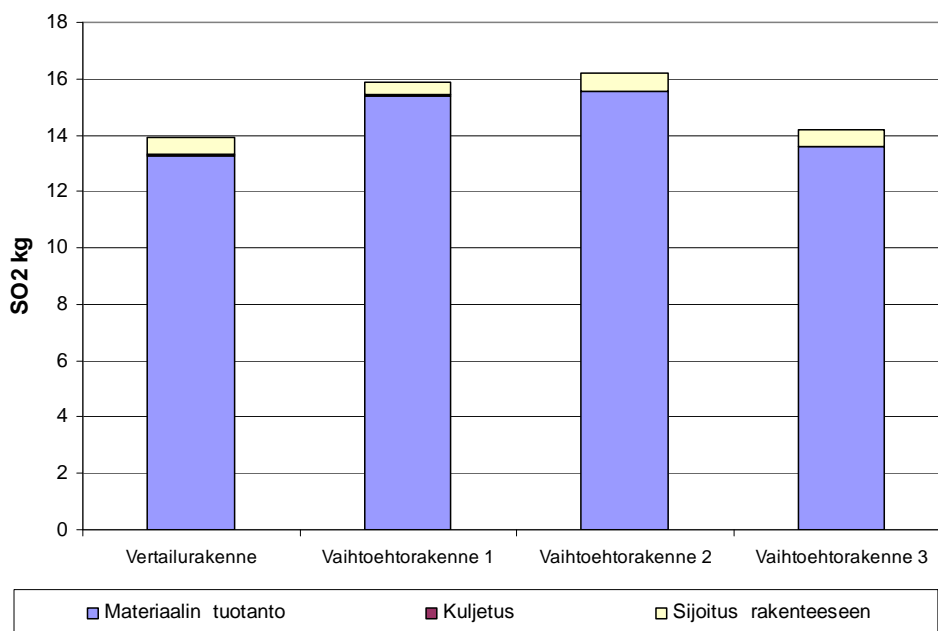
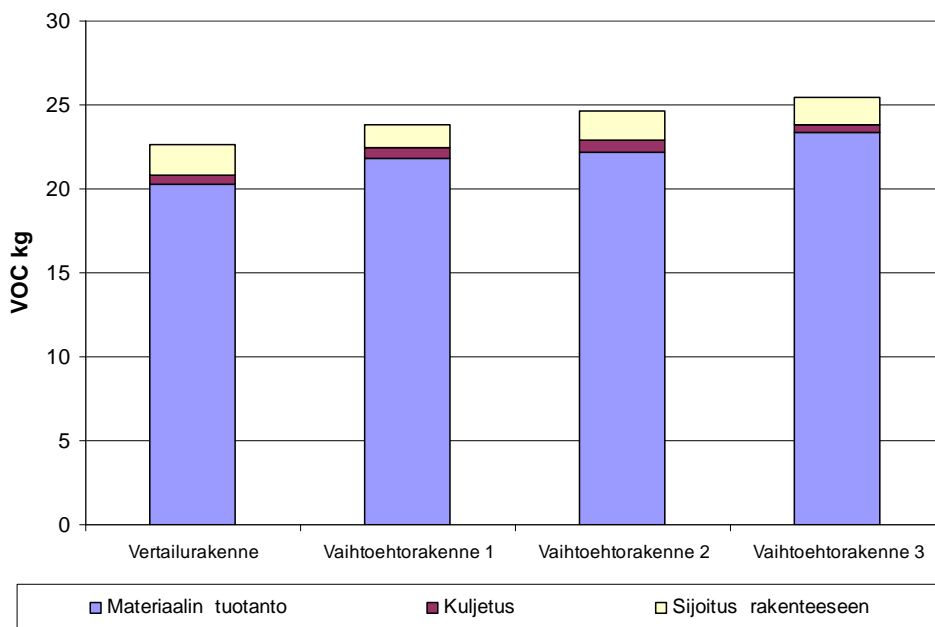
Liite F: Ekotehokkuuslaskelmassa tarkasteltujen tierakennevaihtoehtojen ympäristökuormitukset elinkaarivaiheittain



