

Hanasaaren B-voimalaitoksen jätehuolto ja sivutuotteet

1. Muutokset jätehuoltoon

Puupelletin 40 %:n seospoltto ei normaaliaikaisessa tuotannossa aiheuta muutoksia voimalaitoksen jätehuoltoon, jätejakeisiin tai jätteiden määriin lukuun ottamatta palamisen sivutuotteita (pohjatuhka, lentotuhka ja rikinpoiston lopputuote).

2. Poikkeukselliset tilanteet

Satunnaisissa laitteistojen pesutilanteissa voi syntyä puuainesta sisältäviä pesuvesiä. Pesuvedestä erotetaan puuaines ennen veden johtamista viemäriin. Erotettu puuaines ohjataan uudelleen polttoon.

Häiriötilanteissa, esimerkiksi jouduttaessa käyttämään pellettisiilon hätäpurkausjärjestelmää, suuria määriä pellettiä tai sahanpurua puretaan siilosta esimerkiksi siirtolavalle. Sahanpuru syntyy kun pelletit hajoaa. Siilosta puretut pelletit tai sahanpuru pyritään ohjaamaan uudelleen polttoon. Polttoon kelpaamaton osuus toimitetaan kaatopaikalle.

3. Syntyvät sivutuotteet ja niiden käsittely

Puupelletin 40 %:n seospolton myötä kaikkien syntyvien palamisen sivutuotteiden määrä pienenee vähintään neljänneksellä. Puupelletti sisältää tuhkaa 0,5 -3 % ja rikkiä 0,15 -0,4 % pellettilaadusta riippuen. Taulukossa on esitetty syntyvien sivutuotteiden määrät 40 %:n ja 10 %:n biopolttoaineosuuksilla.

Biopolttoaineen osuus	Pohjatuhka (PT), t/a	Lentotuhka (LT), t/a	Rikinpoiston lopputuote (RPT), t/a
40 %	9 000	40 000	6 000
10 %	12 000	59 000	8 000

Puupelletin tuhkapitoisuus kivihiilen verrattuna on pieni (0,5 - 3 % vs. 8,5 - 15 %). Laskennallisesti puupelletin 40 %:n seospoltossa syntyvästä kokonaistuhkamäärästä 2,7 - 14,3 % on peräisin puusta (laskettaessa kivihiilen 12 %:n keskimääräisellä tuhkapitoisuudella).

Puupelletin 40 %:n seospoltossa syntyvien sivutuotteiden ominaisuuksia (ympäristökelpoisuus ja geotekniset ominaisuudet) on arvioitu liitteenä 10.1 olevassa erillisselvityksessä koskien Helsingin Energian kehitysohjelman eri vaihtoehtojen vaikutuksia sivutuotteisiin.

Syntyvät sivutuotteet hyötykäytetään mahdollisuuksien mukaan. Sivutuotteiden laatua valvotaan sekä hyötykäytön että mahdollisen kaatopaikkasijoituksen vaatimusten mukaisesti.

Pohjatuhka käytetään maarakentamiseen ja muihin luonnon kiviaineksia korvaavissa sovellutuksissa. Lentotuhkaa hyödynnetään soveltuvien osin rakennustuoteteollisuudessa. Lisäksi lentotuhkaa sekä lentotuhkan ja rikinpoiston lopputuotteen seoksia hyödynnetään soveltuvien osin erilaisissa maarakentamissovellutuksissa.

Ne sivutuotejakeet, jotka eivät kelpaa hyödyntämissovellutuksiin, sijoitetaan kunkin jätejakeen kaatopaikkakelpoisuuden mukaiselle kaatopaikalle.

4. Rakentamisen aikaiset jätteet

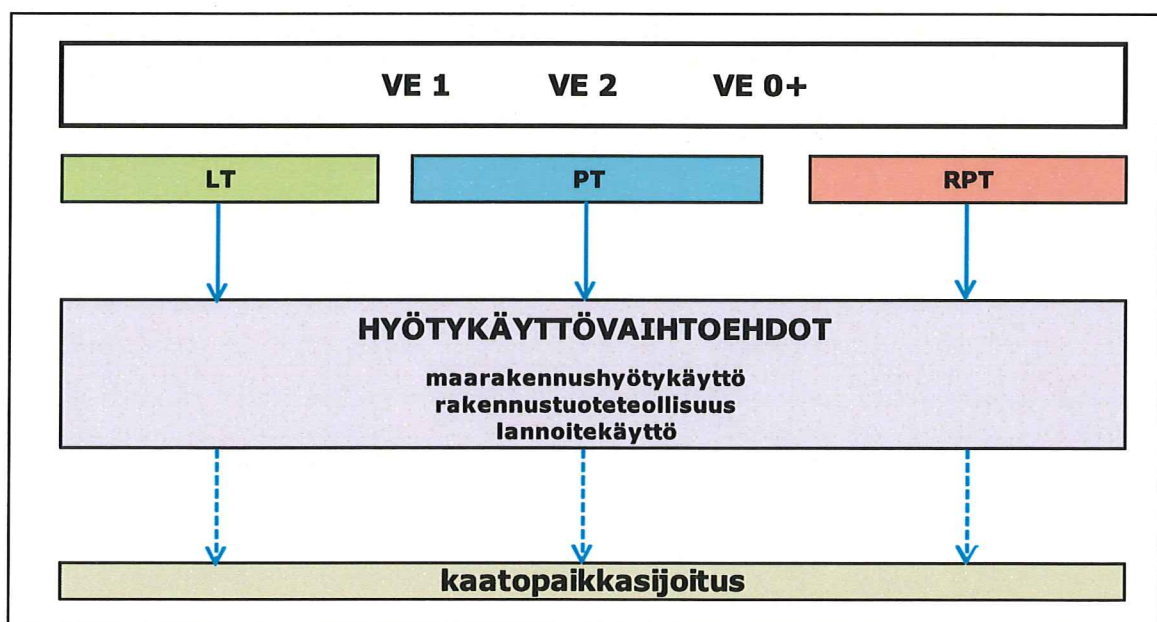
Pellettijärjestelmien rakennustöiden aikana syntyy normaalia enemmän jätteitä. Rakennusjätteet toimitetaan hyötykäyttöön ja, jos tämä ei ole mahdollista, ne toimitetaan käsittelijälle, jolla on lupa ottaa vastaan ko. jätettä.

Liitteet

10.1 Vuosaaren C-voimalaitoksen ympäristövaikutukset, Palamisen sivutuotteet, Ramboll Oy, 22.1.2014.

VUOSAAREN C- VOIMALAITOKSEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

PALAMISEN SIVUTUOTTEET



Vastaanottaja

Helsingin Energia

Asiakirjatyyppi

Erillinen raportti YVA-selostukseen

Päivämäärä

22.1.2014

Päivämäärä **22.1.2014**

Laatija **Ins. AMK Tarja Niemelin, DI Marjo Ronkainen**

Tarkastaja **Helsingin Energialta Ilkka Toivokoski, Sari Väättäjä**

Viite **Rambollin työnumero 82141074-007**

SISÄLTÖ

1.	JOHDANTO	6
2.	TYÖVAIHEET JA VAIHTOEHDOT	6
3.	POLTTOAINEIDEN PERUSTIEDOT JA SIVUTUOTEMÄÄRÄT	7
3.1	Kivihilli	7
3.2	Puupelletti	7
3.3	Metsähake	7
3.4	Poltossa muodostuvat sivutuotteet	8
3.4.1	Kivihillen polton tuhkat	9
3.4.2	Puunpolton tuhkat	10
3.4.3	Seospolton tuhkat	10
3.4.4	Rikinpoiston lopputuote	10
3.5	Sivutuotemäärät	11
4.	POLTTOAINEEN VAIKUTUKSET HYÖDYNNETTÄVYYTEEN	13
4.1	Vaikutukset ympäristöominaisuuksiin	14
4.2	Helsingin kaupungin ohjeistus	16
4.3	Vaikutukset geoteknisiin ominaisuuksiin	17
5.	HYÖTYKÄYTTÖVAIHTOEHDOT	19
5.1	Maarakennustekniset hyötykäyttösovellutukset	19
5.1.1	Massiiviset lentotuhkarakenteet	20
5.1.2	Tuhkaseosrakenteet	20
5.1.3	Pohjatuhkakerrosrakenteet	20
5.1.4	Tuhka stabiloinnin sideaineena	20
5.2	Hyötykäyttö rakennustuoteteollisuudessa	25
5.2.1	Betoniteollisuus	25
5.2.2	Sementtiteollisuus	27
5.2.3	Tuhkan käyttö asfaltin seosaineena	28
5.2.4	Kipsilevyteollisuus	28

5.2.5	CE-merkintä	28
5.3	Tuhkan käyttö lannoitteena ja rakeistus	29
5.3.1	Rakeistus	31
6.	VARASTOINTI- JA KÄSITTELYVAIHTOEHDOT MAARAKENTAMISTA VARTEN	32
6.1	Varastointi	32
6.2	Sekoitus ja laadun parantaminen	34
7.	KAATOPAIKKASIJOTUS JA LOUHOSTÄYTÖT	36
7.1	Kaatopaikkasijoitus	36
7.2	Louhostäytöt	37
8.	KIVIAINESTARPEET UDELLAMAALLA	37
8.1	Pääkaupunkiseudun ja Uudenmaan kiviainestarpeet	37
8.2	Ylijäämämaat	39
8.3	Pohjatuhka ja lentotuhka	39
8.3.1	Vertailu kiviainestarpeesta	39
8.4	Tuhkien hyödyntämisen periaatteet	39
9.	JOHTOPÄÄTÖKSET	41
	Lähdeluettelo	48

LIITTEET

Liite 1a	Betoniin käytettävän lentotuhkan kemialliset vaatimukset
Liite 1b	Betoniin käytettävän lentotuhkan fysikaaliset vaatimukset
Liite 1c	Puutuhkien betonin kannalta tärkeimmät pitoisuudet ja kivihiili- tuhkan raja-arvot kyseisille pitoisuuksille
Liite 2	Sementtistandardin mukaiset sementtien koostumusvaatimukset
Liite 3a	Kirjallisuusarvoja tuhkien metallien pitoisuuksista verrattuna metsäkäytön raja-arvoihin.
Liite 3b	Eri tuhkalajien ravinnepitoisuuksia
Liite 3c	Puutuhkan ravinnepitoisuuksien vaihtelut eri puolajeilla

1. JOHDANTO

Tämä raportti on osa Helsingin Energian Vuosaaren rakennettavan voimalaitoksen ympäristövaikutusten arviointiohjelmaa. Raportin tarkoituksena on olla tukena ympäristövaikutusten arviointia tehdessä.

Palamisen sivutuotteiden hyötykäyttöä ja käsittelyä ohjaa ympäristönsuojelulaki (86/2000), ympäristönsuojeluasetus (169/2000) että jätelaki (646/2011). Jätelain 2 luvun 8 § mukaan kaikessa toiminnassa on noudatettava etusijajärjestystä:

”Ensisijaisesti on vähennettävä syntyvän jätteen määrää ja haitallisuutta. Jos jätettä kuitenkin syntyy, jätteen haltijan on ensisijaisesti valmistettava jäte uudelleenkäyttöä varten tai toissijaisesti kierrätettävä se. Jos kierrätys ei ole mahdollista, jätteen haltijan on hyödynnettävä jäte muulla tavoin, mukaan lukien hyödyntäminen energiana. Jos hyödyntäminen ei ole mahdollista, jäte on loppukäsiteltävä.

Toiminnanharjoittajan, jonka tuotannossa syntyy jätettä tai joka ammattimaisesti kerää taikka ammattitai laitosmaisesti käsittelee jätettä, ja 48 §:ssä tarkoitetun tuottajan sekä muun jätehuoltoon osallistuvan ammattimaisen toimijan on noudatettava etusijajärjestystä sitovana velvoitteena siten, että saavutetaan kokonaisuutena arvioiden lain tarkoituksen kannalta paras tulos. Arvioinnissa otetaan huomioon tuotteen ja jätteen elinkaaren aikaiset vaikutukset, ympäristönsuojelun varovaisuus- ja huolellisuusperiaate sekä toiminnanharjoittajan tekniset ja taloudelliset edellytykset noudattaa etusijajärjestystä.”

Tuhkien maarakennushyötykäyttöä ohjaa Valtioneuvoston asetus 591/2006 eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Asetuksessa annetaan raja-arvot tuhkien hyödyntämiselle, joiden vaatimukset täytettyään, niitä voidaan hyödyntää ilmoitusmenettelyllä. Muussa tapauksessa tuhkia on mahdollista hyödyntää ympäristölupamenettelyn kautta.

Lentotuhkan hyödyntämistä rakennustuoteteollisuudessa määrittää betonin osalta standardi SFS-EN 450-1, asfalttimassojen osalta standardi SFS-EN 13055-2 ja sementin osalta standardi SFS-EN 197-1.

Lentotuhkan käyttöä lannoitteena ohjaa lannoitevalmistelaki (539/2006) sekä maa- ja metsätalousministeriön asetus 24/11. Asetuksessa annetaan tiukat raja-arvot tuhkan hyödyntämisestä maa- ja puutarhataloudessa tai metsätaloudessa.

Sivutuotteiden sijoittamista kaatopaikoille ohjaa Valtioneuvoston asetus 331/2013 kaatopaikoista. Asetuksessa annetaan raja-arvot materiaalin kaatopaikkakelpoisuudesta pysyväälle, tavanomaiselle ja vaaralliselle jätteelle.

Edellä mainittujen lakien, asetusten, standardien sekä kirjallisuudesta löytyneiden tietojen pohjalta tässä selvitysraportissa esitetään vaihtoehtoja sivutuotteiden hyödyntämiselle ja tarkastellaan polttoainekoostumuksen vaikutusta hyödynnettävyyteen.

2. TYÖVAIHEET JA VAIHTOEHDOT

Palamisen sivutuotteiden laadun ja käsittely- ja hyötykäyttövaihtoehtojen osalta tarkasteltavat voimalaitokset ovat Vuosaari C sekä Hanasaari B ja Salmisaari B.

Tarkasteltavat asiat ovat:

- Palamisen sivutuotteiden (pohja- ja lentotuhka sekä rikinpoiston lopputuote) laatu sekä käsittely- ja hyötykäyttövaihtoehdot
- Rikinpoiston osalta vaihtoehdot ovat:
 - märkämenetelmä VuC- voimalaitoksessa. Voimalaitoksen toiminta ei tämän hetken tietojen mukaan edellytä rikinpoistolaitosta. Märkämenettely on otettu tarkasteluun mukaan havainnollistamaan rikinpoistolaitoksen vaikutuksia eri sivutuotteiden määriin.
 - rikinpoistolaitosta ei tarvita VuC:ssa (puupolttoaine, seospolttu)
 - puolikuiva rikinpoistomenetelmä Hanasaaren B- ja Salmisaaren B-voimalaitoksessa
- Arvioidaan julkisesti saatavilla olevan tiedon perusteella polttoainekoostumuksen vaikutus hyötykäytettävyyteen, kaatopaikkakelpoisuuteen sekä materiaalin maarakennusteknisiin ominaisuuksiin

- Esitellään useita maarakennusteknisiä hyötykäyttösovellutuksia ja arvioidaan niiden vahvuudet, heikoudet, mahdollisuudet ja uhat (ns. SWOT-analyysi) pitkäaikaisen kokemuksen perusteella
- Selvitetään ko. voimalaitosten muodostuvien sivutuotemäärien ja käyttömahdollisuuksien pohjalta vertailu pääkaupunkiseudun ja Uudenmaan kiviainestarpeista

YVA-lain mukainen eri hankevaihtoehtojen vertailu on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Hankevaihtoehtojen vertailu.

Vaihtoehto	Kuvaus
VE1	Laitos Vuosaaressa 745 MW. Hanasaaren voimalaitos puretaan ja lakkautetaan, kun Vuosaari C on käytössä. Salmisaaren B-voimalaitos jatkaisi edelleen polttaen 5-10 % biopolttoaineita. Vuosaaren suunniteltavan voimalaitoksen tavoiteltu polttoainejakauma olisi 80 % biopolttoaineita ja 20 % kivihiiltä. Tässä raportissa tarkastellaan myös tilanteita, jossa Vuosaaren laitos polttaisi 100 % biopolttoainetta (10 % pellettiä ja 90 % haketta) ja 100 % kivihiiltä.
VE2	Laitosta Vuosaareen ei rakennetta. Biopolttoaineen seospoltto Hanasaaren B- ja Salmisaaren B-voimalaitoksissa; 40 % biopolttoainetta ja 60 % kivihiiltä.
VE0+	Helsingin Energia katsoo kaupunginvaltuuston päätös huomioon ottaen, että tulevassa energiaratkaisussa ei ole ns. nollavaihtoehtoa. Kun ympäristövaikutusten arvioinnissa on kuitenkin oltava myös nollavaihtoehto, tämä on Hanasaaren B- ja Salmisaaren B-voimalaitosten polttoaineen pitäminen nykyisenä kivihiilenä. Voimalaitoksissa tehdään IE-direktiivin edellyttämät muutokset ja biopolttoaineiden osuus käytettävästä polttoaineesta on 5-10 %.

3. POLTTOAINEIDEN PERUSTIEDOT JA SIVUTUOTEMÄÄRÄT

3.1 Kivihiili

Kivihiilen poltossa muodostuu tuhkaa noin 10 – 15 painoprosenttia kivihiilen kosteasta massasta. Suomessa muodostuva kivihiilen tuhka on pölynpolton tuhkaa, jolloin 80 – 100 % tuhasta on lentotuhkaa. Kivihiili sisältää runsaasti tuhkaa, mikä näkyy kivihiiltä polttavien laitosten suurena tuhkamääränä polton sivutuotteissa. Lisäksi rikkipitoisuus on melko korkea, mikä vaikuttaa rikinpoiston lopputuotteen runsaaseen muodostumiseen.

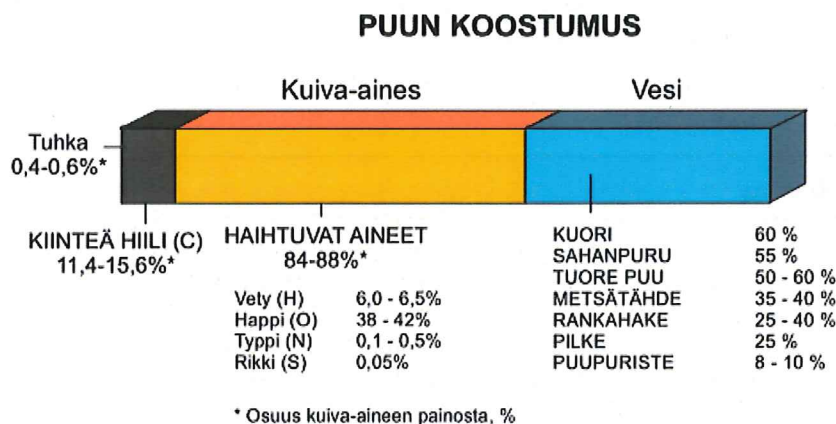
3.2 Puupelletti

Puupelletit ovat energiatihedeltään erittäin tiiviitä verrattuna puuhalkoihin, hakkeisiin, jyrshinturpeisiin tai muihin verraten käsittelemättömiin polttoaineisiin nähden. Puupelletille on ominaista alhainen tuhka- ja rikkipitoisuus. Puupolttoaine on käytännössä rikitöntä. Biopolttoaineiden irtotihedyet vaihtelevat 600-750 kg/m³ välillä riippuen materiaalista (Alakangas 2000). Vuosaari C-voimalaitoksen esisuunnittelussa on käytetty teollisuuspelletin tuhkapitoisuusarvona 1,5 %.

3.3 Metsähake

Vuosaari C -voimalaitoksessa arvioidaan käytettävän polttoaineena 90 % metsähaketta biopolttoaineesta. Metsähakkeen tuhkapitoisuus vaihtelee 1-3 m-% kuiva-aineesta ja sillä on alhainen rikkipitoisuus, < 0,05 %. Puupolttoaineiden ominaisuudet vaihtelevat melko paljon riippuen mistä puulajista ja puun osasta (runko, kuori, oksat) on kyse (Flyktman, Kärki, Hurskainen, Helynen, Sipilä, 2011).

Kuvassa 1 on esitetty puun koostumus. Vesipitoisuus vaihtelee suuresti riippuen puumassan koostumuksesta.



Kuva 1. Puun koostumus (Alakangas 2000).

Taulukkoon 2 on koottu tarkasteltavien Helsingin Energian voimalaitoksissa poltettavien polttoaineiden eli kivihiilen, puupelletin ja metsähakkeen ominaisuuksia.

Taulukko 2. Kivihiilen, pelletin ja metsähakkeen keskimääräiset tuhkapitoisuudet, energiasäällöt, rikkipitoisuudet ja tiheydet.

	Kivihiili	Puupelletti	Metsähake
Tuhkaa [%]	8,5-15	< 0,7	1-3
Energiasisältö [MWh/t]	7,003	4,75	2,85
Rikkipitoisuus [% k.a.]	0,25-3,1	0,03	<0,05
Tiheys [t/m³]	0,8	0,7	0,3

3.4 Poltossa muodostuvat sivutuotteet

Energiantuotannon polttoprosesseissa sivutuotteina muodostuu tuhkaa, jonka laatu riippuu polttoprosessista, polttoaineesta ja tuhkanerotustekniikasta. Tuhka on lähtökohtaisesti luokiteltu jätteeksi. Polttoprosessissa palamattomat aineet muodostavat tuhkan. Tuhkalaadut luokitellaan Suomessa niiden keräyspaikan (pohja- ja lentotuhka) ja polttoprosessin polttoainekoostumuksen mukaan kivihiilen polton-, seospolton- sekä rinnakkaispolton tuhkiin (taulukko 3). 1.7.2013 voimaan tullut eurooppalainen toissijaisten kiviainesten standardi (CEN/TC 154/WG12) luokittelee tuhkat hieman toisin. Tämän standardin mukainen luokittelu on esitetty taulukossa 4 (Kiviniemi ym. 2012).

Taulukko 3. Suomessa tuhkien luokitteluun käytetyt määritelmät (Kiviniemi ym. 2012).

	Nimike	Määritelmä
Keräyspaikka	Pohjatuhka	Kattilan pohjalle kerääntyvä tai poistettava tuhka- ja
	Lentotuhka	Savukaasuista erotettava tuhka- ja
Polttoainekoostumus	Kivihiilen poltto	Kivihiilen polton lentotuhka
	Seospoltto	Tavanomaisten polttoaineiden seospoltto
	Rinnakkaispoltto	Jätteiden ja tavanomaisten polttoaineiden rinnakkaispoltto

Taulukko 4. Eurooppalaisen standardin CEN/TC 154/WG12 mukainen luokittelu (Kiviniemi ym. 2012).

