



Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020



Euroopan unioni  
Euroopan aluekehitysrahasto  
Euroopan sosiaalirahasto

# MAAKIERTO KP

## TEKNISTALOUDELLINEN SELVITYS

Tuhkan hyötykäyttö lannoitteena

Riku Niva ja Aki Suokko  
Centria-ammattikorkeakoulu  
Kesäkuu 2023

**centria**  
University of Applied Sciences  
ammattikorkeakoulu

**Luke**  
LUONNONVARAKESKUS

**KOSEK**  
KOKKOLA

**KESKI-POHJANMAAN LIITTO**  
MELLERSTA ÖSTERBOTTENS FÖRBUND



**EPSE**

**Energiateollisuus**

**KELIBER**

**sma mineral**



# Sisällysluettelo

TERMIT .....	3
1 JOHDANTO.....	4
2 TUHKALANNOITTEET .....	5
2.1 TUHKA JA SEN KOOSTUMUS .....	5
2.2 TUHKAN KÄYTTÖ LANNOITTEENA .....	5
2.2.1 TYYPPINIMIKOHTAISET VAATIMUKSET.....	5
2.2.2 MUUT KÄYTÖN RAJOITUKSET.....	6
2.3 TUHKIEN ESIKÄSITTELYMENETELMÄT .....	6
3 VOIMALAITOSTUHKA LANNOITTEEKSI.....	8
3.1 MARKKINOILLE SAATTAMINEN .....	8
3.2 TUHKAN LAADUN SEURANTA.....	8
3.2.1 NÄYTTEENOTTO JA ANALYSOINTI.....	9
3.2.2 TUHKIEN HAITTA-AINEPITOISUUKSIEN RAJA-ARVOT .....	9
3.3 TUOTESELOSTE.....	10
4 TALOUDELLISUUSTARKASTELU .....	11
4.1 ROOLIT LIIKETOIMINTAVERKOSTOSSA .....	11
4.2 KUSTANNUKSET .....	11
4.3 DOLOMIITTKALKIN ANNOSTELULAITTEISTO .....	11
4.4 KULJETUSKUSTANNUKSET.....	12
4.5 TUHKAN ESIKÄTTELYN VAIKUTUKSET KUSTANNUKSIIN .....	13
4.5.1 ITSEKOVETUSMENETELMÄ.....	13
4.5.2 RAKEISTUSMENETELMÄ.....	13
4.5.3 TUHKAN PAKKAUS JA VARASTOINTI.....	14
4.6 DOLOMIITTKALKIN KULUTUS .....	14
4.6.1 DOLOMIITTKALKIN KUSTANNUS .....	15
4.7 TUHKAN MUODOSTUMINEN .....	15
5 TÄRKEIMPIEN TALOUDELLISTEN VAIKUTUSTEN HERKKYYSTARKASTELUT .....	17
5.1 YHTEENVETO TALOUDELLISESTA TARKASTELUSTA .....	22
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA HUOMIOITA TULEVISTA SELVITYSTARPEISTA .....	23
7 LÄHTEET.....	24

## TERMIT

### DDU-hinta

DDU eli *Delivered Duty Unpaid* on kauppatermi, jossa myyjä vastaa tavaran turvallisesta toimittamisesta määräpaikkaan vastaten ainoastaan kuljetukseen liittyvistä kustannuksista.

### Huipunkäyttöaika

Huipunkäyttöaika ilmaisee, kuinka pitkän käyntiajan lämmöntuotantolaitos olisi tarvinnut vuotuisen tuotannon tuottamiseen laitoksen huipputeholla.

### Kiertotalous

Kiertotalous on termi toiminnalle, jonka keskeisenä tavoitteena on säästää luonnonvaroja sekä hyödyntää ja kierrättää materiaalit tehokkaasti ja kestävästi.

### LCOE

LCOE eli *Levelized Cost of Energy* tarkoittaa omakustannushintaa, jota voidaan käyttää verratessa eri energiantuotantomuotoja toisiinsa.

### Leijupeti

Polttokattilassa oleva kvartsihiekan muodostama kerros, joka saadaan liikkeeseen ja irti kattilan tulipesän pohjasta ilmavirran avulla.

### Leijupetihiekka

Leijupetihiekalla tarkoitetaan leijukerroslaitoksen polttoprosessista poistettavaa hiekkapetimateriaalia tai poltossa hienontunutta hiekkapetimateriaalia, joka erottuu savukaasusta joko kattilassa tai savukaasujen puhdistuksessa.

### Lentotuhka

Energiatuotantolaitosten savukaasuista erotettava tuhka- ja jäte.

### MMM

Maa- ja metsätalousministeriö

### MARA-asetus

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa.

### Pohjatuhka

Kattilan pohjalle kerääntyvä tai poistettavan leijupetimateriaalin mukana poistuva tuhka- ja jäte.

# 1 JOHDANTO

Tämä raportti on laadittu osana Maakierto KP-hanketta. Raportin tarkoituksena on selvittää polttolaitoksissa muodostuvan tuhkan hyötykäyttöä lannoitteena ja sen liiketoimintamahdollisuuksia. Raportissa perehdytään edellytyksiin, joita vaaditaan, jotta tuhkan markkinoille saattaminen voidaan aloittaa. Tavoitteena on, että poltossa muodostuva tuhka olisi hyödynnettävissä peltolannoitteena, jolloin polttoprosessiin on lisättävä haitallisia aineita vähentävää seosta, kuten dolomiittikalkkia. Tässä työssä keskitytään dolomiittikalkin syöttöön ja siitä aiheutuviin kustannuksiin. Raportti pohjautuu pitkälti kirjallisuuslähteisiin ja aiemmin hankkeessa saatuihin tuloksiin.

Suomen lämpökattiloissa ja voimalaitoksissa syntyy vuosittain noin 600 000 tonnia-, puu, turve- ja sekatuhkaa [1]. Poltossa muodostuvan tuhkan alkuaineosto-ominaisuudet vaihtelevat kattiloiden välillä riippuen käytetystä polttoaineesta, polttoprosessista ja lämpötilasta sekä savukaasujen puhdistustekniikasta. Poltossa muodostuvaa tuhkaa voidaan hyödyntää maanrakennusaineena tai metsälannoitteena, mutta peltolannoituksessa rajoittavaksi tekijäksi muodostuvat yleensä tuhkan raskasmetallipitoisuudet.

Erityisesti puupohjainen tuhka on ravinnerikasta ja sitä tulisi hyödyntää lannoitteena nykyistä enemmän. Puutuhka on hyvä fosforin ja kaliumin lähde [2], jonka kalsium- ja magnesiumpitoisuudet parantavat fosfori-kalium-lannoitusvaikutusta. Puhdas puutuhka sisältää tyyppiä lukuun ottamatta käytännössä kaikki puiden ja maan tarvitsemat ravinteet oikeissa suhteissa [2]. Tuhkalannoituksella parannetaan puuston ja maan ravinnetilaa pitkäaikaisesti, jolloin sitä tulisi hyödyntää lannoitteena ja samalla korvata keinolannoitteiden käyttöä maa- ja metsälannoituksessa. Myös kaatopaikoille vietävän tuhkan määrä vähenee, kun metsän ja maan lannoitukseen ja maarakennukseen kelpaava tuhka saadaan hyötykäyttöön.

Tuhkan laajempaa hyötykäyttöä rajoittaa kuitenkin sen raskasmetallipitoisuudet. Hankkeessa onkin tutkittu, kuinka dolomiittikalkin lisääminen voimalaitoksen leijupetiprosessiin vaikuttaa poltossa muodostuvaan tuhkaan. Tulokset ovat olleet hyviä, sillä tuhkan haitalliset raskasmetallipitoisuudet ovat laskeneet raja-arvojen alapuolelle.

Tässä selvityksessä perehdytään tuhkan hyötykäytön liiketoimintamahdollisuuksiin. Mikäli tuhkaa halutaan hyödyntää maanrakennuksessa tai metsä- ja peltolannoituksessa, mikä on silloin tuhkan kustannus? Tuhkan hyötykäyttöön liittyy kuitenkin useita lannoitelakien ja asetusten vaatimuksia, jotta lannoitetuhkan hyötykäyttö voidaan aloittaa. Tämän lisäksi on otettava huomioon kustannukset, joita hyötykäytöstä väistämättä syntyy. Tuhkan analysoinnit, dolomiittikalkki, annostelulaitteisto, tuhkan esikäsitely ja kuljetuskustannukset aiheuttavat kustannuksia, jotka on otettava huomioon tuhkan hyötykäytön liiketoimintamahdollisuuksia pohdittaessa. Mikäli tuhkan hyötykäyttö metsä- tai peltoparannuksessa yleistyy, tulevat kustannukset laskemaan markkinoiden ja tekniikan kehittyessä. Tämä raportti pyrkii antamaan alustavia arvioita näistä kustannuksista tilanteessa, jossa liiketoimintaympäristö on vasta kehitymässä.

## 2 TUHKALANNOITTEET

Tuhkalannoitteena tai sen raaka-aineena käytettävän teollisuus- tai käsittelylaitoksen sivutuotteen on oltava sellaista, että sillä on kasvien kasvua edistävä vaikutus. Tämä perustuu pääosin sivutuotteessa olevien kasveille käyttökelpoisten ravinteiden määrään. Tuhkalannoitteena tai sen raaka-aineena voidaan käyttää turpeen, peltobiomassan tai puun tuhkaa sekä eläinperäistä tuhkaa.

### 2.1 TUHKA JA SEN KOOSTUMUS

Kun polttoainenäyte poltetaan täydellisesti hapettavassa kaasukehässä, siitä jää jäljelle epäorgaaninen aines eli tuhka. Tuhkan määrä ei vastaa suoraan sitä epäorgaanisen aineen määrää, joka polttoaineessa on alkuperäisessä tilassaan, sillä esimerkiksi useat mineraalit voivat hajota tai hapettua polton aikana. Orgaanisen aineksen palaessa siitä poistuvat typpi (N) ja pääosin myös rikki (S) savukaasujen mukana. Epäorgaaniset aineosat jäävät tuhkaan likimain samoissa suhteissa kuin ne esiintyvät poltettavassa materiaalissa. [3]. Leijupoltossa muodostuva lentotuhka on hyvin emäksistä (pH on 11-13), jolloin sen sisältämä kalsium neutraloi maaperää.

Puutuhkassa on keskimäärin 0,2–3 % fosforia (P), 0,5–10 % kaliumia (K) ja 5–40 % kalsiumia (Ca) riippuen mm. puulajista ja poltettavasta puuositteesta. Tuhka sisältää myös tärkeitä hivenaineita, kuten booria (B), kuparia (Cu) ja sinkkiä (Zn).

Turvetuhkassa kalsiumin, kaliumin ja boorin pitoisuudet ovat matalampia kuin puutuhkassa. Turvetuhkan keskimääräiset ravinneainepitoisuudet ovat 0,5–2 % fosforia, 0,2–0,4 % kaliumia, 5–10 % kalsiumia ja alle 0,01 % booria. [4]. Turvetuhkan lannoitearvoa lisäävät kuitenkin sen alhaiset raskasmetallipitoisuudet ja korkea rautapitoisuus.

Puhdas puutuhka sisältää tavallisesti hyvin ravinneaineita lukuun ottamatta tyyppiä, ja se soveltuu siten sellaisenaan metsälannoitteeksi. Puhdasta puutuhkaa muodostuu Suomen lämpö- ja voimalaitoksissa kuitenkin suhteellisen vähän, ja muodostunut tuhka on tyyppillisesti puu- ja turvetuhkan seosta. [4]. Puu- ja turvetuhkan seoksella ravinnepitoisuudet voivat jäädä liian alhaisiksi metsälannoitukseen, jolloin tuhkaa hyödynnetään maarakentamisessa tai muilla aloilla, kuten sementtiteollisuudessa. Peltolannoitteeksi rajoittavin tekijä on yleensä kadmium- ja arseenipitoisuus.

### 2.2 TUHKAN KÄYTTÖ LANNOITTEENA

Lannoitteena käytettävä tuhka voi muodostua kasviperäisten raaka-aineiden sekä lannan poltosta. Eläinperäisten aineiden, lukuun ottamatta lantaa, poltosta muodostuvaa tuhkaa voi käyttää ainoastaan tilan omilla pelloilla. [5]. Turpeen ja puun tuhkalla tarkoitetaan sivutuotetta, joka muodostuu poltettaessa:

- turvetta
- puuhaketta
- kuorijätettä
- ensiomassan tai massasta valmistettavan paperin tuotannon yhteydessä syntyvää kuituainetta sisältävää kasviperäistä jätettä
- luokan A biopolttoainetta (kemiallisesti käsittelemätön)
- luokan B biopolttoaine kattilalaitoksista, joiden teho on vähintään 1 MWTH (kemiallisesti käsitelty)
- peltobiomassoja, kuten ruokohelpi, olki, vilja, öljykasvit, paju ja järviruoko [5].

tai näiden seosta sekä puu-, turve- tai kasvibiomassapohjaisen polttoaineen valmistuksessa syntyvää tuhkaa. Poltossa voidaan käyttää myös muita edellä mainittuihin raaka-aineisiin verrattavia puhtaita puuperäisiä aineksia [5].

