



Tommi Kaartinen, Jutta Laine-Ylijoki, Auri Koivuhuhta,
Tero Korhonen, Saija Luukkanen, Pekka Mörsky, Raisa Neitola,
Henna Punkkinen & Margareta Wahlström

Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi

Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi

Tommi Kaartinen, Jutta Laine-Ylijoki, Auri Koivuhuhta,
Tero Korhonen, Saija Luukkanen, Pekka Mörsky, Raisa Neitola,
Henna Punkkinen & Margareta Wahlström



ISBN 978-951-38-7679-1 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7680-7 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

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

Copyright © VTT 2010

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4374

Tommi Kaartinen, Jutta Laine-Ylijoki, Auri Koivuhuhta, Tero Korhonen, Saija Luukkanen, Pekka Mörsky, Raisa Neitola, Henna Punkkinen & Margareta Wahlström. Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi [Refining of bottom ash from municipal solid waste incineration]. Espoo 2010. VTT Tiedotteita – Research Notes 2567. 98 s. + liitt. 8 s.

Avainsanat waste incineration, bottom ash, processing, utilization, earth construction, enrichment

Tiivistelmä

Lähitulevaisuudessa yleistyvän jätteenpolton myötä syntyy Suomessakin uudenlaisia kuonia ja tuhkia, joiden käsittely vaikuttaa merkittävästi polttolaitoksen käyttökustannuksiin ja jotka läjitettyinä, ilman hyötykäyttöä, kuormittavat kaatopaikkoja. Jätelainsäädäntö edellyttää mahdollisuuksien mukaan kuonien ja tuhkien hyödyntämistä ja uusi valtakunnallinen jätesuunnitelma painottaa toimia jätteiden kierrätyksen tehostamiseksi. Jättemateriaalien hyötykäytön tehostamiseksi onkin meneillään lukuisia sekä kansallisia että EU-tason kehittämistoimia. Vuonna 2006 Suomessa hyväksyttiin asetus (591/2006) ”Eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa”, jonka soveltamisalaa on tavoitteena laajentaa nykyistä useampiin jättemateriaaleihin. Yhtenä tällaisena uutena, asetuksen piiriin soveltuvana uusiomateriaalina, myös valtakunnallisessa jätesuunnitelmassa, nähdään jätteenpoltossa muodostuva pohjatuikka ja -kuona, jota arvioidaan Suomessa muodostuvan tulevaisuudessa noin 200 000 t/a. Tämän Tekesin rahoittaman hankkeen tavoitteena oli parantaa jätteenpolton pohjakuonan maarakentamishyötykäyttömahdollisuuksia jalostamalla kuonaa malmien rikastuksessa käytettyjen teknologioiden pohjalta ja kehittämällä siten uusia, innovatiivisia jättemateriaalien kierrätys- ja jalostusteknologioita. Hankkeessa selvitettiin pohjakuonalle soveltuvia kustannustehokkaita käyttökohteita ja prosessoinnin mahdollisuuksia parantaa maarakentamishyötykäytön edellytyksiä. Lisäksi hankkeessa koottiin pohjakuonan jalostamiseen keskittynyt kansainvälinen asiantuntijaverkosto.

Hankkeessa saatujen tulosten perusteella jätteenpolton pohjakuona on lähtökohtaisesti erinomainen uusioraaka-aine, jota jalostamalla saadaan talteen arvo-metalleja ja tuotetaan muita hyödynnettäväksi soveltuvia materiaali-jakeita. Samalla jalostusprosessilla ei kuitenkaan saada kuonasta sekä arvoaineita mahdollisimman hyvin talteen että valmisteta hyvää maarakentamiseen soveltuvaa aggregaattia, vaan molempia jalostuksen ”päätuotteita” varten jalostusprosessi tulee suunnitella ja optimoida erikseen. Keskeistä tässä on siten yksikköprosessien ja koko prosessin optimointi ja kannattavuuden kannalta haasteellisten jakeiden, kuten hienoaineksen, jatkokäsittely ja hyödyntäminen.

Tommi Kaartinen, Jutta Laine-Ylijoki, Auri Koivuhuhta, Tero Korhonen, Saija Luukkanen, Pekka Mörsky, Raisa Neitola, Henna Punkkinen & Margareta Wahlström. Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi [Refining of bottom ash from municipal solid waste incineration]. Espoo 2010. VTT Tiedotteita – Research Notes 2567. 98 p. + app. 8 p.

Keywords waste incineration, bottom ash, processing, utilization, earth construction, enrichment

Abstract

New kinds of slags and ashes will be created by waste incineration, which will become more common in Finland in the near future. The processing of these slags and ashes will contribute significantly to the operating costs of incineration plants, and will burden landfill sites when dumped unutilised. Waste legislation requires, where possible, the utilisation of slags and ashes, and the new National Waste Plan emphasises the efforts to improve waste recycling. Numerous ongoing national and EU-level development activities are engaged in increasing the utilisation of waste materials. In 2006, Finland adopted the Government Decree (591/2006) “concerning the recovery of certain wastes in earth construction”. The aim is to expand its scope to include more waste materials. The bottom ash formed as a result of waste incineration is seen as one such new recovered material, which would fall under the Decree and would also be included in the National Waste Plan. According to estimates, the future yearly production of these in Finland would be approximately 200,000 tonnes. The Tekes-funded project in question aimed at improving the utilisation of waste incineration bottom ash in earth construction, by refining it with technologies used in ore enrichment and by using these to develop new, innovative waste material recycling and processing technologies. The project examined cost-effective applications suitable for bottom ash and the processing possibilities for improving the conditions for utilisation of earth construction. In addition, the project compiled an international network of experts focusing on bottom ash processing.

The project results indicate that, in principle, waste incineration bottom ash is an excellent recovered raw material, giving up precious metals as well as other materials suitable for reuse. However, as this same bottom ash refining process is unsuitable for optimum recovery of precious materials and for producing good aggregate suitable for earth construction, the production process for both “main products” should be designed and optimised separately. Central to this, therefore, is the optimisation of both the unit processes and the entire process, as well as the further processing and utilisation of challenging materials – from a viability point of view – such as fine particles.

Alkusanat

Tämän Tekesin (Tekes – teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus) rahoittaman hankkeen tavoitteena oli parantaa jätteenpolton pohjakuonan maarakentamishyötykäyttömahdollisuuksia jalostamalla kuonaa malmien rikastuksessa käytettyjen teknologioiden pohjalta ja kehittämällä siten uusia, innovatiivisia jättemateriaalien kierrätys- ja jalostusteknologioita. Hankkeessa selvitettiin pohjakuonalle soveltuvia kustannustehokkaita käyttökohteita ja prosessoinnin mahdollisuuksia parantaa maarakentamishyötykäytön edellytyksiä. Lisäksi hankkeessa koottiin pohjakuonan jalostamiseen keskittynyt kansainvälinen asiantuntijaverkosto.

Tutkimusta rahoittivat Tekesin lisäksi Ekokem-Palvelu Oy, JLY – Jätelaitosyhdistys ry, Kaakkois-Suomen Hankintarengas – KSHR, Lassila & Tikanoja Oyj, Outotec Minerals Oy, YIT Rakennus Oy, GTK ja VTT.

Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt: Anna-Maija Pajukallio, ympäristöministeriö, puheenjohtaja; Lassi Hietanen, Lassila & Tikanoja Oyj; Harri Lehto, Outotec Minerals Oy; Antti Leiskallio, KHSR:n psta Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy; Esa Nummela, Jätelaitosyhdistys ry; Tapio Strandberg, YIT Rakennus Oy; Asko Vesanto, Tekes; Jan Österbacka, Ekokem-palvelu Oy; Pekka Mörsky, GTK; Esa Mäkelä, VTT; Jutta Laine-Ylijoki, VTT, sihteeri.

Tutkimuksen vastuullisena johtajana toimi Esa Mäkelä VTT:stä ja projekti-päällikkönä toimi erikoistutkija Jutta Laine-Ylijoki VTT:stä. Tutkimusryhmässä olivat mukana VTT:stä tutkija Tommi Kaartinen ja erikoistutkija Margareta Wahlström sekä GTK:sta erikoistutkija Pekka Mörsky, johtava tutkija Saija Luukkanen ja tutkija Tero Korhonen.

Espoo, joulukuussa 2010

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
1. Tausta ja tavoitteet.....	9
2. Pohjakuonan prosessoinnin toimintaympäristö	11
2.1 Lainsäädäntö ja muut vaatimukset	11
2.2 Jäteluokitus ja sen vaikutus käsittelyyn	14
2.3 Hyödyntämisen toimintakonseptit	14
2.3.1 Hyödyntäminen luvanvaraisesti	15
2.3.2 Hyödyntäminen ilmoitusmenettelyllä.....	16
2.3.3 Tuotteistaminen	16
2.3.4 Rakennustuotteiden CE-merkintä ja REACH-asetus.....	18
2.4 Kuonan prosessoinnin ominaispiirteitä ja taloudellisia näkökohtia	19
3. Pohjakuonan prosessointi.....	21
3.1 Tuotanto ja keskeiset ominaisuudet	21
3.1.1 Koostumus ja ympäristöominaisuudet	22
3.1.2 Tekniset ominaisuudet	24
3.2 Prosessointitekniikat	26
3.2.1 Ikäännytytys.....	27
3.2.2 Metallien fysikaalinen erottelu.....	28
3.3 Prosessointikonsepteja.....	28
3.3.1 Ruotsalainen kuiva käsittelyprosessi (Grönholm 2008).....	29
3.3.2 Belgialainen märkä käsittelyprosessi (Bobelyn 2010).....	31
3.4 Kuonajalosteen käyttö maarakentamisessa	32
3.4.1 Nykytilanne muutamissa maissa.....	33
3.4.2 Potentiaaliset käyttökohteet	34
4. Esimerkkikuonan prosessointi	37
4.1 Tutkimusohjelma.....	37
4.2 Tutkimusmenetelmät	39
4.2.1 Mineralogia	39
4.2.2 Ympäristöominaisuudet	39
4.2.3 Maarakennustekniset tutkimukset.....	41
4.2.4 Esimerkkikuona ja sen ominaisuudet.....	42
4.2.5 Poltettava jäte	43
4.2.6 Esimerkkikuonan ominaisuudet	44
4.3 Käytetyt prosessointitekniikat	48
4.3.1 Näytteen esikäsittely	48
4.3.2 Mekaanis-fysikaaliset tekniikat.....	49
4.3.2.1 Seulonta.....	49
4.3.2.2 Magneettierotus	50

4.3.2.3	Eddy Current -erotus.....	51
4.3.2.4	Painovoimaerotus ja vaahdotus.....	51
4.3.3	Bioliuotus.....	52
4.3.3.1	Mikrobien kasvatus.....	52
4.3.3.2	Ravistelupullokokeet.....	52
4.3.3.3	Analyysit.....	53
4.3.4	Ikäännyttäminen.....	54
4.4	Prosessointikokeiden tulokset.....	55
4.4.1	Massataseet ja saannot.....	55
4.4.2	Magneettisten metallien talteenotto.....	56
4.4.3	Ei-magneettisten metallien talteenotto.....	58
4.4.4	Painovoimaerotus.....	61
4.4.5	Vaahdotus.....	62
4.4.6	Bioliuotus.....	66
4.4.7	Prosessiveden ominaisuudet.....	71
4.4.8	Ikäännytytys.....	72
4.4.9	Fraktioiden mineralogia ja koostumus.....	74
4.4.9.1	Vaahdotuksen tuotteet.....	74
4.4.9.2	Tärypöytäerotuksen tuotteet.....	78
4.4.10	Käsittelyfraktioiden ympäristöominaisuudet.....	78
4.4.10.1	Fysikaalisesti erotellut fraktiot.....	79
4.4.10.2	Ikäännytetty kuona.....	80
4.5	Lopputuotteen ominaisuudet ja hyötykäyttökelpoisuus.....	80
4.5.1	Ympäristöominaisuudet.....	80
4.5.2	Tekniset ominaisuudet.....	82
4.6	Jalostusprosessin toimivuuden arviointi.....	83
4.6.1	Yksikköprosessien toimivuus, hyöty ja vaikutus kuonan ominaisuuksiin.....	83
4.6.1.1	Kuonan esikäsittely.....	83
4.6.1.2	Metallien erottelu.....	83
4.6.1.3	Painovoimaerotus.....	84
4.6.1.4	Vaahdotus.....	84
4.6.1.5	Bioliuotus.....	85
4.6.1.6	Ympäristökelpoisuus.....	85
4.6.2	Kustannustarkastelu.....	85
5.	Kuonan jalostusprosessin suunnittelu ja malliprosessi.....	89
5.1	Kuonan karakterisointi ja esikäsittely.....	89
5.2	Yksikköprosessien valinta.....	89
5.3	Malliprosessit ja niiden tarkastelu.....	90
6.	Kuonien jalostuksen ja hyödyntämisen tulevaisuudennäkymät.....	95
	Lähdeluettelo.....	97