	Tunnus	Määritelmä
B Yhdyskuntajätteenpoltto	B1	Yhdyskuntajätteenpolton pohjatuhka
	B2	Yhdyskuntajätteenpolton lentotuhka
C Kivihiilen poltto	C1	Kivihiilen pölypolton lentotuhka
	C2	Kivihiilen leijupetipolton lentotuhka (750-900 °C)
	C3	Kivihiilen kattilakuona (1500-1700 °C)
	C4	Kivihiilen arinapolton pohjatuhka
	C5	Kivihiilen leijupetipolton lentotuhka (800-900 °C)
I Muut	I1	Paperilietteenpolton tuhka
	I2	Vedenkäsittelyjätteenpolton tuhka
	I3	Biomassatuhka

3.4.1 Kivihiilen polton tuhkat

Kivihiilivoimalaitosten palamisen sivutuotteet koostuvat pääasiassa lentotuhkasta (83 %). Pohjatuhkan osuus on noin 12 % ja loput 5 % rikinpoiston lopputuotetta. Suomessa kivihiilen poltossa muodostuu vuosittain 500 000 tonnia lentotuhkaa ja noin 90 000 tonnia pohjatuhkaa (Hakari 2007).

Kivihiilen polton pohjatuhkat ovat lentotuhkia karkeampia materiaaleja. Pohjatuhkat voivat olla rakeisuudeltaan hyvin suhteistuneita eli partikkelikokojakauma on asettunut laajalle alueelle. Pohjatuhkan rakeisuus voi vaihdella 0,002-16 mm välillä (Kiviniemi ym. 2012). Lentotuhka on rakeisuudeltaan 0,002 – 1 mm. Maalajeina kivihiilen lentotuhka vastaa silttiä ja pohjatuhka hiekkaa. Kivihiilen polton tuhkia syntyy selostuksen vaihtoehtoisissa:

VE1

(VE0+)

3.4.2 Puunpolton tuhkat

Suomessa muodostuu voimalaitostuhkaa metsäteollisuudessa vuosittain lähes 350 000 tonnia. Tuhka muodostuu poltettaessa turvetta, puuta ja puun kuorta. Kasavarastoidun puunpolton tuhkien rakeisuus vaihtelee silttisestä hiekasta (siHk) soraiseen hiekkaan (srHk), hienoaineksen määrän ollessa 9-34 %. Tuhkan väri vaihtelee vaalean ruskeasta harmaaseen ja joissain tapauksissa mustaan. Kaikissa tuhkissa esiintyy tikkumaisia, levymäisiä ja pallomaisia raemuotoja, joiden määrasuhteet vaihtelevat polttoaineesta ja palamisprosessista riippuen (Finncao, Metsäteollisuuden lentotuhkien käyttö tie-, katu- ja kenttärakenteissa). Puunpolton tuhkia syntyy vain tarkasteluvaihtoehdossa:

VE1

3.4.3 Seospolton tuhkat

Seospolton tuhista puhutaan kun polttoaineena käytetään yhtäaikaaisesti esimerkiksi kivihiiltä ja biopolttoaineita. Seospoltto mahdollistaa biomassan hyödyntämisen sellaisissakin laitoksissa, joissa se ei yksinään riittäisi polttoaineeksi (Laine-Ylijoki, Wahlström, Peltola, Pihlajaniemi, Mäkelä 2002). Seospolton tuhkia muodostuu kaikissa tarkasteluvaihtoehdoissa:

VE1

VE2

(VE0+)

3.4.4 Rikinpoiston lopputuote

Kivihiilen poltossa muodostuva rikki kulkeutuu savukaasujen mukana. Rikki kerätään talteen savukaasujen rikinpoistoprosessissa. Rikinpoiston lopputuotetta on yleensä peräisin energialaitosten, savukaasujen puhdistamisesta käytettävästä puolikuivasta rikinpoistomenetelmästä, jossa savukaasuihin ruiskutetaan kalkkilietettä pieninä pisaroina. Lietteessä olevan vesi haihtuu ja savukaasuissa oleva SO_4 reagoi alkalisen kalkin kanssa. Lopputuote erotetaan savukaasuista pölyerottimella. Rikinpoiston lopputuote sisältää lähinnä lentotuhkaa ja Ca-yhdisteitä (Mäkelä ja Höynälä 2000).

Puolikuiva menetelmä

Puolikuivamenetelmän rikinpoiston lopputuote sisältää pääasiassa kalsiumsulfidia ja -sulfaattia. Ras-kasmetallien pitoisuudet ovat huomattavasti pienempiä kuin lentotuhkissa. Myöskään orgaanista ainesta ei esiinny merkittävästi. Ympäristön kannalta haitallisimpia rikinpoistotuotteissa esiintyviä epäpuhtauksia ovat liukoiset kloridit ja sulfaatit, jotka voivat aiheuttaa haittaa pohjavesiin joutuessaan. (Mäkelä, Wahlström, Pihlajaniemi, Mroueh, Keppo, Rämö 1999).

Märkämenetelmä

Märkämenetelmässä pesuriin johdettujen savukaasujen sekaan syötetään rikkioksideja sitovaa lietettä. Yleensä lietteenä käytetään kalsiumpohjaista ainetta kuten kalkkikiveä (CaCO_3) tai kalsiumhydroksidia (Ca(OH)_2). Märkämenetelmä koostuu kolmesta eri vaiheesta, jotka ovat rikkidioksidin (SO_2) erotus absorptiotornissa, pesuliuoksen käsittely ja lopputuotteen käsittely. Rikinpoiston yhteydessä muodostuu kalsiumsulfidia, ja jotta se voidaan hyödyntää, se hapetetaan kalsiumsulfaatiksi (CaSO_4) eli kipsiksi jota voidaan käyttää esimerkiksi kipsilevyjen valmistukseen (Akerfelt 2010).

Märkämenetelmän avulla erotettu rikinpoiston lopputuote sisältää 95 - < 100 % kipsiä, 0-5 % kalsiumsulfidia ja 0-5 % kalsiumkarbonaattia. Kipsikiteet ovat pallomaisia tai neulasmaisia hiukkasia joiden rae-ko on 1-250 μm . Vuonna 1993 tehdyssä tutkimuksessa verrattiin eri maissa syntyneiden märkämenetelmän lopputuotteiden koostumusta luonnonkipsiin. Tutkimuksessa havaittiin, että useimpien rikinpoistokipsinäytteiden mangaanipitoisuudet sekä joidenkin näytteiden lyijy-, kupari-, sinkki- ja bariumpitoisuudet olivat korkeampia kuin luonnonkipsissä (Mäkelä, Wahlström, Mroueh, Keppo, Rämö 1995)

Taulukossa 5 on vertailtu puolikuivan ja määrän rikinpoiston lopputuotteen menetelmän koostumuksia.

Taulukko 5. Rikinpoiston lopputuotteen koostumus menetelmän mukaan.

	Puolikuiva menetelmä*	Märkä me- netelmä**
Kemiallinen yhdiste	Paino-%	
Kalsiumsulfaatti $\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$	5-15	95 - <100
Kalsiumsulfiitti $\text{CaSO}_3 \times \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	50-70	0-5
Kalsiumhydroksidi $\text{Ca}(\text{OH})_2$	5-20	
Kalsiumkarbonaatti CaCO_3	5-10	0-5
Lentotuhka	1-3	

*(Mäkelä ja Höynälä 2000)

** (Mäkelä ym. 1995)

Rikinpoiston lopputuotetta syntyy kaikissa tarkasteluvaihtoehdoissa:

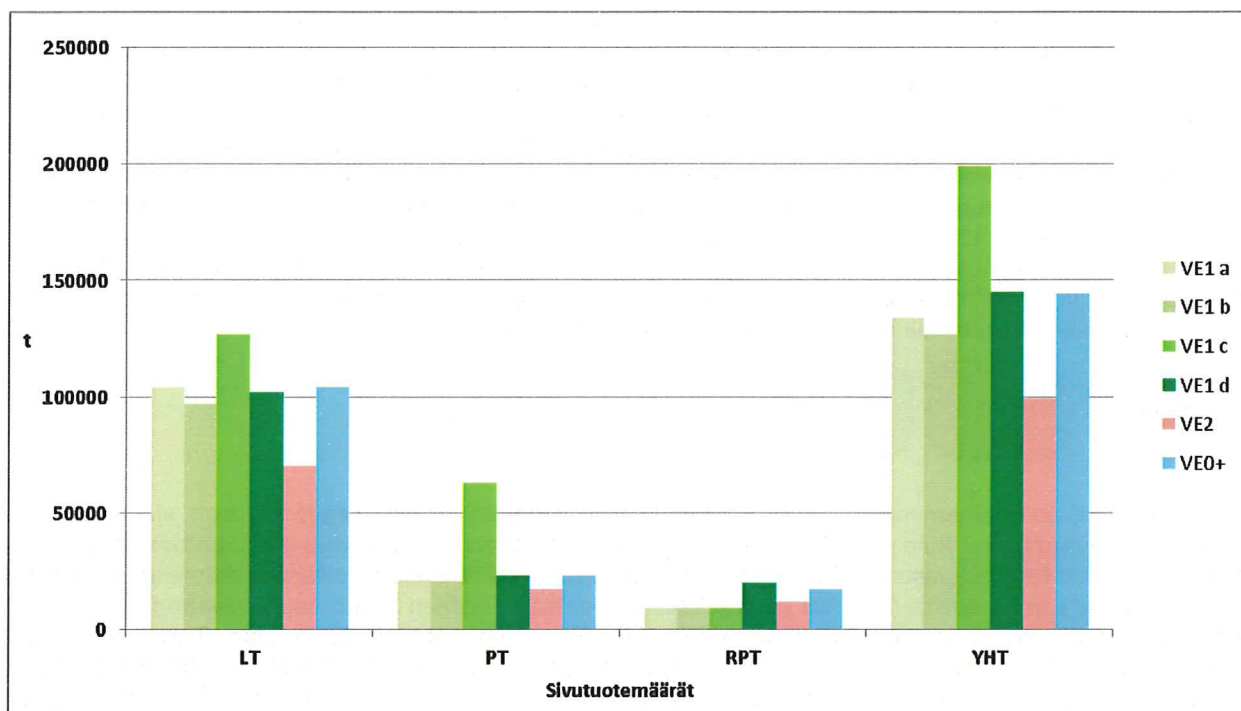


3.5 Sivutuotemäärät

Helsingin Energian toimittamien tietojen mukaan sivutuotemääriä syntyy eri vaihtoehdoissa taulukon 6 mukaisesti. Vertailu on esitetty pylvasdiagrammin avulla myös kuvassa 2.

Taulukko 6. Eri vaihtoehtojen mukaiset laskennalliset sivutuotemäärät.

Vaihtoehdot		Lentotuhka (t)	Pohjatuhka (t)	Rikinpoiston lopputuote (t)	Yhteensä (t)
VE1	Vuosaari C rakennetaan: a-d ovat eri polttoainevaihtoehtoja				
	a) 80 % bio, 20 % kivihiili	59 000	10 000		69 000
	b) 100 % bio (10 % pelletti, 90 % hake)	52 000	9 750		62 000
	c) 100 % kivihiili	82 000	52 000		134 000
	d) 34 % bio, 66 % kivihiili (märkä rikinpoistomenetelmä käytössä)	57 000	12 000	11 000	80 000
	Hanasaaren voimalaitos: puretaan	-	-	-	-
	Salmisaaren voimalaitos: 10% bio, 90 % kivihiili	45 000	11 000	9 000	65 000
	YHTEENSÄ				
	a)	104 000	21 000	9 000	134 000
	b)	97 000	21 000	9 000	127 000
	c)	127 000	63 000	9 000	199 000
	d)	102 000	23 000	20 000	145 000
VE2	Vuosaari C: ei rakenneta	-	-	-	-
	Hanasaaren voimalaitos: 40 % bio, 60 % kivihiili	40 000	9 000	6 000	54 000
	Salmisaaren voimalaitos: 40 % bio, 60 % kivihiili	30 000	8 000	6 000	44 000
	YHTEENSÄ	70 000	17 000	12 000	99 000
VE0+	Vuosaari C: ei rakenneta	-	-	-	-
	Hanasaaren voimalaitos: biopolttoaineiden osuus 10 %	59 000	12 000	8 000	79 000
	Salmisaaren voimalaitos: biopolttoaineiden osuus 10 %	45 000	11 000	9 000	65 000
	YHTEENSÄ	104 000	23 000	17 000	144 000



Kuva 2. Sivutuotemäärät eri vaihtoehtoissa. Vaihtoehto VE1 a) 80 % bio, 20 % kivihiili, b) 100 % bio, c) 100 % kivihiili, d) 66 % kivihiili, 34 % bio.

4. POLTTOAINEEN VAIKUTUKSET HYÖDYNNETÄVYYTEEN

Tuhkien hyötykäytössä huomioon otettavat lait ja säädökset ovat ympäristönsuojelulaki (86/2000) ja ympäristönsuojeluasetus (169/2000) sekä jätelaki (646/2011). Jätteen maarakennuskäyttöön tarvitaan eräitä poikkeuksia lukuun ottamatta ympäristönsuojelulain mukainen ympäristölupa. Valtioneuvoston asetuksella eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (591/2006) pyritään helpottamaan kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lento- ja pohjatuhkien käyttöä maarakentamisessa.

Käytetty polttotekniikka vaikuttaa materiaalin tekniseen laatuun. Leijupolttol on yksi yleisimmistä polttotekniikoista. Leijupolton tukiaineena käytettävää hiekkaa on myös pohjatuhkassa (Kiviniemi ym. 2012)

Hanasaaren ja Salmisaaren kattilat ovat pölypolttokattiloita, ja Vuosaari C-voimalan kattila tulisi olemaan kiertoleijupetikkattila (CFB = Circulating Fluidised Bed). Taulukossa 7 on esitetty Helsingin Energian voimalaitoksissa muodostuvat tuhkalaadut käytettävän polttoaineen/polttoaineseoksen perusteella.

Taulukko 7. Helsingin Energian voimalaitoksissa muodostuvat tuhkalaadut polttoaineen/seoksen mukaan.

Polttoaine	Tuhkalaatu	YVA:n vaihtoehto	Voimalaitos
100 % hiili	Kivihiilituhka	VE1	VuC
90 % hiili/10 % bio (pelletti)	Kivihiilituhka	VE0+ tai VE1	Ha ja/tai Sa
60 % hiili/40 % bio (pelletti)	Seospolton tuhkaa	VE2	Ha ja Sa
20 % hiili/80 % bio (hake + pelletti)	Seospolton tuhkaa	VE1	VuC
100 % bio (hake + pelletti)	Biotuhkaa	VE1	VuC

Pölypoltossa polttoaine syötetään polttoaineen jauhamista varten myllyyn, johon samanaikaisesti tuodaan polttoaineen kuivaamiseen tarpeellinen palamiskaasun ja ilman seos. Myllyssä pölyksi jauhettu polttoaine johdetaan puhaltimen avulla tulipesään. Ennen tulipesää tai vasta tulipesässä sekoitetaan palamiseen tarvittava happi. Polttimet sijaitsevat seinillä, nurkissa tai katossa (Luukkanen 2003). Hiilen pölypoltossa muodostuvien yhdisteiden käyttäytyminen riippuu merkittävästi hiilen laadusta, alkuperästä ja palamisprosessin olosuhteista. Osa (0,1-10 %) tuhkan höyrystyvistä komponenteista (As, K, Na, Pb, Cd-yhdisteistä) reagoi muodostuneiden pienhiukkasten ja kaasuuntumattoman mineraaliaineksen kanssa. Lämpötilan laskiessa yhdisteet tiivistyvät muodostuneiden pienten hiukkasten pinnoille, koska niiden ominaispinta-ala on huomattavasti suurempi kuin isojen hiukkasten. Tämä tiivistyminen aiheuttaa raskasmetalli- ja alkalikomponenttien rikastumista jo muodostuneiden pienhiukkasten pinnalle (Ohlström 1998). Pölypolttoa koskevat tarkasteluvaihtoehdot ovat:



CFB-kattilassa polttoainemateriaali kierrätetään kattilasysteemin sisällä. Leijutuskaasun virtausnopeus nostetaan suuremmaksi kuin partikkelien terminaalinopeus, jolloin peti muuttuu turbulenttiseksi ja hiukkasia kulkeutuu leijutuskaasun mukana reaktorin yläosaan ja sieltä edelleen syklonierottimeen jossa kiinteä aine erotetaan kaasuista. Erotettu kuuma kaasu johdetaan edelleen savukaasukanavaan ja kiinteä aine palautetaan reaktorin alaosaan, jossa palamaton aines jatkaa palamisreaktiotaan. Tuhka erotetaan petimateriaalista kattilan alla sijaitsevalla tuhkanerottimella. Savukaasujen mukana kulkeutunut lentotuhka erotetaan erillisillä sähköstaattisilla suodattimilla tai pussisuodattimilla (Kattelus 2010). CFB-kattilan polttotekniikka koskee tarkasteluvaihtoehtoa:



Tuhkan käyttäytyminen poltossa riippuu tuhkan sisältämistä yhdisteistä ja niiden ominaisuuksista. Tuhkaa muodostavien ainesosien koostumus vaihtelee suuresti eri polttoaineiden lisäksi. Tavanomaisten mineraalien kuten raudan, piin, alumiinin, magnesiumin ja kalsiumin lisäksi polttoaineen tuhkassa on raskasmetalleja. Raskasmetalleja on mm. kattilan pohjatuhkassa ja sähkösuodattimen supiloiden tuhkassa. Raskasmetallien taipumus sitoutua hiukkasiin voidaan karkeasti jaotella höyrystymis- ja sitoutumiskäytymisen mukaan seuraavasti (Kotola 2010):

- Al, Ca, Fe, Mg → pieniin hiukkasiin
- Ba, Co, Cu, Ni, U → pitoisuus kasvaa lievästi hiukkaskoon pienentyessä
- As, Cd, Mo, Pd, Se, Zn → pitoisuus kasvaa hiukkaskoon pienentyessä.

Tuhkien ainesosien koostumus eri hiukkaskoossa koskee kaikkia tarkasteluvaihtoehtoja:



4.1 Vaikutukset ympäristöominaisuuksiin

Tärkein ympäristökelpoisuuteen vaikuttava tekijä on materiaalista liukenevien metallien ja suolojen määrä. Tuhkien ympäristökelpoisuutta voidaan arvioida tutkimalla haitta-aineiden kokonaispitoisuuksia ja liukoisuuksia. Valtioneuvoston asetuksen 591/2006 (nk. MARA-asetus) raja-arvot alittavat tuhkat soveltuvat hyötykäyttöön asetuksessa mainittuihin sovelluksiin ilmoitusperiaatteella. Mikäli MARA-asetuksen ehdot eivät täyty, tuhkien hyötykäyttö edellyttää muiden lupaprosessien läpikäymistä ja soveltuvuuden arvioimista riskinarvioinnin kautta (Kiviniemi ym. 2012).

Lentotuhkalle voidaan tehdä mm. seuraavanlaisia käsittelyjä haitta-aineiden liukoisuuksien vähentämiseksi (Ollila 2011):

- vanhentaminen: varastointi kostutettuna, jolloin mineralisoitumisen kautta mm. barium ja fluoridi muuttuvat niukkaliukoiseen muotoon

- stabiloiminen ja seostaminen: side- tai seosaineesta riippuen voidaan pienentää eräiden haitta-aineiden liukoisuuksia
- tiivistäminen: lujittuminen ja tiivistyminen rakenteessa voi vaikuttaa haitta-aineiden liukoisuuksiin

Ympäristökelpoisuuteen vaikuttavat ja ominaisuuksia muuttavat mahdollisuudet koskevat tarkasteluvaihtoehtoja:

VE1

VE2

VE0+

Taulukossa 8 on esitetty Helsingin Energian kivihiilen lentotuhkan ja puolikuivan rikinpoiston lopputuotteen sekä kirjallisuudesta löytyneitä kivihiilen lentotuhkan liukoisuustuloksia. Kivihiilien lentotuhkien liukoisuuksia on verrattu sekä MARA-asetuksen että kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvoihin. Rikinpoiston lopputuotetta on verrattu ainoastaan kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvoihin. Kivihiilen lentotuhkan osalta esiintyy raja-arvojen ylityksiä pääasiassa verrattaessa MARA-asetuksen peitetyn rakenteen raja-arvoihin.

Kirjallisuudesta löytyneet kivihiilen lentotuhkan liukoisuustulokset korreloivat ylityksien osalta myös Hansasaaren ja Salmisaaren kivihiilen lentotuhkan kanssa. Kriittisiä haitta-aineita ovat kromi, molybdeeni, seleeni, sulfaatti ja fluoridi, joiden pitoisuudet ylittävät peitetyn rakenteen ja pysyvän jätteen raja-arvot. Pitoisuudet ovat kuitenkin sen verran alhaisia, että tuhkan hyötykäyttö on mahdollista päällystetyissä rakenteissa.

Helsingin Energian puolikuivan rikinpoiston lopputuote (tiedot vuodelta 2006) ylitti sulfaatin osalta pysyvän jätteen raja-arvot. Kloridi ylitti päällystetyn rakenteen ja vaarallisen jätteen raja-arvot. Fluoridi ylitti peitetyn rakenteen ja pysyvän jätteen raja-arvot.

Kivihiilien tuhkien lähtötiedot koskevat tarkasteluvaihtoehtoja:

VE1

VE0+

Taulukko 8. Kirjallisuudesta löytyneet liukoisuustulokset kivihiilen lentotuhkalle, sekä Helsingin Energian kivihiilen lentotuhkan ja rikinpoiston lopputuotteen liukoisuudet verrattuna lainsäädännön raja-arvoihin. Huom. rikinpoiston lopputuotetta verrataan vain kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvoihin.