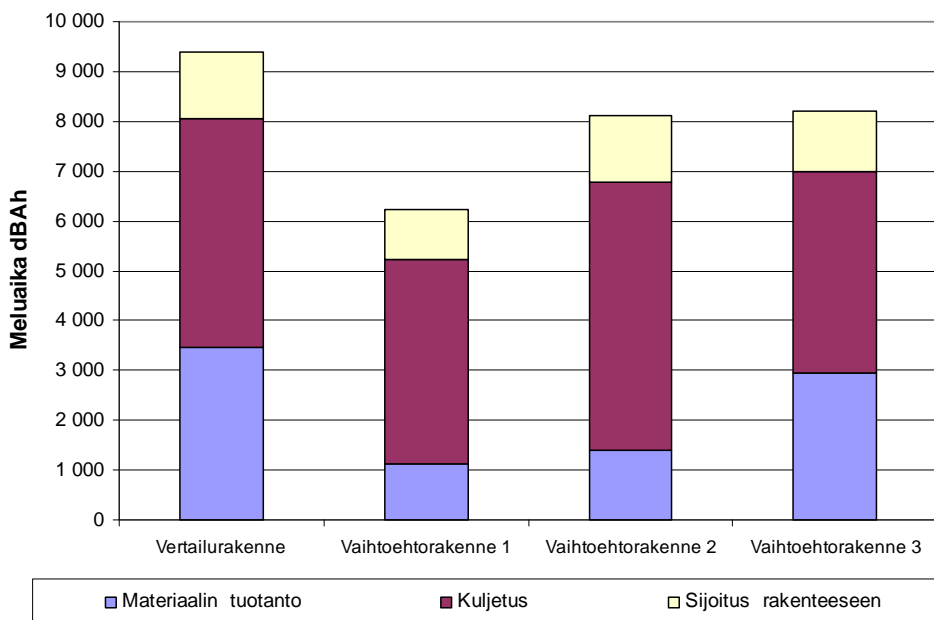
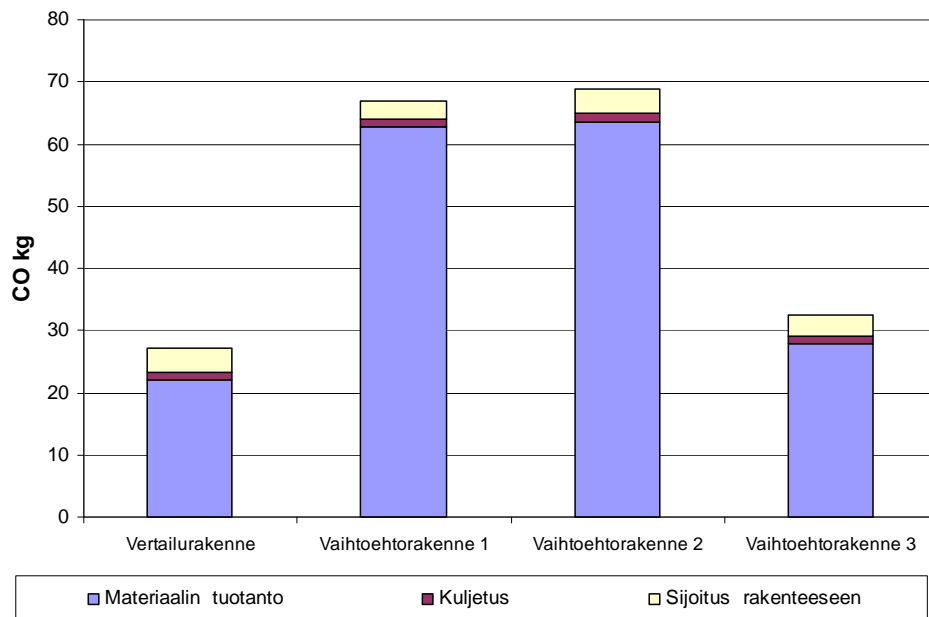
Liite F: Ekotehokkuuslaskelmassa tarkasteltujen tierakennevaihtoehtojen ympäristökuormitukset elinkaarivaiheittain