Liitteet

LIITE A: Prosessivesikokeiden tulokset

LIITE B: "Lopputuotteen" maarakennustekniset ominaisuudet

1. Tausta ja tavoitteet

Lähitulevaisuudessa yleistyvän jätteenpolton myötä syntyy Suomessakin uudenlaisia kuonia ja tuhkia, joiden käsittely vaikuttaa merkittävästi polttolaitoksen käyttökustannuksiin ja jotka läjitettyinä, ilman hyötykäyttöä, kuormittavat kaatopaikkoja. Jätelainsäädäntö edellyttää mahdollisuuksien mukaan kuonien ja tuhkien hyödyntämistä ja uusi valtakunnallinen jättesuunnitelma painottaa toimia jätteiden kierrätyksen tehostamiseksi. Jättemateriaalien hyötykäytön tehostamiseksi onkin meneillään lukuisia sekä kansallisia että EU-tason kehittämistoimia. Vuonna 2006 Suomessa hyväksyttiin asetus (591/2006) ”Eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa”, jonka soveltamisalaa on tavoitteena laajentaa nykyistä useampiin jättemateriaaleihin. Yhtenä tällaisena uutena, asetuksen piiriin soveltuvana uusiomateriaalina, myös valtakunnallisessa jättesuunnitelmassa, nähdään jätteenpoltossa muodostuva pohjatuhka ja -kuona, jota arvioidaan Suomessa muodostuvan tulevaisuudessa noin 200 000 t/a.

Jätteenpolton pohjakuonan tekniset ominaisuudet maarakentamisessa vastaavat luonnonmateriaaleja ja kuonaa voitaisiinkin ominaisuuksiensa puolesta käyttää uusiomateriaalina korvaamaan hiekkaa, soraa ja mursketta, esimerkiksi erilaisissa maa- ja päällysrakenteissa. Sellaisenaan, ilman jalostusprosessia, pohjakuona ei hyötykäyttöön kuitenkaan sovellu, vaan materiaalikäyttö edellyttää VTT:n aiempien Tekesin rahoittamien tutkimusten perusteella ainakin fysikaalista esikäsitteilyä ja ympäristökelpoisuuden parantamiseen liittyen usein myös välivarastointia eli ikäännyttämistä sellaisenaan tai tehostetusti. Jättemateriaalien jalostukseen voidaan myös suhteellisen helposti soveltaa ja siirtää malmien rikastuksessa yleisesti käytettäviä prosessointiteknologioita, joihin Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) Mineraalitekniikan laboratorio on erikoistunut sekä laboratorio- että pilotmittakaavassa.

Tämän Tekesin rahoittaman hankkeen tavoitteena oli parantaa jätteenpolton pohjakuonan maarakentamishyötykäyttömahdollisuuksia jalostamalla kuonaa malmien rikastuksessa käytettyjen teknologioiden pohjalta ja kehittämällä siten

1. Tausta ja tavoitteet

uusien, innovatiivisten jättemateriaalien kierrätys- ja jalostusteknologiaita. Hankkeessa selvitettiin pohjakuonalle soveltuvia kustannustehokkaita käyttökohteita ja prosessoinnin mahdollisuuksia parantaa maarakentamishyötykäytön edellytyksiä. Lisäksi hankkeessa koottiin pohjakuonan jalostamiseen keskittynyt kansainvälinen asiantuntijaverkosto.

2. Pohjakuonan prosessoinnin toimintaympäristö

2.1 Lainsäädäntö ja muut vaatimukset

Kaikessa jätteiden käsittelyssä, jalostuksessa ja käytössä lähtökohtana on lainsäädännön velvoitteiden täyttyminen. Käsittely ja käyttö eivät saa aiheuttaa maaperän tai pohjaveden pilaantumisen vaaraa tai muuten vaarantaa terveyttä tai ympäristöä. Koko käyttöketjun aikaiset ympäristövaikutukset täytyy huomioida kattaen kuonien esikäsittelyn, kuljetukset, mahdollisen välivarastoinnin, käytön ja käytön jälkeiset toiminnot. Ympäristölainsäädäntö ei aseta velvoitteita materiaalien teknisille ominaisuuksille.

Kuonia koskevat tärkeimmät säädökset ovat ympäristönsuojelulaki (86/2000) ja -asetus (169/2000), jätelaki ja -asetus (1072/1993, 1390/1993), ympäristöministeriön asetus yleisimpien jätteiden ja ongelmajätteiden luetteloista (1129/2001), valtioneuvoston päätös ongelmajätteistä annettavista tiedoista sekä ongelmajätteiden pakkaamisesta ja merkitsemisestä (659/1996) sekä valtioneuvoston päätös kaatopaikoista (861/1997). Lisäksi jätteenpolttoasetuksen (362/2003) mukaan jätteenpolttolaitoksessa on saavutettava sellainen polttotaso, että kuonassa ja pohjatuhkassa olevan orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC) on alle kolme prosenttia tai niiden hehikutushäviö (LOI) alle 5 prosenttia aineen kuivapainosta.

Suomessa jätteen kaatopaikkakelpoisuutta säätelee valtioneuvoston päätös kaatopaikoista (Vnp 861/97), joka on annettu Euroopan unionin kaatopaikkadirektiiviin (99/31/EY) perustuvasti. Valtioneuvoston päätöksessä esitetään yleinen ohjeistus jätteiden kaatopaikkakelpoisuuden arvioimiseksi ja ne rajoitukset, jotka koskevat jätteiden sijoittamista kaatopaikoille. Tämä kelpoisuuden osoittamismenettely koskee kaikkia jätteitä. Kaatopaikkapäätöstä on muutettu vuonna 2006 asetuksella (202/2006), jossa on säädetty mm. sitovat raja-arvot pysyvän jätteen kaatopaikalle, ongelmajätteen kaatopaikalle sekä käsiteltyä ongelmajätettä vastaanottavalle tavanomaisten jätteiden kaatopaikalle sijoitettaville jätteille

2. Pohjakuonan prosessoinnin toimintaympäristö

(taulukko 1). Lisäksi tavanomaiset kipsipohjaiset materiaalit olisi sijoitettava ainoastaan sellaisiin kaatopaikan osiin, joihin ei hyväksytä biohajoavaa jätettä. Sitovat raja-arvot eivät koske muita tavanomaisia jätteitä, kuten sekalaista jätettä, jossa on sekä orgaanista että epäorgaanista ainesta eivätkä jätteiden hyötykäyttöä esim. kaatopaikkarakenteissa, kaatopaikka-alueilla tai maarakennuskohteissa.

Jätteen käsittelyssä on myös otettava huomioon pysyvien orgaanisten yhdisteiden (ns. POP-yhdisteet) kohdalla Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (805/2004/EY) pysyvistä orgaanisista yhdisteistä sekä direktiivin (79/117/EY) muuttamisesta. Asetuksessa on säädetty raja-arvopitoisuudet, joiden ylittyessä jätteet on pääsääntöisesti käsiteltävä siten, että POP-yhdisteet tuhoetaan tai muunnetaan palautumattomasti. Raja-arvo torjunta-aineille (aldriini, dieldriini, endriini, DDT, heptakloori, klordaani, mirex, toksafeeni, heksaklooribentseeni) ja PCB-yhdisteille on 50 mg/kg sekä dioksiineille ja furaaneille 15 µg/kg toksisuusekvivalenttina (TEQ).

2. Pohjakuonan prosessoinnin toimintaympäristö

Taulukko 1. Yhteenveto VNp:n (861/1997, muutos 202/2006) liitteen 2 kaatopaikkakelpoissuuskriteereistä.

Jäteluokka	Yksikkö	Pysyvän jätteen kaatopaikka	Tavanomaisen epäorgaanisen jätteen kaatopaikka, johon voidaan sijoittaa käsiteltyä ongelmajätettä	Ongelmajätteen kaatopaikka
Liukoisuusominaisuudet L/S-suhteessa 10 Testimenetelminä: CEN/TS14405 ja SFS-EN 12457				
Arseeni	mg/kg	0,5	2	25
Barium	mg/kg	20	100	300
Kadmium	mg/kg	0,04	1	5
Kromi (kok.)	mg/kg	0,5	10	70
Kupari	mg/kg	2	50	100
Elohopea	mg/kg	0,01	0,2	2
Molybdeeni	mg/kg	0,5	10	30
Nikkeli	mg/kg	0,4	10	40
Lyijy	mg/kg	0,5	10	50
Antimoni	mg/kg	0,06	0,7	5
Seleeni	mg/kg	0,1	0,5	7
Sinkki	mg/kg	4	50	200
Kloridi, Cl ⁻	mg/kg	800	15 000	25 000
Fluoridi, F ⁻	mg/kg	10	150	500
Sulfaatti, SO ₄ ²⁻	mg/kg	1 000 ²⁾	20 000	50 000
Fenoli-indeksi	mg/kg	1		
Liuenut orgaaninen hiili, DOC ¹⁾	mg/kg	500	800	1 000
Liuenneiden aineiden kokonaisuusmäärä, TDS ³⁾	mg/kg	4 000	60 000	100 000
Kokonaispitoisuudet				
Hehkutushäviö 550°C	%			10 ⁴⁾
TOC	%	3 ⁵⁾	5 ^{6), 7)}	6 ⁷⁾
BTEX	mg/kg	6		
PCB-yhdisteet (7 kongeneeria ⁸⁾)	mg/kg	1		
Mineraaliöljy (C10-C40)	mg/kg	500		
PAH-yhdisteet (EPA16)	mg/kg	40		
Muut ominaisuudet				
pH			> 6	
Haponneutralointikapasiteetti (ANC)			Tutkittava ja arvioitava	Tutkittava ja arvioitava

- 1) mitattu säädetyssä (neutraalissa) pH-arvossa
- 2) vaihtoehtoisesti läpivirtaustestin ensimmäisen fraktion (L/S 0,1) sulfaattipitoisuus enintään 1 500 mg/l ja sulfaatin liukoisuus L/S-suhteessa 10 on enintään 6 000 mg/kg
- 3) liuenneiden aineiden kokonaisuusmäärän arvoja voidaan käyttää sulfaatti- ja kloridiarvojen sijasta
- 4) käytettävä joko hehkutushäviötä tai orgaanisen hiilen kokonaispitoisuutta (TOC)
- 5) maaperälle voidaan sallia korkeampi raja-arvo, jos liukoisuustestissä liuenneelle DOC:lle esitetty enimmäispitoisuus täytyy
- 6) koskee myös jätettä, joka sijoitetaan kipsipohjaisten jätteiden yhteyteen
- 7) jätteelle voidaan sallia korkeampi raja-arvo, jos liukoisuustestissä liuenneelle DOC:lle esitetty enimmäispitoisuus täytyy
- 8) PCB-kongeneerien 28, 52, 101, 118, 138, 153 ja 180 kokonaisuusmäärä

2.2 Jäteluokitus ja sen vaikutus käsittelyyn

Jätteet luokitellaan tavanomaiseksi jätteeksi tai vaaralliseksi jätteeksi (uudessa jätedirektiivissä 2008/98/EY ongelmajätteelle käytetty nimitys) niiden syntyvän, koostumuksen tai muun tekijän pohjalta. Jätteen luokitus vaikuttaa jätteen koko käsittelyketjuun aina varastoinnista ja kuljetuksesta loppusijoitukseen sekä niille asetettaviin vaatimuksiin. Kaatopaikalle saa sijoittaa vain sen luokituksen mukaisia jätteitä, ellei lainsäädännössä ole toisin määrätty kuten on stabiilin ongelmajätteen (vaarallisen jätteen) kohdalla. Jätteen kaatopaikkakelpoisuutta ei voida arvioida jäteluokituksen mukaan, vaan kaatopaikkakelpoisuus on aina arvioitava erikseen. Vaarallista jätettä voidaan esikäsitellä vaarattommaksi esimerkiksi kemiallisesti, jolloin sen sijoitus tähän tarkoitukseen varatulle tavanomaisen jätteen kaatopaikalle on mahdollista.