Liukoisuus L/S = 10 l/kg	Kivihiilen lentotuhkan liukoisuustulokset			Hansasaari 2012		Salmisaari 2012		Helen RPT	MARA-asetus 591/2006		Kaatopaikkakelpoisuus 331/2013	
	keskiarvo	min	max	LT	PT (ka)	LT	PT (ka)		Peitetty rakenne	Päällystetty rakenne	Tavan-omainen jäte	Vaarallinen jäte
Antimoni	0,1	0,01	0,5					<0,0009	0,06	0,18	0,7	5
Arseeni	0,15	0,02	2					0,028	0,5	1,5	2	25
Barium	45	1	106					6,1	20	60	100	300
Kadmium	0,01	0,001	0,02					<0,001	0,04	0,04	1	5
Kromi	1,5	0,02	10	0,7	<0,020	1,5	<0,04	0,11	0,5	3,0	10	70
Kupari	0,1	0,01	1					<0,05	2,0	6,0	50	100
Elohopea	0,003	0,002	0,004					<0,0009	0,01	0,01	0,2	2
Molybdeeni	4 (8)	0,3 (2)	13 (50)	4,5	0,19	5,9	0,3	0,44	0,5	6,0	10	30
Nikkeli	0,03	0,01	0,1					0,15	0,4	1,2	10	40
Lyijy	0,2	0,02	0,4	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,01	0,5	1,5	10	50
Seleeni	0,3	0,05	0,5	0,29	<0,020	0,32	<0,026	0,02	0,1	0,5	0,5	7
Vanadiini	1,5	0,2	5	0,23	0,23	0,42	0,32	0,049	2,0	3,0		
Sinkki	0,2	0,01	9					<0,009	4,0	12	50	200
Alumiini	20	2	40									
DOC	7	7	8					16	500	500	800	1000
Sulfaatti	4000	65	30000	1300	275	2100	615	10000	1000	10000	20000	50000
Kloridi	75	6	4200	< 18	< 17	< 14	< 11,7	42000	800	2400	15000	25000
Fluoridi	20	3	90	17	< 4,95	14	< 5,4	46	10	50	150	500

Lähde: Korpijärvi et al. 2009, s. 20

Seospolttoaineiden tuhkien koostumusta ei voida arvioida pelkästään jokaisen erillisen polttoaineen tuhkan pitoisuuksia tarkastelemalla. Puun ja hiilen seospoltosta löytyneen artikkelin perusteella seospolton tuhalla on paljon samanlaisia ominaisuuksia kuin pelkän puun polton tuhalla. Erona olivat alhaisemmat kalsiumin, kaliumin ja kloorin pitoisuudet sekä korkeammat alumiinin, raudan ja rikin pitoisuudet (Steenari ja Lindqvist 1999). Seospolton tuhkien lähtötiedot koskevat tarkasteluvaihtoehtoja:

VE1

VE2

(VE0+)

Taulukossa 9 on esitetty niin ikään kirjallisuudesta löytyneitä puun tuhkan sekä puun ja kivihiilen seospolton tuhkan kokonaispitoisuuksia sekä Hanasaaren ja Salmisaaren voimalaitosten kivihiilen tuhkien kokonaispitoisuuksien keskiarvoja vuoden 2012 näytteistä, ja näitä on verrattu MARA-asetuksen raja-arvoihin. Kivihiilituhkan osalta ylityksiä ei ole, mutta puun tuhkan osalta kadmiumin ja lyijyn keskiarvopitoisuudet ylittävät asetuksen raja-arvot. Puun ja hiilen (70/30) seospolton tuhkassa ylityksiä ei esiintynyt. Tiedot perustuvat kirjallisuuteen ja antavat viitteitä siitä, mihin suuntaan puun ja kivihiilen seospolton tuhkan pitoisuudet kehittyvät.

Taulukko 9. Kirjallisuudesta löytyneitä puun tuhkan sekä Hanasaaren ja Salmisaaren kivihiilen lentotuhkan kokonaispitoisuuksia.

mg/kg	Kivihiilen lentotuhka (Hanasaari ja Salmisaari 2012)			Puun tuhka			70 / 30 puu/hiili	MARA-asetus 591/2006	
	keskiarvo	min	max	keskiarvo	min	max		Peitetty rakenne	Päälystetty rakenne
PCB								1	1
PAH								20	40
Arseeni	<29,5	<15	44	31	1	60	48	50	50
Barium	1600	1200	2000	750	200	1300		3000	3000
Kadmium	<0,85	0,7	<1	23	6	40	13,3	15	15
Koboltti				102	3	200			
Kromi	66	56	76	145	40	250	92	400	400
Kupari	54	34	74	175	50	300	150	400	400
Elohopea	<29,5	<10	49	1	0,02	1	0,48		
Molybdeen	<9	<5	13	15	15	15	16	50	50
Nikkeli				60	20	100	220		
Lyijy				552	3	1100	166	300	300
Seleen							1,4		
Vanadiini	120	100	140	25	20	30	110	400	400
Sinkki	93,5	37	150	1100	200	2000	1840	2000	2000

Lähde: Korpijärvi et al.

Lähde: B-M. Steenari ja O. Lindqvist: Fly ash characteristics in co-combustion of wood with coal, oil or peat

Seospolton tuhkien lähtötiedot koskevat tarkasteluvaihtoehtoja:



4.2 Helsingin kaupungin ohjeistus

Helsingin kaupungin rakennusvirasto (HKR) on laatinut ohjeen mineraalisen purkujätteen ja kivihiilituhkan hyödyntämisestä maarakentamisessa Helsingissä. Ohjeessa on annettu ohjeet tuhkan ympäristökelepoisuuden selvittämisestä. Kun tuhkaa halutaan hyödyntää, hyötykäytettävästä tuhkasta tehdään VNa 591/2006 mukaiset perustutkimukset myös ympäristölupaa edellyttävissä kohteissa. Tutkimuksista vastaa tuhkan tuottaja. Tutkimukset tehdään taulukon 10 mukaisesti (Forsman, Järvinen, Hakari 2010)

Taulukko 10. Tuhkille tehtävät tutkimukset Helsingin kaupungin rakennusviraston ohjeen mukaan (Forsman, Järvinen, Hakari 2010)

Tutkittava aine	Pohja- ja lentotuhka	
	Pitoisuus	Liukoisuus
PCB	Perus	
PAH	Perus	
DOC		Perus
Sb		Perus
As	Perus, Laad	Perus
Ba	Perus, Laad	Perus
Cd	Perus, Laad	Perus
Cr	Perus, Laad	Perus, Laad
Cu	Perus, Laad	Perus
Hg		Perus
Pb	Perus, Laad	Perus, Laad
Mo	Perus, Laad	Perus, Laad
Ni		Perus
V	Perus, Laad	Perus, Laad
Zn	Perus, Laad	Perus
Se		Perus, Laad
F ⁻		Perus, Laad
SO ₄ ²⁻		Perus, Laad
Cl ⁻		Perus, Laad

Perus = ko. tutkimus tehdään perustutkimusvaiheessa,

Laad = ko. tutkimus tehdään laadunvalvontatutkimusvaiheessa,

? = tehdään pitoisuusmäärittäminen perustutkimusvaiheessa, jos taustatietojen tai aistinvaraisten havaintojen perusteella on syytä epäillä pilaantumista.

Helsingin kaupungin rakennusviraston ohjeistus koskee kaikkia tarkasteluvaihtoehtoja:

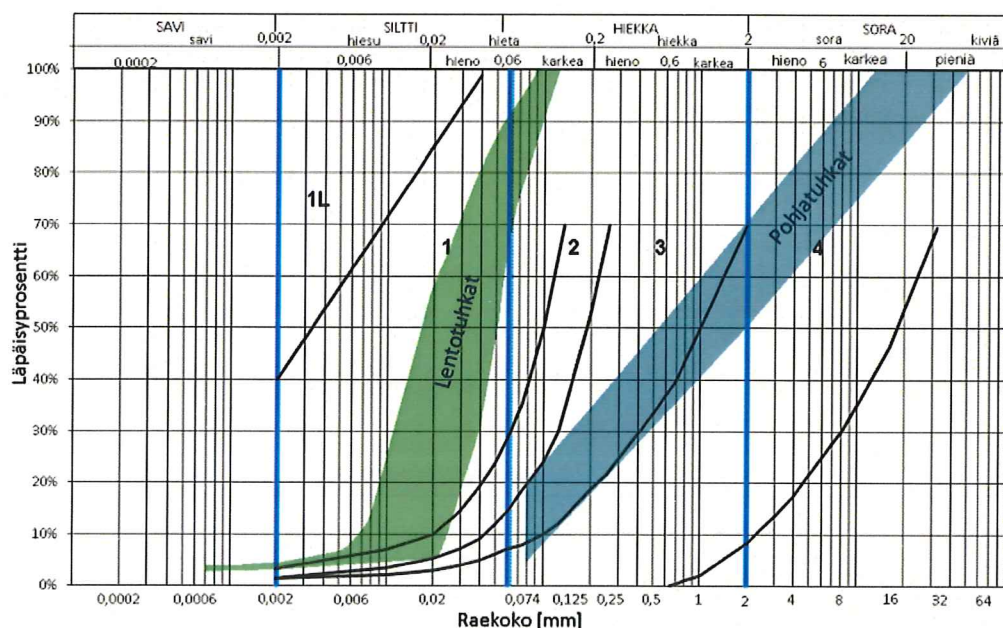


Yhteenveto

Ympäristötekniiseen kelpoisuuteen vaikuttava tekijä on materiaalista liukenevien metallien ja suolojen määrä. Tuhkien ympäristökelpoisuutta arvioidaan vertaamalla haitta-aineiden kokonaispitoisuuksia ja liukoisuuksia MARA-asetuksen (591/2006) raja-arvoihin. Seospolton tuhkien ympäristökelpoisuutta ei voi arvioida pelkästään polttoaineen eri osien tuhkien tietoja tarkastelemalla. Kirjallisuudesta löytyneiden tietojen perusteella seospolton tuhka on ominaisuuksiltaan pitkälti puunpolton tuhkan kaltaista, mutta ominaisuudet riippunevat seospolton seossuhteista.

4.3 Vaikutukset geoteknisiin ominaisuuksiin

Geoteknisiin ominaisuuksiin vaikuttaa merkittävästi polttoteknologia. Lentotuhka muistuttaa rakeisuudeltaan siltistä maalajia. Hienoaineksen ($d \leq 0,06$) määrä on 65–90 %. Keskimääräinen raekoko d_{50} on noin 0,02–0,05 mm. Tuoreet tuhkat sijoittuvat yleisimmin jakauman vasempaan reunaan eli ne sisältävät selkeästi enemmän hienoainesta. Kasavarastoituna rakeisuusjakauma muuttuu vähitellen karkeampaan suuntaan. Pitkään tiivistettynä olleet kasavarastoidut tuhkat ovat voineet muodostaa suhteellisen suurikin kokkareita, jotka useimmiten saadaan hienonnettua mekaanisen käsittelyn, kuten aumasekoituksen avulla. Pohjatuhkan rakeisuus vaihtelee geoteknisen maalajiluokituksen mukaan hienon hiekan ja hienon soran välillä (Kiviniemi ym. 2012). Kuvassa 3 on esitetty lento- ja pohjatuhkien rakeisuusominaisuuksia ja taulukossa 11 lento- ja pohjatuhkien perusominaisuuksia.

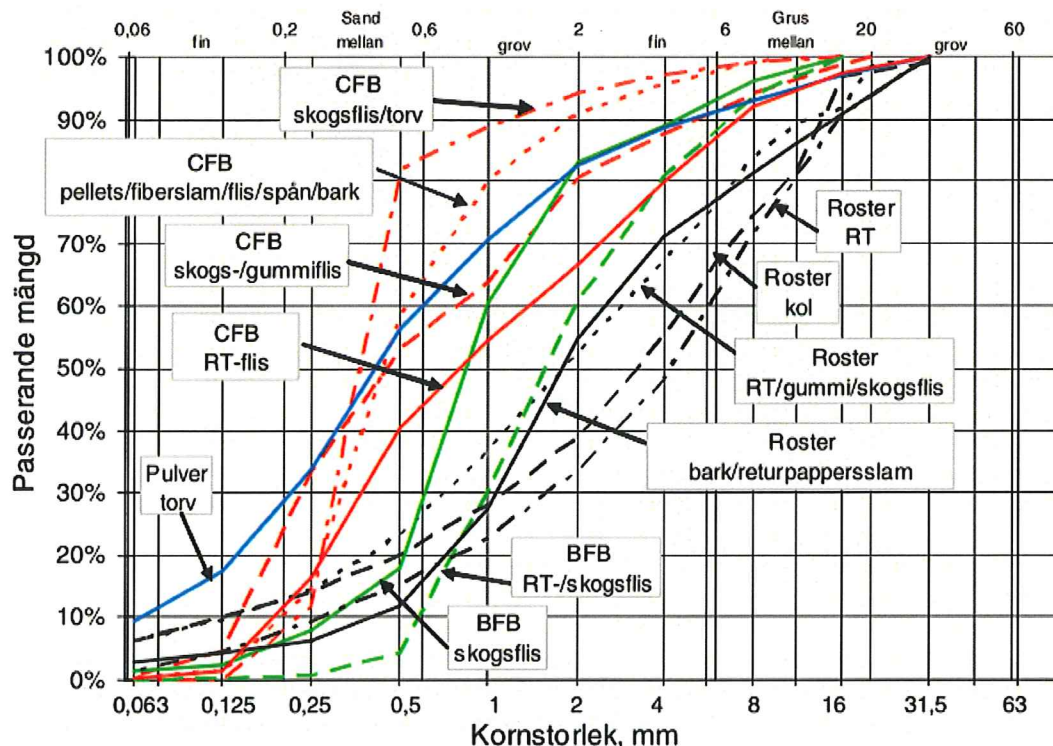


Kuva 3. Tuhkien rakeisuuksien tyypilliset vaihtelualueet. Alueelle 1 sijoittuvat maa-ainekset luokitellaan routiviksi. Hyvin lujittuvat lentotuhkat ovat routivuuteen viittaavasta rakeisuudesta huolimatta usein routimattomia. Alueiden 2–4 materiaalit ovat routimattomia, mikäli käyrät eivät leikkaa vasemmanpuoleista rajakäyrää. Pohjatuhkat sijoittuvat useimmiten kokonaan alueille 3 tai 4 (Kiviniemi ym. 2012)

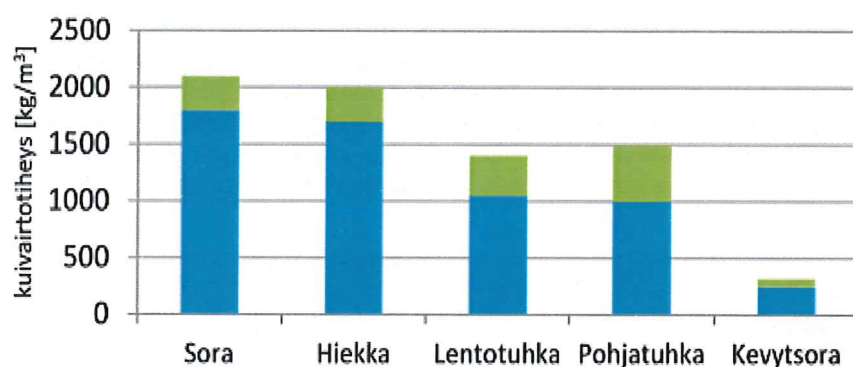
Taulukko 11. Lento- ja pohjatuhkan ominaisuuksia (Kiviniemi ym. 2012).

Ominaisuus	Olosuhde	Lentotuhka	Pohjatuhka
Rakeisuus [mm]		0,002–0,1 (siltti)	0,002–16 (hiekkä)
Optimivesisipitoisuus [%]		20–50	16–24
Maksimikuivairtoteiheyys [kg/m ³]		1100–1400	1000–1500
Märkäirtoteiheyys tilvistettynä [kg/m ³]		1300–1500	1250–1800
Kitkakulma [°]	lujittumaton	28–36	39–53
	lujittunut	49–77	
Koheesio [kPa]	lujittumaton	23–47	10–30
	lujittunut	64–490	
Vedenläpäisevyys [m/s]	lujittumaton	10 ⁻⁷ –10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ –10 ⁻⁵
	lujittunut	10 ⁻⁸ –10 ⁻⁶	
Hehkutushäviö [%]		1–15	-
Lämmönjohtavuus [W/mK]	sula	0,4–0,6	0,9
	jäähtynyt	0,8	
Segregaatiopotentiaali [mm ² /Kh]		0,05–5	<0,2

Kuvassa 4 on esitetty rakeisuuskäyriä, ja kuvasta nähdään miten suuri vaikutus polttotekniikalla ja polttoaineella on rakeisuuteen. Kuvassa 'CFB' tarkoittaa kierto-leijupetiä, 'BFB' kuplivaa leijupetiä ja 'roster' arinapolttoa. Vuosaari C-voimalaitoksen tuottaman pohjatuhkan voi olettaa olevan enemmänkin CFB-vaihtoehtojen suuntaan rakeisuudeltaan.

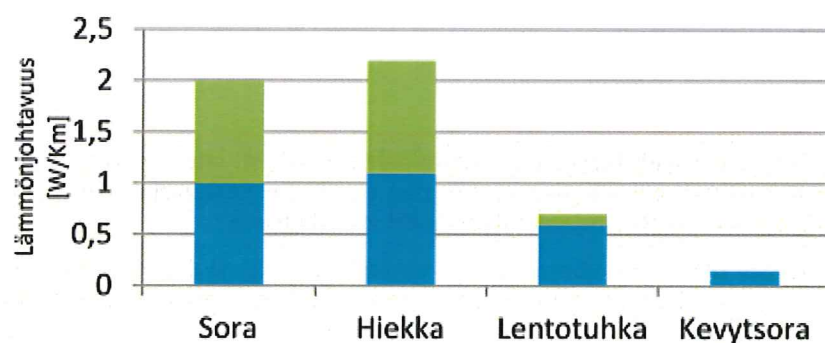
**Kuva 4. Pohjatuhkien rakeisuuskäyriä polttoaineen ja polttotekniikan mukaan (Arm ja Tiberg 2010).**

Tuhkarakentamisen käsikirjan mukaan tuhkat ovat korkeasta huokoisuudestaan johtuen kiviaineksia kevyempiä tiheydeltään. Lentotuhkilla korkea optimivesisipitoisuus rakenteessa tosin tasoittaa tätä eroa. Yleisesti kuitenkin raskaammilla ja karkeammilla lentotuhkilla optimivesisipitoisuus on pienempi kuin kevyemmillä ja hienorakeisilla lentotuhkilla. Kuljetuksen aikana lentotuhka painaa keskimäärin 800–1100 kg/m³. Kuvassa 5 on vertailtu eri maarakentamiseen soveltuvien materiaalien kuivairtoteiheyksiä (Kiviniemi ym. 2012).



Kuva 5. Eri rakentamiseen soveltuvien materiaalien kuivavirtotiheyksiä. Vihreä väri kuvaa arvojen vaihteluväliä (Kiviniemi ym. 2012).

Materiaalin lämmönjohtavuus on routamitoituksessa tarvittava ominaisuus. Lämmönjohtavuuteen vaikuttavat materiaalin ominaisuuksien ohella sen vesipitoisuus ja lämpötila. Tuhkien lämmönjohtavuudet ovat suuremman huokostilan vuoksi rakeisuudeltaan vastaavia kiviaineksia alhaisempia. Vedellä kylläisessä tilassa tuhkan lämmönjohtavuudet nousevat hieman korkeammalle tasolle. Alla olevassa kuvassa 6 on vertailtu eri luonnonmateriaalien lämmönjohtavuutta lentotuhkan ja kevytsoran lämmönjohtavuuksiin (Kiviniemi ym. 2012).



Kuva 6. Eri rakentamiseen soveltuvien materiaalien lämmönjohtavuuksia. Vihreä väri kuvaa arvojen vaihteluväliä (Kiviniemi ym. 2012).

Vaikutukset geoteknisiin ominaisuuksiin koskevat kaikkia tarkasteluvaihtoehtoja:



5. HYÖTYKÄYTTÖVAIHTOEHDOT

Tässä kappaleessa esitellään polton sivutuotteiden hyötykäytön mahdollistavat rakentamismenetelmät, periaatekuvat mahdollisista hyötykäyttösovellutuksista, rakennekuvia ratkaisusta sekä analyysiä vahvuuksista, heikkouksista, mahdollisuuksista ja uhista (SWOT). Kappaleessa selvitetään hyötykäyttövaihtoehtoja muodostuville pohja- ja lentotuhka sekä rikinpoiston lopputuotteelle. Painopisteenä tarkastelussa on maarakennustekniset hyötykäyttövaihtoehdot. Arviointimenetelmänä käytetään mm. SWOT-analyysiä.

5.1 Maarakennustekniset hyötykäyttösovellutukset

Tuhkia voidaan käyttää maarakentamisessa sellaisenaan, tiivistettynä, seostettuna toisen sivutuotteen kanssa tai sideainemaisesti. Seuraavassa on esitelty erilaisia tuhkan käyttösovelluksia yleisellä tasolla, käyttäen lähteenä Tuhkarakentamisen käsikirjaa (Kiviniemi ym. 2012).

5.1.1 Massiiviset lentotuhkarakenteet

Massiivisilla lentotuhkarakenteilla tarkoitetaan pelkästään lentotuhkaa sekä tarvittaessa lujittavalla sideaineella stabiloitua lentotuhkaa sisältäviä kerrosrakenteita. Tällaisten lentotuhkarakenteiden käyttö on teknisesti mahdollista uusien tie-, katu- ja kenttärakenteiden kerroksissa pengertäytöistä kantavan kerroksen alaosaan. Lentotuhkan soveltuvuus massiivirakenteeseen riippuu käytettävästä polttoaineesta, polttoprosessista, tuhkan varastoinnista ja käsittelystä. Kuvassa 7 on esitetty poikkileikkauskuvaa rakenteesta sekä porakappalienäytteet.



Kuva 7. Massiivituuhkarakenteiden kuvaukset.

5.1.2 Tuhkaseosrakenteet

Tuhkaseosrakenteiden lähtökohtana on pyrkiä yhdistämään eri materiaaleja hallitusti siten, että voidaan mahdollisimman tehokkaasti hyödyntää käytettävien osakomponenttien hyviä ominaisuuksia ja samalla pienentää hyödynnettävien lähtömateriaalien ei-toivottujen ominaisuuksien vaikutusta.

Esimerkiksi lentotuhka-kuitusaviseoksissa pyritään hyödyntämään tuhkan lujuutta ja kuormituskestävyyttä, mutta samalla tuomaan kuitusaven avulla ratkaisuun mukaan myös muodonmuutoskestävyyttä ja joustavuutta, mikä ei pelkkää tuhkaa käyttäen ole mahdollista. Lentotuhkan ja kuitusaven keskinäistä seossuhdetta tai stabiloinnissa käytettävän sideaineen määrää varioimalla voidaan vaikuttaa huomattavasti saavutettaviin ominaisuuksiin ja räätälöidä kunkin kohteen asettamien vaatimusten mukainen seosratkaisu.

Tyypillisimpiä lentotuhkan kanssa seosrakenteissa hyödynnettäviä materiaalityyppejä ovat kuitusavet, kipsit, rikastushiekat ja betonimurske, mutta myös soodasakan, pastajätteen ja meesasakan ominaisuuksia voidaan parantaa lentotuhkan avulla.

5.1.3 Pohjatuuhakerrosrakenteet

Rakeisuudeltaan ja ympäristöllisiltä ominaisuuksiltaan sopivaa pohjatuuhkaa voidaan käyttää kuten hiekkaa tien päällysrakenteiden ja kenttärakenteiden suodatinkerroksessa sekä penger- ja muissa täytöissä.

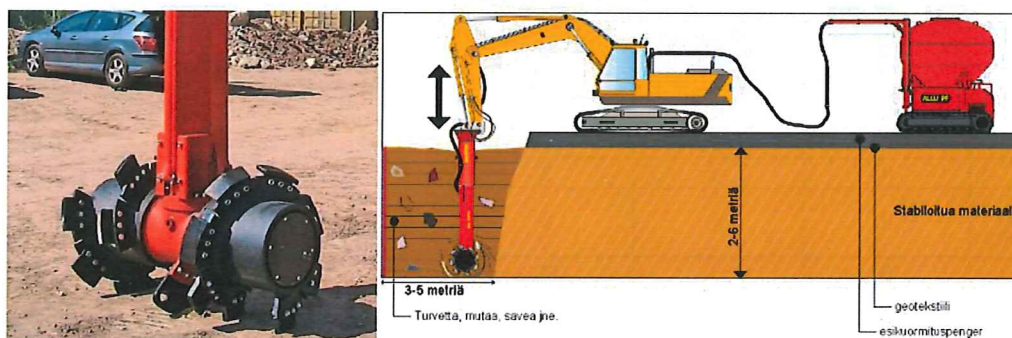
5.1.4 Tuhka stabiloinnin sideaineena

Lujittuvaa, kuivana varastoitua lentotuhkaa voidaan käyttää erilaisten stabilointimenetelmien sideaineseoksessa joko sellaisenaan tai kaupallisten sideaineiden tai muiden sivutuotteiden kanssa. Lentotuhkan avulla voidaan säästää sideainekustannuksissa ja sen on todettu parantavan stabiloitujen rakenteiden pitkän ajan lujuuskehitystä ja jäätymis-sulamisrasituksen kestävyttä.