#### 2.2.1 TYYPINIMIKOHTAISET VAATIMUKSET

Maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa 24/11 säädetään lannoitevalmistetyyppejä ja tyyppinimiryhmiä koskevista vaatimuksista. Lannoitevalmisteen tyyppinimellä pyritään kuvaamaan lannoitteen ominaisuuksia, kuten koostumusta, käyttötarkoitusta tai valmistusmenetelmää. Lannoitteen tyyppinimi tarvitaan, jotta tuotteelle voidaan valita soveltuvat valvonta-analyytit. Tyyppinimiluettelossa on tyyppinimen yhteydessä kuvaus lannoitteen ominaisuuksista, valmistusmenetelmästä, ravinnepitoisuuksista, sille asetetuista laatuvaatimuksista ja mahdollisista rajoituksista. [6].

Taulukossa 1 on esitetty maa- ja metsätalousministeriön asetuksen 24/11 tyyppinimikohtaisia vaatimuksia 1A7 tyyppinimen mukaisille tuhkalannoitteille.

Taulukko 1. 1A7 Tuhkalannoitteet [7]

Nro 1A7	Tyyppinimi / voimaan tulo	Valmistusmenetelmä ja siihen liittyvät vaatimukset	Keskeisten aineosien vähimmäispitoisuus	Tuoteselosteessa ilmoitettavat tiedot
1	Puun ja turpeen tuhka MMMa 12/07 MMMa 19/09 MMMa 24/11	Puun, turpeen tai peltobiomassojen tuhka.  Booria sisältävien metsälannoitteiden käyttörajoitukset maa- ja metsätalousministeriön asetuksen 24/11 mukaisesti.	2 % P+K 6 % Ca  Muussa kuin metsäkäytössä neutraloiva kyky 10 % (Ca)	Kokonaisfosfori (P) Kokonaiskalium (K) Kokonaiskalsium (Ca) Neutraloiva kyky % (Ca) Kosteus % Haitallisten metallien pitoisuudet Raaka-aineet
2	Eläinperäinen tuhka  MMMa 19/09 Komission asetus (EU) N:o 592/2014 Komission asetus (EU) N:o 2017/1262	Sivutuote muodostuu poltettaessa tuotantoeläinten lantaa valtioneuvoston asetuksen jätteen polttamisesta (151/2013) tai komission asetuksen (EU) N:o 2017/1262 mukaisesti tai siipikarjan lantaa komission asetuksen (EU) N:o 592/2014 mukaisesti.  Poltossa saa olla mukana puun, turpeen ja peltobiomassan poltossa sallittuja raaka-aineita.	5 % P+K	Kokonaisfosfori (P) Vesiliukoinen fosfori Kokonaiskalium (K) Kokonaiskalsium (Ca) Sivu- ja hivenravinteet asetuksen 24/11 liitteen II mukaisesti Neutraloiva kyky % (Ca) Kosteus % Haitalliset metallit Raaka-aineet ja lisätyt aineet

Taulukosta on havaittavissa, että metsässä käytettävän tuhkalannoitteen yhteenlaskettu kalium- ja fosforipitoisuus on oltava vähintään 2,0 % ja kalsiumin pitoisuus 6,0 % kuiva-aineessa. Muualla kuin metsässä käytettävälle tuhkan fosfori- ja kaliumpitoisuudelle ei ole säädetty vähimmäispitoisuutta, mutta tuhkan neutraloivan kyvyn on oltava vähintään 10,0 % kalsiumiksi (Ca) laskettuna. Neutraloiva kyky voidaan määrittää standardin SFS-EN 12945 mukaisesti analyysimenetelmän omaavissa laboratorioissa.

Taulukossa on esitetty myös vaatimuksia tuoteselosteessa ilmoitettavista tiedoista. Näitä esitellään tarkemmin osiossa 3.3.

## 2.2.2 MUUT KÄYTÖN RAJOITUKSET

Muut käytön rajoitukset liittyvät boorin, kadmiumin ja arseenin pitoisuuteen tuhkalannoitteessa. Jos maaperä-, lehti- tai neulasanalyysillä on todettu maaperässä tai kasvustossa boorin puute, on sitä sisältävän lannoitteen levitysmäärä enintään 4 kg booria hehtaarille. Jos boorin puutetta ei ole todettu, enimmäislevitysmäärä on 2,5 kg booria hehtaarille. Jos tuhkalannoitteeseen on lisätty booria, on sen levittäminen pohjavesialueilla ja suojualueilla kuitenkin kielletty. [5]

Kadmiumin enimmäiskuormitus maa- ja puutarhataloudessa saa olla enintään 7,5 grammaa hehtaarille viiden vuoden ajanjaksona annettuna. Maisemoinnissa ja viherrakentamisessa sallittu määrä on 15 grammaa hehtaarille 10 vuoden ajanjaksona annettuna. Metsätaloudessa sallittu määrä on 100 grammaa hehtaarille 60 vuoden ajanjaksona annettuna. [5].

Arseenin keskimääräinen enimmäiskuormitus metsätaloudessa saa olla enintään 2,65 grammaa hehtaaria kohden vuodessa ja enintään 160 grammaa hehtaarille 60 vuoden ajanjaksona annettuna. [5].

Muita tuhkan tuottajaa koskevia rajoituksia ovat ilmoitus- ja kirjanpitovelvollisuudet, joita on avattu tarkemmin osiossa 3.

## 2.3 TUHKIEN ESIKÄSITTELYMENETELMÄT

Käsittämätön irtotuhka on erittäin hienojakoista ja helposti pölyvää. Lisäksi irtotuhka sisältää reaktiivisia yhdisteitä, kuten oksideja, jotka saattavat aiheuttaa metsämaassa pH-shokin ja palamisvaurioita kasveille, kun käsittelemättömän irtotuhkan liukeneminen on nopeaa. [8]. Tällöin tuhka on esikäsiteltävä eli stabiloitava ennen käyttöä. Esikäsitellyllä varmistetaan kuljetuksen ja levityksen helpottaminen sekä pölyämisestä aiheutuvien ympäristö- ja terveysriskien vähentäminen. Tuhkan esikäsitelymenetelmiä ovat itsekovettaminen, rakeistus ja pelletointi. Kaikki menetelmät perustuvat tuhkan kostuttamiseen vedellä, jolloin tuhka kovettuu. Itsekovettumismenetelmä on yksinkertaisin stabilointimenetelmänä, sillä menetelmässä tuhka jätetään kostuttamisen jälkeen kasaan kovettumaan. Veden sopiva annostusmäärä on n. 30-35 % veden ja tuhkan yhteenlasketusta massasta. Kovettumisilmiö perustuu biopoltoainetuhoissa

esiintyviin kalsium-, alumiini- ja sulfaattiyhdisteisiin, jotka saostuvat sementtimäisiksi aineiksi ja sitovat tuhkahiukkasia tiiviiksi rakeiksi, kun tuhkaan lisätään vettä. Kovettumisprosessi kestää muutamia viikkoja kostuttamisen jälkeen. Ennen levitystä kovettunut tuhka murskataan sopivan kokoisiksi partikkeleiksi. Tuhkassa voidaan havaita itsekovetuksen jälkeenkin runsaasti hienojaetta, mutta se pölyä silti huomattavasti irtotuhkaa vähemmän, koska itsekovetetun tuhkan kosteus sitoo pölyä. [4].

Tehokkain tuhkan stabiloimismenetelmä on rakeistus. Rakeistusmenetelmiä on useita, mutta kaikille niille yhteistä on kostutetun tuhkan sekoittaminen, jolloin tuhka muodostaa rakeita ennen kovettumistaan. Rakeistusmenetelmässä tuhka kovettuu itsekovetusmenetelmää nopeammin. Jos tuhka on heikosti kovettuvaa, voidaan tuhkiin lisätä hieman sementtiä, jolloin rakeista saadaan riittävän kestäviä. Rakeistettu tuhka pölyää vähemmän ja sen loppukosteus on pienempi kuin itsekovetetussa tuhkassa, jolloin mm. kuljetus- ja levityskustannuksen pienenevät. Rakeistaminen on kalliimpaa mitä itsekovetus, mutta rakeet ovat helppokäyttöisempiä ja niillä saadaan parempi levitystarkkuus. Rakeistusmenetelmällä on myös mahdollista muuttaa tuhkan ravinnesuhteita lisäämällä siihen lannoitteita tai jäteaineita. [4].

Pelletöintimenetelmässä tuhkaan sekoitetaan prosessin yhteydessä vettä ja tuhkavesiseos johdetaan laitteistoon, jossa massa puristetaan matriisien läpi. Suomessa menetelmä ei ole käytössä suuressa mittakaavassa. Pelletöimällä saadaan aikaan hyvälaatuinen lopputuote, mutta ongelmana pidetään pelletöintimatriisien nopeaa kulumista, minkä takia kustannukset nousevat suuriksi. Menetelmä onkin sopiva lähinnä pienimuotoiseen toimintaan, jossa tuhkan pelletöinnin määrät ovat vähäiset. [9].

Selvästi edullisin menetelmistä on itsekovetus, toiseksi edullisin on rakeistus ja kallein pelletöinti.

### 3 VOIMALAITOSTUHKA LANNOITTEEKSI

Ennen kuin polttolaitos voi hyödyntää tuhkaa lannoitteena, heidän on perehdyttävä lannoitelakiin 711/2022, maa-, metsätalousministeriön ja Ruokaviraston asetuksiin ja ohjeisiin. Tuhkalannoitteita koskevat vaatimukset säädellään Lannoitevalmistelaissa 539/2006 sekä maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa lannoitevalmisteista 24/11. Lakien ja asetusten tarkoituksena on, että lannoitevalmistesten käyttö on turvallista ja lannoitteet laadukkaita.

Lannoitelaisissa ja lannoiteasetuksessa esitettyjen määräyksien ja sääntöjen noudattamista valvoo Suomessa Ruokavirasto [10]. Seuraavissa osioissa on käsitelty markkinoille saattamisen edellytyksiä.

#### 3.1 MARKKINOILLE SAATTAMINEN

Tuhkan valmistus ja markkinoille saattaminen on sallittua kansallisen tyyppinimen (1A7) mukaisesti lannoitelaisissa 711/2022 säädetyn siirtymäkauden ajan. Siirtymäsäännöksessä kerrotaan, että kumotun lannoitevalmistelain 539/2006 mukaisilla tyyppinimillä on valmistus sallittua 31.12.2023 saakka. Maa- ja metsätalousministeriö valmistelee uutta asetusta, jossa säädetään kansallisten lannoitevalmistesten vaatimuksista. Asetuksen on tarkoitus tulla voimaan vuonna 2023. [11]

Tuhkalannoitteen tuottajan on ennen tuhkan lannoitekäyttöön toimittamista tehtävä toiminnastaan Ruokavirastolle toiminnan aloitusilmoitus ja rekisteröityä Ruokaviraston ylläpitämään valvontarekisteriin. Rekisteröinti edellyttää tuotetusta tuhkaerästä näytteenottoa ja analysointia sekä tietojen ilmoittamista rekisteriin. Tiedoista tulisivat ilmetä asetuksen mukaiset tuhkan ravinne- että haitta-ainepitoisuudet. [11]

Aloitustilmoituksen käsittely ja toimijan merkitseminen Ruokaviraston ylläpitämään toimijarekisteriin on maksullista toimintaa. Aloitusilmoitus voidaan tehdä sähköisesti Ruokaviraston Touko-järjestelmän kautta, jolloin sen hinta on toimijalle muutamia kymmeniä euroja. Lisäksi Ruokavirasto ottaa säännöllisesti viranomaisnäytteitä, joista tutkimus ja näytteenottokulut peritään toimijoilta. Näytteenotto- ja analysointikulut vaikuttaa toiminnan kokoluokkaa ja lopputuotteessa mahdollisesti aiemmin havaitut laatuongelmat. Jos toiminnassa ei ole ongelmia, otetaan viranomaisnäytteet 2-4 vuoden välein. [11]. Tuhka-analyseissa käytetään näytteenoton maksuluokkaa 4, jonka hinta raporttia laatiessa on 741 €. [12].

Tuhkalannoitteen tuottajalta edellytetään lannoitelain 711/2022 mukaista laatujärjestelmää, jossa toimija kuvaa laitoksen prosessit ja laadunvalvonnan. Käytännössä toimijan tulee varmistaa, että lannoitevalmisteeksi toimitettavat lannoitevalmisteet ovat lainsäädännön vaatimusten mukaiset. Näytteet on näin otettava eräkohtaisesti, jolloin toimija voi itse päättää eräkoon. Lisäksi toimijan tulee raportoida valmistamistaan lannoitevalmisteista Ruokavirastoon vuosi-ilmoituksella. [11].