Liite F: Ekotehokkuuslaskelmassa tarkasteltujen tierakennevaihtoehtojen ympäristökuormitukset elinkaarivaiheittain



Liite F: Ekotehokkuuslaskelmassa tarkasteltujen tierakennevaihtoehtojen ympäristökuormitukset elinkaarivaiheittain





Tekijä(t) Kirsi Korpijärvi, Ulla-Maija Mroueh, Elina Merta, Jutta Laine-Ylijoki, Harri Kivikoski, Eliisa Järvelä, Margareta Wahlström & Esa Mäkelä		
Nimeke Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön		
Tiivistelmä Tutkimuksen tavoitteena oli jalostaa energiantuotannon tuhkista tuotteita maarakennuskäyttöön. Esimerkivoimalaitoksilta kerättyjen tuhkanäytteiden avulla selvitettiin tuhkien ympäristökelpoisuutta ja teknistä soveltuvuutta maarakennuskäyttöön sekä mahdollisuuksia ko. ominaisuuksien parantamiseen jalostamalla. Projektissa tarkasteltiin myös tuhkien jalostamisen ekotehokkuutta ja tuotteistamismahdollisuuksia. Mikään tutkituista tuhkanäytteistä ei sellaisenaan täyttänyt "Eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa" annetun asetuksen VNa 591/2006 vaatimuksia. Lähes vaatimusten mukaisia olivat turvepuutuhkat, jotka valittiin tarkempien tutkimusten kohteeksi. Näiden tuhkien jalostukseen käytettiin tutkimuksessa ilmaluokitteita. Luokittelu paransi tuhkan ympäristökelpoisuutta ja teknistä soveltuvuutta maarakennuskäyttöön. Kustannustarkastelussa havaittiin tuhkan luokittelun olevan todennäköisesti taloudellisesti kannattavaa, mikäli vaihtoehtona on koko tuhkamäärän sijoittaminen kaatopaikalle. Vuotuiset kokonaiskustannukset tuhkan jalostamiselle ovat noin puolet kaatopaikkasijoituksen kustannuksista, kun karkean jakeen saanto on 60 %. Kehitetyn käsittelykonseptin elinkaaren aikaisia ympäristökuormituksia arvioitiin vertailemalla luonnonmateriaalirakennetta erilaisiin tierakennevaihtoehtoihin, joissa karkeaa lentotuhkajaetta ja luokittelematonta lentotuhkaa on hyödynnetty eri tavoin. Lentotuhkavaihtoehtoissa säästyi luonnonmateriaaleja ja polttoainetta, mutta energian kulutus ja päästöt ilmaan olivat suurempia. Elinkaaritarkastelun perusteella tutkittuja tierakenteita ei voida laittaa selkeään paremmuusjärjestykseen. Työssä tarkasteltiin lisäksi mahdollisuuksia helpottaa tuhkien hyötykäyttöä tuotteistamalla ne EY:n uuden jätepuitedirektiivin (2008/98/EY) mahdollistaman <i>End of Waste</i> -menettelyn (EOW) mukaisesti. Tuotteen on oltava turvallinen sille osoitetuissa käyttökohteissa, joten tuotteistaminen tulee tuskin ainakaan lieventämään tuhkien maarakennuskäytön ympäristökriteereitä nykyisestä. Tuotteistaminen ei myöskään poista laadunvalvonnan tarvetta. Jos tuhkista pystytään kohtuullisin kustannuksin jalostamaan tuotevaatimukset täyttävä materiaali ja samalla parantamaan myös teknisiä käyttöominaisuuksia, tuotteistaminen parantaisi kuitenkin tuhkien asemaa markkinoilla. Kaatopaikkakustannusten kasvu tekisi jalostuksesta nykyistä kannattavampaa ja tukisi näin tuhkien hyötykäyttöä.		
ISBN 978-951-38-7317-2 (nid.) 978-951-38-7318-9 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 9372
Julkaisu-aika Elokuu 2009	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 75 s. + liitt. 19 s.
Projektin nimi Tuhkan UUMA-tuotteistus (TUUMA)		Toimeksiantaja(t) Ympäristöministeriö, Jyväskylän Energian-tuotanto Oy, Kotkan Energia Oy, Metso Power Oy, Rudus Oy, Lassila-Tikanoja Oyj, Ekokem-Palvelu Oy, VTT
Avainsanat fly ash, classification, earth construction, productisation		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374