Lentotuhkapohjaisissa sideaineseoksissa voidaan käyttää myös muita teollisuuden sivutuotteita tai jättemateriaaleja, kuten fosfokipsiä, rikinpoiston lopputuotetta tai masuunikuonaa. Muiden sivutuotteiden käytöllä voidaan vahvistaa sideaineseoksella saavutettavaa lujuutta tai vastaavasti vähentää tarvittavaa sideaineiden kokonaismäärää.

Massastabilointi

Massastabilointia sovelletaan maa-ainekselle, joka ei heikkojen kantavuusominaisuuksien vuoksi sovellu rakentamiseen. Massastabiloinnissa heikkolaatuiseen maahan sekoitetaan sideainetta homogeenisesti, kaivinkoneeseen liitetyn sekoituslaitteiston avulla. Kuiva sideaineseos puhalletaan sekoittimen päähän ja pystysuunnassa liikkuva sekoitin sekoittaa sideaineseoksen homogeenisesti maahan 6,0 m syvyyteen asti (joissain tapauksissa myös syvemmälle). Massastabiloinnissa stabiloitu maakerros muodostaa lujittuneen laatan ja parantaa pohjamaan ominaisuuksia rakentamiseen. Tyypillisiä massastabiloitavia maa-aineita ovat savet, liejut, turpeet ja ruoppausmassat. Kuvassa 8 on esitetty massastabiloinnin sekoituskärki ja periaatekuva.



Kuva 8. Massastabiloinnin sekoituskärki ja periaatekuva. Menetelmässä sideaine syötetään ilmanpaineella sekoittimen kärkeen. Pyörivä sekoitin sekoittaa sideaineen maa-aineksen sekaan. Sekoittimen varsi liikkuu pystysuunnassa, millä saadaan koko massa sekoitettua.

Kerrosstabilointi

Kerrosstabiloinnissa uuden kiviaineksen tai vanhan tien pintakerroksen sekaan jyrsinsekoitetaan lujittuvaa sideainetta. Lopputuloksena on erittäin kantava ja hyvin jäätymis-sulamissyklejä kestävä rakenne. Sideaineina käytetään yleensä tuoretta sillovarastoitua lentotuhkaa ja sementtiä. Sideaineseokseen voidaan lisätä myös muita kaupallisia sideaineita ja teollisuuden sivutuotteita, kuten fosfokipsiä ja hienoksi jauhattua masuunikuonaa.

Kerrosstabilointi sopii hyvin raskaskuormitteisten teiden ja kenttärakenteiden kunnostukseen ja uudisrakentamiseen. Se on hyvä menetelmä korjausrakentamiskohteisiin, joissa vanha päällyste ja pintakerrokset voidaan hyödyntää stabiloinnin runkoaineena, jolloin tasausta ei tarvitse juurikaan korottaa eikä lisämäärätarvetta tai ylijäämämassoja synny. Hyvän kantavuuskehityksen myötä kerrosstabiloinnin avulla voidaan monissa tapauksissa ohentaa päällysteen paksuutta ja samalla saavuttaa säästöjä päällystyskustannuksissa.

Kuvassa 9 on esitetty periaatekuvat hyötykäyttösovellutuksista.



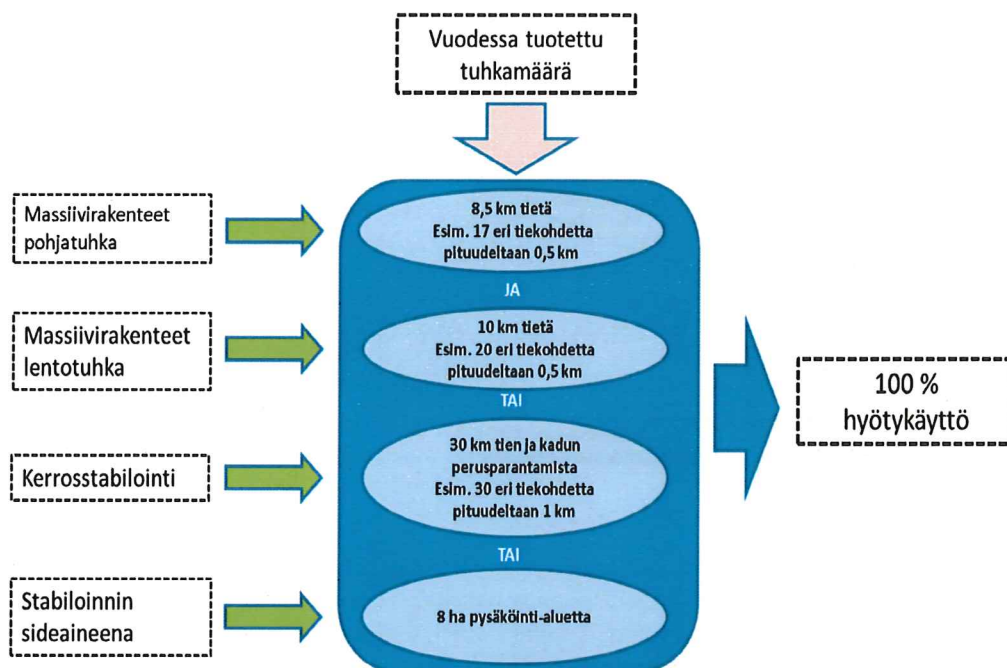
Kuva 9. Hyötykäyttösovellusten periaatekuvat massivirakenteesta, massastabiloinnista ja kerrosstabiloinnista.

Taulukossa 12 on suuntaa-antavasti esitetty lentotuhkan, pohjatuhkan ja rikinpoiston lopputuotteen käyttösovellutuksia. Kaikkia kivihiilituhkatyyppejä voidaan käyttää maarakentamisessa korvaamaan luonnonkiviaineita kuten hiekkaa ja soraa. Kivihiilituhkan lujuusominaisuudet ovat hyvät ja sen lämmöneristävyys on merkittävästi parempi kuin luonnonkiviainesten. Lentotuhkan lujuus ja kantavuus paranevat rakenteen lujittuessa ajan myötä. Pohjatuhka vastaa käsiteltävyydeltään hiekan ja soran kaltaista. Lentotuhkaa tiivistettäessä on tarkkailtava, että sen vesipitoisuus on optimi ja kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus on riittävän pieni.

Taulukko 12. Erilaiset käyttösovellutukset sivutuotteittain ja niiden kelpoisuus rakenteeseen. tähän esim. K=käytetään, S =soveltuu, SR=soveltuu rajoituksin

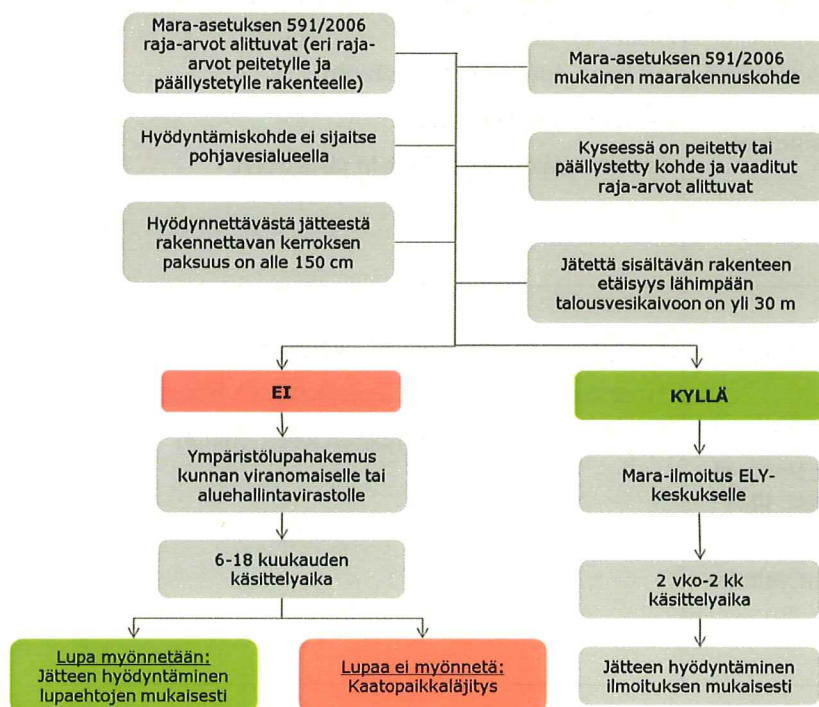
Sovellus	Lentotuhka (LT)	Pohjatuhka (PT)	Rikinpoiston lopputuote (RPT)
Tiet, kadut	K	K	S
Viherrakentaminen	S	S	SR
Ulkoliikuntapaikat	K	K	S
Satamarakenteet (sedimenttien stabilointi)	K	K	K
Meluvallit	S	S	SR
Pilaantuneiden alueiden kunnostus	S	SR	SR
Kaatopaikat	K	K	SR
Kaivosalueet	S	S	S
Kenttä- ja varastoalueet	K	K	K
Tulvasuojelu	SR	S	SR

Yleisesti ottaen maarakennushyötykäyttöpotentiaalia voidaan arvioida seuraavan kuvaajan avulla, kun lentotuhkaa on käytettävissä noin 100 000 t ja pohjatuhkaa 17 000 t. Näillä määrillä on teoreettisesti mahdollista tehdä sovelluksesta riippuen 8,5-10 km tietä, 30 km tien ja kadun perusparantamista tai 8 hehtaaria kenttärakennetta kun koko syntynyt tuhkamäärä hyödynnetään maarakentamisessa (kts. kuva 10). Hyötykäyttökohteiden realistista toteutusmäärää arvioidessa on huomioitava, että kohteiden valmistelu ja lupa-/ilmoitusmenettelyt vaativat työtä ja kohteet ovat toisistaan riippumattomia eivätkä kaikki toteudu suunnitellusti. Näin ollen kohteiden "löytymisestä" kohteiden toteutukseen kuluu aikaa ja valmisteluja. Hyötykäyttö vaatii tarkkaa suunnittelua, jossa monet asiat vaikuttavat toisiinsa, kun otetaan huomioon tuhkan tuotantomäärien vaihtelut, rakennusprojektien aikataulut ja niiden mahdolliset muutokset, ilmoitus-/lupamenettelyt ja niiden vaatima aika sekä tuhkan varastointi ja mahdollinen käsittely.

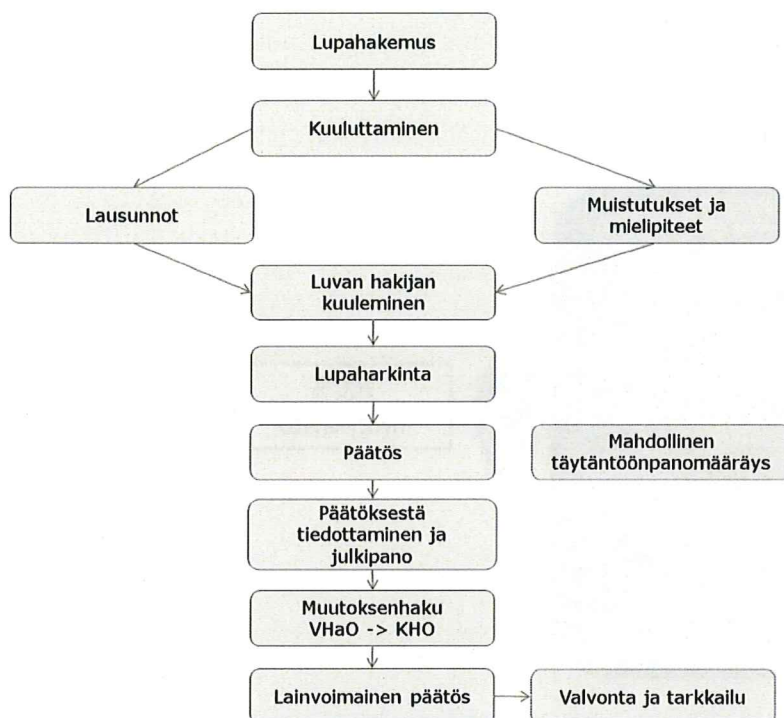


Kuva 10. Periaatemalli tuhkan 100 % hyötykäytöstä maarakentamisessa kun lentotuhkaa on käytettävissä noin 100 000 t ja pohjatuhkaa 17 000 t, mikäli tuhka on hyödynnettävissä MARA-asetuksen tai ympäristöluvan perusteella.

Kuvassa 11 on esitetty sivutuotteiden hyötykäytön periaatekaavio, mitä tulee ottaa sivutuotteita hyödyntäessä huomioon. Jotta hyödyntäminen voi tapahtua MARA-asetuksen mukaisella ilmoitusmenettelyllä, on kaikkien tarkasteltavien asioiden sovellettava kyllä-vastaukseen. Yhdenkin tarkasteltavan asian ei-vastaus johtaa ympäristölupamenettelyyn. Kuva 12 kuvaa ympäristölupaprosessin vaiheita. Mikäli päätöksestä valitetaan ja asia etenee oikeusasteisiin, voi ympäristölupakäsittely kestää vuosia.



Kuva 11. Sivutuotteiden hyötykäyttökaavio. MARA-ilmoitusmenettely toteutuu mikäli kaikki tarkasteltavat asiat soveltuvat kyllä-vastaukseen. Yhdenkin tarkasteltavan asian ei-vastaus johtaa ympäristölupamenettelyyn.



Kuva 12. Ympäristölupaprosessin vaiheet.

Taulukossa 13 on esitetty tuhkarakenteiden maarakentamisen SWOT-analyysi. Taulukosta nähdään että tuhkan hyötykäytöllä on paljon vahvuuksia ja mahdollisuuksia, mutta toisaalta täysimittaisen hyödyntämisen esteenä esiintyy kuitenkin monia huomion arvoisia seikkoja.

Taulukko 13. Tuhkarakenteiden maarakentamisen SWOT-analyysi.

Vahvuudet (S) *lämmöneristyskyky jonkin verran kiviaineksia parempi * rakenteen kantavuus paranee sideainemaisella tuhkan käytöllä *keveys verrattuna kiviaineksiin *luonnonvaroja säästävä vaikutus	Heikkoudet (W) *tuhkan epätasainen tuotanto *tuhkan laatuvariaatiot *kuivavarastointitarpeet ja järjestelyt
Mahdollisuudet (O) *rakenteiden kokonaispaksuudet voivat pienentyä *rakenteiden kestävyys voi parantua * sideainemainen käyttö (massastabilointi) vähentää mm. syntyvien ylijäämämaiden läjitys- ja kuljetustarvetta *korvattujen kaupallisten sideaineiden valmistuksen päästöt pienenevät *kustannussäästöt (kokonaisuutena)	Uhkat (T) *käsittely- ja varastointialueiden puute *mahdollisen ympäristölupakäsittelyn hitaus *ominaisuuksien vaatimusten kiristyminen

Yhteenveto

Sekä kivihiilen että puunpolton, ja näiden yhteispolton lento- ja pohjatuhkat soveltuvat hyvin moniin erilaisiin maanrakennussovelluksiin. MARA-asetuksessa on asetettu haitta-aineiden raja-arvot, joiden alittuessa tuhkia voidaan hyödyntää ilmoitusmenettelyllä. Mikäli jokin haitta-aine ylittää annetut raja-arvot, tuhkan hyötykäyttö edellyttää ympäristölupaa. MARA-asetuksen mukaisen ilmoituksen hankkeesta käsittelee aina ELY-keskus.

Ympäristöluvan käsittelee kunnan ympäristölupaviranomainen, mikäli hyödynnettävä määrä on alle 10 000 t vuodessa, ja määrän ylittyessä viranomaisena on aluehallintoviranomainen. Mikäli hankkeen tuhkamäärä on vähintään 50 000 t, tuhkan hyödyntäminen saattaa vaatia ympäristövaikutusten arviointimenettelyn.

Tuhkien rakeisuus vaihtelee käytetyn polttoaineen ja polttotekniikan suhteen. Kirjallisuudesta on löytynyt viitteitä siitä, että polton olosuhteet (kuormitus, lämpötila, höyrynuohoimet, jne.) vaikuttavat lentotuhkan partikkelikokojakaumaan enemmän kuin polttoaineen koostumus.

5.2 Hyötykäyttö rakennustuoteteollisuudessa

5.2.1 Betoniteollisuus

Betoni on keinotekoinen kiviaines, joka muodostuu sementtiliimasta ja kiviaineksista. Sen puristuslujuus on erinomainen. Betoni koostuu sementistä, vedestä ja runkoaineesta sekä työstettävyyteen vaikuttavista seos- ja lisäaineista. Runkoaineen on muodostuttava vähintään kahdesta eri kiviaineesta, vähintäänkin sorasta ja sepelistä, sekä tarvittaessa filleristä (Paavola 2013). Betoniin käytettävän lentotuhkan CE-merkintä on pakollista 1.7.2013 alkaen.

Kivihiilituhka

Kivihiilen lentotuhka jaetaan hehkutushäviön perusteella A, B ja C-luokkiin ja betonin valmistuksessa käytetään yleensä vain A-luokan lentotuhkaa (hehkutushäviö enintään 5 %). Liiallinen hiili huonontaa betonin ominaisuuksia. Betonin runkoaineeksi ja/tai sideaineeksi kelpaa lentotuhka, jonka maksimiraekoko on 150 µm. Aktiivisuuskertoimen, joka kertoo miten paljon lentotuhka pystyy korvaamaan sementtiä, on oltava vähintään 75 %, perustuen standardiin SFS-EN 450-1:2012. Jos sementtiä korvataan lentotuhkalla, sen 28 vrk lujuus pitää olla vakio-olosuhteissa vähintään 75 % vertailulaastin lujuudesta ja 90 vrk lujuus 85 %. Kivihiilen lentotuhkan reaktio betonissa on sementtiä hitaampi ja siksi lentotuhkan käyttö alentaa alkulujuuksia, mutta toisaalta nostaa lopullisia puristuslujuusarvoja (Paavola 2013)

Karkeasti arvioiden 100 kg lentotuhkaa korvaa 30 kg sementtiä (Lentotuhkan kierrätys 2013). Tutkimustulosten mukaan seosaineiden käytöllä voidaan selvästi vähentää betonin ympäristökuormaa. Kun sementtiä korvataan lentotuhkalla, kokonaisenergian kulutus pienenee lähes 40 % (Seosaineiden käyttö 2013).

Liitteissä 1a ja 1b on esitetty standardin SFS-EN 450-1:2012 mukaiset kemialliset ja fysikaaliset raja-arvot. Koskee tarkasteluvaihtoehtoja, joissa muodostuu kivihiilituhkaa:

VE1

(VE0+)

Puutuhka

Puutuhkan ominaisuuksia betonin sideaineena tai fillerinä tutkittiin Teknillisen korkeakoulun Rakennusmateriaalitekniikan laboratoriossa vuosina 2006 - 2008 metsäteollisuuden sivutuotteiden hyötykäyttöä koordinoivan Finncao Oy:n toimeksiannosta. Alustavissa tutkimuksissa oli mukana 14 suomalaista tuotantolaitosta, ja tarkemmin selvitettiin viiden puutuhkan ominaisuuksia ja toimivuutta betonissa (Vornanen ja Penttala 2008).

Puutuhkan käytölle betonin seosaineena ei vielä ole olemassa standardeja tai muuta virallista ohjeistusta, joten sen tutkittuja ominaisuuksia verrattiin betonissa yleisesti seosaineena käytettyyn kivihiilen lentotuhkaan sekä sille asetettuihin viranomaisvaatimuksiin. Tutkimuksen perusteella puutuhka soveltuu hyvin betonin seosaineeksi ja sitä voidaan käyttää kivihiilituhkan tavoin, kunhan sen erityispiirteet, kuten kemialliset ominaisuudet, otetaan huomioon (Vornanen ja Penttala 2008). Tämä koskee tarkasteluvaihtoehtoa, jossa muodostuu 100 % puutuhkaa:

VE1
Yhteispoltto

Standardin SFS-EN 450-1:2012 kohdan 4.2 mukaan tuottajan tulee osoittaa ja dokumentoida oheispolttoaineiden poltosta saadun lentotuhkan kelpoisuus. Kattilassa tulee suorittaa alkupoltto käyttäen aiottuja oheispolttoaineiden maksimimääriä. Kelpoisuuden osoittamiseen käytetään tästä poltosta otettua edustavaa näytettä. Yhteispoltosta syntyneen lentotuhkan kelpoisuus katsotaan osoitetuksi kun standardin mukaiset laatuvaatimukset kohdista 5.2 (kemialliset vaatimukset), 5.3 (fysikaaliset vaatimukset) ja 5.4 (muut vaatimukset) on todistettu. Hiilen kuivamassan prosenttiosuuden on oltava vähintään 60 %, tai vähintään 50 %, jos oheispolttoaine on pelkästään puhdasta luonnonpuuainesta. Oheispolttoaineista syntyvän lentotuhkan osuuden maksimi saa olla korkeintaan 30 % kuivapainosta (SFS-EN 450-1:2012. Betoniin käytettävä lentotuhka 2013)

Liitteessä 1c on esitetty standardin SFS-EN 450-1:2012 mukaiset oheispolttoaineiden lajit. Yhteispoltto koskee kaikkia tarkasteluvaihtoehtoja:


VE1

VE2

VE0+
Puutuhkan kemialliset ominaisuudet

Puutuhka eroaa jonkin verran kivihiilituhkasta kemialliselta koostumukseltaan. Joidenkin yhdisteiden osalta puutuhkan pitoisuudet ovat kivihiilituhkaa korkeampia, ja ne voivat rajoittaa puutuhkan käyttöä. Kriittisimpiä yhdisteitä ovat rikkiyhdisteet (SO_3 -pitoisuutena mitattuna) ja kloridit. Rikkiyhdisteet voivat kosteissa olosuhteissa reagoida kalsiumhydroksidin kanssa ja aiheuttaa betonissa haitallista paisumista, sementtikiven halkeilua ja betonin puristuslujuuden heikkenemistä ettringiitin, kipsin tai thaumasiitin muodostumisen takia (Vornanen ja Penttala 2008).