#### 3.2 TUHKAN LAADUN SEURANTA

Aloitustilmoituksen ja laitosrekisteröinnin jälkeen Ruokavirastoon on raportoitava vuosittain laitoskohtaisesti tuhkien lannoituskäytöstä. Tuhkan luovuttaminen lannoitekäyttöön edellyttää myös omavalvontajärjestelmää. Omavalvontajärjestelmällä varmistetaan, että tuhka ja sen käsittely lannoitteena täyttävät sille lainsäädännössä asetetut vaatimukset. Omavalvontajärjestelmästä on laadittava kirjallinen suunnitelma, joka tulee toimittaa Ruokaviraston lannoitevalmistevalvontaan. [13].

Kirjallisen suunnitelman täytyy sisältää muun muassa:

- Vastuussa olevat henkilöt ja suunnitelma henkilökunnan perehdyttämisestä
- Tuotekohtaiset tiedot lannoitevalmisteen raaka-aineista, niiden alkuperästä ja laadusta
- toimenpiteet, joilla varmennetaan eräkohtainen jäljitettävyyttä
- Tuotanto- ja toimintaprosessien kuvaukset
- Toimintaohjeet häiriötilanteita varten
- Laadunvalvonta- ja näytteenottosuunnitelma koskien raaka-aineita, tuotantoa ja lopputuotetta
- Toimenpiteet, joihin ryhdytään, mikäli lannoitevalmiste tai niiden raaka-aine ei täytä sille asetettuja laatuvaatimuksia tai on vanhentunut,
- Kuvaus lannoitevalmisteen ja niiden raaka-aineiden maahantuonti-, varastointi-, säilytys- ja kuljetusjärjestelyistä sekä näihin liittyvien dokumenttien sisällöstä ja arkistoinnista. [13].



Omavalvontajärjestelmän suunnitelmassa tulee huomioida myös toiminnan luonne, siihen liittyvät riskit ja menettelyt, jolla valvonta toteutetaan [13].

Omavalvonnan toteuttamisesta tulee pitää kirjaa. Kirjanpidon tulee sisältää lannoitevalmisteiden tai niiden raaka-aineiden laadun ja turvallisuuden varmistamiseen liittyvät tulokset ja viralliset todistukset. Tämän lisäksi nämä on esitettävä myös kriittisistä valmistus- ja käsittelyvaiheista. Myös asiakirjat poikkeamatilanteista ja niiden korjaamiseksi tehdyistä toimenpiteistä on oltava olemassa. Kirjanpidon pitää olla tarvittaessa helposti saatavilla valvontaviranomaisille. [13].

### 3.2.1 NÄYTTEENOTTO JA ANALYSOINTI

Tuhkasta tulee teettää analyysi sen lannoitevalmisteeksi soveltuvuuden varmistamiseksi. Tuhka-analysit tulee tehdä laitoskohtaisesti. Analysoinnilla selvitetään tuhkan raskasmetallien ja ravinteiden määrä. Käytettävä polttoaine, polttoaineseos ja polttomenetelmä ovat tekijöitä, jotka vaikuttavat tuhkan laatuun.

Näytteenoton tavoitteena on saada koko erää edustava riittävän kokoinen näyte. Näyte on otettava siten, että se edustaa koko tutkitavaa erää (max. 1000 tonnia) mahdollisimman hyvin. Seoslannoitteissa voi epähomogeenisuuden vuoksi olla suuria vaihteluja pitoisuuksissa tarkastettavan erän eri osissa. Tuhkan varastokasaan voidaan tehdä esim. pyöräkuormaajalla joko yksi tai useampia leikkauksia mahdollisimman lähelle keskikohtaa ja kasan pohjaan asti. Leikkauspinnoilta otetaan mahdollisimman monta osanäytettä (10–140) siten, että vähintään 30 cm pintakerroksesta jää pois. [13].

Taulukko 2. Osanäytteiden lukumäärä suhteessa tuhkaerän kokoon [13]

Erän koko (t)	Osanäytteiden lkm
≤ 5	10
50	32
100	45
250	71
500	100
1000	140

Lannoitevalmisteiden tuoteseloste- ja omavalvontatutkimukset voidaan teettää laboratorioissa, jossa on käytössä lannoitevalmisteiden analysointiin tarkoitetut menetelmät.

### 3.2.2 TUHKIEN HAITTA-AINEPITOISUUKSIEN RAJA-ARVOT

Tuhkan haitta-aineiden raja-arvot määrittävät tuhkan soveltuvuuden eri käyttötarkoituksiin. Haitta-aineiden pitoisuuksille määritellään raja-arvot ympäristölainsäädännössä ja siihen liittyvissä asetuksissa sekä lannoitelainsäädännössä. Tuhkalannoitteille asetetuilla raskasmetallien raja-arvoilla estetään haitallisten raskasmetallien liiallinen kertyminen maaperään.

Taulukko 3. Haitta-ainepitoisuuksien raja-arvot [14]

Alkuaine	Raja-arvo muussa kuin metsäkäytössä (mg/kg ka.)	Raja-arvo metsäkäytölle (mg/kg ka.)
Arseeni (As)	25	40
Elohopea (Hg)	1,0	1,0
Kadmium (Cd)	2,5	25
Kromi (Cr)	300	300
Kupari (Cu)	600	700
Lyijy (Pb)	100	150
Nikkeli (Ni)	100	150
Sinkki (Zn)	1500	4500

### 3.3 TUOTESELOSTE

Lannoitevalmisteesta on oltava tuoteseloste, jos se luovutetaan tai myydään lannoitteeksi [14]. Eli ts. mitä tahansa tuhkaa ei voida käyttää lannoitteena. Tuhkan tulee täyttää lannoiteasetuksen vähimmäisvaatimukset ja maanomistajalla on oikeus vaatia nähtäväksi seloste, minkälaista tuhkaa hän on käyttämässä lannoitteena. Tuoteselosteessa ilmoitettavista tiedoista säädetään lannoitevalmistelaissa 766/2022 ja maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa 24/11.

Tuoteselosteessa tulee käydä ilmi tyyppinimi, kaupan nimi, ravinteet, neutraloiva kyky, kosteus, haitallisten raskasmetallien pitoisuudet, raaka-aineet, käyttö- ja käyttörajoitukset ja valmistajan tiedot [14]. Tuoteselosteessa voi olla myös muita tietoja, jos ne ovat yksiselitteisiä, mitattavissa ja perusteltavissa, eivätkä ne johda lannoitevalmisteen lopullista käyttäjää harhaan. [15]. Tuoteselosteesta on esitetty malli liitteessä 1.

Mikäli lannoitevalmiste toimitetaan irtotavarana, voidaan tuoteseloste toimittaa kuormakirjan yhteydessä. Jos tuotteet ovat pakattuna, tulee jokaisessa pakkauksessa olla oma tuoteselosteensa ja tuoteselosteen merkinnät tulee olla suomeksi ja ruotsiksi [10].

## 4 TALOUDELLISUUSTARKASTELU

Tuhkan käytöllä on liiketoimintamahdollisuuksia, kun kolme reunaehto eli lainsäädäntö, käytettävyyys ja hyötykäytön kannattavuus täyttyvät.

Tuhkan hyödyntämismahdollisuuksia määrittelee sen laatuun vaikuttavat tekijät. Näistä tärkeimmät ovat polttoaineen laatu, polttoprosessi ja erottelumenetelmät. Lainsäädäntö määrää esim. materiaalin luokituksen, ympäristökelpoisuuden raja-arvot ja käytön ympäristöluvanvaraisuuden. Käyttöön vaikuttavat muun muassa tuhkan ominaisuudet ja saatavuus. Hyödyntämismahdollisuuksia ovat lan- noite- tai maarakennuskäyttö. [13].

Tuhkan hyötykäytön kokonaisuutta tarkastellessa on otettava huomioon kannattavuus. Kannattavuuteen vaikuttavat ainakin lainsäädäntö, laimennusaineen hinta, investoinnit, tuhkan käyttökohde, syntypaikka, määrä sekä kuljetus- ja käsittelykustannukset. Tässä raportissa arvioidaan taloudellista kannattavuutta nykyisen lainsäädännön kannalta. On kuitenkin huomioitava, että mahdollinen kierto- taloutta edistävä poliittinen ohjaus voi vaikuttaa voimakkaasti tuhkan hyötykäytön kannattavuuteen [13].

### 4.1 ROOLIT LIKETOIMINTAVERKOSTOSSA

Tuhkan jalostus, myynti, markkinointi, verkostonhallinta ja toimitusketjun kokonaisoptimointi ovat liiketoimintaverkoston keskeisiä rooleja. Tuhkan myynnistä ja markkinoinnista loppukäyttäjälle voi kuitenkin vastata eri toimija tai useampi kumppani. Esimerkiksi tuhka voidaan luovuttaa lannoitevalmistajalle, jolloin lannoitevalmistaja jalostaa tuhkan, huolehtii myynnistä, markkinoinnista ja verkostonhallinnasta. Kuljetuksiin ja tuhkan levityksiin voi olla omat alihankkijat. [13].

Raaka-aineeksi tuhkaa tuottava laitos voi sopia tuhkan vastaanottajan kanssa siitä, kuka vastaa tuhkan analyysikustannuksista. Tällä hetkellä raaka-ainetuhkan tuottajan on kuitenkin varmistettava, että tuhka täyttää maa- ja metsätalousministeriön (MMM) asetuksen 24/11 laatuvaatimukset. Lainsäädäntöä ollaan muuttamassa ja raaka-ainetuhkan tuottajien osalta tulee tähän vaatimukseen todennäköisesti muutoksia. Koska MMM:n uuden asetuksen valmistelu on vielä kesken, ei ole tarkkaa tietoa sen vaatimuksista tai voimaantulon ajankohdasta. [14].

### 4.2 KUSTANNUKSET

Tuhkan käyttämisen kustannukset koostuvat laimennusaineen, annostelulaitteiston, varastoinnin, tuhkan esikäsittelyn ja kuljetuksen kustannuksista. Tuhkan tuottaja hyötyy tuhkan tuotteistamisesta vähintään säästyneiden kaatopaikkakustannuksien verran. Tuhkan käytön kannattavuuteen ja hinnoitteluun vaikuttavat myös vaihtoehtoisten materiaalien hinta, saatavuus ja lopputuotteen laatu.

Tuhkan lannoituskäytön ketjun keskeiset toiminnot ovat tuhkan jalostus, tuotteen markkinointi ja myynti metsän- tai maanomistajalle, sekä tuhkan kuljetus ja levitys. Voimalaitoksilla voi olla erilaisia sopimuksia tuhkan hyödyntämisen toteuttamisesta. Loppukäyttäjä eli asiakas on metsän- tai maanomistaja. Lisäksi toimitusketjuun voi liittyä erillinen laitetoimittaja, joka vastaa tuhkan esikäsittelystä esim. rakeistuslaitteistolla. [2].

Tuhkan käytön kannattavuuteen vaikuttaa erityisesti varastointipaikkojen sijainti ja kuljetusmatkojen pituus. Tuhka voidaan varastoida esimerkiksi voimalaitoksen alueella, välivarastointialueella, murskeasemalla/maa-ainesasemalla, työmaa-alueella tai mahdollisesti kaatopaikalla. Varastointipaikan valintaan vaikuttavat voimalaitosten sijainti ja varastointikapasiteetti, kuljetusmatkat, kaatopaikkamaksut sekä tuhkan kysyntä.

### 4.3 DOLOMIITTKALKIN ANNOSTELULAITTEISTO

Aiemmin toteutetuissa dolomiitti- ja kalsiittikokeissa erillistä syöttöjärjestelmää ei ole tarvittu, sillä laimennusaineen syöttö on voitu toteuttaa olemassa olevalla laitteistolla. Tyypillisesti voimalaitoksissa on ollut ruuvikuljetin, syöttösuppilo, kalkkisiilo tai ym., jonka kautta laimennusaineen syöttö on voitu toteuttaa. Annostelumäärän säätö on toteutettu yksinkertaisimmillaan siten, että syöttösuppilon pohjareian koko on muutettu halutulle syöttömäärälle sopivaksi.

Syöttölaitteistoja kalkkisiiloa lukuun ottamatta yhdistää se, että laimennusaineen syöttö annostelujärjestelmään on ollut työlästä. Annostelujärjestelmien ”siilot” eivät ole olleet tilavuudeltaan kovin suuria, jolloin laimennusaineen säkin sisältö ei ole mahtunut sinne kokonaan. Tällöin laimennusainesäkki on asetettu roikkumaan ”siilon” päälle siltanosturin tai trukin piikkien avulla.