Vaarallisella jätteellä tarkoitetaan jätettä, joka kemiallisen tai muun ominaisuutensa takia voi aiheuttaa erityistä vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle. Jätehuollossa Suomessa on käytössä ympäristöministeriön luokittamisesta antama asetus yleisimpien jätteiden ja ongelmajätteiden luettelosta. Se pohjautuu EY:n komission päätökseen Euroopan jäteluettelosta (1129/2001). Vaarallisen jätteen hyötykäyttö on jätelain mukaan mahdollista, jos se on jätteiden hyödyntämisen tai käsittelyn kannalta välttämätöntä ja se voidaan tehdä aiheuttamatta terveydelle tai ympäristölle vaaraa tai haittaa. Käytännössä vaaralliseksi jätteeksi luokitellun jätteen hyötykäyttö esimerkiksi maarakentamiskohteissa on tuskin mahdollista ilman jätteen prosessointia ja ominaisuuksien parantamista mm. stabiloinnilla.

Vaaralliseksi jätteeksi luokittelu tapahtuu EY:n jäteluettelon tai jätteen sisältämien vaarallisten aineiden ja niistä aiheutuvien vaaraominaisuuksien perusteella. EY:n jäteluettelon uusiminen on tällä hetkellä menneillään komissiossa. Jäteluettelon uudistamistyön myötä luokittelussa sovellettavien jätteiden vaaraominaisuuksien kriteerit todennäköisimmin jossain määrin kiristyvät, kun vaaraominaisuudelle ”haitallinen” ja ”ympäristölle vaarallinen” annetaan sitovat kriteerit.

2.3 Hyödyntämisen toimintakonseptit

Vaatimukset jätemateriaalien hyödyntämiseen ja siihen liittyvien haitallisten ympäristövaikutusten vähentämiseen määritellään lainsäädännön ja ympäristöpoliittisten tavoitteiden kautta. Jätteen hyödyntämisen ensisijaisena tarkoituksena on vähentää luonnonvarojen käyttöä ja syntyvän jätteen määrää. Toisaalta on pyrittävä varmistamaan, että hyödyntämisestä ei aiheudu vaaraa ympäristölle tai ihmisen terveydelle.

Jättemateriaalin on usein vaikea kilpailla markkinoilla, jos se soveltuu vain alemmpitasoisiin käyttökohteisiin, joihin usein löytyy käyttökohteen lähetyviltä ominaisuuksiltaan yhtä hyviä tai parempia luonnonmateriaaleja. Huonolaatuisen materiaalin käyttö voi kuitenkin aiheuttaa lisäkustannuksia ja ympäristökuormituksia, jos rakenne joudutaan korjaamaan ennen aikaisesti. Siksi on tärkeää, että uusiomateriaalin teknisiä ominaisuuksia tarkastellaan aina osana hyödyntämiskelpoisuuden arviointia. Hyötykäytettävät jättemateriaalit ja hyödyntämiskohteet tulisivatkin valita siten, että toiminnalla saavutettavat ympäristöhyödyt ovat mahdollisimman suuret. Valinnan tulee pohjautua kokonaisvaltaisiin elinkaariarvioiteihin (LCA). Elinkaaripohjaisissa tarkasteluissa otetaan huomioon jätteen jalostus- ja hyödyntämisketjun aikana syntyvät ympäristövaikutukset, mutta myös jätteillä korvattavien neitseellisten materiaalien käyttämättä jättäminen ja siten syntymättä jäävät ympäristövaikutukset. Elinkaaripohjaiset tarkastelut kuuluvat näin ollen olennaisena osana mm. jalostus- ja tuotteistamisprosesseihin.

2.3.1 Hyödyntäminen luvanvaraisesti

Lainsäädännössä jätteen ammattimainen hyödyntäminen on lähtökohtaisesti ympäristölupavaraisista toimintaa, jolloin hyödyntämisen ympäristövaikutukset ja jättemateriaalin ympäristökelpoisuus arvioidaan tapauskohtaisesti sekä materiaalin että sijoituskohteen ominaisuuksien perusteella. Merkittävimpiä lakeja ja säädöksiä, jotka on otettava huomioon kuonien hyötykäytössä, ovat ympäristönsuojelulaki (86/2000) ja ympäristönsuojeluasetus (169/2000) sekä jätelaki (1072/1993) ja jäteasetus (1390/1993). Jätteen laitospäiseen tai ammattimaiseen hyötykäyttöön, tarvitaan eräitä poikkeuksia lukuun ottamatta ympäristönsuojelulain (86/2000) 28 §:n mukainen ympäristölupa. Ympäristölupaa haetaan kunnan ympäristölupaviranomaiselta, jos vuosittain käsiteltävä tai hyödynnettävä määrä on alle 10 000 tonnia ja aluehallintoviranomaiselta, jos määrä on 10 000 tonnia tai sen yli.

Lupaprosessissa käytettävää arviointimenettelyä ja ympäristökelpoisuuden arviointikriteerejä ei ole kuitenkaan erikseen määritelty, vaikka eri säännösten perusteella arviointia koskevatkin tietyt yleisperiaatteet ja reunaehdot. Kohdekohtainen ympäristölupamenettely voi mahdollistaa sellaisten, suurienkin yksittäisten jättemateriaalien hyödyntämisen, joiden tuotteistaminen tai lupavelvollisuudesta vapauttaminen ei olisi käytännössä mahdollista.

2. Pohjakuonan prosessoinnin toimintaympäristö

2.3.2 Hyödyntäminen ilmoitusmenettelyllä

Lainsäädännössä on annettu myös poikkeuksia hyödyntämisen luvanvaraisuuteen. Ympäristölupavelvollisuus ei esimerkiksi koske jätteitä, joiden käyttö on valtioneuvoston eräiden jätteiden maarakennuskäyttöä koskevan asetuksen (591/2006) eli ns. MARA-asetuksen mukaista. Asetuksen soveltamisalaan kuuluvat toistaiseksi betonimurske sekä kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lento- ja pohjatuhkat sekä leijupetihiekka. Asetuksen soveltamisala koskee asetuksessa määriteltyjä käyttökohteita ja siinä on annettu myös muita sijoitusta ja hyödyntämISRakenteita koskevia ehtoja. Asetuksen liitteessä esitetään jätteille materiaaliikohtaiset pitoisuus- ja liukoisuusraja-arvot, joiden perusteella niiden ympäristökelpoisuus arvioidaan. Asetuksessa säädetään yleiset vaatimukset myös jätteen laadunhallinnalle. Jos materiaalin käyttö täyttää asetuksen ehdot, hyödyntämisestä on tehtävä ilmoitus ympäristönsuojelun tietojärjestelmään merkitsemistä varten.

Ilmoitusmenettely koskee ainoastaan asetuksen soveltamisalassa määritettyjä käyttökohteita, joita ovat yleiset tiet kadut, pyörätiet ja jalkakäytävät, pysäköintialueet, ratapihat, urheilukentät sekä varastointikentät ja tiet teollisuusalueilla. Käyttökohde ei voi olla tärkeällä tai muulla vedenhankintaan soveltuvalla pohjavesialueella (pohjavesialueiden suojeluluokat I ja II). Jätettä sisältävän rakenteen enimmäispaksuus voi olla 150 cm, ja jätettä sisältävä rakenne on joko peitettävä tai päällystettävä. Rakenteen paksuutta rajoittamalla on haluttu estää hallitsemattomien läjitysalueiden syntyminen. Paksummille rakenteille voi kuitenkin hakea tarvittaessa ympäristölupaa. Päällystetyille kohteille on esitetty väljemmät liukoisuuden raja-arvot kuin peitetyille. Peittämisellä tarkoitetaan peittämistä vähintään 10 cm kerroksella soraa, hiekkaa tai vastaavaa materiaalia ja päällystämällä päällystämistä asfaltilla tai muulla heikosti vettä läpäisevällä materiaalilla.

Poikkeus luvanvaraisuudesta on annettu tietyin edellytyksin myös maa- ja metsätalouden kasviperäisen jätteen, pilaantumattoman maa- ja kiviainesjätteen sekä vaarattoman tuhkan, kuonan ja sakokaivolietteen hyödyntämiseen.

2.3.3 Tuotteistaminen

EY-säädösten mukaan materiaalit ovat aina joko jätteitä tai tuotteita. Tuotteistamisella hyödyntämiskelpoisia jätemateriaaleja pyritään saamaan ensisijaisesti pois jättesäätelyn piiristä, jolloin ne siirtyvät tuotelainsäädännön ja REACHin piiriin. Tuotteistamisena voidaan kuitenkin pitää myös jätemateriaalin hyödyn-

2. Pohjakuonan prosessoinnin toimintaympäristö

tämistä helpottavia toimenpiteitä, joiden avulla materiaalia voidaan hyödyntää tuotteen omaisesti, mutta jätesäännöksiä noudattaen.

Uusi EU:n jätedirektiivi antaa tuotteistamiseen uusia elementtejä. Vaikka jätteen määritelmä säilyy ennallaan, direktiivi sisältää menettelyt, joiden avulla voidaan täsmentää, milloin tiettyyn jätevirtaan kuuluva jäte ei ole enää jätettä (ns. EOW- eli end of waste -kriteerit) sekä EY-tuomioistuimen ratkaisujen pohjalta kehitetyt sivutuotekriteerit. Direktiivi pannaan kansallisesti toimeen jätelain kokonaisuudistuksen yhteydessä. Uudistusta koskeva hallituksen esitys on tar koitus antaa eduskunnalle lokakuussa 2010.

Harmonisoitu EOW-menettely koskisi käytännössä todennäköisesti vain viittä tai kuutta jätemateriaalia, kuten metalliromua, keräyslasia, keräyspaperia, rakennus- ja purkujätteitä sekä eräitä tuhkia ja kuonia. Harmonisoitujen kriteerien puuttuessa voitaisiin laatia myös kansallisia kriteerejä, jotka tulee kuitenkin ennakonotifioitava komissiolle.

Työ EOW-kriteerien laatimiseksi on EU:ssa käynnistynyt ja komission alainen Joint Research Centre (JRC) on julkaissut kaksi taustaselvitystä. Toisessa tarkastellaan metodologiaa, jossa esimerkkeinä ovat aggregaatit (kiviainekset), komposti ja romumetallit. Tässä komissio antoi heinäkuussa 2010 ehdotuksensa asetukseksi alumiini- sekä rauta- ja teräsromun EOW-kriteereistä. Asetus olisi kaikilta osiltaan velvoittava, ja sitä sovellettaisiin sellaisenaan. Ehdotettujen arviointiperusteiden hyödyntäminen olisi kuitenkin vapaaehtoista. Romumetallin tuottaja voisi asetuksen voimaatulon jälkeenkin niin halutessaan edelleen toimittaa metallin hyödynnettäväksi jätteenä jätelainsäädäntöä ja sen edellyttämiä menettelyjä noudattaen.

Toinen selvitys käsittelee materiaalivalintaa ja sen perusteita. Materiaaliryhmät on jaettu kahteen osaan. Ryhmän I.1 materiaalit kuten romumetalli, lasi, tekstiili ja paperi päätyvät teollisuuden prosesseihin, jolloin niiden ympäristöriskit ovat hyvin hallittavissa. Ryhmän I.2 materiaalit kuten esimerkiksi rakennusjätteet, tuhkat ja kuonat joutuvat käyttökohteissaan suoraan kontaktiin ympäristön kanssa. Ryhmän 1.2 kriteerien kehittämisessä joudutaan näin ollen aina arvioimaan tarve asettaa haitallisille aineille raja-arvoja.

EOW-menettely sisältää aina vaikutusarvion, jolla tarkoitetaan tietylle materiaalille ehdotettujen End of Waste -kriteerien vaikutusten arviointia. Vaikutusarvioissa otetaan huomioon lainsäädäntö, talous, markkinat sekä yhteiskunta ja ympäristö. Ympäristö- ja terveysvaikutusten analysoinnissa tarkastellaan hyötykäytön kokonaisvaikutuksia elinkaariperiaatteen mukaisesti. Elinkaariarvioinnissa tunnistetaan tuotteen merkittävimpien käyttövaihtoehtojen koko käyttöketjun

2. Pohjakuonan prosessoinnin toimintaympäristö

aikaiset ympäristökuormitukset ja luonnonvarojen käyttö. Tuotteen hyötykäytön vaihtoehtona tarkastellaan myös luonnonmateriaalien käyttöä vastaavassa kohteessa. Tämä tarkastelu ei johda ympäristökelpoisuuskriteereihin, mutta näitä tietoja voidaan hyödyntää taustatietoina arvioitaessa hyödyntämisen edut ja riskit.