Kloridit nopeuttavat raudoitteiden korroosiota ja lyhentävät näin betonin käyttöikää myös karbonatisoitumattomassa betonissa. Kivihiilituhkan kloridipitoisuuden yläraja on 0,1 % ja betonin suurin sallittu kloridipitoisuus Betoninormien 2004 mukaan on 0,2 % sementin ja seosaineiden määrästä, kun kyseessä on raudoitettu tai muita metallisolia sisältävä betoni. Normaalisti lentotuhkaa käytettäneen betonissa niin pieniä määriä, ettei riski kokonaiskloridimäärän ylityksestä ole kovin suuri. Muita betonin paisumista aiheuttavia tekijöitä ovat magnesiumoksidi (MgO) ja kalsiumoksidi (CaO), jotka veden kanssa reagoiessaan muodostavat magnesium- ja kalsiumhydroksidia, sekä alkalireaktiot, joissa osallisina ovat kiviaines ja huokosvesi. Hehkutushäviö voi vaihdella eri puutuhkaerissä paljonkin, mikä voi vaikeuttaa tuhkien käyttöä betonissa. Lentotuhkan jäännöshiilen määrä voi betonissa vaikuttaa esimerkiksi lisäaineiden anosteluun tai vedentarpeeseen (Vornanen ja Penttala 2008).

Liitteessä 1d on esitetty tarkastelussa mukana olleiden puutuhkien pitoisuuksia verrattuna standardiin SFS-EN 450-1.

Koskee tarkasteluvaihtoehtoa, jossa muodostuu 100 % puutuhkaa:


VE1
Muut ominaisuudet

Puutuhkan hyötykäytettävyyteen betoniteollisuudessa vaikuttavat myös rakeisuusominaisuudet. Finncao Oy:n tutkimuksessa tarkastellut tuhkut olivat karkeampia ja raemuodoltaan epäsäännöllisempiä kuin kivihiilituhka, mikä on luonnollista poltettavan materiaalin vaihdellessa. Puutuhkissa oli yleisemmän rakeisuusalueella olevia ja myös sementtiä ja kivihiilituhkaa selkeästi suurempia partikkeleita. Luonnonfilleri on kuitenkin yleensä puutuhkaa karkeampaa. Rakeisuudeltaan puutuhkat sijoittuvatkin osin sementin ja osin fillerin alueelle (Vornanen ja Penttala 2008)

Tehdastuotannossa puutuhkan käsittelystä havaittiin, että kuljetuksen ja siiloon pumpppaamisen jälkeen puutuhka on melko kevyttä ja laskeutuminen siilossa kestää 1-2 vuorokautta. Mikäli tuhkaa ei käytetä useisiin päiviin, se ei valu ulos siilosta ilman tärytystä. Yleisesti puutuhkaa on käsiteltävä kuten sementtiä ja sen on oltava aina käsiteltäessä ehdottoman kuivaa (Vornanen ja Penttala 2008)

Puutuhkan ominaisuudet riippuvat paljon poltettavasta materiaalista, joka vaihtelee tuotantolaitoksissa erityisesti vuodenajasta riippuen. Puutuhkien hyödyntämistä betoniteollisuudessa vaikuttaakin juuri polttoainekoostumuksen vaihtelu vuoden aikana tuotantolaitoksesta riippuen. Puutuhkan tuottajien olisi menetelmiä kehittämällä pyrittävä mahdollisimman tasalaatuiseen tuhkaan ympäri vuoden, jotta tuhkan käyttö olisi potentiaalisille jatkokäyttäjille betoniteollisuudessa mielekästä. Puutuhkan koostumus on betonin kannalta edullinen muun muassa tuhkan sisältämien mineraalien ja alkuaineiden aiheuttamien hyvien sideaineominaisuuksien takia. Puutuhka voikin parantaa betonin puristuslujuutta merkittävästi. Sen kemialliset ominaisuudet voivat kuitenkin vaikuttaa esimerkiksi betonin työstettävyyteen tai säilyvyyteen. Tutkimuksen perusteella puutuhka soveltuu hyvin betonin seosaineeksi ja sitä voidaan käyttää kivihiilituhkan tavoin, kunhan sen erityispiirteet otetaan huomioon. Puutuhkan potentiaalisia käyttökohteita voivat olla esimerkiksi kevytsoraharkot, mosaiikkibetonilaatat, kuivien tilojen elementit ja valmisbetoni (Vornanen ja Penttala 2008). Koskee tarkasteluvaihtoehtoa, jossa muodostuu 100 % puutuhkaa:

VE1

5.2.2 Sementtiteollisuus

Sementtistandardi SFS-EN 197-1:2012 määrittelee tavallisten sementtien koostumus- ja laatuvaatimukset sekä vaatimustenmukaisuuden ehdot. Standardin mukaan sementti on hydraulinen sideaine, jolla tarkoitetaan hienoksi jauhettua epäorgaanista materiaalia, joka veden kanssa sekoitettaessa muodostaa pastan, joka sitoutuu ja kovettuu hydrataatioreaktioiden kautta ja joka kovettumisen jälkeen pitää lujuutensa ja pysyvyytensä jopa veden alla (Suomalainen sementti 2012).

Tavallisten sementtien valmistuksessa käytetään portlandklinkkeriä ja seosaineita. Standardi ryhmittelee sementit viiteen päälajiin niiden koostumuksen perusteella:

- CEM I Portlandsementti
- CEM II Portlandseossementti
- CEM III Masuunikuonasementti
- CEM IV Pozzolaanisementti
- CEM V Seossementti

Nämä päälajit jaetaan edelleen eri sementtilajeihin käytetyn seosaineen ja seosainemäärien perusteella. Standardi tuntee sementin seosaineena masuunikuonan (S), kalkkikiven (L tai LL), silikan (D), pozzolaanit (P tai Q), lentotuhkan (V tai W) ja poltetun liuskeen (T). Liitteessä 2 on esitetty Suomessa sallittujen sementtien koostumusvaatimukset. Lentotuhkan käyttö tulee kysymykseen neljässä eri sementtilaadussa (Suomalainen sementti 2012).

Sementin valmistuksessa käytetään kivihiilen polton lentotuhkaa, mutta sementtistandardissa viitataan betonistandardin SFS-EN 450-1:2012 lentotuhkan määritelmään, jonka mukaan oheispoltosta syntyvää lentotuhkaa voidaan käyttää, mikäli se täyttää tietyt ehdot (kts. s. 26, kohta Yhteispoltto). Sementtistandardin mukaan lentotuhka on jaettu silikaattipitoiseen (V) ja kalkkipitoiseen (W) lentotuhkaan, joita voi olla sementissä 6-20 tai 21-35 % riippuen sementin laadusta. (SFS-EN 197-1 Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus 2012). Koskee tarkasteluvaihtoehtoja, joissa muodostuu kivihiilituhkaa:

VE1

(VE0+)

5.2.3 Tuhkan käyttö asfaltin seosaineena

Standardi SFS-EN 13055-2:2004 koskee mineraalista alkuperää olevia kevytkiviaineksia, joiden kiintoteheys on enintään 2000 kg/m³ tai irtoteheys enintään 1200 kg/m³ mukaan lukien mm. teollisuusprosessien sivutuotteet. Sivutuotekiviaineksella tarkoitetaan mineraalista, alkuaan teollisessa prosessissa syntynyttä kiviainesta, jota on jälkeensä käsitelty vain mekaanisesti (SFS-EN 13055-2:2004 Kevytkiviainekset asfalttimassoihin ja pintauksiin sekä sitomattomiin ja sidottuihin käyttötarkoituksiin)

Asfaltin valmistuksessa on perinteisesti käytetty täyteaineena (noin 5 %) kalkkikivijauhetta. Kivihiilen lentotuhka sopii asfalttipäällysteen hienoaineeksi, koska sillä on tasainen rakeisuus, hyvä huokosten täytökapasiteetti, sopivan alhainen vesipitoisuus ja emäksinen luonne. Koska lentotuhka on asfalttimassassa sidotussa muodossa, sen ympäristövaikutukset ovat vähäiset (Lentotuhkan kierrätys 2013).

Valtioneuvoston asetuksen 846/2012 asfalttiasemien ympäristönsuojeluvaatimuksista mukaan asfalttiasema saa käyttää vuodessa enintään 40 000 tonnia kivihiilen lentotuhkaa vuoden aikana rekisteröintilomituksella. Tätä suuremmat määrät ovat luvanvaraisia. Asetuksessa lentotuhkalla tarkoitetaan kivihiiltä polttavissa energiantuotantolaitoksissa syntyvää lentotuhkaa, jonka jätenimike on 10 01 02 (hiilen poltossa syntyvä lentotuhka). Ympäristöviranomainen tekee päätöksen jätenimikkeestä. On mahdollista, että hiilenpolton lentotuhkan nimikkeen mukaista tuhkua tuottavan voimalaitoksen polttoaineena voidaan käyttää jonkin verran puupohjaisia polttoaineita. Asfalttimassan valmistukseen käytettävä lentotuhka on oltava CE-merkittyä (VNA 846/2012).

Tuhkan käyttö asfaltin seosaineena koskee seuraavia tarkasteluvaihtoehtoja:

VE1

(VE0+)

5.2.4 Kipsilevyteollisuus

Kipsilevyjen valmistajalta saadun tiedon mukaan, kipsilevyn valmistukseen soveltuu kalsiumsulfaatti. Olennaista on, että käytettävä raaka-aine on riittävän puhdasta, eli noin 97 % kalsiumsulfaattia kuiva-aineesta ja alhainen vapaa kosteus 8-12 %. Myös poistokaasun käsittelyssä käytettävän kalkkikiven epäpuhtauksien ja säteilyarvojen pitää olla riittävän pienet. (Salminen 2013). Rikinpoiston lopputuotteen käyttö kipsilevyteollisuudessa koskee tarkasteluvaihtoehtoa:

(VE1)

5.2.5 CE-merkintä

Rakennustuotteiden CE-merkintä on tullut pakolliseksi 1.7.2013 EU:n rakennustuoteasetuksen myötä niille rakennustuotteille, joille on olemassa harmonisoitu tuotestandardi. Harmonisoituja tuotestandardeja valmistuu tämän jälkeen lisää, joten tilanne vaadittavasta CE-merkinnästä eri käyttötarkoituksissa tulee muuttumaan lähivuosina.

Hyötykäytön kannalta rakennustuotteena tulee kysymykseen lentotuhkan käyttö betonin lisäaineena, jota määrittelee standardi SFS-EN 450-1:2012. Tähän käytettävät lentotuhkat ovat jauhemaisen hiilen poltosta syntynyttä lentotuhkaa. Kivihiilen poltossa voi käyttää oheispolttoaineita, kunhan oheispolttoaineista syntyvän lentotuhkan osuuden maksimi ei ylitä 30 %. Liitteessä 1c on esitetty standardin sallimat oheispolttoaineet.

Myöhemmin on tulossa voimaan kiviaineksia koskeva muutettu standardi EN 13242:2013, joka sisältää myös kiviainekset, joiden alkuperä on tuhka. Standardissa on mainittu sekä kivihiilen että puun polton (biomass) tuhkat. Tämän standardin soveltaminen eri maarakentamisen sovellutuksiin ei ole vielä selvää, mutta se tulee koskemaan ainakin osaa maarakennussovellutuksista, kun tuhkaa käytetään kiviaineksenä.

Aiemmin esitetty kevytkiviainesstandardi SFS-EN 13055-2:2004 sisältää rakennustuotedirektiiviin perustuvan yhdenmukaistetun osan, jonka pohjalta rakennustuotteeseen voidaan kiinnittää CE-merkintä EU:n komission määräämän käyttöönottopäivämäärän jälkeen. Standardin mukaista merkintää on noudatettava, kun valmistaja kiinnittää tuotteeseensa CE-merkinnän.

CE-merkintä koskee tarkasteluvaihtoehtoja:

VE1

VE0+

Yhteenveto

Kivihiilen lentotuhkan käytölle betonin lisäaineena on olemassa standardi SFS-EN 450-1:2012, jonka kriteerit tulee täytyä jotta tuhkaa voidaan hyödyntää.

Puutuhkan käytölle betoniteollisuudessa ei ole vielä olemassa kriteeristöä. Puutuhkan käytöstä betonin sideaineena tai fillerinä on saatu lupaavia tuloksia Teknillisen korkeakoulun Rakennusmateriaalitekniikan laboratoriossa tehdyissä tutkimuksissa vuosina 2006 - 2008. Puutuhkien hyödyntämiseen betoniteollisuudessa vaikuttaa erityisesti polttoainekoostumuksen vaihtelu vuoden aikana. Puutuhkan koostumus on betonin kannalta edullinen mm. sen sisältämien mineraalien alkuaineiden aiheuttamisen hyvien sideaineominaisuuksien takia. Tutkimuksen mukaan puutuhka soveltuu hyvin betonin seosaineeksi ja sitä voidaan käyttää kivihiilituhkan tavoin, kunhan sen erityispiirteet otetaan huomioon.

Sementtistandardi SFS-EN 197-1:2012 määrittelee tavallisten sementtien koostumus- ja laatuvaatimukset sekä vaatimustenmukaisuuden ehdot. Sementin valmistuksessa voi käyttää ainoastaan kivihiilen polton lentotuhkaa. Lentotuhkaa voidaan hyödyntää 6-20 tai 21 - 35 % sementin raaka-aineista, riippuen valmistettavan sementin tyypistä.

Lentotuhkan käyttöä asfaltin seosaineena määrittää standardi SFS-EN 13055-2:2004, joka koskee mineraalista alkuperää olevia kevytkiviaineiksi, mukaan lukien mm. teollisuusprosessien sivutuotteet. Asfaltiasema saa käyttää vuodessa enintään 40 000 tonnia kivihiilen lentotuhkaa ilman lupamenettelyä. Lentotuhkan on oltava CE-merkittyä. Asfaltin valmistukseen käytettävällä lentotuhkalla tarkoitetaan hiilen poltossa syntyvää lentotuhkaa, jonka jätenimike on 10 01 02. On mahdollista, että hiilenpolton lentotuhkan nimikkeeseen mukaista tuhkaa tuottavan voimalaitoksen polttoaineena voidaan käyttää jonkin verran puupohjaisia polttoaineita.

Taulukkoon 14 on koottu sivutuotteiden rakennustuoteteollisuuden hyötykäyttöä määrittelevät standardit.

Taulukko 14. Hyötykäyttöä määrittelevät standardit.

Nimi	Nro	Vaikutus
Betoniin käytettävä lentotuhka. Osa 1: Määritelmät, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus	SFS-EN 450-1:2012	Kivihiilen polton lentotuhkan hyötykäyttö betonissa. Koskee myös seospolton lentotuhkaa standardin mukaisin rajoituksin.
Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus	SFS-EN 197-1:2012	Kivihiilen polton lentotuhkan hyötykäyttö sementissä
Kevytkiviainekset. Osa 2: Kevytkiviainekset asfalttimassoihin ja pintauksiin sekä sitomattomiin ja sidottuihin käyttötarkoituksiin	SFS-EN 13055-2:2004	Teollisuusprosessien sivutuotteiden hyötykäyttö kevytkiviaineksenä
Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction	EN 13242:2013	Tuhkien hyötykäyttö maarakentamisen kiviaineksenä.

5.3 Tuhkan käyttö lannoitteena ja rakeistus

Tuhkan käyttöä lannoitteena ohjaa lannoitevalmistelaki 539/2006 sekä maa- ja metsätalousministeriön asetus 24/11. Asetuksen liitteen I kohdan 1A7 kohdan mukaan *tuhkalannoitteena tai sen raaka-aineena voidaan käyttää turpeen, peltobiomassan tai puun tuhkaa, joka on eroteltu turpeen, puuhakkeen, kuorijätteen, ensiomassan tuotannon tai massasta valmistettavan paperin tuotannon yhteydessä syntyvän kuituainetta sisältävän kasviperäisen jätteen, käsittelemättömän puujätteen tai muun näihin verrattavan puhtaan puuperäisen aineksen tai peltobiomassojen kuten ruokohelpi, olki, vilja, öljykasvit, paju ja järvi-ruoko taikka niiden seoksen poltossa syntyvistä savukaasuista mekaanisesti tai sähköisesti tai joka on poistettu polttolaitoksen polttokammion pohjalta. Myös puu-, turve- tai kasvibiomassapohjaisen polttoaineen valmistuksessa syntyvä tuhka on lannoitekäyttöön soveltuvaa tuhkaa (MMM 24/11).*

Lentotuhkan käyttö lannoitteena tulee siis kysymykseen ainoastaan 100 % biopolttoaineen osalta (Vuosari C-polttolaitos). Lannoitekäyttöön ei myöskään sovellu pohjatuhka eikä rikinpoiston lopputuote.

Taulukossa 15 on esitetty asetuksen mukaiset enimmäispitoisuuksien raja-arvot. Metsässä käytettävän tuhkalannoitteen ravinnepitoisuuksien on oltava vähintään seuraavat:

- kalium (K) + fosfori (P) 2,0 %
- kalsium (Ca) 6,0 %

Muulla kuin metsässä käytettävän tuhkan neutraloiva kyky (Ca) on oltava vähintään 10 %. Rakeistettuun tuhkalannoitteeseen saa lisätä epäorgaanisia lannoitevalmisteita sen käyttökelpoisuuden lisäämiseksi tai vähimmäisvaatimuksen täyttämiseksi. Tuhkalannoitteen, johon on lisätty booria, levittäminen pohjavesialueilla ja suojelualueilla on kielletty (MMM 24/11).

Taulukko 15. Lannoitelainsäädännön mukaiset enimmäispitoisuuksien raja-arvot (MMM 24/11).

Alkuaine	Enimmäispitoisuus mg/kg kuiva-ainetta*	Metsätaloudessa käytettävissä tuhkalannoitteissa tai niiden raaka-aineena käytettävässä tuhkassa enimmäispitoisuus mg/kg**
Arseeni (As)	25	30
Elohopea (Hg) ¹⁾	1,0	1,0
Kadmium (Cd)	1,5 ²⁾	17,5
Kromi (Cr)	300 ³⁾	300
Kupari (Cu)	600 ⁴⁾	700
Lyijy (Pb)	100	150
Nikkeli (Ni)	100	150
Sinkki (Zn)	1500 ⁴⁾	4500 ⁴⁾

1) Elohopean määrittäminen EPA 743-menetelmällä

2) 2,5 mg Cd/kg ka maa- ja puutarhataloudessa sekä viherkentä- ja maisemoinnissa käytettävässä tuhkalannoitteissa tai niiden raaka-aineena käytettävässä tuhkassa

3) Sellaisenaan kalkitusaineena käytettävälle sivutuotteelle teräskuona (tyyppinimi 2A2/3) määritetään kromi liukoiseena kuuden arvoisena kromina (Cr⁶⁺). Raja-arvo liukoisealle kuuden arvoiselle kromille on 2,0 mg/kg kuiva-ainetta.

4) Enimmäispitoisuuden ylitys lannoitevalmisteissa voidaan sallia, kun maaperäanalyysin perusteella on todettu puutetta kuparista tai sinkistä. Metsätaloudessa enimmäispitoisuuden ylitys lannoitevalmisteena käytettävässä sivutuotteessa on sallittu ainoastaan sinkkiä suometissa käytettäessä, silloin kun sinkin puute on kasvustosta todettu joko maaperä-, lehti- tai neulasanalyyseillä. Tällöin maksimimäärä sinkkiä lannoitevalmisteena käytettävässä sivutuotteessa saa olla enintään 6000 mg Zn/kg ka.

* Peltokäyttöön sovellettavat raja-arvot

** Metsäkäyttöön sovellettavat raja-arvot

Tuhkan lannoitekäyttö edellyttää käytännössä tuhkan rakeistusta tai itsekovetusta. Puhdas puutuhka on melko hienojakoista ja yleensä helposti rakeistuvaa. Palamattoman hiilen korkea pitoisuus (yli 10 %) vaikeuttaa tuhkan rakeistamista ja lopputuloksena voi olla tuote, jolla on liian suuri reaktiivisuus levityksen kannalta, jolloin se voi aiheuttaa vahinkoja kasvustossa (Isännäinen ym.).

Vuonna 2007 Elintarviketurvallisuusvirasto Evira käynnisti maa- ja metsätalousministeriön aloitteesta tuhkan lannoituskäyttöä selvittäneen hankkeen yhteistyössä TE-keskusten (nyk. ELY-keskus) kanssa. Projektissa selvitettiin vuosina 2007-2009 maakuntakohtaisesti voimalaitostuhkien loppusijoituskohteita, sekä lannoitevalmistekäyttöön menevien tuhkien laatua erityisesti haitallisten aineiden osalta. Osa toimijoista oli jo entuudestaan Eviran lannoitevalmistevalvonnan rekisterissä. Projektissa kartoitettiin 373 voimalaitoksen/lämpökattilan toiminta. Näistä 162 ilmoitti vuonna 2007 luovuttavansa tuhkaa lannoitevalmistekäyttöön. Voimalaitoksilta otettiin 177 näytettä vuosien 2007-2009 aikana. Haitallisista metalleista analysoidtiin arseeni (As), elohopea (Hg), kadmium (Cd), kromi (Cr), kupari (Cu), lyijy (Pb), nikkeli (Ni) ja sinkki (Zn). Valvonnan tuloksia on esitetty liitteessä 3a (Eviran tuhka- ja lannoitevalvonnan tuloksia vuosilta 2007-2009, 2010).

Puun tuhkan sisältämät tärkeimmät ravinteet ovat fosfori ja kalium sekä hivenravinteet. Puun tuhkassa on runsaasti myös kalsiumia ja magnesiumia, mutta niiden merkitys ravinteena on vähäinen. Kokonaisuudessaan puun tuhkan pääasialliset ainesosat ovat kalsium, magnesium ja kalium ja näiden ravinteiden vaihtelut eri puulajien välillä voivat olla suuriakin. Eri tuhkalajien ravinnepitoisuuksia on esitetty liitteessä 3b ja puutuhkan ravinnepitoisuuksien vaihteluita liitteessä 3c.

Suomessa on tutkittu myös menetelmää, jossa ravinteet erotellaan biotuhkasta, ja jäljelle jäänyt silikaatitifraktioksi kutsuttu massaosa voidaan hyödyntää asfaltin lisäaineena, teknisessä rakentamisessa tai betonituotannossa. Erotellut ravinteet jalostetaan liuokseksi, jota ei tarvita metsähehtaarille kuin 150-200 kiloa. Rakeistettua tuhkalannoitetta tarvitaan 4-7 t hehtaarille. Ravinneliuosta voidaan käyttää myös käytöstä poistuneiden turvesoiden ravinnetasapainon palauttamiseen (Saarinen 2012). Menetelmä ei ole tällä hetkellä käytössä. Lannoitekäyttö koskee vain tarkasteluvaihtoehtoa jossa syntyy puutuhkaa:

VE1

5.3.1 Rakeistus

Rakeistamalla tuhkaa, saadaan poistettua tuhkan käsittelyyn liittyvät pölyämisriskit ja mahdollistetaan myös ympärivuotinen levitys jos olosuhteet sen muuten sallivat. Rakeistetun tuhkan kuljetus ja levittäminen on helpompaa. Etuna on myös rakeistetun tuhkan hidas liukenevuus, jolloin tuhkalannoituksen vaikutukset ovat pitkäaikaisemmat kuin pölytuhkalla. Pölytuhkasta aiheutuva nopea pH:n nousu voi aiheuttaa kasvillisuudessa vaurioita, jotka voidaan estää rakeistuksella (Puutuhkan käyttö metsien lannoitteena ja sen ympäristövaikutukset, 2003)

Rakeistettu tuhka voidaan säkittää suursäkkeihin. Suursäkkejä on helppo käsitellä. Säkit kuljetettaneen maanteitse käyttöpaikalle, josta niitä voidaan hakea myös helikopterilla levitettäväksi (leviävät suursäkit). Yksi helikopteri voi levittää jopa 200 000 kg lannoitetta päivän aikana (Mäkinen 2012).