Edellä esitetyillä ratkaisuilla lyhyet koeajot on saatu suoritettua, mutta pidemmän päälle ne ovat epäkäytännöllisiä. Työläälle syöttöjärjestelmälle suositeltava vaihtoehto on suunnitella ja rakentaa dolomiittikalkille kokonaan oma syöttöjärjestelmänsä, joka voisi muistuttaa rakenteeltaan rikinsyöttöjärjestelmää. Rikinsyöttöjärjestelmä koostuu rikkisiilosta, kuljetinjärjestelmästä, annostelujärjestelmästä ja sähkö- ja automaatio-ohjauksesta. Rikinsyöttö tapahtuu niin, että rikki syötetään polttoaineen kautta suoraan kuljetinhihnalle ja siitä

polttoaineiden päiväsiiloihin, joista polttoainetta annostellaan kattilaan. Dolomiittikalkki on kuitenkin suositeltavaa annostella suoraan polttoaineen syöttöruuville, kuin päiväsiiloihin. Dolomiittikalkin annostelun säätö muodostuu haasteellisemmaksi, sillä päiväsiiloihin polttoaine kulkeutuu sykleittäin. Jos dolomiittikalkki ohjataan suoraan polttoaineen syöttöruuveille, on säätö kattilatehon mukaan helppompaa toteuttaa.

Annostelulaitteiston vaatima tila riippuu halutusta siilon koosta ja kuljetinlaitteistosta. Taloudellisesta näkökulmasta katsottuna siilon koko tulee olla riittävän suuri, jotta dolomiittikalkkia voidaan toimittaa täysi rahti, jolloin rahtikustannukset jäävät pienemmiksi. Jos ajatellaan, että dolomiittikuorma saa olla 50 tonnia, on siilon koko oltava silloin vähintään 36 m<sup>3</sup> kun huomioidaan 2-4 mm:n dolomiittikalkin tiheys 1400 kg/m<sup>3</sup>. Siilo on suositeltavaa ylimitoittaa, jotta siilo ei pääse tyhjenemään ja dolomiittikalkkia voidaan toimittaa täysi kuorma, vaikka edellistä dolomiittikalkkia on vielä jäljellä. Riittävän suuri siilo lisää siis aikaikkunaa dolomiittikalkin toimittamiselle, mikä vähentää kustannuksia, kun toimitukselle ei tarvitse vaatia tiukkaa ajankohtaa. Suositeltavaa on mitoittaa siilo vielä 20-30 prosenttia suuremmaksi, jolloin siilon kooksi saadaan n. 50 m<sup>3</sup>.

Dolomiittisiilo sijoitetaan voima- tai lämpölaitoksen alueelle n. 10-20 metrin päähän itse kattilasta. Dolomiittisiilo täytetään painesäiliöauton puhallusputken avulla. Koejoissa käytetty dolomiitti ei vedä hygroskooppisesti puoleensa vettä eikä sen pitäisi altistua herkästi paakkuuntumiselle. Dolomiittisiilon ei tällöin tarvitse olla lämmin, mutta siilo voidaan varustaa paineilmapuhalluksella. Paineilmapuhalluksen avulla dolomiittia voidaan liikutella, jos ei haluta ottaa riskiä dolomiitin jäähäntämisestä.

Tätä tutkimusta varten dolomiittikalkin annostelulaitteistoja tiedusteltiin kolmelta yritykseltä, josta yhdeltä saatiin virallinen tarjous. Dolomiittisiilo D2870x12m mikä on varustettu 24,5 m<sup>2</sup> pölysuodattimella, ruuviannostelijalla, fluidipurkaimilla, 100 mm:n eristyksellä ym. siilon perustarvikkeilla. Budjettihinnaksi muodostui 110 000 € alv 0 %, josta eristyksen ja pellityksen osuus on 15 000 €.

Koska siilo joudutaan sijoittamaan lämpökattilan ulkopuolelle, tulee annostelulaitteisto varustaa ruuvi- ja kolakuljettimella. Ruuvikuljettimella voidaan tehdä dolomiittikalkin siirto maan tasolla. Kolakuljettimella puolestaan tehdään siirrot, jotka tarvitsevat nousun ylöspäin. Myös ruuvikuljettimella voidaan tehdä nousut ylöspäin, mutta kolakuljetinta voidaan pitää yleisempänä ratkaisuna.

Kuusi metriä pitkän ja 200 mm:n halkaisijalla olevan ruuvikuljettimen budjettihinta on 12 500 €. Ruuvikuljetin on varustettu eristyksellä ja pellityksellä, jonka osuus hinnasta on 2 500 €. Ruuvikuljetin varustetaan 1,5 kW tappivaihdemoottorilla, joka riittää tälle kuljettimelle. Moottori tulee mitoittaa uudelleen, jos ruuvikuljettimen pituutta tai nousukulmaa kasvatetaan.

16 metriä pitkän ja 300 mm leveän kolakuljettimen budjettihinta on 26 000 €. Kolakuljettimen nousukulma on 35 astetta ja se on varustettu 3 kW:n tappivaihdemoottorilla.

Yhteensä budjettihinnaksi muodostuu 148 500 € siiloihin ja kuljettimien. On kuitenkin huomioitava, että dolomiittikalkin annostelulaitteisto räätälöidään laitoskohtaisesti. Edellä olevat budjettihinnat laskettiin 8 MW:n lämpölaitokselle tapauksessa, jossa dolomiittikalkki haluttiin kuljettaa suoraan polttoaineen syöttöruuville. Dolomiittikalkki voidaan kuljettaa myös päiväsiiloihin, jolloin kuljetinlaitteistojen tarve vähenee. Mutta kuten aiemmin todettiin, tällöin annostelun säätö voi muodostua haasteelliseksi. Annostelulaitteiston hinnan vaikutusta kokonaiskustannukseen on suositeltavaa herkkyytarkastella. Tätä tehdäänkin jäljempänä laskemalla investointikustannusten vaikutus kokonaiskustannukseen, kun investointikustannus kasvaa tai pienenee 50 %.

#### 4.4 KULJETUSKUSTANNUKSET

Kuljetuskustannuksissa huomioon otettavia asioita ovat etenkin kuljetusmatkat, jolloin väliaraston ja lopullisen hyötykäyttökohteen sijainnit tulisi optimoida. Näiden lisäksi kuljetuskustannuksiin vaikuttaa tuhkan vesipitoisuus. Tuhkan liiallista kostuttamista kannattaa välttää, koska silloin tuhkan ”hyötykuorma” pienenee. Kun vesipitoisuus tuhassa kasvaa, kasvaa myös autokuormien määrä kuivattua tuhkamäärää kohti.

Kokonaisuudessaan tuhkan kuljetusketju alkaa odotusajasta voimalaitosalueella, joka kattaa lastauksen ja mahdollisen punnituksen. Tähän tulee vielä lisäksi ajoaika, ajomatkojen keskeytykset, kuorman tyhjentäminen ja ajomatka tyhjänä.

Erään voimalaitoksen lentotuhkan siirto väliarastolle maksaa noin 15 €/tonni. Väliarastolta eteenpäin logistiikkakulut voivat olla 60 €/h. Tapio Oy:n raportissa onkin arvioitu, että tuhkan kuljettaminen on taloudellisesti kannattavaa enintään 100 kilometrin päähän [2].

## 4.5 TUHKAN ESIKÄITTELYN VAIKUTUKSET KUSTANNUKSIIN

Tuhka on esikäsiteltävä eli stabiloitava ennen käyttöä. Esikäsitteilyllä varmistetaan kuljetuksen ja levityksen helpottaminen sekä pölyämistä aiheutuvien ympäristö- ja terveysriskien vähentäminen. Esikäsitteilymenetelmänä voidaan käyttää tuhkan itsekovetusta tai tuhkan rakeistamista. Kumpikin menetelmä perustuu tuhkan kostutukseen. Muita menetelmiä ovat pelletointi, joka on Suomessa harvinaisemmin käytetty menetelmä.

### 4.5.1 ITSEKOVETUSMENETELMÄ

Itsekovetusmenetelmä perustuu tuhkan kostuttamiseen vedellä, minkä jälkeen se ajetaan kasalle kovettumaan. Kovettuessaan tuhka tulee vähemmän pölyävää ja siten helpommin ja turvallisemmin käsiteltävää. Vaikka itsekovetusmenetelmällä käsitellyssä tuhka on runsaasti hienojaetta, tuhka on kuitenkin niin pölyämätöntä, että sitä voidaan kuormata, kuljettaa kuorma-autolla ja levittää maassa kulkevilla koneilla. Itsekovetuksessa voi muodostua suuria kokkareita, jolloin tuhka on syytä murskata ennen levitystä. Murskaus hoituu kuljetukseen lastauksen yhteydessä, kun käytetään seulakauhalla varustettua kuormaajaa.

Tuhkan kostutukseen on olemassa valmiita kostutinlaitteistoja, joita valmistaa Suomessa mm. Pneuplan Oy. Kostutinlaitteisto asennetaan tuhkasiilon alle, josta lentotuhkan purku toteutetaan käyttäen joko märkä- tai kuivapurkua. Märkäpurussa lentotuhka kostutetaan ja puretaan märkäpurkaimen avulla, josta voidaan käyttää myös nimeä kostutin. Kuiva tuhka ajetaan kostuttimen läpi, jolloin siihen sumutetaan pieni määrä vettä suuttimien avulla. Tuhkan purkautumisnopeus on mitattu ja vakio, vesimäärä säädetään rotametrin avulla. Kosteutettu ja pölyämätön tuhka puretaan suoraan kostuttimisesta auton lavalle, jonka jälkeen se voidaan kuljettaa joko uusiokäyttöön tai läjitettäväksi. Kuivapurussa purku tapahtuu kuivana kuivapurkuun tarkoitetun laitteiston avulla. Kuivapurku toteutetaan yleensä sulkusyöttimen ja lastauspalkeen yhdistelmällä bulkkiautoon. [16].

Tällaisen kostutinlaitteiston budjettihinta on 70 000 €. Kun laitteiston käyttö hoituu siirtokuljetuksen yhteydessä, kustatuksessa ei tarvita erillistä työntekijää. Yleensä kuitenkin pelkästään kostutinlaitteistoon investointi ei riitä, vaan samalla joudutaan investoimaan tuhkasiilon ja tämän alle rakennettavaan alahuoneeseen, johon itse kostutinlaitteisto sijoitetaan. Alahuoneeseen tulee olla lämmin tila, jotta laitteisto ei altistu jäätymiselle. Jos voimalaitokselle rakennetaan esim. 100 m<sup>3</sup> tuhkasiilo ja tälle 4x6 m alahuone, on kokonaisinvestointi silloin laitteistoinen 250 000 - 300 000 euroa.

### 4.5.2 RAKEISTUSMENETELMÄ

Rakeistusmenetelmiä on useita, mutta kaikille niille on yhteistä kostutetun tuhkan sekoittaminen, jolloin tuhka muodostaa rakeita ennen kovettumistaan. Rakeistukseen on olemassa valmiita rakeistusjärjestelmiä, joita Suomessa valmistaa mm. Rakeistus Oy ja Tecwill Granulators.

Rakeistusjärjestelmä voidaan sijoittaa tehtaan voimalaitoksen yhteyteen. Tuhkasiilojen lentotuhka annostellaan erikoissekoittimeen ruuvikuljettimella, jossa se sekoitetaan veden kanssa halutuksi massaksi. Tämän jälkeen kostutettu tuhka annostellaan lautasrakeistimelle, joissa itse rakeistus tapahtuu. Tuhkarakeita voidaan halutessa ”terästä” esim. lisäravinteilla tai muilla hyödynnettävillä ravintopitoisilla sivuvirroilla. Tuhkaraelannoitteen ravinnekoostumus voidaan räätälöidä lannoitettavan maaperän tarpeen mukaan. Muodostuneet rakeet kuljetetaan hihnakuljetinjärjestelmällä välivarastoon, konttiin tai suursäkiykseen, josta ne ovat valmiina kuljetettavaksi tai myytäväksi metsä- tai peltolannoitteeksi. [17].

Tällaisen rakeistuslaitteiston budjettihinta on 750 000 €. Investointikustannus on huomattavasti suurempi kuin mitä itsekovetusmenetelmä vaatii, mutta rakeistetun tuhkan myyntiarvo on vastaavasti suurempi. Rakeistettu tuhka pölyää vähemmän ja sen loppukosteus on pienempi kuin itsekovetetussa tuhka, jolloin mm. kuljetus- ja levityskustannukset pienenevät. Rakeet ovat myös helpokäyttöisempiä ja niillä päästään parempaan levitystarkkuuteen.

Jos tuhka halutaan rakeistaa, mutta investointikustannus koetaan liian suureksi, voidaan tuhka toimittaa tuhkan jatkokäsittelystä vastaaviin vastaanottoterminaaleihin. Vastaanottoterminaalit, kuten Rakeistus Oy Oulussa, ottavat vastaan biopohjaista lentotuhkaa, joka soveltuu pelto- tai metsälannoitteeksi. Vastaanottopalveluun voidaan sisällyttää kuljetus voimalaitokselta rakeistuslaitokselle. [18]. Jos lähialueella ei kuitenkaan sijaitse tuhkan vastaanottoterminaalia, ei tuhkan kuljetus lähialueen ulkopuolelle ole kannattavaa. Rakeistus Oy on oikeissa laajentaa vastaanottoterminaalin toimintaa Oulun ulkopuolelle [19].