Tuotteistaminen voi tapahtua myös jätedirektiivissä esitettyjen sivutuotekriteerien avulla. Sivutuotekriteerien osalta ei ole toistaiseksi olemassa yleistä eurooppalaista metodologiaohjetta. Menettely ei kuitenkaan ole samalla tavalla uusi kuin EoW-konsepti, sivutuote/jäte – vaan tulkintaa on jo aikaisemminkin tehty mm. ympäristö lupapäätöksissä sekä Euroopan yhteisön tuomioistuimen ratkaisujen pohjalta.

2.3.4 Rakennustuotteiden CE-merkintä ja REACH-asetus

EU uudistaa parhaillaan rakennustuotedirektiiviään. Se muutetaan asetukseksi, joka velvoittaa kaikkia jäsenmaita. Käytännössä tämä tarkoittaa, että rakennustuotteiden, kuten myös sivutuotetta sisältävien rakennustuotteiden CE-merkintä yleistyy merkinnän tullessa pakolliseksi tuotteille, joille on olemassa harmonisoitu tuotestandardi (hEN). Tulevaisuudessa CE-merkinnässä on huomioitava myös rakennustuotteiden ympäristöominaisuuksia käyttökohteessa, kuten esimerkiksi säänneltyjen aineiden liukenemista ulkokäytössä olevista rakennustuotteista. Komission mandaatin pohjalta rakennustuotteille laaditaan harmonisoidut liukoisuustestit. Jätepohjaisten tuotteiden tutkimuksissa jo vakiintuneisiin menetelmiin ei kuitenkaan ole odotettavissa merkittäviä muutoksia, sillä harmonisoitujen testien lähtökohtana on ollut jättemateriaaleille jo aiemmin kehitetyt menetelmät.

CE-merkintään liittyy tärkeänä osana vaatimustenmukaisuuden osoittamismenettely (ns. ”Attestation of conformity”, AoC), jossa osoitetaan tarvittavat menetelmät sekä alkututkimuksiin että laadunvalvontaan. Menettelyssä osoitetaan myös eri osapuolten tehtävät, mm. kolmannen osapuolen suorittama varmentaminen, tarkastus ja testaus. Tämä järjestelmä on mielenkiintoinen UUMA-materiaalien kannalta, sillä jätteen tuotteistaminen tulee todennäköisesti edellyttämään useimpien materiaalien osalta jatkuvaa laadunvalvontaa. Tärkeä osa laadunvalvontaa on myös menettelyyn kytketty näytteenottostrategia. Nordic Innovation Centre (NICE) on julkaissut raportin rakennustuotteiden sisältämien säänneltyjen aineiden testauksesta ja testaustulosten käytöstä (Wahlström et al. 2009).

REACH-asetuksessa, jota tullaan soveltamaan sivutuotteille ja EOW-materiaaleille, tarkastelun lähtökohtana on aineen rekisteröintiin liittyvän altistusskenaarion luominen. Näiden materiaalien osalta riittää, että yksi valmistaja

tai maahantuojia rekisteröi aineen, koska jätteestä tuotettavaa ainetta ei tarvitse rekisteröidä, jos aine on sama kuin aikaisemmin rekisteröity ja toimintaa harjoittavalla yrityksellä on käytettävissään aikaisemmin rekisteröidyn aineen käyttöturvallisuustiedote. Mikäli käyttöturvallisuus-tiedotetta ei materiaalista tarvitse tehdä, käytettävissä on oltava muut REACH-asetuksen artiklan 32 mukaiset tiedot. (REACH artikkelit 2 kohta 7d ja artikla 32)

Yhtymäkohtina ympäristökelpoisuustutkimuksiin ovat erityisesti tarkasteltavat haitta-aineet, koska altistumisen arviointi on tehtävä silloin, jos aine on luokiteltu vaaralliseksi tai jos se määritellään PBT- tai vPvB-aineeksi (määritelmät: PBT = aine on hitaasti hajoava, biokertyvä ja myrkyllinen; vPvB = aine on erittäin hitaasti hajoava ja erittäin voimakkaasti biokertyvä). REACH-asetuksen altistusskenaariossa päähuomio on mahdollisten vaarojen tunnistamisessa ja torjunnassa, joten UUMA-materiaalien kelpoisuusarvioinnissa voidaan hyödyntää samoja altistusskenaarioita. REACH-asetuksen puitteissa riittää kuitenkin päästöjen arviointi yleisemmällä tasolla kuin kelpoisuusarvioinnissa. Lisäksi REACH-asetuksen piiriin ei sisälly tuotteille keskeistä laadunvalvontaelementtiä.

2.4 Kuonan prosessoinnin ominaispiirteitä ja taloudellisia näkökohtia

Kuonista puhutaan usein yhtenä materiaalityyminä, vaikka kyseessä on useiden tuottajien erilaisista raaka-aineista erilaisissa prosesseissa tuottama joukko kuonia. Jätteiden termisessä käsittelyssä myös vaihteleva polttoaine ja polttoprosessi vaikuttavat merkittävästi kuonan koostumukseen sekä tekniseen ja ympäristölaatuun. Siksi laitosten välisen vaihtelun lisäksi kuonan koostumus ja laatu vaihtelevat samallakin laitoksella.

Laatuvaihtelun ohella kuonan käsittelyssä on otettava huomioon, että kuonat syntyvät useissa eri tuottajien laitoksissa eri puolilla maata. Yksittäisten laitosten voimavarat ja kuonamäärät eivät yleensä riitä kuonan käsittelyn kehittämiseen, lopputuotteiden tuotteistamiseen ja markkinointiin. Tuotantolaitoksilla ei välttämättä aina ole riittävästi edes välivarastointi- ja esikäsittelykapasiteettia. Kuonan laatuun voitaisiin periaatteessa vaikuttaa myös ohjaamalla tuotantoprosessia ja vaikuttamalla sen raaka-aineiden laatuun, kuten yleensä päätuotteiden tuotantoprosessissa tapahtuukin. Jätteenpolttolaitoksella kuona on kuitenkin ensisijaisesti jätteen termisen käsittelyn sivuvirta, minkä vuoksi laadun parantamista prosessiin vaikuttamalla ei toistaiseksi juurikaan tehty.

2. Pohjakuonan prosessoinnin toimintaympäristö

Kuonan jalostuksen ja koko käsittelyprosessin kannattavuuden kannalta keskeisiä tekijöitä ovat prosessiin syötettävän materiaalin määrä sekä käsittelyn eri materiaali-jakeista saatava hinta ja/tai vaihtoehtoisen sijoituksen/käsittelyn kustannukset ja vastaanottajan vaatimukset. Käsittelyn tavoitteet tulisikin siten ottaa huomioon ja tavoiteltavat hyödynnettävät ja/tai talteen otettavat jakeet määrittellä jo käsittelyprosessin suunnittelussa ja yksikköprosessien valinnassa. Prosessi tulee siten suunnitella ja optimoida erikseen tavoiteltavia lopputuotteita silmällä pitäen. Jos kuonan kaatopaikkasijoituksesta joudutaan maksamaan eikä käsittelemättömälle kuonalle löydy sijoituskohdetta, käsittelyn kustannusvaikutukset ovat yleensä positiiviset. Jalostamisella saadaan yleensä myös parempilaatuinen lopputuote, jolla taas on paremmat edellytykset markkinoilla. Lisäksi jalostus mahdollistaa käyttäjien tuotekriteerien täyttymisen sekä kuonajakeiden käytön parhaiten soveltuvissa kohteissa ja näin parantaa käyttäjien luottamusta tuotteen laatuun.

Loppusijoituskustannusten noustessa eri materiaali-jakeiden ja metallien erotelu tulee kuitenkin todennäköisesti taloudellisesti yhä kannattavammaksi, varsinkin kun kuonavyörymien odotetaan jatkossa kasvavan ja metallien hintojen taas kohoavan. Tärkeää on myös löytää logistiset näkökohdat huomioon ottaen jalostusprosessille riittävä määrä syötettä. Esimerkkinä voidaan sanoa, että kun yksi jätteenpolttolaitos polttokapasiteetista riippuen tuottaa vuosittain 20 000–100 000 tonnia kuonaa, on metallurgisen kuonan jalostus ollut taloudellisesti kannattavaa jo 30 000–50 000 tonnin vuotuisilla määrillä.

Kuonan kuten muidenkin jätteiden käsittelyn kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi jäteverotus, jota ollaan juuri nyt uudistamassa. Valtiovarainministeriön heinäkuussa 2010 lausunnoille lähettämän jäteverolakiluonnoksen mukaan jäteveropohjaa laajennetaan jatkossa koskemaan myös yksityiset kaatopaikat. Myös verotettavien jätteiden määrä kasvaa. Verotettavat jätteet olisi lueteltu lain liitteessä. Liitteessä ovat mukana mm. termisissä prosesseissa syntyvät jätteet kuten polttolaitosten tuhkat ja kuonat, jotka loppusijoitetaan kaatopaikalle. Kaatopaikkarakenteissa hyödyntävät jätteet eivät kuitenkaan tulisi jatkossakaan verottaviksi. Ehdotus ei koskisi ongelmajätteitä. Ehdotuksen mukaan jätevero tulisi olemaan 40 euroa tonnilta jätettä (vuoden 2011 alusta alkaen) ja 50 euroa tonnilta (vuoden 2013 alusta alkaen).

3. Pohjakuonan prosessointi

3.1 Tuotanto ja keskeiset ominaisuudet

Nykyaikaiset jätteenpolttolaitokset tuottavat pohjakuonaa tyypillisesti 200–350 kg poltettua jätetonna kohti. Eurooppalainen lainsäädäntö sisältää vaatimuksia jätteenpolton kiinteiden jäännösjakeiden laadulle. Direktiivissä 2000/76/EC (Art. 6.1) on asetettu operatiiviset raja-arvot jätteenpolttolaitosten pohjatuhkien ja -kuonien orgaanisen aineksen määrälle mitattuna joko orgaanisen hiilen kokonaisuutena (TOC) tai hehikutushäviönä (LOI). Raja-arvo hehikutushäviölle on 5 % ja TOC:lle 3 %. Nykyaikaisissa yhdyskuntajätettä polttavissa laitoksissa pohjakuonan TOC-pitoisuus voi usein olla alle 1 %.

Pohjakuona koostuu useimmiten arinalle jääneestä palamattomasta ja sulaneesta aineesta ja arinan aukkojen läpi sulamisen tai pienen partikkelikoon vuoksi pudonneesta materiaalista (Chandler et al. 1997). Näitä kahta virtaa ei yleensä voida erottaa toisistaan.

Tyypillisesti pohjakuona jäädytetään välittömästi polttoprosessin jälkeen erillisissä sammutusaltaissa, minkä jälkeen kuona on vedellä kyllästynyt. Yhdyskuntajätteen polttolaitoksissa syntyvän tuoreen pohjakuonan vesipitoisuus vaihtelee tyypillisesti välillä 15–25 %. Veden läsnäolo on tärkeää pölyämisen estämiseksi, mutta se asettaa samalla haasteita kuonan fysikaaliselle jatkokäsittelylle. Nopean jäädyttämisen johdosta kuonasta muodostuu osin lasimainen materiaali. Pohjakuona on hyvin huokoista, kevyttä aggregaattimateriaalia, jolla on erittäin suuri ominaispinta-ala. Pohjakuonan kuivatiheys on noin 1 500 kg/m³, hienommalla jakeella (< 100 mm) tyypillisesti noin 1 500–2 000 kg/m³ ja karkealla jakeella (> 100 mm) noin 1 800–2 400 kg/m³ (Chandler et al. 1997, Wiles 1996).

Pohjakuonan sisältämien partikkelien raekoot jakautuvat laajalle alueelle. Kuonan raekokojakauma on keskeinen monien jatkokäsittelyjen, kuten metallien erottelun kannalta. Yleisesti pohjakuonan massasta 40 % voi olla raekooltaan alle 2 mm ja 80 % raekooltaan alle 10 mm.