Rakeistuksen onnistumiseen vaikuttavat lisätyn veden määrä, veden lisäystapa, rakeistusaika, rum-pusekoittimen kallistuskulma ja pyörimisnopeus sekä tietysti myös tuhkan laatu. Rakeiden koossapysyvyyden vuoksi on tärkeää, että rakeiden annetaan kuivua riittävän kauan (Karvonen, Pesonen, Kuokkanen ja Kuokkanen, 2012).

Rakeistuksen vaikutus hyödynnettävyyteen

Oulun yliopiston tutkimuksessa vuonna 2012 rakeistettiin Oulun Energian (OE) ja Laanilan Voiman (LV) tuhkia. Kumpikin tuhka oli muodostunut poltettaessa seosta, joka sisälsi noin 75 % turvetta ja noin 25 % puuta. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää em. turve-/puupohjaisten lentotuhkien kemiallista koostumusta, ominaisuuksia ja luokittelumahdollisuuksia ja huomioida mm. jätelain ja lannoitevalmisteasetuksen tuomat haasteet ja mahdollisuudet (Karvonen ym. 2012).

Tutkimuksessa valmistettiin kaikkinsa 18 kpl erilaisia (tuhkan alkuperä, rakeistusaika, sementtipitoisuus) tuhkarakeita. Rakeisiin lisättiin 5 tai 10 m-% sementtiä sideaineeksi, ja seos kostutettiin lisäämällä siihen vettä, minkä jälkeen kostutettua tuhkaseosta sekoitettiin voimakkaasti lapasekoittimella noin minuutin ajan. Tämän jälkeen tuhkaseos rakeistettiin koerakeistuslaitteistolla, jonka pyörimisnopeutta ja kaltevuutta voitiin säätää (Karvonen ym. 2012).

Tuhkien luokittelussa käytettiin ilmaluokittelua, ja yleisesti ottaen alkuaineiden havaittiin ainakin jossain määrin rikastuvan hienoimpaan jakeeseen. Ainoastaan pii rikastui karkeisiin jakeisiin. Ilmaluokittelun huomattiin toimivan hyvin haitallisten aineiden pitoisuuksien vähentämisessä, mutta sen haittapuolena oli, että myös monet ravinteet rikastuivat hienoihin jakeisiin. Näin ollen ilmaluokittelun kannattavuus tulee miettiä tapauskohtaisesti (Karvonen ym. 2012).

Tutkimuksessa tehtyjen happoliuotuskokeiden perusteella havaittiin, että tuhkan sisältämien alumiinin ja raudan liukoisuus on suurempi hienosta jakeesta kuin käsittelemättömästä tai karkeasta tuhkasta. Luenneiden alumiinin ja raudan avulla voisi olla mahdollista poistaa jätevesistä fosforia. Alumiinin ja raudan vähäinen liukoisuus tuhkasta on aiemmin ollut fosforinpoistosovellutuksen ongelma (Karvonen ym. 2012).

Toinen mahdollinen ja lupaava menetelmä tuhkan käytölle jäteveden puhdistuksessa on sen käyttö adsorptiomateriaalina. Se kuitenkin edellyttää tuhkien rakeistusta, jonka todettiin esikokein olevan helposti ja edullisesti toteutettavissa (Karvonen ym. 2012).

Yhteenveto

Mikäli Helsingin Energian suunnitteilla olevan voimalaitoksen Vuosaari C:n polttoaineena käytetään ainoastaan puuta tai haketta, on näiden polttoaineiden lentotuhkien hyötykäyttö lannoitteena mahdollista mikäli ne täyttävät lannoitevalmisteasetuksen (24/11) asettamat raja-arvot. Jos joidenkin ravinteiden pitoisuudet jäävät alle vaaditun, on lainsäädännön mukaan tuhka valmistamiseen mahdollista lisätä lannoittavia ainesosia. Vuonna 2007 tehdyssä Elintarviketurvallisuusviraston tutkimuksessa tutkittiin voimalaitosten lannoitevalmistekäyttöön menevien tuhkien laatua. Haitta-aineiden pitoisuuksissa oli suurta vaihtelua, mutta otannan keskiarvot jäivät alle metsäkäytön raja-arvojen.

Tuhkan rakeistuksella voidaan poistaa käsittelyyn liittyvät pölyämisriskit. Rakeistettua tuhkaa on myös mahdollista levittää ympäri vuoden olosuhteiden sen muuten salliessa. Rakeistetun tuhkan etuna ovat myös sen hidas liukenevuus, jolloin lannoituksen vaikutukset ovat pidempiaikaiset kuin pölytuhkalla. Pölytuhka voi myös aiheuttaa nopeasta pH:n noususta johtuen kasvillisuusvaurioita, joita ei esiinny rakeistettua tuhkaa käytettäessä. Mikäli jonkin haitta-aineen pitoisuus nousee niin korkeaksi, ettei tuhkaa voida enää hyödyntää, on mahdollista saada se rikastettua hienoimpaan tuhka-jakeeseen. Rakeistettuun tuhka-lannoitteeseen saa lisätä epäorgaanisia lannoitevalmisteita sen käyttökelpoisuuden lisäämiseksi tai vähimmäisvaatimusten täyttämiseksi. Tuhkalannoitteen, johon on lisätty booria, levittäminen pohjavesialueilla ja suojelualueilla on kielletty.

Tuhkan käyttö lannoitteena tulee kysymykseen ainoastaan 100 % biopolttoaineen tuhkan osalta, seospolton (kivihiili ja puu) tuhkia ei voida käyttää lannoitteena. Myöskään pohjatuhkaa tai rikinpoiston loppu- tuotetta ei käytetä lannoitteena, ainoastaan lentotuhkaa.

6. VARASTOINTI- JA KÄSITTELYVAIHTOEHDOT MAARAKENTAMISTA VARTEN

Tuhkarakentaminen keskittyy sulan maan ajanjaksolle, kun taas voimalaitosten tuhka- tuotanto keskittyy pääosin talven kylmiin kuukausiin. Maarakentamisen sujuvuuden kannalta on tärkeää saada oikeanlaatuiset materiaalit haluttuun aikaan riittävällä toimituskapasiteetilla (taulukko 16), minkä vuoksi tuhkan varastointi on usein pakollinen välivaihe tuhkan logistisessa ketjussa. Jäteverolain (1126/2010) 3 §:n mukaan jätettä eli tuhkaa voi varastoida muista jätteistä erillään korkeintaan kolmen vuoden ajan ilman veroseuraamuksia (Kiviniemi ym. 2012).

Taulukko 16. Työmaan asettamat tyypilliset tuhka- toimituskapasiteettivaatimukset eri menetelmillä.

Kohde	Toimituskapasiteetti
Massiiviset tierakenteet	50-100 t/h
Pengertäyttö	>100 t/h
Stabiloinnin sideaine	30-35 t/h

Lentotuhkien varastoinnilla on merkittävä vaikutus materiaalin teknisiin ominaisuuksiin. Käsittely-, varastointi- ja logistiset menetelmät tulee valita tuhkan käyttötarkoituksen mukaan (kuva 11). Materiaalin vesipitoisuuden hallinnalla on tässä ketjussa hyvin keskeinen rooli. Se vaikuttaa sekä käsittelyn ja kuljetuksen toimivuuteen ja taloudellisuuteen, että materiaalin laatuun (Kiviniemi ym. 2012).

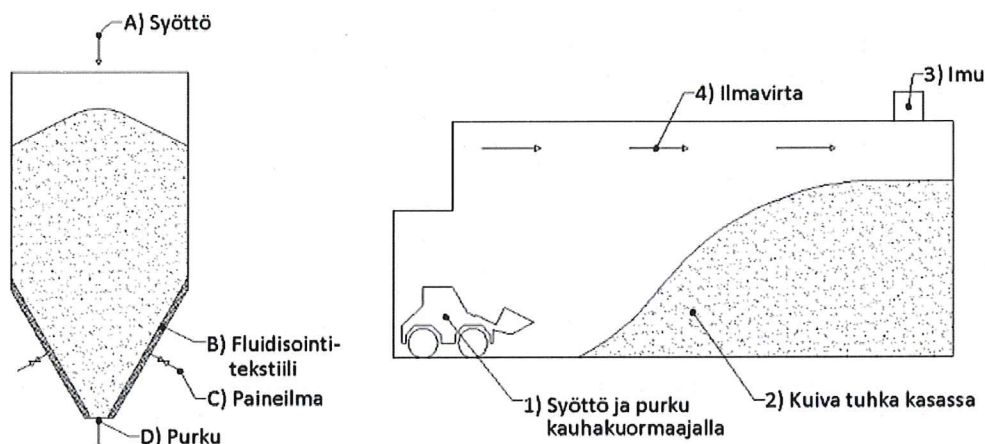
Maarakentamisen kannalta hallittu tuhkien varastointi voidaan jakaa kahteen eri pääluokkaan:

- kuivavarastointiin ja
- varastointiin kostutettuna

6.1 Varastointi

Pohjatuhkilla varastointi ei juuri vaikuta tekniseen laatuun. Kuivavarastoinnissa tuhkan maarakennusominaisuudet säilyvät paljon paremmin kuin kostutettuna. Kuiva lentotuhka säilyy reaktiivisena ja homogeenisena jopa vuosia. Kostutus heikentää tuhkan reaktiivisuutta ja pääosa heikkenemisvaikutuksesta tapahtuu 1 – 2 viikon kuluessa (Kiviniemi ym. 2012).

Kuivavarastointi toteutetaan hienorakeisen materiaalin varastointiin soveltuissa suljetuissa varastohalleissa tai silloissa (kuva 13). Kuivavarastoinnissa oleellista on tuhkan purkutekniikka. Uuden, kapasiteetiltaan riittävän lentotuhkan kuivavarastointiin soveltuvan varaston rakentaminen voi olla kannattavaa, mikäli vuosittain syntyvä tuhkamäärä saadaan kokonaisuudessaan hyötykäytettyä. Uuden kuivavaraston rakentamisesta olisi logistista etua myös siinä mielessä, että purkulaitteisiin voisi yhdistää samalla sekoittimen mahdollisesti tarvittavan sideaineen ja halutun vesimäärän lisäämistä varten (Kiviniemi ym. 2012)



Kuva 13. Fluidipohjasiilo ja varastohalli (Kiviniemi ym. 2012).

Tuhkan varastointi kostutettuna tulee kyseeseen kun tuhkaa pitää varastoida isoja tie- tai kenttärakentamiskohteita varten. Varastointi kostutettuna on taloudellinen tapa varastoida. Vesi vaikuttaa tuhkan ominaisuuksia heikentävästi varastoinnin aikana, mutta käytännössä suuremmissa hankkeissa kostutettuna varastointi voi olla ainoa taloudellinen tapa varastoida lentotuhkaa. Varastointi kosteana voidaan toteuttaa seuraavilla tavoilla:

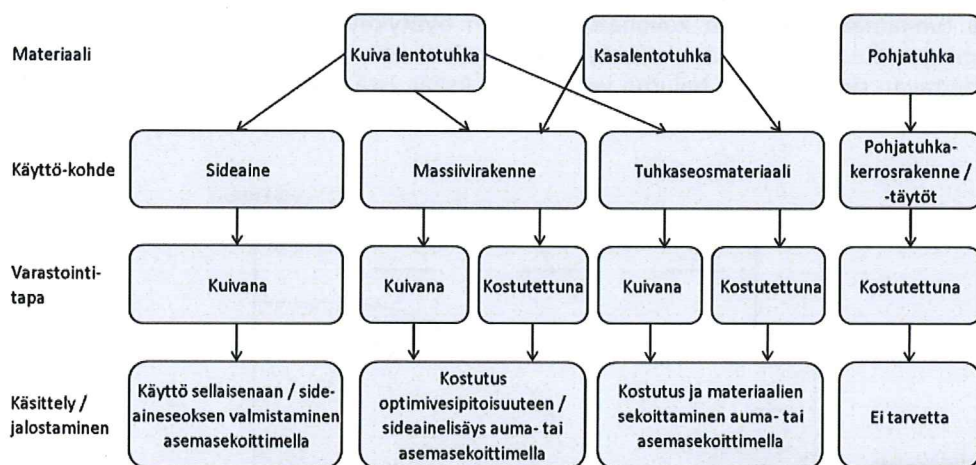
- hallittu varastointi suuriin kasoihin
- varastoaumoihin varastointi

Läjittäminen on vähemmän tilaa vaativa ja yksinkertaisempi tapa varastoida. Se sopii hyvin silloin, kun lentotuhka hyötykäytetään sellaisenaan ja käytettävä tuhka on laadultaan homogeenista. Mikäli lentotuhkaa joudutaan sekoittamaan suuria määriä (suuri vedenlisäystarve tai sideaineen lisäys), aumavarastointi tulee vartenotettavaksi menetelmäksi, koska silloin säästytään ylimääräiseltä materiaalin siirtämiseltä. Pohjatuhkan varastointi voidaan käytännössä aina suorittaa läjittämällä eikä siihen tarvitse kiinnittää erityishuomiota (Kiviniemi ym. 2012).

Lentotuhkan varastointi on yleensä suositeltavaa toteuttaa hallitun läjittämisen ja aumavarastoinnin yhdistelmällä, jolloin osa varastointialueesta varataan aumavarastointikäyttöön ja loput läjittämiseen. Läjittämisen tai aumaamisen aikana tuhkaa ei saa missään tapauksessa tiivistää esimerkiksi kasan päällä ajamalla. Kasojen tulee pysyä löyhänä, koska tiivistyessään kostea lentotuhka alkaa lujittua (Kiviniemi ym. 2012).

Läjittäminen suoritetaan käytössä olevan siirtokaluston rajoitteet huomioiden. Periaatteessa muita kokorajoituksia kuin kasan korkeus ei ole, mutta voi olla järkevää jakaa varastoitava materiaali useampaan kasaan, jolloin materiaalia on helpompi ottaa eri osista esimerkiksi silloin, kun käytettävää lentotuhkaa pitää homogenisoida useammalta laitokselta tulevan materiaalin takia (Kiviniemi ym. 2012).

Kuvassa 14 on esitetty erilaisia varastointi- ja käsittelymenetelmiä lento- ja pohjatuhkille (Kiviniemi ym. 2012).



Kuva 14. Eri lentotuhkan käyttökohteille soveltuvat varastointi- ja käsittelymenetelmät (Kiviniemi ym. 2012).

Jotta kaikkien eri jakeiden täysimittainen hyödyntäminen on mahdollista, on jakeita varastoitava erillään. Maarakennushyötykäyttöä varten lentotuhkat ja pohjatuhkat on pidettävä erillään. Rakennustuoteteollisuuden hyötykäyttöä varten on erityisen tärkeää pitää kivihiilituhka ja biotuhka erillään. Lannoitekäyttöön ei sovellu kuin 100 % biotuhka, joten tämänkään jakeen osalta sekoittumista ei saa tapahtua. Mikäli rikinpoiston lopputuotetta käytetään kipsilevyteollisuudessa, on sen puhtaus varmistettava varastoinnilla.

6.2 Sekoitus ja laadun parantaminen

Aumasekoitus

Aumasekoitus soveltuu suurien massamäärien, kuten sementillä jalostettavan ja kostutettavan lentotuhkan tehokkaaseen sekoittamiseen. Sekoitus tapahtuu erillisellä aumasekoittimella, joka on materiaalia ulkoa sisäänpäin siirtävällä ruuvilla varustettu tela-alustainen kone. Suomessa käytössä olevia aumasekoittimia varten sekoitettava materiaali kasataan sopiviin aumoihin. Aumasekoittimen teoreettinen sekoituskapasiteetti voi olla 6000 m³ tunnissa. Lentotuhka-aumat tarvitsevat kuitenkin yleensä useamman kääntökerran, jolla varmistetaan veden ja mahdollisen sideainelisyksen tasainen jakautuminen. Tämän takia aumasekoittimen sekoituskapasiteetti lentotuhkan osalta on luokkaa 1000 m³/h. Sekoitustyön kokonaiskeston arvioinnissa on kuitenkin huomioitava myös muut työvaiheet, kuten aumojen rakentaminen ja veden lisääminen (Kiviniemi ym. 2012).

Asemasekoitus

Asemasekoitus soveltuu pienempien materiaalmäärien, kuten kerrosstabiloinnin sideaineen, sekoitukseen. Asemasekoittimella on mahdollista sekoittaa hyvin hallitusti eri aineita halutussa suhteessa ja samalla kostuttaa sideaineseos halutulla vesimäärällä. Asemasekoittimen toimintakapasiteetti on esimerkiksi kerrosstabiloinnin sideaineseosta valmistettaessa noin 50 t/h valmista sideaineseosta. Toimintakapasiteetti riittää hyvin yhden stabilointityöryhmän tarpeisiin. Massiivirakentamisen materiaalien sekoituksessa kapasiteetti voi olla jopa 100 t/h riippuen massojen olomuodosta (kuiva/kostea) ja syöttötavasta (siilosta/kiviainessyötöstä) (Kiviniemi ym. 2012).

Ruuvisekoitus

Ruuvisekoituksesta ei ole tällä hetkellä vielä kokemusta tuhkien sekoituksessa muualla kuin voimalaitosten siilojen purkuruuveissa, jotka on suunniteltu veden lisäykseen lentotuhkan kaatopaikkaläjitystä varten. Periaatteessa esimerkiksi liikuteltavan asematyyppisen ruuvisekoittimen avulla tuhkia voisi kostuttaa ja jalostaa tehokkaasti (Kiviniemi ym. 2012).

Taulukkoon 17 on koostettu tuhkien jalostamiseen soveltuvat sekoitusmenetelmät.

Taulukko 17. Tuhkan jalostamiseen soveltuvat sekoitusmenetelmät, soveltuvuus, sekoituspaikan tyyppi ja sekoituskapasiteetti (Kiviniemi ym. 2012).

Sekoitusmenetelmä	Soveltuvuus	Sekoituspaikka	Kapasiteetti
Ruuvisekoitin	Lentotuhkan jalostaminen ja kostutus	Voimalaitos, välivarastointialue, työmaa	laitteiston mukaan
Asemasekoitin	Stabilointien sideaineseokset, lentotuhkaseosmateriaalit, lentotuhkan jalostaminen ja kostutus	Välivarastointialue, työmaa	50–100 t/h
Aumasekoitin	Stabiloinnin sideaineseokset, lentotuhkaseosmateriaalit, lentotuhkan jalostaminen ja kostutus	Välivarastointialue	1000–5000 t/h *
Kevyet sekoittimet	Pienet kohteet, ei vaativiin töihin, epähomogeenisuus todennäköistä	Välivarastointialue	10–25 t/h
Jyrsinsekoittimet	Lentotuhkan jalostaminen	Työmaalla	

* Sekoituskapasiteetti ei sisällä aumojen rakentamista, mikä rajoittaa todellisuudessa sekoitustehon tasolle 500–2000 t/tv.

Rakentamisaikataulu

Tuhkarakentamisen ennakkosuunnittelussa on huomioitava käytettäväksi suunnitellun tuhkan tyyppi ja varmistuttava siitä, että ennakkotutkimukset ja rakenteen mitoitukset on tehty saman käyttöluokan tuhkalta kuin mitä käytetään rakentamisessakin. Erityisesti on huomioitava eri tavalla varastoitujen tuhkien väliset erot, sekä varmistettava käytettävissä olevan rakennuskaluston soveltuvuus ja kapasiteetin riittävyys (Kiviniemi ym. 2012).

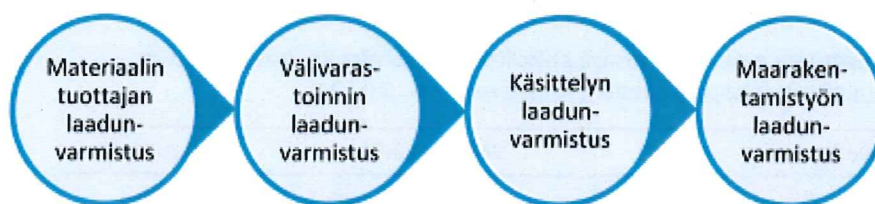
Rakentajan on selvitettävä tuhkan saatavuus ja toimituskapasiteetti hyvissä ajoin ennen varsinaista rakentamista ja tarvittaessa rakennusmateriaaleja on kerättävä välivarastoon. Tuotannossa on usein seisokkeja, jotka tulee huomioida tuhkamääriä arvioitaessa (arviointissa on selkeintä käyttää yksikkönä kuivatonneja). Muita rakennustyön ennakkosuunnittelussa huomioitavia tekijöitä ovat erityisesti mahdolliset lupa-asiat, tuhkan epätasaiset tuotantomäärät vuoden aikana sekä sääolosuhteiden mahdolliset vaikutukset työn edistymiseen ja lopputuloksen laatuun. Lentotuhkarakentaminen on suositeltavaa ajoittaa touko-syyskuun väliselle ajalle. Muina ajankohtina riskit kasvavat erityisesti rakenteiden alkulujittumisen suhteen. Matala lämpötila hidasta oleellisesti lujittumista ja lähellä 0 °C lämpötilaa rakenteen lujittuminen pysähtyy kokonaan (Kiviniemi ym. 2012).

Materiaalintuottajan laadunvarmistus

Rakentamisen laadunvalvonnan varmistamiseksi tuhka- ja keet on pidettävä erillään toisistaan. Tämä tuo osaltaan myös haastetta varastoinnille, koska jokainen sivutuote vaatii oman varastointitilansa.

Materiaalintuottajan laadunvarmistus sisältää olennaisten prosessitietojen seurannan, tuhkien teknisten ominaisuuksien määrittämisen ja seurannan sekä tuhkien ympäristöllisten ominaisuuksien seurannan. Lentotuhkien osalta perusominaisuudet käsittävät hehkutushäviön, tiivistävyysominaisuudet, lämmönjohtavuuden, routivuuden sekä lujittumisominaisuudet. Pohjatuhkien osalta olennaisin ominaisuus on rakeisuus, jota on suositeltavaa seurata tasaisin väliajoin. Muut olennaiset perusominaisuudet ovat hehkutushäviö, tiivistävyysominaisuudet, kapillaarisuus sekä lämmönjohtavuus (Kiviniemi ym. 2012).

Teknisiin ominaisuuksiin vaikuttavia seurattavia prosessitietoja ovat käytetty polttoaine, varastoitavan tuhkan vesipitoisuus sekä kattilan kuormitustilanne. Teknisten ominaisuuksien lisäksi ympäristölainsäädännön edellyttämät kokonaispitoisuus- ja liukoisuusarvot on selvitettävä vuosittain tai prosessin tai polttoainekoostumuksen muuttuessa merkittävästi (Kiviniemi ym. 2012). Kuvassa 15 on esitetty materiaalintuottajan laadunvarmistusketju.