### 4.5.3 TUHKAN PAKKAUS JA VARASTOINTI

Tuhkan varastointipaikkoja ovat esimerkiksi voimalaitosalue, välivarastointialue, murskeasema/maa-ainesasema, työmaa-alue tai kaatopaikka. Varastointipaikan valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat voimalaitosten sijainti, varastointikapasiteetti, kuljetusmatkat, kaatopaikkamaksut sekä tuhkan kysyntä. Tuhkan varastointimahdollisuus on tärkeää, jotta voidaan tasata kysynnän ja tarjonnan eriaikaisuutta. Varastoinnilla voidaan myös optimoida kuljetuskustannuksia. [13].

Lannoitevalmisteen varastoinnissa tulee huomioida tuhkan laatu. Tuotteen koostumuksen ei varastoinnin aikana tulisi muuttua ja koostumuksen tulee vastata tuoteselosteessa ilmoitettuja tietoja. Varastoinnissa on myös huomioitava, ettei lannoitevalmisteesta pääse liukenemaan ravinteita ympäristöön. Jos lannoitevalmisteen rakenne on sellaista, että sen kuljetuksesta voi aiheutua vaaraa tai haittaa liikenteelle tai ympäristölle, on pakkaamaton valmiste ja sen raaka-aineet kuljetettava peitettyinä. [20].

Lannoitevalmisteen raaka-aineet on säilytettävä merkittyinä ja erillään muista valmiista lannoitevalmisteista. Epäorgaanista lannoitetta ei saa varastoida samoissa varastotiloissa palo- ja räjähdysvaarallisten aineiden kanssa. [20].

Tuhka eli lannoitevalmiste voidaan pakata myös säkkeihin, joiden enimmäispakkauskooko saa olla 1000 kg. Pakkaus on suljettava tiiviiksi siten, että pakkausta avatessa kiinnitys, kiinnityssulkija tai itse pakkaus vaurioituu käyttökelvottomaksi. Pakkauksessa voidaan käyttää myös venttiilillä varustettuja säkkejä. [20].

Tuhkalannoitevarasto voidaan sijoittaa vapaammin, kun käytetään säkitettyä tuhkaa. Varastoa on myös mahdollista jakaa pienemmissä erissä tarpeen mukaan. Tuhkan pitkäaikaista varastointia tulee kuitenkin välttää, koska etenkin itsekovettuneen tuhkan levitysominaisuudet heikkenevät. [2].

### 4.6 DOLOMIITTIKALKIN KULUTUS

Dolomiittikalkista aiheutuvat kustannukset riippuvat sen kulutuksesta. Hankkeessa tehdyissä kokeissa dolomiittikalkkia on syötetty tulipesään polttoaineen tuhkapitoisuuden mukainen määrä, jonka lisäksi kaavaan on lisätty kertoimia, jotka riippuvat polttoaineen kadmium-pitoisuudesta, dolomiitin kalsinoitumisesta ja dolomiitin magnesium- ja kalsiumpitoisuudesta. Kaava on esitetty alla.

$$\dot{m} = \left( \frac{\Phi_k}{Q_{net,ar}} \right) * A_d * L_k * K_k * V_k * S_k \quad (3)$$

jossa

$\Phi_k$  = kattilateho, MW

$Q_{net,ar}$  = tehollinen lämpöarvo (vakiopaineessa) saapumistilassa, MJ/kg

$A_d$  = polttoaineen tuhkapitoisuus, p-%

$L_k$  = laimennuskerroin

$K_k$  = kalsinoitumiskerroin

$V_k$  = varmuuskerroin

$S_k$  = skaalautumiskerroin.

Laimennuskerroin  $L_k$  riippuu käytettävän polttoaineen kadmium-pitoisuudesta ja se lasketaan pitoisuuden ja pitoisuusrajan suhteena. Jos oletetaan, että käytettävän polttoaineen kadmium-pitoisuus on 4 ppm ja pitoisuusraja tuhkalannoitteissa on 2,5 ppm, laimennuskertoimeksi saadaan 1,6. Jos käytettävä polttoaine ei sisällä kadmiumia, laimennuskerroin on 1.

Kalsinoitumiskerroin  $K_k$  riippuu käytettävän dolomiitin kalsinoitumisesta. Jos kalsinoitumiskokeissa havaitaan kalsinoitumisen tapahtuvan vain osittain, esimerkiksi suhteellisen kalsinoitumisen ollessa 80 %, käytetään kalsinoitumisen kertoimena 1,3. Jos suhteellinen kalsinoituminen on 100 %, käytetään kalsinoitumiskertoimena 1,6. Hankkeen aikana tehdyissä koeajoissa kalsinoitumiskerroin on ollut 1,3.

Skaalautumiskerroin riippuu käytettävän dolomiittikalkin magnesium- ja kalsiumpitoisuudesta. Dolomiittikalkin on todettu aiemmissä tutkimuksissa vähentävän tuhkan haitta-ainepitoisuuksia, kun dolomiitin kalsiumoksidin pitoisuus on ollut n. 76 % ja magnesiumoksidin

pitoisuus n. 16 %. Jos alkuaineanalyysissä todetaan näiden pitoisuuksien olevan alhaisemmat, tulee kaavaan lisätä skaalautumiskerroin, joka lasketaan näiden pitoisuuksien summan ja analyysissa havaittujen pitoisuuksien summan suhteella.

Jos oletetaan, että lämpölaitoksen kattilateho on 10 MW ja siellä poltetaan kokopuuhaketta, jonka tuhkapitoisuus kuiva-aineessa on 0,5 %, tehollinen lämpöarvo saapumistilassa on 10 MJ/kg ja kadmium-pitoisuus polttoaineessa on 4 ppm, saadaan dolomiitin massavir-raksi:

$$\dot{m} = \left( \frac{10 \text{ MW}}{10 \text{ MJ/kg}} \right) * 0,005 * 1,6 * 1,3 * 1,3 * 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} * 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} = 49 \text{ kg/h}$$

Kaavassa käytettiin varmuuskertoimena arvoa 1,3 ja skaalauskerroin jätettiin huomioimatta. Laskukaavaa on hyödynnetty hankkeen aikana tehdyissä koeajoissa ja sen avulla määritetyn dolomiittikalkkiannostuksen on todettu vähentävän tuhkan raskasmetallipitoisuuksia.

#### 4.6.1 DOLOMIITTIKALKIN KUSTANNUS

Dolomiittikalkin vuosittaista kulutusta voidaan arvioida yksinkertaisesti siten, että kerrotaan dolomiittikalkin massavirta laitoksen huipunkäyttöajalla:

$$\text{Dolomiittikalkki}_{\text{OMINAISKULUTUS_VUOSI}} = t_h * \dot{m} \quad (4)$$

jossa

$t_h$  = huipunkäyttöaika, h/a

Kaukolämmöllä huipunkäyttöaika  $t_h$  on yleisesti n. 3200 h/a, mutta peruslämpöä tuottavan kiinteän polttoaineen kattilan huipun käyttöajan tulisi olla vähintään 4000 h [21]. Tällöin esimerkkilaskussa huipunkäyttöaikana käytetään 4000 h/a ja dolomiittikalkin ominaiskulutukseksi saadaan:

$$\text{Dolomiittikalkki}_{\text{OMINAISKULUTUS_VUOSI}} = 4000 \frac{\text{h}}{\text{a}} * 49 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 196 \text{ 000 kg/a}$$

Dolomiittikalkin ominaiskulutukseksi saadaan siis 196 tonnia (196 tn) vuodessa.

Dolomiittikalkin hinta riippuu sen fraktiosta ja toimituspaikasta, jolloin sen DDU-hinta asettuu vaihteluväliin 40-80 €/tn [22]. Toimituksen kustannukseen vaikuttaa ns. kuljetussuunta, sillä suuremmalle markkina-alueelle kustannus muodostuu pienemmäksi kuin pienemmälle markkina-alueelle. Dolomiittikalkin vuosittainen kustannus voidaan arvioida seuraavasti:

$$\text{Dolomiittikalkki}_{\text{KUSTANNUS_VUOSI}} = \text{Dolomiittikalkki}_{\text{OMINAISKULUTUS_VUOSI}} * \text{Dolomiittikalkki}_{\text{HINTA}} \quad (5)$$

Kun vuosittainen kulutus on 196 tonnia ja hinta 40 €/tn, kustannukseksi saadaan:

$$\text{Dolomiittikalkki}_{\text{KUSTANNUS_VUOSI}} = 196 \text{ tn/a} * 40 \text{ €/tn} = 7840 \text{ €/a}$$

Vuosittaiseksi kustannukseksi saadaan 7840 €/a. Jos dolomiittikalkin hinta on 80 €/tn ja kulutus on sama, saadaan vuosittaiseksi kustannukseksi 15 680 €

#### 4.7 TUHKAN MUODOSTUMINEN

Oleellista taloudellisuustarkastelun kannalta on pystyvä arvioimaan, että kuinka paljon tuhkaa voimalaitoksessa muodostuu. Ensimmäiseksi tulee laskea käytettävän polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, joka saadaan kaavasta:

$$q_{p,net,ar} = q_{p,net,d} * \left( \frac{100 - M_{ar}}{100} \right) - 0,02443 * M_{ar} \quad (6)$$

jossa

$q_{p,net,ar}$  = tehollinen lämpöarvo (vakiopaineessa) saapumistilassa, MJ/kg

$q_{p,net,d}$  = tehollinen lämpöarvo (vakiopaineessa) kuiva-aineessa, MJ/kg

$M_{ar}$  = kosteus saapumistilassa, p-%

0,02443 = veden höyrystymiseen kuluva lämpöenergia (MJ/kg) 25 °C:n lämpötilassa

Jos oletetaan polttoaineen teholliseksi lämpöarvoksi kuiva-aineessa 20 MJ/kg ja kosteudeksi saapumistilassa 45 %, saadaan:

$$q_{p,net,ar} = 20 \frac{MJ}{kg} * \left( \frac{100 - 45}{100} \right) - 0,02443 MJ/kg * 45 = 9,9 MJ/kg$$

Yhtälö antaa tulokset MJ/kg -muodossa, jonka jälkeen ne voidaan muuntaa yleisimmin käytettyyn MWh/kg muotoon. Muunnos perustuu siihen, että 1 W = 1 J/s. Tämä voidaan ilmaista myös muodossa 1 Ws = 1 J. Toisaalta 1 Wh = 3600 J. Eli 9,9 MJ/kg saadaan muunnettua MWh/kg:ksi siten, että jaetaan saatu tulos 3600:lla:

$$\frac{9,9 MJ/kg}{3600} = 0,00275 MWh/kg$$

Kun tästä tuloksesta otetaan käänteisluku, saadaan polttoaineen ominaiskulutus  $A_c$  yksikössä kg/MWh:

$$A_c = \frac{1}{0,00275 MWh/kg} = 363,613 kg/MWh$$

eli polttoaineen määräksi saadaan 0,363 tn/MWh. Kun polttoaineen määrä on tiedossa, voidaan laskea polttoaineesta muodostuvan tuhkan määrä kg/MWh, joka saadaan kaavasta:

$$A_q = A_c * \left( \frac{100 - M_{ar}}{100} \right) * \frac{A_d}{100} \quad (7)$$

jossa

$A_c$  = Polttoaineen ominaiskulutus saapumistilassa, kg/MWh

$A_d$  = polttoaineen tuhkapitoisuus, p-%

$M_{ar}$  = kosteus saapumistilassa, p-%

Tällöin saadaan:

$$A_q = 363,613 \frac{kg}{MWh} * \left( \frac{100 - 45}{100} \right) * \frac{5}{100} = 1,00 kg/MWh$$

Kun tiedetään, kuinka tuhkaa syntyy per MWh, voidaan vuodessa muodostuvan tuhkan määrä laskea kaavasta:

$$A_{vuosi} = \Phi_k * t_h * A_q \quad (8)$$

Jos oletetaan, että kattilateho on 10 MW ja huipunkäyttöaika 4000 h, saadaan:

$$A_{vuosi} = 10 MW * 4000 h * 1,00 \frac{kg}{MWh} = 40,0 tn$$

Tuhkaa muodostuu näin esimerkkiluvuilla vuodessa 40 tonnia. Tämä on kuitenkin kokonaistuhkan määrä, kun tavoitteena on hyödyntää vain lentotuhkaa. Lentotuhkan osuus leijukerros-poltossa muodostuvasta tuhkasta on 80-100 % [23].