3. Pohjakuonan prosessointi

Pohjakuonan kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet sekä määrät riippuvat käytettävän polttoaineen koostumuksesta ja laadusta. Polttotekniikalla ja -parametreilla, kuten lämpötilalla, palamisnopeudella ja ilman syötöllä, sekä kattiloiden kunnolla ja tuhkan talteenottojärjestelmillä on myös vaikutusta kuonan laatuun.

3.1.1 Koostumus ja ympäristöominaisuudet

Jätteenpolton pohjakuona on useimmiten heterogeeninen materiaali, joka sisältää vaihtelevina osuuksina lasia ja metalleja. Pohjakuonassa suurimpina pitoisuuksina esiintyviä yhdisteitä ovat piin ja alumiinin oksidit. Muita aineita ovat mm. alkali- ja maa-alkalimetallien yhdisteet, kloridit, sulfaatit, raudan ja muiden metallien yhdisteet ja palamaton orgaaninen aines.

Nielsenin (2010) mukaan pohjakuonalle tyypillinen koostumus on seuraava:

- 10 % magneettisia metalleja
- 2,5–3,0 % ei-magneettisia metalleja (alumiini, kupari ja messinki)
- 80–85 % kuonaa ja palamatonta epäorgaanista ainesta (lasia, keramiikkaa, kiviainesta)
- 1–3 % palamatonta orgaanista ainesta.

Alkuaineiden kokonaispitoisuuksia pohjakuonassa ja luonnonmaissa on esitetty taulukossa 2. Alkuaineita, joita kuonassa esiintyy yli 1 %:n pitoisuuksina ovat pii, rauta, kalsium, alumiini, natrium, hiili ja happi, joka on suurimpina pitoisuuksina esiintyvä alkuaine (n. 40 %). Noin 80–90 % pohjakuonan painosta muodostuu näistä alkuaineista. Monet ko. alkuaineista esiintyvät oksideina, mikä selittää hapen suuren osuuden kuonassa. Pienempinä pitoisuuksina (0,1–1 %) kuonassa esiintyviä alkuaineita ovat mm. titaani, kloori, mangaani, barium, kupari, magnesium, kalium, sinkki, kromi, lyijy ja nikkeli. Jotkin suurempina pitoisuuksina esiintyvät alkuaineet ja monet pienempinä pitoisuuksina esiintyvät alkuaineet (esim. lyijy, kupari, tina, kadmium ja elohopea) ovat rikastuneina kuonassa luonnonmaihin verrattuna (Kinnunen 2006).

Taulukko 2. Alkueineiden kokonaispitoisuuksia luonnonmaissa ja pohjakuonissa (Chandler et al. 1997).

Alkuaine	Normaali vaihteluväli luonnonmaassa (mg/kg)	Vaihteluväli pohjakuonassa (mg/kg)
Alumiini, Al	10 000–300 000	21 900–72 800
Antimoni, Sb	-	10–432
Arseeni, As	1–50	0,12–189
Barium, Ba	100–3 000	400–3 000
Elohopea, Hg	0,01–0,3	0,02–7,75
Kadmium, Cd	0,01–0,70	0,3–70,5
Kalsium, Ca	7 000–500 000	370–123 000
Kloori, Cl	20–900	800–4 190
Kromi, Cr	1–1 000	23–3 170
Kupari, Cu	2–100	190–8 240
Lyijy, Pb	2–200	98–13 700
Magnesium, Mg	600–6 000	400–26 000
Molybdeeni, Mo	0,2–5	2,5–276
Nikkeli, Ni	5–500	7–4 280
Rauta, Fe	7 000–550 000	4 120–150 000
Sinkki, Zn	10–300	613–7 770

Aineiden liukoisuus pohjakuonasta voi vaihdella huomattavasti poltetun jätteen ja polttotekniikan sekä -olosuhteiden seurauksena. Verrattuna kivimäisiin tai muihin inertteihin materiaaleihin erityisesti kuparin, sinkin, antimonin, lyijyn, molybdeenin kloridin, sulfaatin ja orgaanisen hiilen liukoisuus saattaa olla pohjakuonassa kohonnut.

Euroopassa pohjatuhkaa ja -kuonaa käsitellään yleensä tavanomaisena jätteenä. Yleensä pohjakuona täyttää tavanomaisen jätteen kaatopaikoille sijoitettaville jätteille asetetut kriteerit, mutta kaatopaikkakelpoisuuden kannalta edellisessä kappaleessa mainitut aineet voivat olla kriittisiä.

Mahdollinen kuonan hyötykäyttö edellyttää myös haitallisten aineiden liukoisuuden tuntemista. Pohjakuonista on olemassa melko paljon liukoisuustutkimuksia, mutta pH-muutokset pohjakuonassa tai käyttö- tai sijoitusolosuhteissa vaikuttavat myös liukoisuusominaisuuksiin.

3. Pohjakuonan prosessointi

3.1.2 Tekniset ominaisuudet

Pohjakuona koostuu viidestä partikkelityypistä: kuona, metalli, lasi, keraamiset materiaalit ja palamaton orgaaninen aines. Em. jakeiden suhteellinen osuus riippuu käytetyn polttotekniikan lisäksi mm. tarkasteltavasta raekokoluokasta. Vaikka käytetty tekniikka vaihtelee paljon polttolaitoksittain, voidaan kuonan koostumuksessa havaita selvä yleispiirre. Karkeimmat fraktiot koostuvat yleensä rakennusjätteestä, rautapitoisesta materiaalista, kuonan kappaleista ja palamatomasta yhdyskuntajätteestä. Lasin osuus on suurin 5–16 mm raekokoluokassa. Hienoin materiaali (< 5 mm) koostuu valtaosin kuonasta.

Pohjakuonan ominaisuuksien takia vain osa mineralogisesta koostumuksesta pystytään määrittämään. Tunnistettuja mineraaleja ovat mm. amorfinen lasi, kvartsi, kalsiitti, maasälvät, hematiitti, magnetiitti, diopsidi, wollastoniitti, dolomiitti ja savimineraalit. Tuore pohjakuona sisältää myös kalkkia ja portlandiittia, jotka karbonoituvat nopeasti kalsiitiksi tai muiksi vastaaviksi mineraaleiksi. Kuonan hienojakoinen osa sisältää vaihtelevia määriä sulfaatteja (esim. kipsi, anhydriitti, polyhaliitti), joiden olemassaolo on syytä huomioida niiden osallisuudessa uusien faasimuotojen syntymiseen. Esimerkiksi ettringiitin muodostuminen aiheuttaa paisumista. Pohjakuonan on havaittu sisältävän myös muutostuotteita (esim. geleniitti, larniitti ja tobermoriitti), jotka viittaavat potsolaanisiin reaktioihin. Näillä on merkitystä pohjakuonan tiivistymisominaisuuksiin (Izquierdo et al. 2001).

Pohjakuona on yleensä hyvin suhteistunutta, eli sen rakeisuuskäyrät ovat muodoltaan hyvin loivan S-kirjaimen muotoisia (Izquierdo et al. 2001). Rakeisuuskäyrien perusteella pohjakuonan raekokojakauma on siis jatkuva, hienoimpien partikkeleiden (< 63 µm) ja karkeiden rakeiden (> 40 mm) osuuden ollessa pieni. Raekokojakauma mahdollistaa materiaalin helpon tiivistettävyyden. Pohjakuona voidaan luokitella suhteistuneeksi materiaaliksi (esim. 0/40 mm). Useissa maissa pohjakuona seulotaan ennen hyötykäyttöön toimittamista käyttämällä esimerkiksi 50 mm:n seulaa. Tällöin seulan läpäisseen materiaalin raekokokäyrä vastaa hiekkaisen soran raekokokäyrää.

Kuonamateriaalin hienorakeisin osa koostuu pääosin kuonasta, joka on raemuodoltaan epäsäännöllistä ja kokonaisuudessaan hyvin huokoista. Huokoisuudesta seuraa suuri ominaispinta-ala. Myös muiden kuonamateriaalien raemuoto on epäsäännöllinen, lukuun ottamatta eräiden mineraalien kiteytymiä (Izquierdo et al. 2001).

Taulukossa 3 on esitetty yhteenvetoa pohjakuonan teknisistä ominaisuuksista.

3. Pohjakuonan prosessointi

Taulukko 3. Pohjakuonan teknisiä ominaisuuksia (Laine-Ylijoki et al. 2005).

	Espanja (Izquierdo et al. 2001)	Ruotsi (Arm 2003)	Kooste eri maista (Chandler et al. 1997)	Ranska, Itävalta (Reid et al. 2001)	Tanska (Afatek A/S 2004)	USA (TFHRC)	Italia (Cappai et al. 1999)
Raekokojakauma mm D60/D10 < 0,063 mm % > 0,075 mm %	0/40	0/50 2,0–10,0		0/40 7,5–8,6 4,9–6,2	0/64 22,0 2,5	2–16	0/40 23–34
Hehkutushäviö p-%	2,0–9,0	2,3–7,7				1,5–6,4	
Hiekkaekvivalentti	70–81						
Kiintoiheys kg m ⁻³ < 5 mm > 5 mm	2 500–2 680 2 420–2 490				2 730	1 500–2 230 1 930–2 440	2 530–2 740
Vedenpidätyskapasiteetti % < 5 mm > 5 mm	14,3–17,2 3,5–6,2					12–17 4,1–4,7	
Kuivatilavuuspaino t/m ⁻³ y, d min y, d max					1,22 1,4–1,8	1,26–1,76	
Huokosluku (e min / e max)					0,50/1,24		
Proctor-sullonta kuivatilavuuspaino kg m ⁻³ optimivesipitoisuus %	1 520–1 580 13,9–18,0				1 720 19,7		1 380–1 470 15,0–23,5
Parannettu Proctor kuivatilavuuspaino kg m ⁻³ optimivesipitoisuus %	1 580–1 640 13,9–18,0	1 500–1 800 13–19	1 530–1 739 10–20				
Los Angeles -luku %	40–42	45	10–90 (yl 40–45)	40–48	45–55	41–60	
Mikro-Deval -arvo %		26–39		28–53	40		
M _r σ v 90, σ h 20 kPa σ v 200, σ h 60 kPa σ v 560, σ v 120 kPa		70–110 210–230 260–300					
CBR	58–79					74–155	
Suurin sallittu kuormitus kPa (2 % deformaatio sallittu)		150–200					
Jäätymissulamiskoe, massahäviö %		1,0–8,0					
Kitkakulma °					44	40–45	43
Koheesio kPa							0
Vedenjohtavuus m/s				3,2*10 ⁻⁴ – 7.2*10 ⁻⁵		10 ⁻⁵ –10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ –5*10 ⁻⁸

3. Pohjakuonan prosessointi

3.2 Prosessointitekniikat

Tässä luvussa kuvataan lyhyesti tyypillisimmät pohjakuonille sovelletut prosessointimenetelmät. Yksityiskohtaisemmin tuhille ja kuonille soveltuvia käsittelymenetelmiä on esitelty mm. aiemmissa VTT:n julkaisuissa (Laine-Ylijoki et al. 2005, Kaartinen et al. 2007). Taulukossa 4 on annettu nopea yleiskatsaus tyypillisistä tekniikoista ja seuraavissa kappaleissa kuvattu tiettyjä, hankkeen kannalta keskeisimpiä prosessointitekniikoita hieman tarkemmin.

Taulukko 4. Tyypillisiä pohjakuonan prosessointitekniikoita.