Kuva 15. Materiaalintuottajan laadunvarmistusketju tuhkarakentamiselle (Kiviniemi ym. 2012).

Yhteenveto

Sivutuotteiden tehokkaan hyötykäytön edellytyksenä on oikeanlainen varastointi jokaiselle sivutuotejakeella. Varastointi vaatii tilaa ja eri jakeet on syytä pitää erillään toisistaan (lentotuhka, pohjatuhka, rikinpoiston lopputuote). Myöskään esimerkiksi kivihiilen tuhkaa ei pidä sekoittaa biopolton tuhkan kanssa sekaisin. Jäteverolain (1126/2010) 3 §:n mukaan jätettä eli tuhkaa voi varastoida muista jätteistä erillään korkeintaan kolmen vuoden ajan ilman veroseuraamuksia

Tuhkarakentamisen ennakkosuunnittelussa on huomioitava käytettäväksi suunnitellun tuhkan tyyppi ja varmistuttava siitä, että ennakkotutkimukset ja rakenteen mitoitus on tehty saman käyttöluokan tuhkalta kuin mitä käytetään rakentamisessakin.

7. KAATOPAIKKASIJOITUS JA LOUHOSTÄYTÖT

7.1 Kaatopaikkasijoitus

Mikäli jätelain 646/2011 etusijajärjestyksestä huolimatta hyödyntämis- tai kierrätysvaihtoehtoa ei löydy, polton sivutuotteet on sijoitettava kaatopaikalle. Ottaen huomioon pääkaupunkiseudun infrastruktuurin ahtaus, on todennäköistä että kaatopaikka sijoittuisi melko kauas voimalaitoksilta (30-50 km). Taulukossa 18 on esitetty kuormien lukumäärä eri vaihtoehtoissa kun ajoneuvon kapasiteetti on 40 tonnia, mikäli kaatopaikkasijoitus on ainoa vaihtoehto, kuten se on siinä tapauksessa, että toteuttavia hyötykäyttökohteita ei löydy tai kohteet eivät ole teknis-taloudellisesti tarkoituksen mukaisia toteuttaa.

Taulukko 18. Kuormien lukumäärä eri vaihtoehtoissa, kun ajoneuvon kapasiteetti on 40 tonnia.

Vaihtoehto	Kuormien lukumäärä
VE1 a)	3350
VE1 b)	3175
VE1 c)	4975
VE1 d)	3625
VE2	2475
VE0+	3600

Taulukossa 5 (kappale 4.1) on verrattu Helsingin Energian kivihiilen lentotuhkan ja rikinpoiston lopputuotteen liukoisuustuloksia kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvoihin. Kivihiilen lentotuhkan osalta ylityksiä esiintyy kromin, molybdeenin, seleenin, sulfaatin ja fluoridin pitoisuuksissa pysyvän jätteen raja-arvoihin verrattuna. Rikinpoiston lopputuotteen osalta fluoridi ylittää pysyvän jätteen, sulfaatti tavanomaisen jätteen ja kloridi vaarallisen jätteen raja-arvot.

7.2 Louhostäytöt

Helsingin Energian lentotuhkaa ja rikinpoiston lopputuotetta on viety louhostäyttöön Lohjan Tytyrin kaivokseen. Voimassa olevan ympäristöluvan mukaisesti louhostäyttöön voidaan vuosittain sijoittaa energiantuotannon palamisen sivutuotteista kivihiilen lentotuhkaa ja turpeen ja käsittelemättömän puun poltosta syntyvää lentotuhkaa sekä rikinpoiston lopputuotetta (ympäristölupa UUS-2002-Y-548-111 ja ESA-VI/85/04.08/2011). Ympäristölupamääräysten tarkistamista on haettava 30.6.2015 mennessä.

Tulevaisuudessa eri vaihtoehtoista muodostuvien tuhkien ja rikinpoiston lopputuotteiden sijoittaminen louhostäyttöön riippuu niiden kaatopaikkakelpoisuudesta sekä ko. kaatopaikan ympäristöluvan määräyksestä.

Biotuhkaa ja rikinpoiston lopputuotetta ei saa sekoittaa keskenään ja siten niiden sijoittaminen samaan louhostäytön osaan on todennäköisesti myös tulevaisuudessa kielletty.

Tähän saakka kivihiilen lentotuhkaa ja rikinpoiston lopputuotetta on sekoitettu keskenään, jolloin louhostäytössä seos on muodostanut lujittuvan rakenteen. Toistaiseksi ei ole olemassa selkeää määritelmää sille, kuinka suuri biopolttoaineen osuus kivihiilen seassa poltettuna muuttaa kivihiilituhkan biotuhkaksi. Puupelletin tuhkapitoisuus on kuitenkin hyvin pieni verrattuna kivihiilen tuhkapitoisuuteen, jolloin puupelletin poltto kivihiilen seassa voidaan katsoa tuottavan puhtaaseen kivihiilen lentotuhkaan verrattavaa tuuhkaa. Puuperäisten polttoaineiden seospolton myötä muodostuvan lentotuhkan laatu on arvioitava tapauskohtaisesti, jotta voidaan arvioida tuhkan sijoittamisen tarve omaan louhostäytön osaan tai voiko sen sijoittaa yhdessä rikinpoiston lopputuotteen kanssa louhokseen.

Nykyiset louhosalueet eivät todennäköisesti ole enää käytössä, kun suunnitteilla oleva Vuosaari C-voimalaitos käynnistyy. Tästä syystä kaatopaikkasijoitusta varten tarvitaan joka tapauksessa uusia alueita joko Tytyristä tai muualta ja siten niiden ympäristölupien vaatimiin menettelyihin ja vaatimuksiin on varauduttava.

Yhteenveto

Kaatopaikkasijoitus tulee kysymykseen siinä tapauksessa jos hyödyntämis- tai kierrätysvaihtoehtoa tai -kohdetta ei löydy tai hyötykäytön vaatimukset eivät täyty. Taulukkoon 19 on koottu sivutuotteiden kaatopaikkaläjäytysessä huomioitavat asiat.

Taulukko 19. Helsingin Energian sivutuotteiden kaatopaikkasijoitukseen ja louhostäyttöön vaikuttavat asiat.

Nimi	Nro	Vaikutus
Jäteverolaki	1126/2010	Jätteen varastointiaika, kaatopaikalle toimitettavasta jätteestä suoritettava vero
Jätelaki	646/2011	Etusijajärjestys
Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista	331/2013	Jätteen kaatopaikkakelpoisuus
Nordkalk ympäristölupa	UUS-2002-Y-548-111 ESAVI/85/04.08/2011	Tytyrin kaivokseen sijoitettavat sivutuotteet

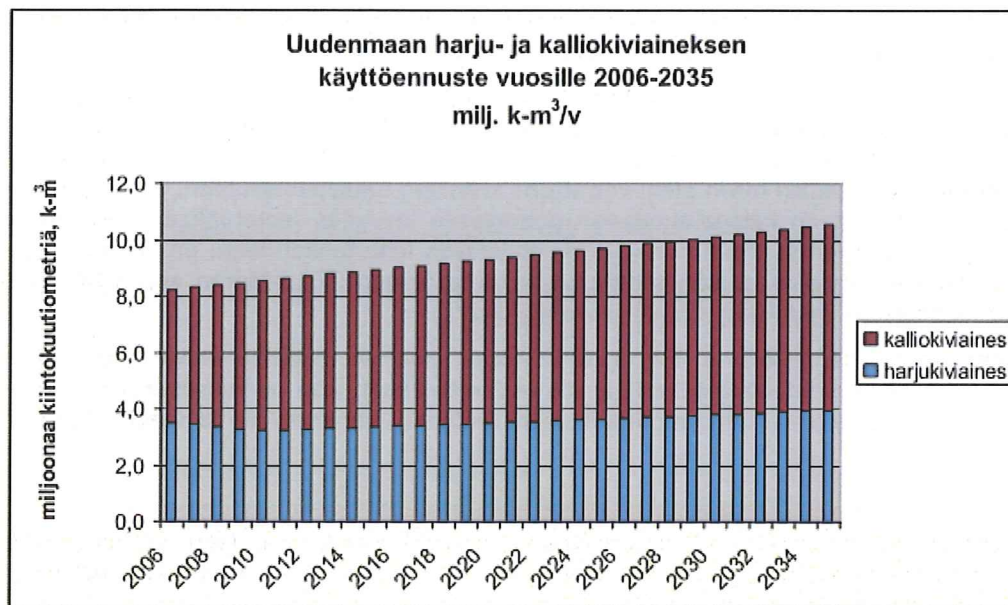
8. KIVIAINESTARPEET UDELLAMAALLA

8.1 Pääkaupunkiseudun ja Uudenmaan kiviainestarpeet

Pääkaupunkiseutu on maamme suurin yksittäinen kiviaineisten kuluttaja. Yhdyskuntien rakentamisen ja ylläpidon kannalta kiviainekset ovat välttämätön, uusiutumaton luonnonvara ja kiviainesten käyttö on jatkuvaa. Kiviaineita saadaan peruskalliosta, erilaisista harjumuodostumista, moreenikentistä sekä kiviaineita kierrättämällä (Uudenmaan kiviaineshuollon kehityskuvat 2007).

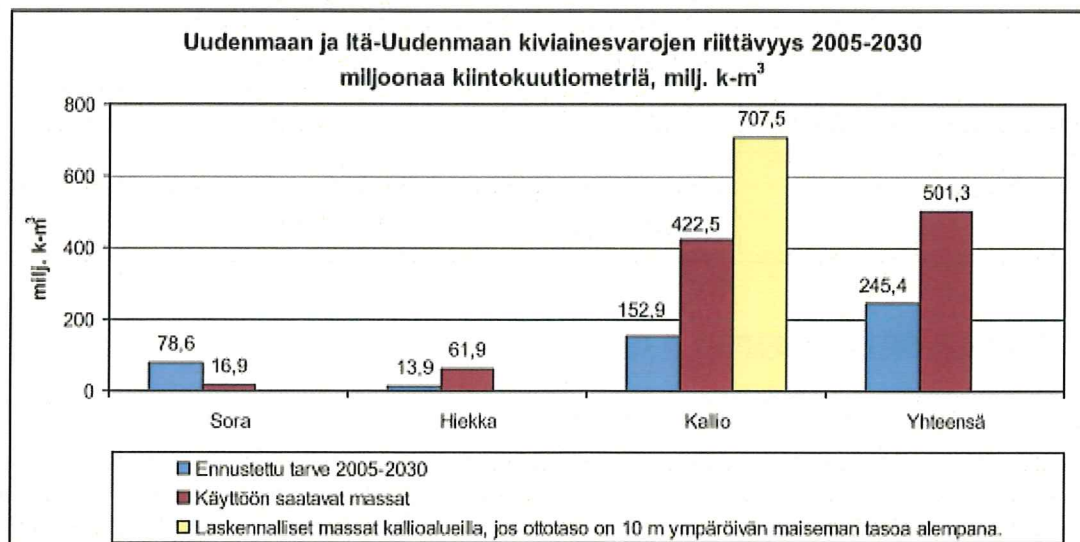
Uudenmaan vuotuinen kiviainesten käyttö on noin 9 miljoonaa kiintokuutiometriä eli noin 14,2 tonnia asukasta kohden. Tästä määrästä 2/3 on kalliokiviainesta. Vuoteen 2035 mennessä kulutuksen arvioidaan jatkuvan tasaisena eikä merkittävää kasvua ole odotettavissa (Uudenmaan kiviaineshuollon kehityskuvat 2007).

Uudenmaan maakunnan otettavissa oleva harjuaines on lähes loppunut ja ottoalueiden painopiste on siirtynyt jo yli 40 km:n päähän Helsingistä. Uudellemaalle tuodaan harjuainesta erityisesti eteläisestä Hämeestä. Kuvassa 16 on esitetty Uudenmaan kiviaineksen käyttöennuste vuoteen 2035 asti kun mitoitusnormina on käytetty 15 t/asukas ja asukasmääränä Uudenmaan liiton väestösuunnitteen ylärajaa (Uudenmaan kiviaineshuollon kehityskuvat 2007).



Kuva 16. Uudenmaan harju- ja kalliokiviaineksen käyttöennuste vuoteen 2035 asti (Uudenmaan kiviaineshuollon kehityskuvat 2007).

Uudenmaan kiviaineshuollon kehityskuvat-raportin mukaan hiekan ja kalliokiviaineksen osalta saatavuusongelmaa ei ole tulevaisuudessakaan, mutta edellä mainittu harjuaines on ehtymässä. Kuvassa 17 on esitetty Uudenmaan ja Itä-Uudenmaan kiviainesvarojen riittävyys (Uudenmaan kiviaineshuollon kehityskuvat 2007).



Kuva 17. Uudenmaan ja Itä-Uudenmaan kiviainesvarojen riittävyys (Uudenmaan kiviaineshuollon kehityskuvat 2007).

8.2 Ylijäämämaat

Koko pääkaupunkiseudulla tuotetaan ylijäämämassoja noin kolme miljoonaa kuutiometriä vuodessa. Näistä kolmannes on savia ja muita liettyviä maa-aineksia. Helsingissä syntyy tällä hetkellä noin miljoona kuutiometriä ylijäämäsaviala (Anttalainen, Toikka, Huhtinen ja Palolahti 2005).

Ylijäämämassoja voidaan hyödyntää myös niiden syntypaikoilla käyttämällä erilaisia stabilointitekniikoita. Voimalaitoksilta saatavaa tuhkaa voidaan mahdollisesti hyödyntää stabiloinnissa joko sellaisenaan tai kaupalliseen sideaineeseen sekoitettuna. Tuhkien soveltuvuus kohteeseen on selvittettävä tapauskohtaisesti.

Kun otetaan huomioon kunkin materiaalin yksilölliset ominaisuudet, kaikkia tuhkalaatuja voidaan käyttää kuivalla maalla ja pohjavesialueiden ulkopuolella penger-, täyttö- ja ympäristörakennemateriaaleina. Tuhkilla voidaan korvata moreeneja, hiekkaa, soraa tai louhetta kohteen olosuhteet ja vaatimukset huomioiden. Myös toissijaisissa täytöissä voidaan tuhkillä korvata moreeneja, silttejä ja savimaita, jolloin nämä tuhkia heikompileatuisemmat maa-ainekset voidaan käyttää esimerkiksi penger- ja ojaluisien sekä täyttömaiden verhoilumateriaaleina (Kiviniemi ym. 2012).

8.3 Pohjatuhka ja lentotuhka

Vuonna 2007 Uudenmaan alueella syntyi tuhkia noin 0,3 miljoonaa tonnia. Tästä määrästä hyödynnettiin maanrakentamisessa noin 30 % ja kaatopaikkarakenteissa 6 % (Lillman 2009).

Aiemmin taulukossa 4 esitetyn mukaisesti eri vaihtoehtoista syntyvien sivutuotteiden kokonaismäärä vaihtelee 99 000 – 171 000 tonnin välillä. Lentotuhkan osuus on noin 75 % kaikissa vaihtoehtoissa lukuun ottamatta Vuosaari C:n 100 % kivihiilivaihtoehtoa. Pohjatuhkan osuus on noin 11 % ja rikinpoiston lopputuotteen osuus 14 %.

8.3.1 Vertailu kiviainestarpeesta

Taulukossa 20 on esitetty eri vaihtoehtoista muodostuvat sivutuotteiden kokonaismäärät (yksityiskohtaisempi taulukko kappaleessa 3.5) sekä missä määrin sivutuotteilla voidaan korvata kiviaineksia. Taulukko on suuntaa-antava, koska tuhkan käytettävyyteen vaikuttavat monet jo esille tuodut asiat.

Taulukko 20. Eri vaihtoehtojen mukaiset laskennalliset sivutuotemäärät.

Vaihtoehdot	Yhteensä (t)	Korvaa kiviainesta (m ³) (jaettu arvolla 2,5)	Osuus Uudenmaan kiviaineskulutuksesta v. 2020 (%)
VE1 a)	125 000	50 000	Noin 1 % kaikissa vaihtoehtoisissa
VE1 b)	118 000	47 200	
VE1 c)	190 000	76 000	
VE1 d)	125 000	50 000	
VE2	87 000	34 800	
VE0+	127 000	50 800	

Koska vaihtoehtodossa VE1 (c) muodostuvan tuhkan määrä on suurin, myös kiviaineksen korvaavuus on suurin. Kaikissa vaihtoehtoisissa muodostuvan tuhkan kiviainesta korvaava osuus on kuitenkin varsin pientä Uudenmaan kiviaineskulutuksesta. Yhdessä muiden Uudenmaan voimalaitosten tuhkien kanssa tuhkien osuudella kiviainesta korvaavana materiaalina on kuitenkin jo jonkinlainen merkitys.

8.4 Tuhkien hyödyntämisen periaatteet

Tuhkien ja muiden sivutuotteiden käyttö rakennushankkeessa kannattaa arvioida jo hankkeen valmisteluvaiheessa, jotta voidaan selkeimmin kohdentaa sivutuotteisiin perustuvat ratkaisut soveltuviin kokonaisuuksiin (Kiviniemi ym. 2012).

Ensimmäisessä vaiheessa tulee selvittää tuhkan tekniset ja ympäristölliset ominaisuudet, joiden perusteella arvioidaan tuhkan soveltuvuus ja jalostettavuus eri maarakentamisen osa-alueille. Haitta-aineiden kokonaispitoisuuksien ja liukoisuuksien perusteella selvitetään voidaanko tuhkaa hyödyntää ilmoitusmenettelyllä vai tarvitaanko ympäristölupa. Nämä vaikuttavat myös toteuttamisen aikatauluun, koska ympäristölupamenettely kestää aina ilmoitusmenettelyä kauemmin (Kiviniemi ym. 2012).

Toinen merkittävä seikka tuhkien hyödyntämisessä on tuhkien muodostumisen ja maarakentamisen ajankohdan eriaikaisuus. Voimalaitoksissa muodostuu tuhkaa talviaikaan enemmän, kun taas kesäisin tuhkan muodostuminen on vähäistä. Saatavuuteen vaikuttavat siis tuhkien tuotantomäärät eri aikoina sekä tuhkasiilojen koko (Kiviniemi ym. 2012).

Tuhkarakentamisella voidaan tietyissä tapauksissa saavuttaa selviä kustannussäästöjä sekä tuottaa ekologisempia ratkaisuja (Kiviniemi ym. 2012).

Tuhkien korvaama kiviainesmäärä on pieni, mutta lukumääräisesti se tarkoittaa kuitenkin suurta määrää kohteita. Kohteet ovat toteutettavissa vain mikäli kaikki rakentamiseen liittyvät asiat kohteen löytymisestä, soveltuvuuden tarkastelusta, tarvittavasta tuhkan määrästä aina ilmoitus-/lupamenettelyyn sekä rakentamisajankohdan saatavuuteen kulkevat aikataulullisesti järkevästi rinnakkain. Toisistaan riippumattomien kohteiden aikataulutus vaatii jatkuvaa materiaaliavirtojen hallintaa, koska rakentamisaikataulut usein muuttuvat hankkeen toteutuksen aikana.

9. JOHTOPÄÄTÖKSET

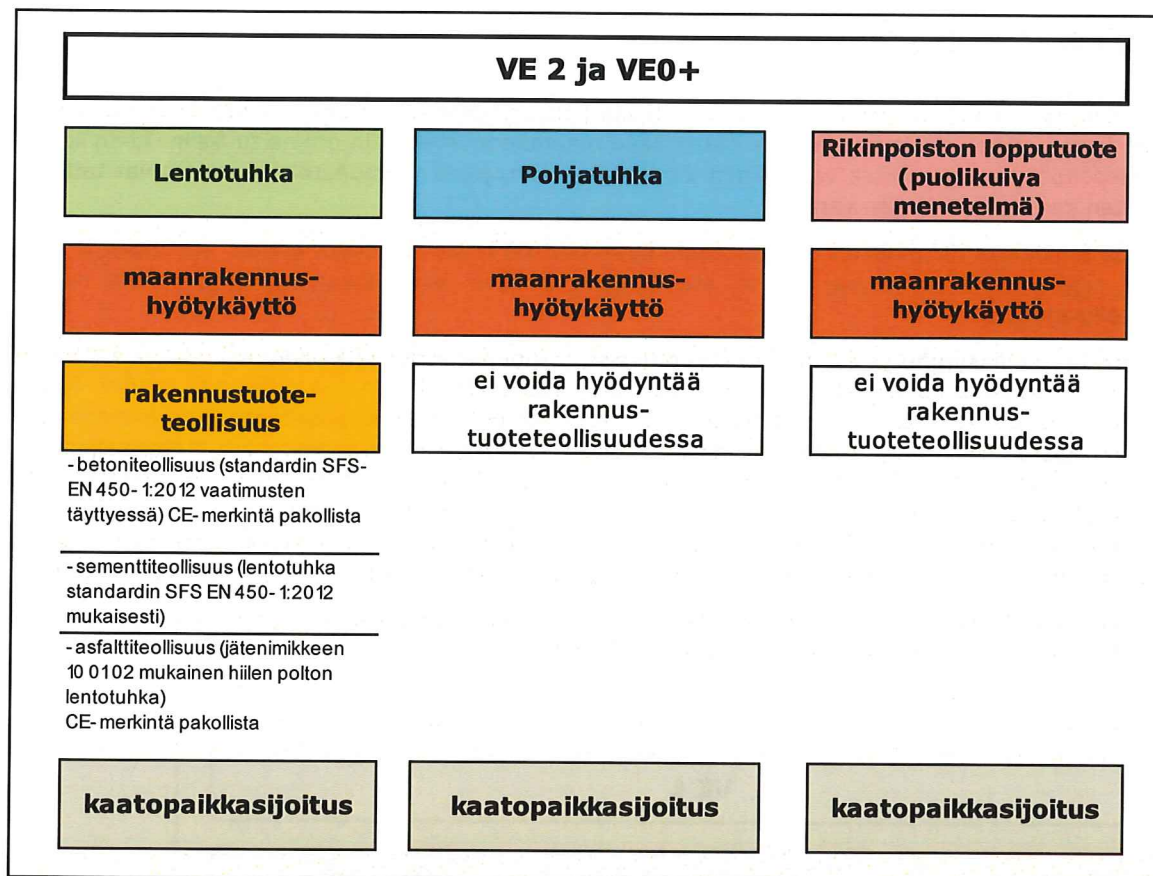
Tässä selvityksessä arvioitiin julkisten lähteiden avulla polttoainekoostumuksen vaikutusta hyötykäytettyvyyteen, kaatopaikkakelpoisuuteen sekä materiaalin maarakennusteknisiin ominaisuuksiin. Kivihiilen ja puun yhteispoltosta on saatavissa vain vähän kirjallisuustietoa, joten johtopäätökset perustuvat tätä raporttia varten kerättyjen tietojen varaan.

Teollisuuden tuhkien ja rikinpoiston lopputuotteen hyötykäyttöä ohjaavat monet eri lait, asetukset ja niissä annetut raja-arvot. Myös eurooppalaiset standardit määräävät lentotuhkan hyödyntämisestä rakennustuoteteollisuudessa.