Jos oletetaan varovaisesti, että lentotuhkan osuus kokonaistuhkasta on 80 %, tulisi lentotuhkaa tällöin 32 tn. Jos dolomiittikalkkia kuluu vuodessa 196 tn, voidaan tästä laskea, että kuinka paljon dolomiittikalkkia kuluu per tonni lentotuhkaa:

$$\frac{196 \frac{tn}{a}}{32 tn} = 6,1 tn$$

Jos dolomiittikalkkia kuluu 6,1 tn ja dolomiittikalkin hinta on 40 €/tn, on sen kustannus 244 €. Jos dolomiittikalkin hinta on 80 €/tn, on kustannus silloin 488 €.

Kustannus voidaan muuttaa €/MWh muotoon kertomalla saatu kustannus arvolla 0,001 tn/MWh. Tällöin muuttuva kustannus on 0,244-0,488 €/MWh.



## 5 TÄRKEIMPIEN TALOUDELLISTEN VAIKUTUSTEN HERKKYYSTARKASTELUT

Herkkyyshanalyysissä tutkitaan, kuinka investoinnin kannattavuus muuttuu, jos yhtä tai useampaa tekijää muutetaan. Jokaisen muutoksen jälkeen tutkitaan, mikä vaikutus sillä on investoinnin kannattavuuteen. Tärkeintä on tutkia ja löytää epäedullisimmat arviointivirheet, joiden löytymisen jälkeen voidaan kriittisimmin arvioida investoinnin kannattavuutta.

Edellä on käsitelty muuttuva kustannus eli dolomiittikalkin kulutus, mutta tämän lisäksi on huomioitava myös kiinteä kustannus eli investointi annostelu- ja/tai kustutinalaitteistoon. Jos em. laitteistoon investoidaan, investointi olisi hyvä jakaa taloudelliselle pitoajalle, jolloin investointikustannus voidaan laskea annuiteettimenetelmällä. Annuiteettimenetelmässä investoinnin hankintakustannus jaetaan jokaiselle investoinnin pitoajan vuodelle yhtä suureksi vuosieräksi eli annuiteetiksi. Nämä annuiteetit koostuvat poistoista ja korkokustannuksista, joissa käytetään laskentakorkokantaa. Laskelman mukaan investointi maksaa itsensä takaisin valitulla korkokannalla, jos vuosittain saatava nettotuotto on vähintään tai suurempi kuin vuotuinen pääomakustannus eli tämä annuiteetti. Kun lasketaan annuiteettia, hankintameno kerrotaan annuiteettitekijällä. Annuiteettitekijä  $c$  määritellään seuraavasti:

$$c = \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1} \quad (1)$$

jossa

$i$  = korkoprosentti, %

$n$  = pitoaika, v

Annostelulaitteiston valmistaja lupaa laitteistolle tekniseksi pitoajaksi kymmeniä vuosia, mutta todellinen tekninen pitoaika riippuu laitteiston käyttötuntien sekä huollon määrästä. Jos laitteistoa huolletaan säännöllisesti, voi sen tekninen elinikä olla 30 vuotta. Perustilanteessa laitteiston pitoaikana on käytetty kuitenkin 20 vuotta. Pitoaikaa voidaan herkkyystarkastella ja herkkyystarkastellaankin jäljempänä.

Korkoprosenttina on yleisesti kustannusarvioissa käytetty 5 prosenttia, jolloin annuiteettikertoimeksi saadaan:

$$c = \frac{(1 + 0,05)^{20} * 0,05}{(1 + 0,05)^{20} - 1} = 0,08$$

Tällöin vuosittainen poisto on 150 000 euron laiteinvestoinnille 12 036 €. Tästä voidaan laskea dolomiittikalkin annostelulaitteistosta johtuva omakustannushinta eli tasoitettu tuotantokustannus (englanniksi LCO eli Levelized Cost) tuotetulle lämmölle kattilateholla ja käyttötuntien määrällä:

$$\frac{V_p}{t_h * \Phi_k} \quad (2)$$

jossa

$V_p$  = vuosittainen poisto, €

$t_h$  = käyttötuntien määrä, h

$\Phi_k$  = kattilateho, MW

Tasoitettu tuotantokustannus on laskettu alla 10 MW:n kattilateholla ja 4000 h:n käyttötunneilla:

$$\frac{12\,036\ \text{€}}{(4000\ \text{h} * 10\ \text{MW})} = 0,30\ \text{€/MWh}$$

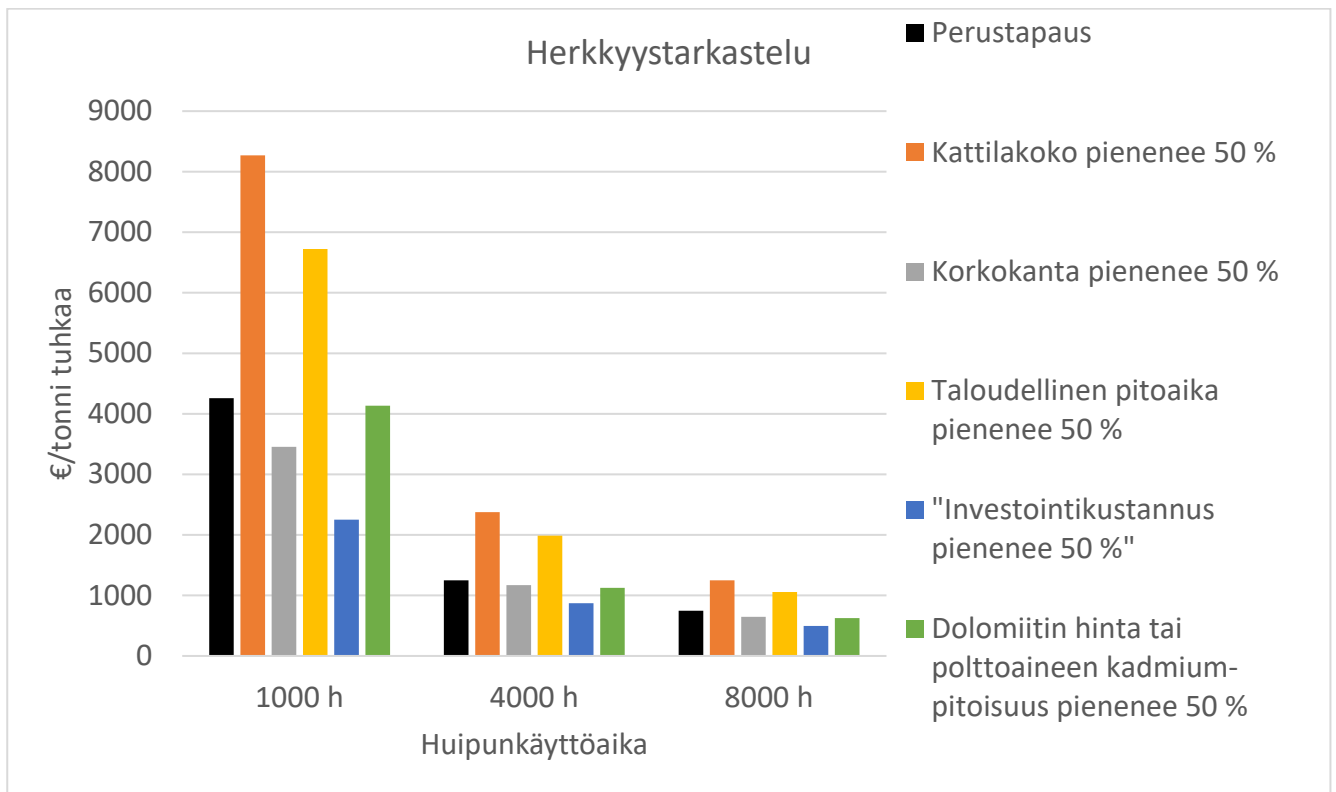
Tästä saadaan kiinteä kustannus 0,30 €/MWh perustapauksessa. Tähän tulee lisätä vielä muuttuva kustannus, jolla tarkoitetaan lähinnä dolomiittikalkin kulutusta. Näiden summana saatava kokonaiskustannus voidaan laskea muodossa euroa per MWh dolomiittikalkin syöttöön liittyvien laitteiden käyttöä ajalle jaettuna. Toisaalta kustannus voidaan laskea myös kuivalle tuhkatonnille (mahdollista vesi-

käsittelyä ei ole huomioitu) laskelmissa. Ensimmäinen tunnusluku on hyödyllinen tarkasteltaessa tuotettuun lämpöön liittyviä kustannuksia ja jälkimmäinen puolestaan tuhkan käsittelyn kannalta. LCOE-tunnusluvulle ja euroa per tuhkatonni -tunnusluvulle tehdään herkkyystarkasteluja, eli tutkitaan eri kustannusten vaikutuksia tasoitettuun tuotantokustannukseen. Alla olevassa taulukossa on esitetty perustilanteessa käytettävät parametrit ja tässä investoidaan myös kostutuslaitteistoon. Molemmille arvioidaan sama pitoaika ja laskentakorko.

Taulukko 4. Parametrit perustilanteessa

Laitteinvestoinnit	
Annostelulaitteisto	150 000 €
Kostutuslaitteisto	250 000 €
Pitoaika	20 vuotta
Laskentakorko	5 %
Dolomiittikalkin syöttömäärä ja hinta	
Polttoaineen kosteus saapumistilassa	45 %
Polttoaineen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo	20 MJ/kg
Polttoaineen kuiva-aineen tuhkapitoisuus	0,5 %
Polttoaineen kadmium-pitoisuus	4 ppm
Lämpölaitoksen huipunkäyttöaika	4000 h
Lämpölaitoksen nimellisteho	10 MW
Dolomiittikalkin hinta	40 €/tn

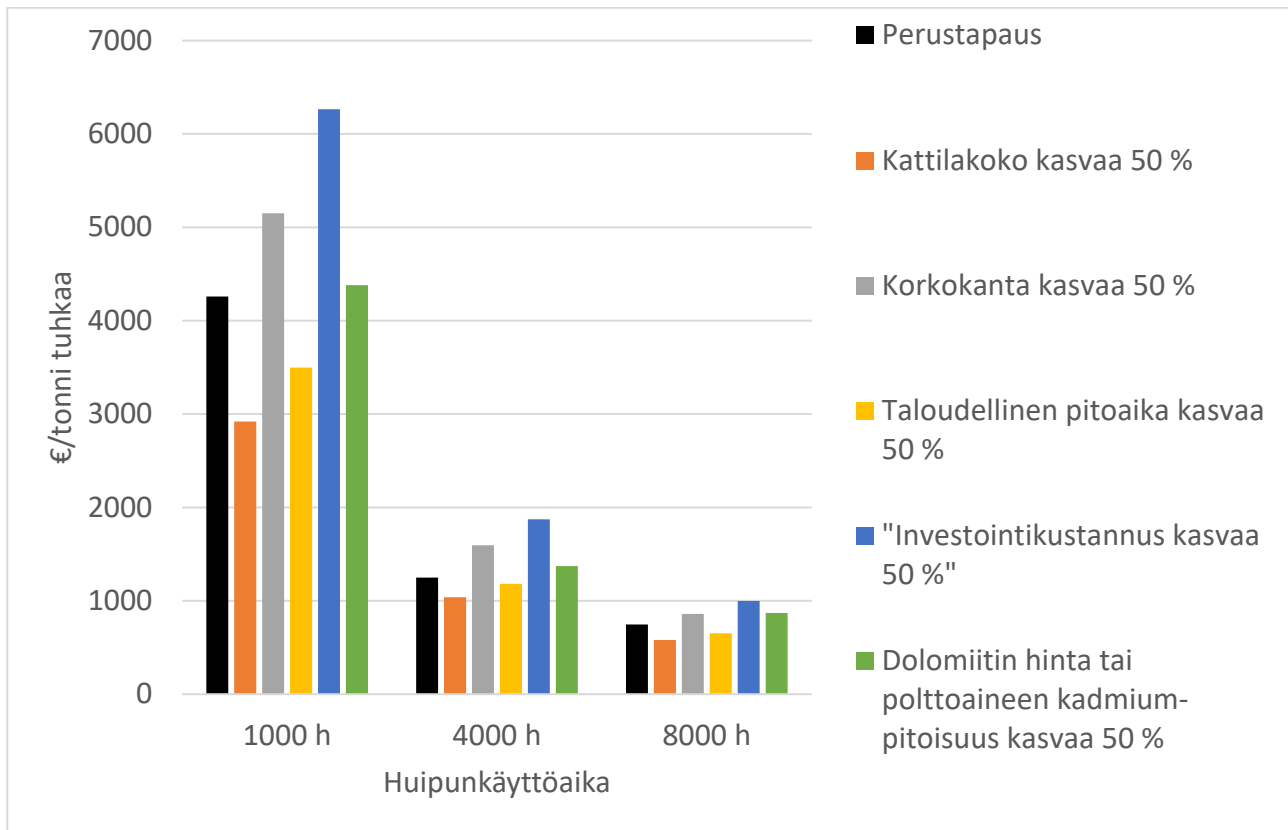
Kun perustilanteen parametrit ovat tiedossa, voidaan laskea muuttuvat ja kiinteät kustannukset. Ensimmäisessä herkkyystarkastelussa tutkitaan, miten parametrien pienentäminen 50 prosenttia vaikuttaa tasoitettuun tuotantokustannukseen.