Author(s) Kirsi Korpijärvi, Ulla-Maija Mroueh, Elina Merta, Jutta Laine-Ylijoki, Harri Kivikoski, Eliisa Järvelä, Margareta Wahlström & Esa Mäkelä		
Title Processing of fly ash for earth construction		
Abstract The aim of this project was to refine energy production ashes to high-quality products for earthworks. Fly ash samples were collected from different power plants and their environmental and technical applicability for earthworks were determined. Also the possibilities to improve properties of ashes by processing were investigated. None of the analysed ash samples fulfilled the requirements of Government Degree (591/2006) concerning the recovery of certain wastes in earth construction. Peat-wood ashes were close to the limit values and they were selected for further investigations. Refining of peat-wood ashes was performed by air classification. Classification improved the environmental and technical applicability of ash for earthworks. Calculation of costs indicated that the classification of ash can be economically profitable if the other alternative is the landfilling of the entire ash amount of a power plant. Annual total costs for ash refining are about half of the landfilling costs, if the yield of coarser ash fraction is 60 %. Life cycle environmental load of the developed ash refining concept was estimated by comparing road structures, in which coarse ash fraction and untreated ash are used in various ways. A road structure made of natural materials was used as a reference. In road structures including fly ash the need for natural materials and fuel was reduced, but the energy consumption and emissions to air were increased. On the basis of life cycle survey the studied road structures can not be arranged into a particular order. The possibilities to facilitate recycling of ashes by productisation according to End of Waste -procedure, enabled by EU's new waste directive (2008/98/EC), were also reviewed in this project. The usage of products is not officially supervised equally to waste recycling and a product must be safe when used according to instructions for use. Therefore productisation of ashes will probably not reduce existing environmental criteria for earth construction. It does not remove the need for quality control either. If ash material, that fulfils the product requirements and has adequate technical properties, can be produced with reasonable costs the productisation can improve the position of ashes on the market. Increase in landfill costs would make the refining more profitable and would support recycling that way.		
ISBN 978-951-38-7317-2 (soft back ed.) 978-951-38-7318-9 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Publications 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 9372
Date August 2009	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 75 p. + app. 19 p.
Name of project From ashes to UUMA-products		Commissioned by Ympäristöministeriö, Jyväskylän Energiantuotanto Oy, Kotkan Energia Oy, Metso Power Oy, Rudus Oy, Lassila-Tikanoja Oyj, Ekokem-Palvelu Oy, VTT
Keywords fly ash, classification, earth construction, productisation		Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374

Tuhkat ovat merkittävästi kaatopaikkoja kuormittava jätejäte. Jätelainsäädännön ja jätesuunnitelmien tavoitteiden mukaan ne pitäisi ensisijaisesti hyödyntää, jos se on teknisesti mahdollista eikä taloudellisesti aiheuta kohtuuttomia kustannuksia jätteen muuhun käsittelyyn verrattuna. Sopivien hyötykäyttökohteiden löytyminen etenkin seostuhkille on usein vaikeaa. Tuhkien laadun parantaminen erilaisin käsittelymenetelmin on yksi vaihtoehto niiden hyötykäyttöasteen parantamiseksi.

Julkaisussa esitetään esimerkkituhkien avulla, kuinka energiantuotannon tuhkia voitaisiin jalostaa paremmin maarakennuskäyttöön soveltuviksi. Lisäksi tutkimuksessa on tarkasteltu tuhkien jalostamisen ekotehokkuutta ja tuotteistamismahdollisuuksia.