Valtioneuvoston hyväksymän jätesuunnitelman mukaisesti luonnonsoraa ja kalliomursketta korvattaisiin vuoteen 2016 mennessä kaivannaistuotannon jätteillä 5 prosenttia eli noin 3-4 miljoonaa tonnia. Teollisuudessa syntyvien sivutuotteiden käsittely uusiomateriaaleiksi on usein edullisempaa kuin materiaalien sijoittaminen kaatopaikalle. Uusiomateriaalien käsittelykustannuksia lisäävät kuitenkin materiaalien varastointikustannukset sekä kuljetuskustannukset käyttöpaikalle. Kustannukset siis riippuvat käytettävästä käsittelytekniikasta, materiaalin varastointitarpeesta ja kuljetusmatkan pituudesta. Kansantaloudellisesti jäteperäisten materiaalien käyttö on pitkällä tähtäimellä kannattavampaa kuin neitseellisten luonnonvarojen käyttö, mikäli välilliset kustannukset eivät muodostu liian suuriksi (Kohti kierrätysyhteiskuntaa 2008).

Kuvassa 18 on esitetty sivutuotteiden käsittelyvaihtoehdot eri tarkasteluvaihtoehdoissa VE1, VE2 ja VE0+. Kaatopaikkasijoitus on aina viimeinen vaihtoehto kaikille jätteille.

VE 1		
Lentotuhka	Pohjatuhka	Rikinpoiston lopputuote (puolikuiva menetelmä)
maanrakennus-hyötykäyttö	maanrakennus-hyötykäyttö	maanrakennus-hyötykäyttö
rakennustuote-teollisuus -betoniteollisuus (standardin SFS-EN 450-1:2012 vaatimusten täytyessä) -sementtiteollisuus (lentotuhka standardin SFS EN 450-1:2012 mukaisesti) -asfalttiteollisuus (jätteenimikkeen 10 01 02 mukainen hiilen polton lentotuhka) CE-merkintä pakollista	ei voida hyödyntää rakennustuoteteollisuudessa	ei voida hyödyntää rakennustuoteteollisuudessa
lannoitekäyttö -vain 100 % biotuhka	ei voida hyödyntää lannoitekäytössä	ei voida hyödyntää lannoitekäytössä
kaatopaikkasijoitus	kaatopaikkasijoitus	kaatopaikkasijoitus



Kuva 18. Yhteenveto eri vaihtoehtojen hyötykäyttömahdollisuuksista.

Ympäristötekniiseen kelpoisuuteen vaikuttava tekijä on materiaalista liukenevien metallien ja suolojen määrä. Tuhkien ympäristökelpoisuutta arvioidaan vertaamalla haitta-aineiden kokonaispitoisuuksia ja liukoisuuksia ja MARA-asetuksen (591/2006) raja-arvoihin. Seospolton tuhkien ympäristökelpoisuutta ei voida arvioida pelkästään polttoaineen eri osien tuhkien tietoja tarkastelemalla. Kirjallisuudesta löytyneiden tietojen perusteella seospolton tuhka on ominaisuuksiltaan pitkälti puunpolton tuhkan kaltaista.

Sekä kivihiilen että puunpolton, ja näiden yhteispolton lento- ja pohjatuhkat soveltuvat moniin erilaisiin maanrakennussovelluksiin. MARA-asetuksessa on asetettu haitta-aineiden raja-arvot, joiden alittuessa tuhkia voidaan hyödyntää ilmoitusmenettelyllä. Mikäli jokin haitta-aine ylittää annetut raja-arvot, tuhkan hyötykäyttö edellyttää ympäristölupaa. MARA-asetuksen mukaisen ilmoituksen hankkeesta käsittelee aina ELY-keskus. Ympäristöluvan käsittelee kunnan ympäristölupaviranomainen, mikäli hyödynnettävä määrä on alle 10 000 t vuodessa, ja määrän ylittyessä viranomaisena on aluehallintoviranomainen. Mikäli hankkeen tuhkamäärä on vähintään 50 000 t, tuhkan hyödyntäminen saattaa vaatia ympäristövaikutusten arviointi-menettelyn.

Tuhkien rakeisuus vaihtelee käytetyn polttoaineen ja polttotekniikan suhteen. Kirjallisuudesta on löytynyt viitteitä siitä, että polton olosuhteet (kuormitus, lämpötila, höyrynuohoimet, jne.) vaikuttavat lentotuhkan partikkelikokojakaumaan enemmän kuin polttoaineen koostumus.

Kivihiilen käytölle betonin lisäaineena on olemassa standardi SFS-EN 450-1:2012, jonka kriteerit tulee täytyttyä jotta tuhkaa voidaan hyödyntää.

Puutuhkan käytölle betoniteollisuudessa ei ole olemassa kriteeristöä.

Sementtistandardi SFS-EN 197-1:2012 määrittelee tavallisten sementtien koostumus- ja laatuvaatimukset sekä vaatimustenmukaisuuden ehdot. Lentotuhkaa voidaan hyödyntää 6-20 tai 21-35 % sementin raaka-aineista, riippuen valmistettavan sementin tyyppistä.

Lentotuhkan käyttöä asfaltin seosaineena määrittää standardi SFS-EN 13055-2:2004, joka koskee mineraalista alkuperää olevia kevytkiviaineksia, mukaan lukien mm. teollisuusprosessien sivutuotteet. Asfaltiasema saa käyttää vuodessa enintään 40 000 tonnia kivihiilen lentotuhkaa ilman lupamenettelyä. Asetuksessa lentotuhkalla tarkoitetaan kivihiiltä polttavissa energiantuotantolaitoksissa syntyvää lentotuhkaa, jonka jätenimike on 10 01 02 (hiilen poltossa syntyvä lentotuhka). Lentotuhkan on oltava CE-merkittyä.

Tuhkan käyttö lannoitteena tulee kysymykseen ainoastaan 100 % biopolttoaineen tuhkan osalta, seospolton (kivihiili ja puu) tuhkia ei voida käyttää lannoitteena. Myöskään pohjatuhkaa tai rikinpoiston lopputuotetta ei käytetä lannoitteena, ainoastaan lentotuhkaa.

Sivutuotteiden tehokkaan hyötykäytön edellytyksenä on oikeanlainen varastointi jokaiselle sivutuottejakeella. Varastointi vaatii tilaa ja eri jakeet on pidettävä erillään toisistaan (lentotuhka, pohjatuhka, rikinpoiston lopputuote). Myöskään esimerkiksi kivihiilen tuhkaa ei pidä sekoittaa biopolton tuhkaan.

Tuhkarakentamisen ennakkosuunnittelussa on huomioitava käytettäväksi suunnitellun tuhkan tyyppi ja varmistuttava siitä, että ennakkotutkimukset ja rakenteen mitoitus on tehty saman käyttöluokan tuhkalle kuin mitä käytetään rakentamisessakin.

Helsingin Energian toimittamien arvioitujen sivutuotemäärien perusteella sivutuotteet voivat korvata noin 1 % Uudenmaan kiviainekulutuksesta. Koska vaihtoehdossa VE0+ muodostuvan tuhkan määrä on suurin, myös kiviaineksen korvaavuus on suurin. Yhdessä muiden Uudenmaan voimalaitosten tuhkien kanssa tuhkien osuudella kiviainesta korvaavana materiaalina on kuitenkin jo jonkinlainen merkitys (34 800 – 76 000 m³ kiviainesta, riippuen vaihtoehdosta), mikäli tuhkat täyttävät tekniset ja ympäristölliset vaatimukset. Tuhkien korvaama kiviainesmäärä on pieni, mutta lukumääräisesti se tarkoittaa kuitenkin suurta määrää kohteita. Kohteet ovat toteutettavissa vain mikäli kaikki rakentamiseen liittyvät asiat kohteen löytymisestä, soveltuvuuden tarkastelusta, tarvittavasta tuhkan määrästä aina ilmoitus-/lupamenettelyyn sekä rakentamisajankohdan saatavuuteen kulkevat aikataulullisesti järkevästi rinnakkain. Toisistaan riippumattomien kohteiden aikataulutus vaatii jatkuvaa materiaalivirtojen hallintaa, koska rakentamisaikataulut usein muuttuvat hankkeen toteutuksen aikana.

Kaatopaikkasijoitus tulee kysymykseen aina, jos hyödyntämis- tai kierrätysvaihtoehtoa ei löydy, sivutuote ei ole hyötykäytön laatukriteerit täyttävää tai hyötykäytön aikataulutus ei ole onnistunut.

LIITE 1 BETONITEOLLISUUS

Liite 1a Betoniin käytettävän lentotuhkan kemialliset vaatimukset (SFS-EN 450-1:2012).

Kemialliset vaatimukset	
Hekikutushäviö	A: $\leq 5 \%$ / B: $\leq 7,0 \%$ / C: $\leq 9,0 \%$
Kloridi (Cl^-)	$\leq 0,10 \%$
Sulfaatti (SO_3)	$\leq 3,0 \%$
Vapaa kalsiumoksidi	Määrittäminen standardin EN 451-1 mukaisesti. Mikäli arvo on yli 1,5 m-%, lentotuhka on testattava standardin kohdan 5.3.3 mukaisesti.
Reaktiivinen kalsiumoksidi	$\leq 10,0 \%$
Reaktiivinen piidioksidi	$\geq 25 \%$
Piidioksidi (SiO_2), alumiinioksidi (Al_2O_3) ja rautaoksidi (Fe_2O_3)	summa $\geq 70 \%$
Kokonaisalkalipitoisuus	$\leq 5,0 \%$ (Na_2O -ekvivalentti)
Magnesiumoksidi	$\leq 4,0 \%$
Fosfaatti (P_2O_5)	$\leq 100 \text{ mg/kg}$

Liite 1b Betoniin käytettävän lentotuhkan fysikaaliset vaatimukset (SFS-EN 450-1:2012).

Fysikaaliset vaatimukset	
Hienous (märkäseulonta $0,045 \mu\text{m}$ seula)	N: $< 40 \% \pm 10 \%$, S: $\leq 12 \%$
Aktiivisuusindeksi	vähintään 75% 28 vrk iässä, ja 85% 90 vrk iässä
Tilavuuden pysyvyys (lentotuhkan ja vertailusementin seos 30/70 %)	$\leq 10 \text{ mm}$
Kiintotiheys	$\pm 200 \text{ kg/m}^3$ tuottajan ilmoittamasta arvosta
Vedentarve	Hienousluokan S vedentarve ei saa olla enempää kuin 95% vertailusementin omasta vedentarpeesta.

Liite 1c Standardin SFS-EN 450-1 mukaiset oheispolttoaineiden lajit (SFS-EN 450-1:2012).

1	Standardin EN 14588:2010 mukaiset kiinteät biopolttoaineet, mukaan lukien kohdassa 4.5 määritellyt karjanhoidon tähteet ja pois lukien kohdissa 4.52, 4.132 ja 4.174 määritellyt jätetä
2	Eläinjauho (liha- ja luumjauho)

3	Yhdyskuntajätevesiliete
4	Paperiliete
5	Petrolikoksi
6	Näennäisesti tuhkattomat nesteet ja kaasumaiset polttoaineet

Liite 1d Puutuhkien betonin kannalta tärkeimmät pitoisuudet ja kivihiilituhkan raja-arvot kyseisille pitoisuuksille standardista SFS-EN 450-1 (Vornanen ja Penttala 2008). Tulokset, jotka eivät täytä vaatimuksia, on värjätty.

Tuhka	SO ₃ [%]	Cl ⁻ [%]	SiO ₂ [%]	Kok. alkalipitoisuus [%]	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₂ [%]	MgO [%]	CaO [%]	Hehkutus-häviöluokka ([%])
Stora Enso, Varkaus	8	0,4	35	4,1	56	3	15	C (7)
UPM, Jämsänkoski	3	0,2	43	3,3	69	3	15	A (1)
Stora Enso, Imatra	10	1,3	20	4,9	38	3	31	A (2)
Stora Enso, Summa	8	0,3	28	5,4	51	5	15	A (3)
M-Real, Kirkniemi	2	0,2	36	3,7	67	2	14	B (5)
Raja-arvot (SFS-EN 450-1)	< 3,0 %	< 0,1 %	reakt. > 25 %	< 5 %	> 70 %	< 4 %	vapaa < 2,5 % reakt < 10 %	A < 5 % B 5-7 % C 7-9 %

LIITE 2 Sementtistandardin SFS EN 197-1:2012 mukaiset sementtien koostumusvaatimukset

Sementtilaji	Klinkkeri	Masuuni- kuona	Silika	Pozzolaani		Lentotuhka		Muut
	K	S	D	P	Q	V	W	
CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	0-5
CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	0-5
CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	0-5
CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	0-5
CEM II/A-M	80-88	12-20						0-5
CEM II/B-M	65-79	21-35						0-5
CEM IV/A	65-89	-	11-35					0-5
CEM IV/B	45-64	-	36-55					0-5
CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	0-5
CEM V/B	20-38	31-49	-	31-49			-	0-5

LIITE 3 LANNOITEKÄYTTÖ

Liite 3 a. Kirjallisuusarvoja tuhkien metallien pitoisuuksista verrattuna metsäkäytön raja-arvoihin (Eviran tuhka- ja lannoitevalvonnan tuloksia vuosilta 2007-2009).

	Arseeni	Elohopea	Kadmium	Kromi	Kupari	Lyijy	Nikkeli	Sinkki
Keskiarvo	15,6	0,1	5,9	62,7	147,4	45,8	79,6	1091,3
Mediaani	3,6	0,01	3,7	33,5	99,0	23	29,5	530
Minimi	<0,2	<0,01	<0,2	4,9	8,3	<1,0	6,3	<50
Maksimi	350	2,7	66	968	4600	1500	6500	20000
Metsäkäytön raja-arvo	30	1,0	17,5	300	700	150	150	4500

Liite 3 b. Eri tuhkalaajien ravinnepitoisuuksia g/kg (Ojala 2010). Korkeimmat pitoisuudet värjätty.

Tuhkalaaji	P	K	Ca	Mg	Mn	B	Fe	Zn	Cu	Al
puu	19,3	123	275	44	13	1	2,2	3	0	6
hake	20	110	279	33	-	-	-	-	-	-
puunkuori	8,4	21	191	17	6,9	0,3	14,4	0,2	0,1	20
turve	11,7	3,4	46	9	0,9	0,1	73	0	0,1	31
kivihilli	1,1	3,3	27	13	0,6	0,1	29,2	-	-	26

Liite 3 c. Puutuhkan ravinnepitoisuuksien vaihtelut erilaisilla puulajeilla (Ojala 2010).

	kg/tn tuhkaa
Ca	212-330
Mg	20-35
P	7-22
B	0,2-0,29
Cu	0,1-0,19
Zn	0,5-2,2

LÄHDELUETTELO

- Akerfelt, T. 2010. Päästöjen hallinta ja säädöt Neste Oilin energialaitoksessa. Opinnäytetyö. Metropolia. Kone- ja tuotantotekniikan osasto. 34 s.
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT tiedotteita 2045. VTT - Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. 159 s. ISSN 1455-0865.
- Anttalainen, K., Toikka, K., Huhtinen, T. ja Palolahti, A. Ylijäämämässatarkastelu. 2005. Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto. Helsinki. 28 s.
- Arm, M. ja Tiberg, C. 2010. Bottenaskor från kol-, torv- och biobränsleeldning i väg- och anläggningsarbeten. Statens Geotekniska Institutet. Information 18:6. Linköping. 26 s.
- Elintarviteturvallisuusvirasto Eviran tuhka- ja jätehuollon tuloksia vuosilta 2007-2009. 2010. Dnro 7171/0749/2010. Evira. Maatalouskemian yksikkö. 14 s.
- Flyktman, M., Kärki, J., Hurskainen, M., Helynen, S. & Sipilä, K. 2011. Kivihiilen korvaaminen biomassalla yhteistuotannon polypolttokattiloissa. VTT Tiedotteita 2595. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT), Espoo. 65 s. ISBN 978-951-38-7779-8.
- Forsman, J., Järvinen, K. ja Hakari, M. 2010. Mineraalisen purkujätteen ja kivihiilituhkien hyödyntäminen maarakentamisessa Helsingissä. Helsingin kaupungin rakennusvirasto. Helsinki. 27 s.
- Hakari, M. 2007. Sivutuotteiden maarakennuskäytön ohjeistus - betonimurske ja pääkaupunki-seudun kivihiilituhkat. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Rakennus- ja Ympäristötekniikan osasto. Espoo. Saatavissa: http://www.tkk.fi/Yksikot/Rakennus/Pohja/D_Hakari_Miikka.pdf.
- Isännäinen, S., Rinne, S., Järvelä, E. ja Lindh, T. Tuhkan käyttö metsälannoitevalmisteena. RecAsh-projekti. 15 s.
- Karvonen, L., Pesonen, J., Kuokkanen, V. ja Kuokkanen, T. Tuhkan rakeistus Pohjois-Pohjanmaalla. Tuhkien jakeistus, niiden kemialliset ominaisuudet ja hyödyntämispotentiaali. 2012. Oulun yliopiston kemian laitoksen raporttisarja, raportti nro 86 (2012). Oulu. 106 s.
- Kattelus, J. 2010. Biomassan termisen konversion ja palamisen mallinnus leijupetikattilassa. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. 58 s.
- Kiviniemi, O., Sikiö, J., Jyrävä, H., Ollila, S., Autiola, M., Ronkainen, M., Lindroos, N., Lahtinen, P. & Forsman, J. 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja - Energiatuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa. Verkkojulkaisu. 64 s.
- Kohti kierrätysyhteiskuntaa. Valtakunnallinen jättesuunnitelma vuoteen 2016. Suomen Ympäristö 32/2008. Ympäristöministeriö. Helsinki. 54 s.
- Korpijärvi, K., Mroueh, U., Merta, E., Laine-Ylijoki, J., Kivikoski, H., Järvelä, E., Wahlström, M. & Mäkelä, E. 2009. Energiatuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön. VTT Tiedotteita 2499. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT), Espoo. 75 s. ISBN 978-951-38-7318-9.
- Kotola, M. 2010. Tuhkanerotuslaitteiston suunnittelu. Opinnäytetyö. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Energiatekniikan koulutusohjelma. Kotka. 55 s.
- Laine-Ylijoki, J., Wahlström, M., Peltola, K., Pihlajaniemi, M. ja Mäkelä, E. 2002. Seospolton tuhkien koostumus ja ympäristölaadunvarmistusjärjestelmä. VTT tiedotteita 2141. Otamedia Oy. Espoo. 49 s.
- Lentotuhkan kierrätys. 2013. Rudus Oy. URL: <http://www.rudus.fi/tuotteet/kierratys/lentotuhka>. Viitattu 16.8.2013.
- Lillman, E. Uudenmaan tiepiirin sivutuotteiden käyttösuunnitelma. 2009. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 25/2007. Helsinki. 29 s.
- Luukkanen, M. 2003. Lämpöpintojen puhdistus ja korrosio Kainuun Voima Oy:n kiertopetikattilassa. Opinnäytetyö. Kajaanin ammattikorkeakoulu. Tuotantotekniikan kunnossapito. Kajaani. 84 s.
- Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista. Asetus nro 24/11. 2011. URL: http://www.mmm.fi/attachments/elo/newfolder/lannoiteaineet/61fAl8BFZ/MMMa_24_11_lannoitevalmisteista_FI.PDF.

Metsäteollisuuden lentotuhkien käyttö tie-, katu- ja kenttärakenteissa. 2005. Finncao Oy. Saatavissa: http://www.finncao.fi/pdf/suunnittelu_ja_mitoitusohje.pdf. 25 s.

Mäkelä, E., Wahlström, M., Pihlajaniemi, M., Mroueh, U., Keppo, M. & Rämö, P. 1998. Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteet ja lentotuhka maarakentamisessa - Jatkotutkimus. VTT Tiedotteita 1952. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT), Espoo. 61 s. ISBN: 951-38-5420-5.

Mäkelä, E., Wahlström, M., Mroueh, U.-M., Keppo, M. & Rämö, P. 1995. Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteiden ja lentotuhkan hyötykäyttö maanrakentamisessa. VTT Julkaisuja 809. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT), Espoo. 78 s. ISBN: 951-38-4518-4.

Mäkelä, H. ja Höynälä, H. 2000. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa. Materiaalit ja käyttökohteet. Teknologia katsaus 91/2000. Tekes. Helsinki. 94 s.

Mäkinen, P. Metsätuhkan rakeistus ja levitys. 2012. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Metsätalouden koulutusohjelma. Tampere. 25 s.

Ohlström, M. 1998. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa. VTT Tiedotteita 1934. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT), Espoo. 114 s. ISBN: 951-38-5403.

Ojala, E. 2010. Selvitys puu- ja turvetuhkan lannoite- sekä muusta hyötykäytöstä. Energiatieteiden tutkimuskeskus, Motiva 51 s.

Ollila, S. 2011. Teollisuuden sivutuotteiden stabiloinnin, seostamisen ja vanhentamisen vaikutus haitta-aineiden liukoisuuksiin. Diplomityö. Oulun Yliopisto. Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto.

Paavola, T. 2013. Lajitellun lentotuhkan käyttö betonissa. Opinnäytetyö. Savonia ammattikorkeakoulu. Rakennusalan työnjohdon koulutusohjelma. 28 s.

Puutuhkan käyttö metsien lannoitteena ja sen ympäristövaikutukset. 2003. URL: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=176589>. Keski-Suomen Ympäristökeskus. Viitattu 5.8.2013.

Saarinen, E. Tuhkan ravinteet takaisin metsään. 2012. Uusiouutiset 23/2012.

Salminen, J. Sähköposti 20.8.2013. Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy.

Steenari, B.-M. ja Lindqvist, O. 1999. Fly ash characteristics in co-combustion of wood with coal, oil or peat. Fuel 78 (1999) 479-488.

Seosaineiden käyttö. 2013. Betoniteollisuus ry. URL: <http://www.betoni.com/tietoa-betonista/betoni-ja-kestava-kehitys/seosaineiden-kaytto>. Viitattu 16.8.2013.

SFS-EN 197-1:2012. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 35 s.

SFS-EN 13055-2:2004. Kevytkevytsementit. Osa 2: Kevytkevytsementit asfalttimassoihin ja pintauksiin sekä sitomattomiin ja sidottuihin käyttötarkoituksiin. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 40 s.

SFS-EN 450-1:2012. Betoniin käytettävä lentotuhka. Osa 1: Määritelmät, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 31 s.

Suomalainen sementti. Finnsementti. 51 s. URL: http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS_Suomalainen_sementti_kirjanen_071112.pdf. Viitattu 17.8.2013.

Uudenmaan kiviaineshuollon kehityskuvat. 2007. Uudenmaan liiton julkaisuja E nro 94. Uudenmaan liitto. ISBN: 978-952-448-216-5. 30 s.

Valtioneuvoston asetus asfalttiasemien ympäristönsuojeluvuorokausista. Asetus 846/2012. 2012. URL: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2012/20120846>.

Vornanen, C. ja Penttala, V. 2008. Puuperäisestä lentotuhkasta uusi betonin seosaine. Betoni-lehti 4/2008.