Menetelmä	Tarkoitus	Esimerkkejä potentiaalisista tekniikoista
Kemialliset menetelmät		
Varastointi/ikäännytys	Parantaa kuonan ympäristö- ja teknisiä ominaisuuksia antamalla kuonan reagoita ilman ja veden kanssa	Kiihdytetty ikäännyttäminen esim. bunkkerissa: Tuuletus- ja vedenkierrätysjärjestelmä
Pesu	Vähentää helposti veteen liukenevien aineiden osuutta kuonassa	Tyypillisesti panosprosesseja, esim. jäähdytysallas polttolaitoksella, minimi L/S-suhde 0,35 Huomioitavaa on mm. käytettävän veden suuri määrä, jolloin raakaveden hinta ei saa olla korkea ja jäteveden käsittely voidaan toteuttaa edullisesti.
Fysikaaliset menetelmät		
Raekoon pienennys	Suurentaa kemiallisille reaktioille alttiina olevaa pinta-alaa	Murskain (leuka-, isku- tai valssimurskain)
Seulonta	Rakeiden erottaminen kahteen tai useampaan kokoluokkaan hienojakeen erottamiseksi, prosessoitavuuden optimoimiseksi tai tiettyjen jakeiden (lasi, metalli) erottamiseksi	Täryseulat, silmäkoot 40 µm–300 mm
Tiheyserottelu	Arvokkaiden ja ei-arvokkaiden aineiden erottelu tiheyteen perustuen	Jig-erotin, tärypöytä- ja spiraali-erottimet. Kahta tyyppiä: Suhteellinen erotin jakaa syötteen kahteen osaan perustuen tiheyteen rajatiheyden riippuessa syötteestä. Absoluuttisella erottimella on määrätty rajatiheys.
Magneetti-erotus	Rautametallin talteenotto perustuen magneettisuuteen	Eryttypiset magneettierottimet
Eddy Current separation	Ei-magneettisten metallien (esim. Al, Cu) talteenotto sekajakeista ja ei-magneettisten metallien erottaminen toisistaan	Raekoko tyypillisesti > 5 mm; perinteinen pyörrevirtaerotin, Raekoko tyypillisesti < 10 mm: Magnus-erotin, märkä pyörrevirtaerotin
Termiset menetelmät		
Terminen käsittely	Vähentää kuonan tilavuutta ja parantaa liukoisuusominaisuuksia. Käsittely korkeassa lämpötilassa sulattaa kuonaa ja aikaansaa vitrifioitumista	Termiset menetelmät jaetaan yleensä kolmeen ryhmään: vitrifiointi, sulatus ja sintraus.

Yksinkertaisin tapa parantaa pohjakuonan laatua on optimoida poltto-olosuhteita siten, että orgaaninen aines palaa mahdollisimman täydellisesti. Tämä voidaan toteuttaa pidentämällä viipymäaikoja tulipesässä, korottamalla tulipesän lämpötilaa tai sekoittamalla jätettä palamisen aikana. Usein kuitenkin poltto-olosuhteiden optimoinnin lisäksi myös kuonan prosessointi on tarpeen esim. kuonan maarakennuskäytön mahdollistamiseksi.

3.2.1 Ikäännytyks

Tuore pohjakuona ei ole kemiallisesti stabiilissa tilassa. Ikäännytyksistä käytetään sekä vähentämään jäljelle jäävää reaktiivisuutta ja metallien liukoisuutta. Ilman hiilidioksidi ja vesi ovat keskeisessä asemassa ikäännytyksessä. Pohjakuonan alumiini reagoi kalsiumhydroksidin ja veden kanssa muodostaen alumiinihydroksidia ja vetykaasua. Alumiinihydroksidin muodostumisen suurin haittapuoli on kuonan tilavuuden kasvu, sillä reaktio aiheuttaa kuonan ”ilmaantumista”. Kaasuntuotto aiheuttaa teknisiä ongelmia, jos tuoretta kuonaa käytetään rakennussovelluksissa. Täten ikäännyttäminen on tarpeen hyötykäytön mahdollistamiseksi.

Ikäännytyksen aikana karbonointireaktiot stabiloivat pohjakuonaa muuttamalla sen mineralogista luonnetta. Karbonoitumisessa hiilidioksidi liukenee kuonan huokosveteen alun perin emäksisissä olosuhteissa. Tämä aiheuttaa pH:n laskun ja kalsiitin saostumisen kunnes materiaali on tasapainossa CO₂:n kanssa. Ikäännytyksen päätarkoitus on kuonan pH:n laskeminen oksidien ja hydroksidien karbonoitumisen seurauksena. Ikäännytyksen ja pH:n laskun seurauksena useiden metallien liukoisuus kuonasta vähenee. Kuonan ikäännytyminen on kuitenkin luonnollisesti tapahtuvana varsin hidas prosessi.

Metallien erotuksen jälkeen pohjakuonaa varastoidaan tyyppillisesti avoimessa tilassa alttiina sateelle tai katetuissa rakennuksissa useiden viikkojen ajan. Kuonaa voidaan tarvittaessa kastella karbonoitumisen tehostamiseksi. Tunnettu tekniikka on myös ikäännytyksen kiihdyttäminen lisäämällä CO₂:n saatavuutta. Tämä voidaan toteuttaa altistamalla pohjakuona kaasulle, jolla on tavallista ilmaa suurempi CO₂-pitoisuus, esimerkiksi polttolaitoksen savukaasulle. CO₂-rikastetulla ilmalla ikäännytykseen tarvittava aika lyhenee huomattavasti 6–20 viikosta yhteen tai kahteen viikkoon (Baun et al. 2007). Kiihdytettyä ikäännyttämistä käytetään useissa pohjakuonan käsittelylaitoksissa Hollannissa, Saksassa, Ranskassa ja Belgiassa.

3. Pohjakuonan prosessointi

3.2.2 Metallien fysikaalinen erottelu

Magneettierottelussa kuona levitetään liikkuvalla kuljetinhihnalle tai pyörivälle kuljettimelle ja magneetti vetää puoleensa magneettiset kappaleet kuonasta. Tehokas magneettierottelu vaatii monivaiheisen prosessin, joka sisältää erottelua edeltäen ainakin kuonan jakamisen useaan raekokoluokkaan ja mahdollisesti raekoon pienennyksen. Magneettisten metallien talteenoton saannoksi on raportoitu 55–60 % polttolaitokseen menevän jätteen magneettisten metallien määrästä (Vrancken 2001).

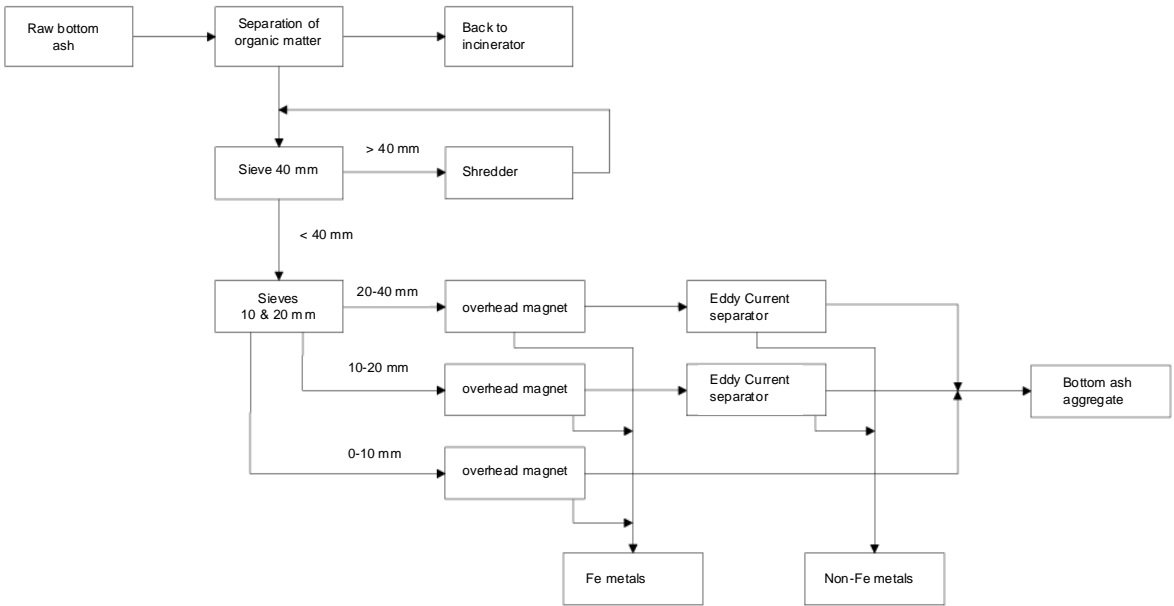
Ei-magneettiset metallit erotetaan pyörrevirtaerottimella (Eddy Current). Nopeasti pyörivä käämi indusoi magneettikentän ei-magneettisiin kappaleisiin, mikä saa ne erottumaan materiaalivirrasta. Tekniikka on tehokas raekoolle 4–30 mm ja se edellyttää materiaalin hyvää jakautumista liikkuvalla hihnalla. Erottelu toteutetaan seulonnan, mahdollisen raekoon pienennyksen ja magneettisten metallien erottelun jälkeen. Ei-magneettisten metallien erottelulla ko. metallien saanto voi olla 50 %. Metallien hapettuminen polton aikana pienentää pyörrevirtaerotuksella saavutettavaa saantoa.

Magneettisista ja ei-magneettisista metalleista saatava hinta riippuu niiden puhtausasteesta eli metallien pitoisuuksista tuotteessa sekä maailmanmarkkinoiden tilanteesta.

3.3 Prosessointikonseptit

Pohjakuonan prosessointikonseptit jaotellaan kuiviin ja märkiin prosesseihin. Pääpiirteiltään nämä ovat hyvin samankaltaisia. Molemmissa prosesseissa keskeiset yksikköprosessit ovat seulonta, magneettisten metallien erotus sekä nykyisin myös ei-magneettisten metallien erotus pyörrevirtaerottimilla. Märissä prosesseissa sitten jokin raekokoluokka, yleensä hienoin, erotetaan pesemällä. Joissain konsepteissa voi myös olla murskausvaiheita agglomeroituneiden kappaleiden erottamiseksi.

Kuivassa käsittelyprosessissa, joka on tällä hetkellä yleisimmin käytössä, keskeisimmät yksikköprosessit ovat: magneettisten metallien erotus, murskaus, seulonta sekä ei-magneettisten metallien erotus pyörrevirtaerottimilla ja ikäännyttäminen (kuva 1). Lopputuotteena prosessissa saadaan kuivia, esimerkiksi 0–4 mm:n, 0–10 mm:n tai 4–10 mm:n maarakentamiskäyttöön soveltuvia aggregaatteja. Lukuisia kuivaan teknologiaan perustuvia laitteistoja on toiminnassa mm. Tanskassa, Alankomaissa, Saksassa, Belgiassa ja Ranskassa.



Kuva 1. Tyypillinen kuiva käsittelyprosessi (Nielsen 2010).

Märissä käsittelyprosesseissa yksikköprosessit ovat: murskaus, seulonta, pesu ja metallien erotus. Yleensä pesemällä erotetaan hienoin 0–2 mm:n fraktio, jossa yleensä on suurin osa kuonan liukoisista aineista ja orgaanisista yhdisteistä. Näin vähennetään jäljelle jäävän kuonaosan liukoisten aineiden, kuten sulfaatin, kloridin ja muutamien metallien, määriä ja parannetaan sen ympäristöominaisuuksia. Kuonan pesu voidaan tehdä heti polttolaitoksella lisäämällä vesimäärää kuonan sammutussäiliössä, maanpesulaitteistolla tai suihkuttamalla vettä kuonan varastoinnin yhteydessä.

Seuraavassa esitellään esimerkinomaisesti muutamia toiminnassa olevia eurooppalaisia pohjakuonan prosessointilaitteistoja ja -konsepteja.

3.3.1 Ruotsalainen kuiva käsittelyprosessi (Grönholm 2008)

SYSAB AB:n pohjakuonan käsittelylaitoksessa Malmössa käsitellään vuosittain noin 100 000 tonnia kuonaa (kuva 2). Prosessin teknisiä tietoja on esitetty taulukossa 5.

3. Pohjakuonan prosessointi

Taulukko 5. SYSAV AB:n Malmön pohjakuonan käsittelylaitoksen teknisiä tietoja.