Kuvio 1. Herkkyystarkastelu kustannusparametrien pienentyessä 50 %. Vain yhtä kustannustekijää on muutettu kerrallaan. Todellisuudessa luonnollisesti useat näistä voivat muuttua samaan aikaan ja eri suuntiin.

Jo yllä olevasta graafista (kuvio 1) nähdään, että tasoitettu tuotantokustannus on herkkä kattilakoolle ja taloudelliselle pitoajalle. Dolomiittikalkin hinta tai polttoaineen kadmium-pitoisuudella nähdään olevan pienin merkitys kustannukseen.

Herkkyystarkastelu tehtiin myös niin, että kustannusparametrejä kasvatettiin 50 prosenttia.



Kuvio 2. Herkkyystarkastelu kustannusparametrien kasvaessa 50 %. Vain yhtä kustannustekijää on muutettu kerrallaan. Todellisuudessa luonnollisesti useat näistä voivat muuttua samaan aikaan ja eri suuntiin.

Graafista yllä (Kuvio 2) nähdään, että nyt kustannus on herkin investointikustannukselle. Jos investointikustannus kasvaa 50 prosenttia, on investointikustannus 4000 h:n käyttötunneilla lähes 2000 €/tn. Kattilakoon kasvaessa 15 MW:iin kustannus muuttuu 4000 h:n käyttötunneilla 300 €/tn. Kun kattilakoko pieneni 5 MW:iin, kasvoi kustannus n. 1000 €/tn. Dolomiittikalkin hinnalla ja polttoaineen kadmium-pitoisuudella on edelleen pienin merkitys tasoitettuun tuotantokustannukseen.

Pylväskaavioiden (kuvio 1 ja 2) lisäksi herkkyystarkastelun tuloksia esitetään taulukossa 5 ja 6 sekä kuvioissa 3 ja 4. Taulukoissa tarkasteltiin kustannuksia, kun kattilakoko tai investointikustannus muuttuu. Tonnikohtaisen kustannuksen lisäksi taulukossa on nähtävissä kustannus yksikössä €/MWh. Tässä MWh on laskettu polttoaineen lämpöarvoa kohti saapumistilassa (kuiva-aineen lämpöarvo 20 MJ/kg ja kosteus 45 m-%).

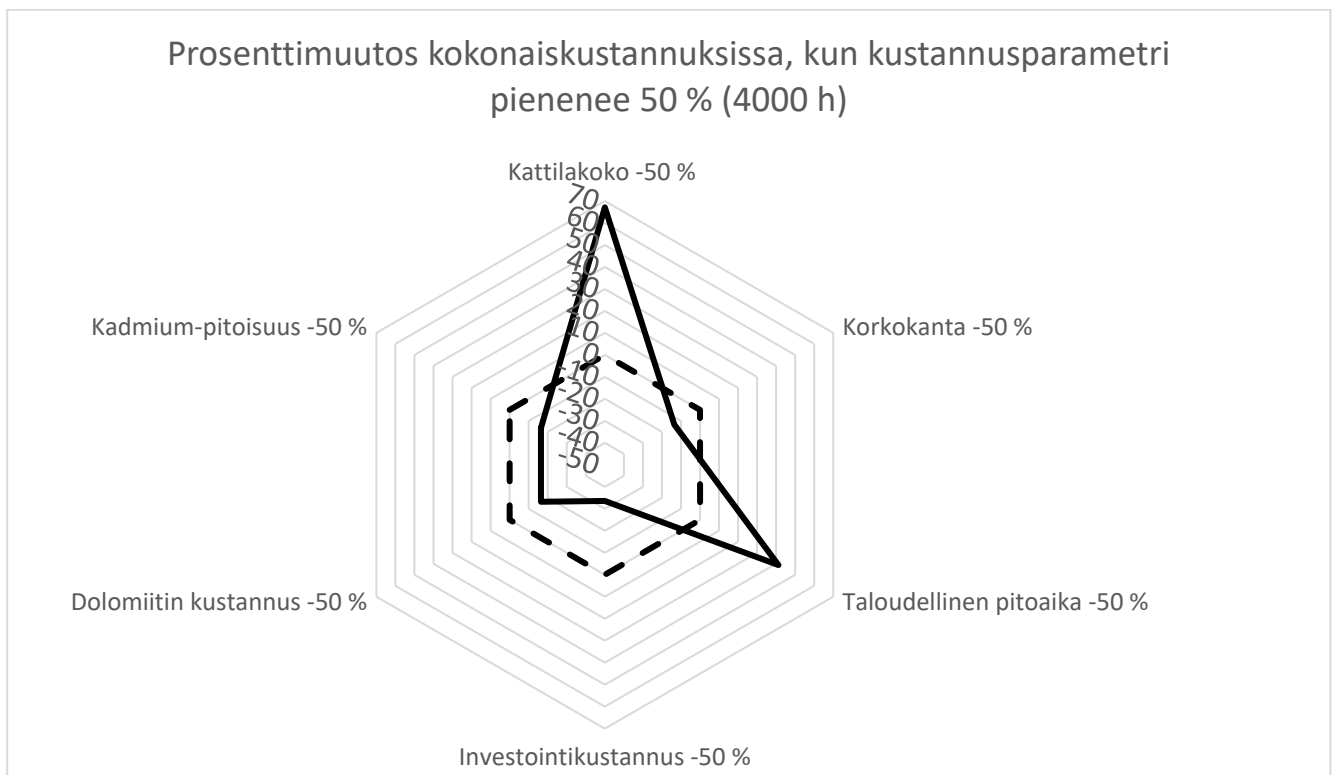
Taulukko 5. Herkkyystarkastelu huipunkäyttöajalle kattilakoon muuttuessa ± 50 %

Kattilakoko muuttuu ± 50 %						
Huipunkäyttöaika	Perustapaus, 10 MW		5 MW		15 MW	
	€/MWh	€/tn	€/MWh	€/tn	€/MWh	€/tn
1000	4,3	4258	8,3	8271	2,9	2921
2000	2,3	2252	4,3	4258	1,6	1583
4000	1,2	1249	2,3	2252	0,9	915
6000	0,9	915	1,6	1583	0,7	692
8000	0,7	747	1,2	1249	0,6	580

Taulukko 6. Herkkyystarkastelu investointikustannuksen muuttuessa  $\pm 50\%$

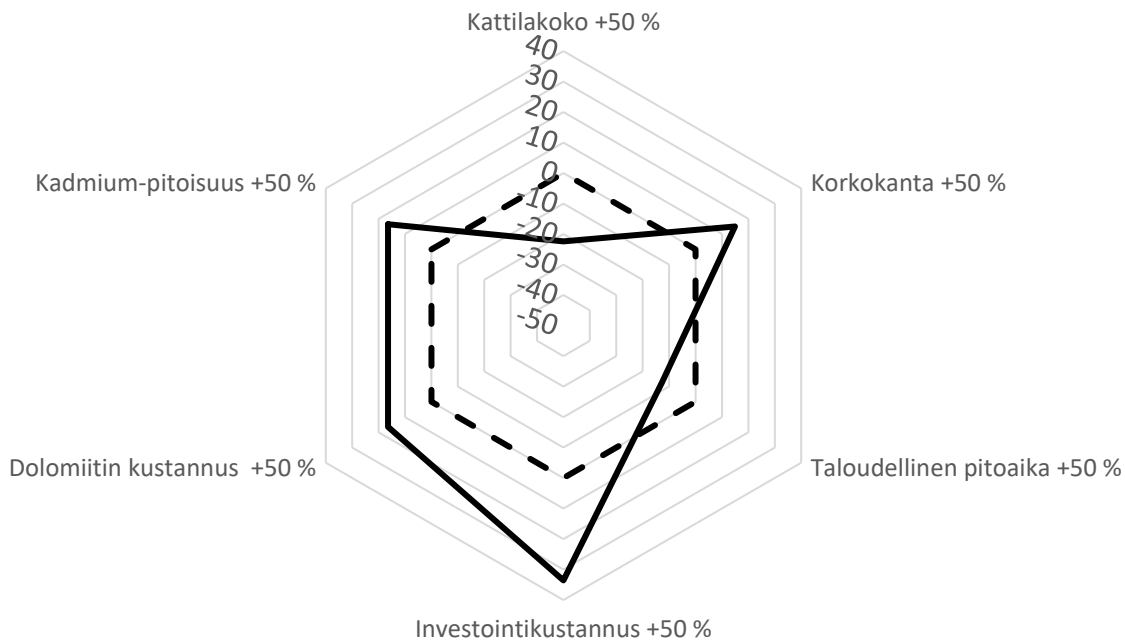
Investointikustannus muuttuu $\pm 50\%$						
Huipunkäyttöaika	Perustapaus, 400 000 €		200 000 €		600 000 €	
	€/MWh	€/tn	€/MWh	€/tn	€/MWh	€/tn
1000	4,3	4258	2,3	2252	6,3	6264
2000	2,3	2252	1,2	1249	3,3	3255
4000	1,2	1249	0,7	747	1,8	1750
6000	0,9	915	0,6	580	1,2	1249
8000	0,7	747	0,5	653	1,0	998

Kuvioissa 3 ja 4 on esitetty graafisesti kunkin kustannustekijän prosentuaalinen muutos yksikkökustannukseen kustannustekijän pienentyessä 50 % (Kuvio 3) ja suurentuessa 50 % (Kuvio 4)



Kuvio 3. Herkkyystarkastelu kustannusparametrien pienentyessä 50 %. Vain yhtä kustannustekijää on muutettu kerrallaan. Pystyakselilla on prosenttimuutos kokonaiskustannuksissa perustapaukseen nähden. Todellisuudessa luonnollisesti useat näistä voivat muuttua samaan aikaan ja eri suuntiin. Katkoviiva tarkoittaa, että ei muutosta. Mitä kauempana ehjällä viivalla ilmaistu arvo on katkoviivasta, sitä suurempi on suhteellinen kustannusmuutos.

## Prosenttimuutos kokonaiskustannuksissa, kun kustannusparametri suurenee 50 % (4000 h)



Kuvio 4. Herkkyystarkastelu kustannusparametrien kasvaessa 50 %. Vain yhtä kustannustekijää on muutettu kerrallaan. Pystyakselilla on prosenttimuutos kokonaiskustannuksissa perustapaukseen nähden. Todellisuudessa luonnollisesti useat näistä voivat muuttua samaan aikaan ja eri suuntiin. Katkoviiva tarkoittaa, että ei muutosta. Mitä kauempana ehjällä viivalla ilmaistu arvo on katkoviivasta, sitä suurempi on suhteellinen kustannusmuutos.

### 5.1 YHTEENVETO TALOUDELLISESTA TARKASTELUSTA

Herkkyystarkasteluissa havaittiin, että dolomiittikalkin syötön kustannukset ovat herkkiä laitoskoolle ja laiteinvestoinneille. Laitoskoon kasvaessa tuhkaa muodostuu enemmän ja sitä todennäköisemmin investoinnit annostelu- ja kostutinlaitteistoon ovat kannattavia. Pienellä laitoksella laiteinvestoinnit voivat olla kannattamattomia, kun tuhkaa muodostuu vähän. Investointien osalta onkin hyvä pohtia ratkaisuja, jolla saadaan kustannukset kohtuullisiksi. Dolomiittikalkin annostelulaitteiston investoinnilta tuskin voidaan välttyä, mutta sen kustannus voi olla vähäisempi mitä raportissa on esitetty. Jokainen annostelulaitteisto räätälöidään laitoskohtaisesti, ja kustannuksen määrään pystytään suunnittelulla vaikuttamaan.

Tuhkan käsittelylaitteiston investoinnilta voidaan välttyä esim. tilanteessa, jossa tuhkan jatkokäsittelyn hoitaa muu toimija kuin voimalaitos itse. Näitä ovat esim. tuhkan vastaanottoterminaalit, jotka hoitavat tuhkan jatkokäsittelyn. Tässäkin ratkaisevaa on voimalaitoksen sijainti vastaanottoterminaalista. Investointi tuhkan käsittelylaitteistoon vaikuttaa kannattavalta tätä raporttia kirjoitettaessa, kun puhutaan useiden kymmenien megawattien voimalaitoksesta, jolloin tuhkaa muodostuu enemmän.

Dolomiittikalkin annostelun määrä kuitenkin määritetään laitoskohtaisesti, mikä voi olla vähäisempi kuin raportissa on esitetty. Herkkyystarkastelussa ilmeni kuitenkin, että kustannus ei ole herkkä dolomiittikalkin annostelumäärälle.