Laitteisto	<ul style="list-style-type: none">• Toimittaja: Heidemann Recycling GmHH• Rakennusvuosi: 2003, laajennus 2006• Kapasiteetti: 100 000 t/a, huippukapasiteetti 80 t/h• Laitteet ja koneet: 2 etukuormaajaa, 1 mekaaninen Bobcat, 3 magneettista erotinta, 5 seulaa, 4 pyörrevirta (Eddy Current) -erotinta, 2 tuuliseulaa
Prosessi	<ol style="list-style-type: none">1. Varastointi 6 vko2. Tuuliseula, jolta yli 150 mm:n palava aines ohjataan takaisin polttoon3. Seulonta neljään fraktioon ja erottelu:<ul style="list-style-type: none">• 50–150 mm: tuuliseula + magn. erotin + Eddy Current• 20–50 mm: tuuliseula + magn. erotin + Eddy Current• 4–20 mm: magn. erotin + Eddy Current• < 4 mm: Eddy Current4. Ikäännyttäminen kasalla 2–6 kk
Materiaalivirrat	<ol style="list-style-type: none">1. > 150 mm:n jae (4 m-%) sisältäen romumetallia, palavaa materiaalia, kiviä, betonia, kaatopaikkajätettä (2 m-%)2. Magneettinen romumetalli (10 m-%) kuten rauta, alumiini, kupari, messinki3. Ei-magneettiset metallit (1 m-%),4. Palava materiaali (0,25 m-%)5. Inertti materiaali ja ruostumaton teräs (5 m-%)6. Jalostettu kuona (80 m-%)

Prosessointikustannus laitoksella on noin 10 €/t ja kuonan ulosmyyntihinta 2,5 €/t. Merkittävin prosessin talouteen ja kannattavuuteen vaikuttava tekijä on metalleista saatava hinta. Käytännön ongelmina laitteistossa ovat pölyämisen lisäksi erityisesti hihnakuljettimien kestävyys ja materiaalit sekä seulojen tukkeutuminen ja rikkoutuminen. Lisäksi ruostumaton teräs erottuu prosessissa huonosti.



Kuva 2. SYSAV AB:n pohjakuonan käsittelylaitos.

Ruotsissa ei jalostetun pohjakuonan käyttöön ole virallista ohjeistusta tai standardeja, joten kuonan toimittajalla on yleensä käytössä oma takuujärjestelmänsä. Toimittaja hoitaa koko hyödyntämisketjun, mutta tilaaja hakee luvan toimittajalta saamiensa dokumenttien pohjalta. Haitat rakentamisessa liittyvät lähinnä pölyämiseen. Kohdemonitorointia tulee tehdä sekä pohjaveden että maaperän osalta. Rakentaminen ja laitteet eivät poikkea merkittävästä vastaavista luonnonmateriaalirakenteista. Rakenteen tulee olla kuiva ja sijaita vähintään metri pohjavedestä. Pohjakuonan etuna kuitenkin on, että sitä voidaan käyttää ohuempina rakennekerroksina.

3.3.2 Belgialainen märkä käsittelyprosessi (Bobelyn 2010)

Belgialaisessa Indaverin kuonan käsittelylaitoksessa käsitellään märkä-teknoologiaan perustuvalla prosessilla vuosittain noin 160 000 tonnia kuonaa (kuva 3). Prosessi on suunniteltu ja toteutettu Indaverin, IPAS (Industrial Processing & Analytical Systems) ja belgialaisen tutkimuslaitoksen VITOn yhteistyönä.

Prosessin teknisiä tietoja on esitetty taulukossa 6.

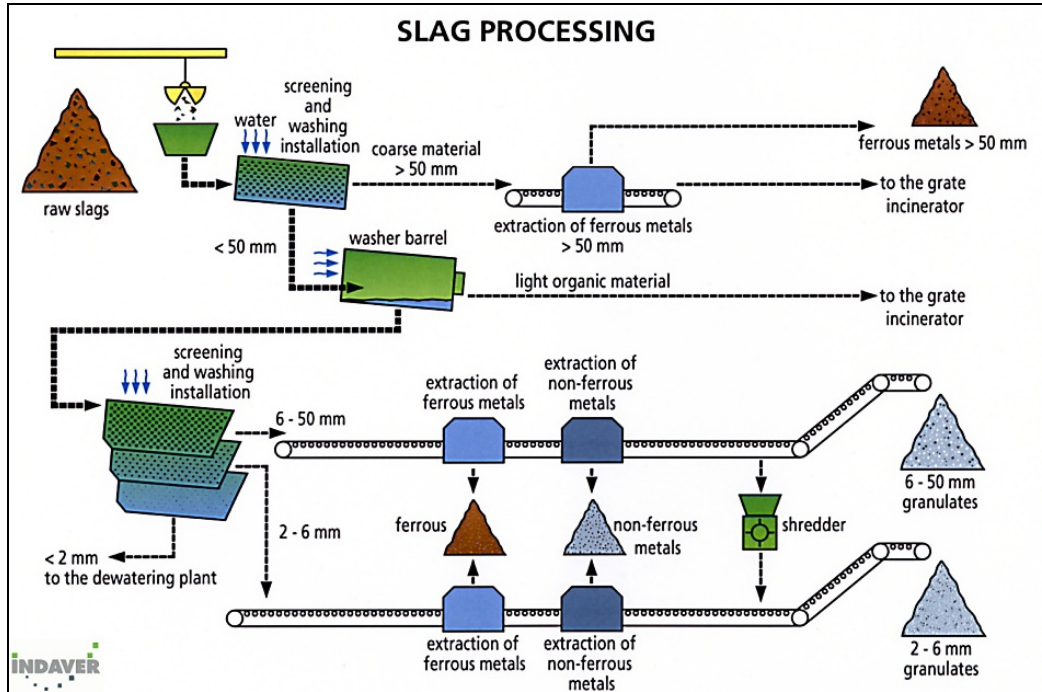
Taulukko 6. Indaverin kuonankäsittelylaitoksen teknisiä tietoja.

Laitteisto	<ul style="list-style-type: none"> • Rakennusvuosi: 2000 • Kapasiteetti: 165 000 t/a,
Prosessi	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pesuseuonta kahteen fraktioon: <ul style="list-style-type: none"> • > 50 mm: magn. erotin • < 50 mm: pesu, josta kevyt orgaanien jae polttoon 2. Pesuseulonta <ul style="list-style-type: none"> • 6–50 mm: magn. erotin + Eddy Current • 2–6 mm: magn. erotin + Eddy Current • < 2 mm vedenkäsittelylaitokseen 3. Ikäännyttäminen kasalla 3 kk
Materiaalivirrat	<ol style="list-style-type: none"> 1. Orgaaninen jae, joka palautetaan polttoon (1 m-%) 2. Magneettiset metallit (8,5 m-%) 3. Ei-magneettiset metallit (1 m-%) 4. Vedenkäsittelyliete (8 m-%) stabiloituna kaatopaikalle 5. Muu kaatopaikkajäte (8,5 m-%) 6. Jalostettu kuona (73 %)

Lopputuotteet ovat visuaalisesti puhtaita ja niiden orgaanisten aineiden pitoisuus on vähäinen. Prosessin käytännön ongelmat liittyvät lähinnä toistuviin seulojen tukkeutumisiin sekä laitteistojen likaantumiseen, minkä vuoksi laitoksessa on

3. Pohjakuonan prosessointi

lähes viikoittain päivän huolto- ja siivousseisokkeja. Märkäprosessi tuottaa myös jonkin verran vedenkäsittelyn sakkaa, joka stabiloidaan ja sijoitetaan omalle kaatopaikalle.



Kuva 3. Indaverin märkä kuonan käsittelyprosessi.

Kuonasta noin 14 % on raekokoja 2–6 mm ja 27 % raekokoja 6–50 mm. Nämä kuona-aggregaatit hyödynnetään sellaisenaan tai stabiloituna erilaisissa kenttä- ja tierakenteiden pohjissa. Loppu 32 % on hiekkafraktiota, jonka raekoko on 0,1–2 mm ja se käytetään jatkuvan tarkkailun alaisissa rakenteissa, yleensä laitoksen omalla kaatopaikalla.

3.4 Kuonajalosteen käyttö maarakentamisessa

Tämän tutkimuksen tavoitteena on ollut kuonan jalostaminen maarakennuskäyttöön, joten myös tässä luvussa keskitytään prosessoidun kuonan käyttömahdollisuuksiin erityisesti tie- ja katurakenteissa sekä muissa maarakenteissa ja meluvallissa.

3.4.1 Nykytilanne muutamissa maissa

Taulukossa 7 esitetään pohjakuonan hyötykäytön nykytilannetta muutamassa Euroopan maassa.

Taulukko 7. Pohjakuonan määriä ja käyttökohteita eräissä Euroopan maissa.

Maa	Pohjakuonan määrä (t/a)	Käyttökohteet	Huom!
Alankomaat	1 320 000	<ul style="list-style-type: none"> Tien pengerrakenteet (minimikoko 10 000 t) Päällystettyjen rakenteiden, kuten parkkialueiden, pohjarakenteet (ei yhteyttä pohjaveteen) Moottoriteiden meluesteet Teollisuusalueiden täytöt tietyin rajoituksin (Soil Quality Degree) Kaatopaikkojen pintarakenteet Asfaltti- ja sementtiaggregaatti 	Tuoteistettu
Belgia/ Flanders	210 000	<ul style="list-style-type: none"> Kaatopaikkojen päiväpeittorakenteet, huoltotiet, valli- ja eristysrakenteet Teollisuusalueet, yksityiset tiet ja paikoitusalueet: täytöt 	<ul style="list-style-type: none"> 2 käsittelykeskusta Kuonaa ei käytetä yleisten teiden rakentamisessa
Belgia/ Vallonia	200 000	<ul style="list-style-type: none"> Teiden pohjarakenteet, joihin ohjeistus (RW 99) Sementtiaggregaatti ja päällystyskivet 	
Ranska	3 000 000	<ul style="list-style-type: none"> Teiden, parkkialueiden ja viemäröntien pohja- ja alusrakenteet 	<ul style="list-style-type: none"> 70 % kuonasta käsitellään 40 laitosta, joiden kapasiteetti 10 000–200 000 t/a ja joille toiminnalliset vaatimukset (1994) Tierakentamiselle erityisvaatimukset
Ruotsi	650 000	<ul style="list-style-type: none"> Kaatopaikkojen peittorakenteet, huoltotiet, valli- ja eristysrakenteet (pääkäyttökohde) Paikoitusalueet ja teollisuusalueiden pohjarakenteet 	<ul style="list-style-type: none"> Kaatopaikkojen ulkopuolinen käyttö ei ole yleistä. Ei virallista ohjeistusta ja standardeja
Saksa	3 500 000	<ul style="list-style-type: none"> Teiden ja teollisuusalueiden täytöt (TL-säädökset ja vaatimukset mm. LAGA, DIN38 414-4) ja pengerrakenteet Kaatopaikkojen väliaikaiset peittorakenteet 	Mineraalit tulee määrittellä vertailtavuuden vuoksi kahden raekoon (0,063–0,09 mm:n hienojae ja 2–5 mm:n karkeajae) osalta.

3. Pohjakuonan prosessointi

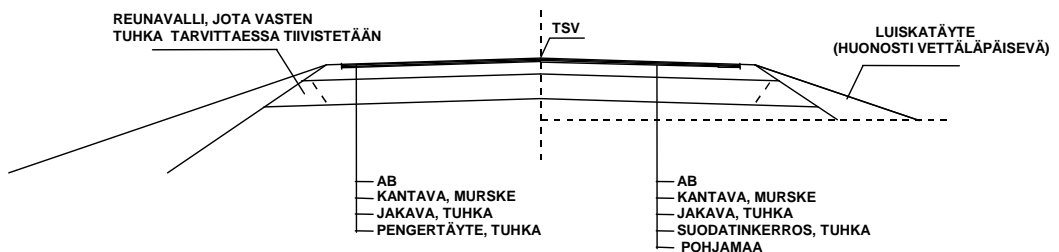
3.4.2 Potentiaaliset käyttökohteet

Pohjakuonaa voidaan käyttää sen teknisten ominaisuuksien (ks. kohta 3.1.2) puolesta monissa maarakentamisen sovelluksissa. Tyypillisimpiä ovat seuraavat:

1. Maarakenteiden alusrakenteet ja alustäytöt
 - Kaikki maarakenteet.
2. Päällysrakenteet (suodatinkerrosta korvaava kerros ja/tai jakava kerros)
 - Kevyen liikenteen väylät ja ulkoilutiet
 - Pysäköintialueet
 - Urheilukentät ja muut liikuntapaikat
 - Varastokentät.

Lisäksi muita maarakenteita, joihin pohjakuonaa voidaan teknisessä mielessä käyttää, ovat mm.: tukimuurien taustatäytöt, maisemointitäytöt, meluvallit ja putkijohtojen arinat ja putkikanaalien täytöt.

Jalostetun kuonan tekniset ominaisuudet vastaavat monessa suhteessa luonnonmateriaalien ominaisuuksia, tosin palamattoman aineksen osuuden kasvaessa ominaisuudet huonontuvat selvästi. Prosessoituna pohjakuonaa käytetään korvaamaan hiekkaa, soraa ja murskettä (kuva 4 ja taulukko 5), mitä varten kuona voidaan tarpeen mukaan erotella prosessissa eri fraktioihin.