Tämän raportin taloudellisissa tarkasteluissa ei ole otettu kantaa investointiympäristön kiertotalouden edistämiseen liittyvän mahdollisen poliittisen ohjauksen lisääntymisestä tai voimistumisesta. Tällä hetkellä ruuan tuotanto pelloilta lautaselle perustuu pitkälti fossiiliseen energiaan. Jokainen kilokalori ruuan energiaa lautasella on vaatinut 3 kilokaloria fossiilista energiaa tuotantoketjussa. [24]. Osa tästä energiasta on peräisin lannoitteiden valmistuksesta, joka on energiaintensiivistä. Pidemmällä aikavälillä fossiilisesta energiasta lannoitteiden valmistuksessa on päästävä eroon. Tämä saattaa tarkoittaa ainakin väliaikaisesti fossiilisilla polttoaineilla valmistettujen lannoitteiden huomattavaa kallistumista, mikä tekisi puutuhkasta kertaheitolla huomattavasti kilpailukykyisemmän lannoiteraaka-aineena.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA HUOMIOITA TULEVISTA SELVITYSTARPEISTA

Dolomiittikalkin annostelusta ja tuhkan hyötykäytön kannattavuudesta ei voida todeta yleisesti päteviä huomioita. Tämä raportti antaa hyvät lähtökohdat liiketoimintamallin suunnittelulle ja perustavan katsauksen kannattavuuden tekijöihin. Kuten todettiin, tuhkan hyötykäytön aloittamiseen liittyy useat lait ja säädökset, joita tulee noudattaa. Näistä merkittävimpiä olivat ympäristönsuojelulaki, jätelaki ja -asetus ja lannoitevalmistelaki. Näihin liittyviä tärkeimpiä toimenpiteitä olivat raportoinnit Ruokavirastolle, kuten toiminnan aloitusilmoituksen tekeminen, omavalvonnan ylläpito ja näytteenotot ja niiden analysointi.

Kannattavuuden kannalta tärkeimpiä tekijöitä ovat voimalaitoksen ja tuhkan loppukäytön sijainti, laiteinvestoinnit ja tuhkan muodostumisen määrä. Kun voimalaitos ja tuhkan lopullinen sijoituspaikka sijaitsevat lähellä toisiaan, vähenevät kuljetuskustannukset parantaen kannattavuutta. Kun voimalaitoksen koko on kymmeniä megawatteja, muodostuu tuhkaa enemmän, jolloin myös laiteinvestoinnit saadaan todennäköisemmin kannattaviksi. Loppukäytön kannalta on myös oleellista, että ovatko tavoitteet pelto- vai metsälannoitekäytössä. Metsälannoitekäytössä tuhkan haitta-ainepitoisuuksien rajat ovat alhaisemmat, jolloin dolomiittikalkin kulutuksen ei tarvitse olla niin suurta. Toisaalta herkkyytarkastelujen tulos oli, että dolomiittikalkin kulutus ei ole suhteellisesti kovin suuri tekijä verrattuna muihin kustannustekijöihin, kuten laiteinvestoinnin suuruuteen, kattilakokoon ja taloudelliseen pitoaikaan.

Tässä raportissa on tarkasteltu dolomiittikalkin syötön hyötyjä poltossa muodostuvaan tuhkaan. Dolomiittikalkilla on selvä vaikutus tuhkan raskasmetallipitoisuuksien vähenemiseen, mutta sen on todettu vähentävän myös päästöjen haitallisia pitoisuuksia. Tämä lisää dolomiittikalkin arvoa. Tulevana selvitystarpeena voidaankin pitää sitä, että mitä muita mahdollisia hyötyjä dolomiittikalkin avulla voidaan saada? Onko löydettävissä dolomiittikalkkia sisältävä seos, jolla saadaan hyötyjä myös kattilaosien korroosion ehkäisyssä? Seoksen tulisi kuitenkin olla sellainen, että tuhkan haitta-ainepitoisuudet vähenevät ja seos on edullista tuottaa. Kannattavuus voi nousta aivan uudelle tasolle, jos edellä mainitut hyödyt täyttyvät ja seoksen hinta on kohtuullinen.

Investointiympäristö lannoitteiden valmistukseen voi muuttua radikaalisti kiertotalouden edistämiseen liittyvän mahdollisen poliittisen ohjauksen voimistumisen myötä. Tämä saattaa tarkoittaa ainakin väliaikaisesti niin sanottujen fossiilisten lannoitteiden huomattavaa hinnannousua. Tämä muuttaisi dolomiittikalkin ja mahdollisesti kattilan korroosiota estävien seoskomponenttien syöttämisen kannattavuutta rajusti. Raportin laskelmissa ei ole otettu huomioon mahdollista investointiympäristön voimakasta muutosta, mikä on raporttia lukiessa hyvä ottaa huomioon.

## 7 LÄHTEET

- [1] Sironen, S., Mäenpää, I., Myllyviita, T., Leskinen, P. & Seppälä, J. 2015. Pohjois-Karjalan materiaalivirrat ja resurssitehokkuus. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 30. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/profile/Susanna-Sironen/publication/282641612\\_Pohjois-Karjalan\\_materiaalivirrat\\_ja\\_resurssitehokkuus/links/5614d22f08ae983c1b40cd28/Pohjois-Karjalan-materiaalivirrat-ja-resurssitehokkuus.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Susanna-Sironen/publication/282641612_Pohjois-Karjalan_materiaalivirrat_ja_resurssitehokkuus/links/5614d22f08ae983c1b40cd28/Pohjois-Karjalan-materiaalivirrat-ja-resurssitehokkuus.pdf). Viitattu 24.4.2023.
- [2] Kauppila, M., Kontinen, K. & Tenhola, T. 2021. Tuhkan hyötykäyttö metsätaloudessa. Tapio Oy. Saatavissa: [Tuhkan-hyotykaytto-metsataloudessa-esite.pdf \(tapio.fi\)](https://www.tapio.fi/tuhkan-hyotykaytto-metsataloudessa-esite.pdf). Viitattu 24.4.2023.
- [3] Alakangas, E., Hurskainen M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>. Viitattu 24.4.2023
- [4] Huotari, N. 2012. Tuhkan käyttö metsälannoitteena. Metla. Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/504366/tuhkan-kaytto-metsalannoitteena%5b1%5d.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Viitattu x.
- [5] Ruokavirasto. 2023. Tuhkan käyttö lannoitteena. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/kierratysravinteet/tuhkalannoitteet/>. Viitattu 24.4.2023.
- [6] Ruokavirasto. 2023. Tyyppinimi. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/lannoitelan-toiminta/lainsaadanto/tyyppinimi/>. Viitattu 24.4.2023.
- [7] Ruokavirasto. 2023. Kansallinen lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelo. Saatavissa: [https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/yriytykset/lannoiteala/tiedostot/tyyppinimiluettelo\\_konsolidoitu\\_22\\_11\\_2019.pdf](https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/yriytykset/lannoiteala/tiedostot/tyyppinimiluettelo_konsolidoitu_22_11_2019.pdf). Viitattu x.
- [8] Isännäinen, S., Huotari, H. & Mursunen, H. 1997. Lentotuhkan itsekovetus. Metsätehon raportti 30. Saatavissa: [https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon\\_raportti\\_030.pdf](https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon_raportti_030.pdf). Viitattu 24.4.2023.
- [9] Juuma, H., Kauhanen, S., Kontas, K.-M., Korhonen, M., Lehtoväre, J., Leskelä, K., Liisanantti, H., Luiro, S., Mikkola, J., Nurmela, T., Ohtamaa, H., Ohtamaa, S., Ojamaa, M., Palola, J., Vähärautio, J., Snäkin, J.-P. & Soppela, J. 2020. Tuhkat kierratustaloudessa. Sarja B. Tutkimusraportit ja kokoomateokset 27/2020. Lapin ammattikorkeakoulu, Rovaniemi. Saatavissa: <https://www.lapinamk.fi/loa-der.aspx?id=ff3ac5fb-5dea-4427-8027-1e82ff97ee08>. Viitattu 25.4.2023.
- [10] Finlex. 2022. Lannoitelaki 711/2022. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2022/20220711#Pidm45053758102608>. Viitattu 25.4.2023.
- [11] Torniainen, M. 2022. Henkilökohtainen tiedonanto. Sähköpostikeskustelu.
- [12] Ruokavirasto. 2023. Lannoitevalvonnan hinnasto. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/lannoitelan-toiminta/hinnasto/>. Viitattu 25.4.2023.
- [13] Arnkil, N., Joensuu, S., Kauppila, M., Kontinen, K., Kotiharju, A., Lahti, E. & Tenhola, T. 2020. Tuhka osana kestävää liiketoimintaa – Opas tuhkan tuottajille ja käyttäjille. Tapion raportteja 42. Tapio Oy. Saatavissa: [Tuhka osana kestävää liiketoimintaa -opas \(tapio.fi\)](https://www.tapio.fi/tuhka-osana-kestavaa-liiketoimintaa-opas). Viitattu 25.4.2023.
- [14] Evira. 2016. Tuhkalannoitteen tuoteselosteohje. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/tietoa-meista/asiointi/op-paat-ja-lomakkeet/yriytykset/lannoitevalmisteet/ohjeet/tuhkalannoitteen-tuoteselosteohje.pdf>. Viitattu 25.4.2023.
- [15] Ruokavirasto. 2023. Orgaanisen lannoitteen tuoteseloste. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/pakkausmerkinnat/orgaaniset-lannoitteet/>. Viitattu 25.4.2023.
- [16] Pneuplan Oy. 2023. Kostutinlaitteet. Saatavissa: <https://pneuplan.fi/tuotteet/purkulaitteet/kostutinlaitteet/>. Viitattu 12.5.2023.
- [17] Tecwill Granulators. 2023. Tuhkan rakeistus – entistäkin vihreämpää metsäteollisuutta. Saatavissa: <https://www.tecwillgranulators.com/fi/ratkaisut/mets%C3%A4teollisuus/tuhkanrakeistus>. Viitattu 12.5.2023.
- [18] Rakeistus Oy. Tuhkan vastaanottopalvelu. Saatavissa: <https://www.rakeistus.fi/yriytykset/tuhkantuottajille/>. Viitattu 12.5.2023.
- [19] Koskelainen, J. 2023. Henkilökohtainen tiedonanto. Puhelinkeskustelu.



[20] Finlex. 2023. Maa- ja metsätalousministeriö: Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/400001/37638>. Viitattu 22.5.2023.

[21] Lehmussaari, H. 2013. Keskitetyn lämmöntuotannon hyödyt. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, energiatekniikka. Opinnäytetyö. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/68855/lehmussaari\\_hermann.pdf;jsessionid=E87216F8ACD5774AF84311EE38A4BFB1?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/68855/lehmussaari_hermann.pdf;jsessionid=E87216F8ACD5774AF84311EE38A4BFB1?sequence=1). Viitattu 22.5.2023.

[22] Naukkarinen, P. 2022. Henkilökohtainen tiedonanto. Puhelinkeskustelu.

[23] Ramboll Finland Oy. 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja. Energiantuotannon tuhkat väylä-, kenttä ja maarakentamisessa. Saatavissa: [https://energia.fi/files/1137/tuhkarakentamisen\\_kasikirja.pdf](https://energia.fi/files/1137/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf). Viitattu 22.5.2023.

[24] Suokko, A. & Partanen, R. 2017. Energian aika – avain talouskasvuun, hyvinvointiin ja ilmastonmuutokseen. WSOY, Helsinki.



Esittelijä  
Hyväksyjä

Suoniitty  
Venelampi

Sivu/sivut 4 / 4  
**Ohje / versio 12504/03**  
Käyttöönotto 15.4.2016

Rehu- ja lannoitevalvontayksikkö

## Tuhalannoitteen tuoteselosteohje

### Tuoteselostemalli metsätuhka

<b>Tyyppinimi</b>	Puun ja turpeen tuhka
<b>Kauppanimi</b>	Tuhkatien voimalaitoksen metsätuhka
<b>Ravinteet</b>	Fosfori (P) 1,2 % Kalium (K) 2,1 % Kalsium (Ca) 11,2 %
<b>Kosteus</b>	20 %
<b>Haitalliset metallit enintään</b>	Arseeni (As) ≤ 10 mg/kg Elohopea (Hg) ≤ 0,2 mg/kg Kadmium (Cd) ≤ 3,5 mg/kg Kromi (Cr) ≤ 40 mg/kg Kupari (Cu) ≤ 20 mg/kg Lyijy (Pb) ≤ 30 mg/kg Nikkeli (Ni) ≤ 45 mg/kg Sinkki (Zn) ≤ 1700 mg/kg
<b>Raaka-aineet</b>	Puun puru, kuori ja hake
<b>Käyttö ja käyttörajoitukset</b>	Tuhkan käyttö on sallittu ainoastaan metsätaloudessa. Enimmäiskäyttömäärä metsätaloudessa on tuhkan sisältämien haitallisten metallien perusteella 16 tonnia hehtaarille 60 vuoden ajanjaksona annettuna. Levityksessä on huomioitava riittävät suojavyöhykkeet vesistöihin.
<b>Valmistaja</b>	Tuhkatien voimalaitos Tuhkatie 1 12345 VOIMALAITOS