Kuva 4. Pohjakuonan käyttö jakavassa kerroksessa, pengermateriaalina ja suodatinkerroksessa (Laine-Ylijoki et al. 2005).

Taulukko 8. Eurooppalaisten prosessoitujen pohjatuhkien ja luonnonkiviainesten ominaisuusvertailu (Laine-Ylijoki et al. 2005).

Ominaisuus	Vertailu luonnonmateriaaleihin	Huomattavaa
Rakeisuus	Hiekkainen sora	Karkein osuus poistettu seulo-malla
Hehkutushäviö	Suurempi kuin luonnon kiviaineiksilla	Vaihtelee huomattavasti laitoksesta riippuen, huonontaa teknisiä ominaisuuksia
Kiintotiheys	Hieman kevyempää useimpiin luonnonkiviaineisiin verrattuna	Vaikuttaa saavutettavaan maksimikuivatilavuuspainoon
Vedenjohtavuus	Siltti, hiekka	Huonompi kuin rakeisuuden perusteella arvioitu
Tiivistyvyys	Hyvin tiivistyvä, vastaa suhteistunutta kiviainesta	Vesipitoisuudella suuri vaikutus
Maksimikuivatilavuuspaino	Löyhä – keskitiivis hiekka	Suhteellisen alhaiset arvot johtuvat pienestä kiintotiheydestä
Vedenpidätyskapasiteetti	Selvästi suurempi kuin tavallisimmilla kiviaineiksilla	Vaikuttaa tiivistystyön suorittamiseen
Lujuusominaisuudet	Sora	Osalla kuonista paremmat ominaisuudet (mursketta vastaavat). Mikäli paljon palamatonta ainesta, ominaisuudet huonommat kuin soralla
Kulutuskestävyys	Huonompi luonnonmateriaaleja (hiekkä, sora, murske)	Vaikuttaa rakennustyöhön (tiivistyskalusto, työmaaliikenne), koerakentaminen suositeltavaa
Kantavuus	Paljon parempi kuin hiekan, parempi kuin soran	Vesipitoisuuden ja orgaanisen aineksen määrän kasvaessa deformaatiot lisääntyvät
Pakkaskestävyys	Huonompi luonnonmateriaaleja (hiekkä, sora, murske)	Vaikuttaa rakennustyöhön (tiivistyskalusto, työmaaliikenne)

Kuonan käyttöominaisuuksien on viime aikoina havaittu vaihtelevan myös mineraalilajeittain ja koostumuksesta riippuen. Esimerkiksi kipsin määrä kuonassa vaikuttaa siihen, miten kuona paisuu käyttökohteessa. Lisäksi metallisen alumiinin ja joidenkin ei-magneettisten metallien on todettu aiheuttavan pintalohkeamia (ns. pop out) erityisesti betonirakenteissa ja -tuotteissa. Pintalohkeamia voidaan välttää tehostamalla em. poistoa käsittelyprosessissa.

3. Pohjakuonan prosessointi

Maarakentamisessa hyötykäyttäviltä pohjakuonilta edellytetään laboratorio- ja kenttätutkimuksiin sekä koerakentamiseen perustuvaa tietoa, jotta niiden luonnonteknisten poikkeavien erityispiirteiden voidaan ottaa huomioon. Materiaalin systemaattinen käyttö edellyttää em. tiedon pohjalta laadittuja teknisiä suunnittelu- ja rakentamisohjeita. Ohjeiden tulee sisältää hyötykäyttömahdollisuudet maarakentamistyyppittäin, ja niissä tulee ottaa huomioon pohjamaan geotekninen laatu ja pohjaviesolosuhteet.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

Tässä luvussa kuvataan tutkimusprojektin aikana esimerkkikuonanäytteelle suoritetut tutkimukset ja niistä saadut tulokset.

4.1 Tutkimusohjelma

Tutkimuksessa käytetty esimerkkikuona valittiin niin, että se edustaisi mahdollisimman hyvin Suomessakin tulevaisuudessa syntyviä kuonia. Jo aiempaa Tekes-rahoitteiseen projektiin hankittua tanskalaista kuonaa, jonka osalta tuloksia on esitetty VTT Tiedotteita -sarjan julkaisussa 2411 (Kaartinen et al. 2007), käytettiin tässä projektissa harjoittelu- ja vertailunäytteenä. Tanskalaisen näytteen avulla selvitettiin mineralogisen tarkastelun soveltuvuutta ao. tyyppisille materiaaleille ja tunnistettiin kuonien käsittelyn mahdolliset erityispiirteet.

Taulukossa 6 esitetään tutkimusohjelman runko. Seuraavissa alaluvuissa suoritetut tutkimukset kuvataan tarkemmin.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

Taulukko 9. Tutkimusohjelma.

TUTKIMUS	TEHTÄVÄT	TAVOITE
Syötteen peruskarakterisointi	<ul style="list-style-type: none"> • Epäorgaanisten ja orgaanisten aineiden pitoisuudet • Raekokojakauma • Liukoisuuskokeet (ravistelutestit, läpivirtaustestit ja pH-vaikutustestit) • Ekotoksisuustutkimukset (vesikirpputesti, levätesti, valobakteeritesti) • Mineralogiset tutkimukset 	<ul style="list-style-type: none"> • Koostumuksen ja liukoisuuspotentiaalın selvittäminen • pH-olosuhteiden vaikutus haitta-aineiden liukenemiseen • Laatuvaihtelu
Prosessointi	<ol style="list-style-type: none"> 1. Seulonta (< 4 mm, 4–20 mm, 20–50 mm, 50–100) mm 2. Tuuliseula 3. Magneettinen erotus 4. Pyörrevirtaerotus 5. Vaahdotus 6. Ikäännyttäminen 7. Bioliuotus 	<ul style="list-style-type: none"> • Massavirrat • Yksikköprosessin soveltuvuus, tehokkuus ja optimointi • Metallien talteenotto potentiaali • Massavirrat
Käsittelyfraktioiden peruskarakterisointi <ol style="list-style-type: none"> 1. Rummutuksen jälkeinen (vrt. syöte) 2. 4–20 mm ennen magneettia 3. 4–20 mm ei-magneettinen 4. < 4 mm ennen magneettia 5. < 4 mm magneettinen ja 6. < 4 mm ei-magneettinen 	<ul style="list-style-type: none"> • Epäorgaanisten ja orgaanisten aineiden pitoisuudet • Mineralogiset tutkimukset • Liukoisuuskokeet (ravistelutestit) 	<ul style="list-style-type: none"> • Yksikköprosessien vaikutus koostumukseen ja ympäristöominaisuuksiin
Lopputuotteen karakterisointi (4–20 mm, magneettiset ja ei-magneettiset metallit poistettu)	<ul style="list-style-type: none"> • Epäorgaanisten ja orgaanisten aineiden pitoisuudet • Liukoisuuskokeet (ravistelutestit, läpivirtaustestit ja pH-vaikutustestit) • Ekotoksisuustutkimukset (vesikirpputesti, levätesti, valobakteeritesti) • Maarakennustekniset perustutkimukset 	<ul style="list-style-type: none"> • Lopputuotteen tekninen laatu ja ympäristökelpoisuus

4.2 Tutkimusmenetelmät

4.2.1 Mineralogia

Mineralogista karakterisointia käytettiin hyväksi suunniteltaessa esimerkkikuonan käsittelyssä käytettäviä yksikköprosesseja. Prosessimineralogian tutkimusmenetelmillä voidaan usein löytää syyt mineraalien rikastukseen liittyviin ongelmiin. Kuonan eri yksikköprosessien toimivuutta ja rikastukseen liittyviä ongelmia selvitettiin tutkimalla eri prosessivaiheiden kuten vaahdotuksen ja painovoimaerotuksen tuotteita.

Pohjakuonan mineralogisessa karakterisoinnissa käytettiin kolmea eri menetelmää raakoosta riippuen. Karkeimmille fraktioille 20–50 mm tehtiin visuaalinen tarkastelu ja tutkittaessa 4–20 mm fraktiota käytettiin optista mikroskooppia. Hienon kuonamateriaalin, < 4 mm sekä vaahdotuksen ja tärypöydän tuotteiden mineraloginen koostumus määritettiin MLA-laitteistolla (Mineral Liberation Analyser).

MLA-laitteisto koostuu Fei Quanta 600 -pyyhkäisyelektronimikroskoopista (SEM) ja EDAXin energiadiispersiivisestä röntgenanalysaattorista, jossa on kaksi detektoria. Näytteiden faasipitoisuudet ja metallisten alkuaineiden assosiaatiot mitattiin XBSE-menetelmällä.

XBSE-menetelmässä kerätään sarja backscatter-elektronikuvia (BSE), joille tehdään erilaisia kuvankäsittelyoperaatioita. Mahdollisesti toisiaan koskevien partikkelien erottamiseksi ohjelma tekee BSE-kuville ns. presegmentaation. Röntgenspektri kerätään jokaisesta BSE-kuvasta havaitusta faasista. Kunkin näytteen XBSE-mittauksessa syntyy kaksi mittaustiedostoa. Toinen on harmaasävykuva ja toinen on faasikuva (X-ray-kuva). Faasikuvatiedosto on värillinen kuva, jossa on BSE-kuvan presegmentoinnissa syntyneet faasit ja joista saadaan myös kunkin faasin röntgenspektri. Eri faasien tunnistamiseksi ohjelma vertaa mitattua spektriä näytteestä kerättyihin spektreihin (spektrikirjastoon) ja tekee tunnistuksen. Faasien pinta-alaosuudet muutetaan painoprosenteiksi annettujen tiheyksien avulla.

4.2.2 Ympäristöominaisuudet

Alustavat ympäristöominaisuuksien karakterisointitutkimukset käsittivät puolikvantitatiivisen epäorgaanisen koostumusanalyysin (röntgenfluoresenssianalyysi XRF) ja kaksivaiheisen ravistelutestin EN 12457-3. Erityisesti käsittelemättömälle kuonalle (syöte) ja ns. lopputuotteelle suoritettavat tarkemmat ympäristömi-

4. Esimerkkikuonan prosessointi

naisuuksien karakterisointimenetelmät käsittivät myös läpivirtaustestin CEN/TS 14405, pH-staattiset testit CEN/TS 14997, ekotoksisuustutkimuksia sekä orgaanisten aineiden (TOC, PCB, PAH) pitoisuusmääritykset. Lisäksi tietyistä fraktioista tutkittiin metallisen alumiinin pitoisuus sekä mahdollisen vedynmuodostuspotentiaalın että erottelujen onnistumisen selvittämiseksi.

Puolikkvantitatiivisessa röntgenfluoresenssianalyyssissä määritettiin kiinteistä kuonanäytteistä fluori ja sitä raskaammat alkuaineet.

Kaksivaiheisessa ravistelutestissä EN 12457-3 kiinteää materiaalia ravistellaan kuusi tuntia ionivaihdetun veden kanssa siten, että L/S-suhde eli testissä käytettävän vesimäärän (L) suhde kiinteän materiaalin määrään (S) on 2. Ravistelun jälkeen näyte suodatetaan, minkä jälkeen kuivaamatonta materiaalia ravistellaan vielä 18 tuntia L/S-suhteessa 8. Kumulatiivinen L/S-suhde on 10. Suodoksista tutkitaan halutut parametrit.

Läpivirtaustestillä (CEN/TS 14405) simuloidaan rakeisen tai jauhemaisen materiaalin liukoisuuskäyttäytymistä eri aikaväleillä erityisesti eristämättömällä sijoituspaikalla. Eristetyssä materiaalikerroksessa saattaa myös diffuusio-liukeneminen olla aineiden tärkein liukenemismekanismi. Liukoisuustestien tuloksia tulkitaan yleensä L/S-suhteen avulla. Läpivirtaustestissä L/S-suhteella tarkoitetaan kolonnista kerättyä vesimäärää (L), joka on ollut kontaktissa tietyn jätemateriaalimäärän (S) kanssa. Kun jätemateriaalikerroksen läpi suodautunut vuotui- nen vesimäärä tunnetaan, voidaan karkeasti arvioida aika tietyn L/S-suhteen saavuttamiseksi sijoituspaikalla.

pH-olosuhteiden vaikutusta haitta-aineiden liukoisuuteen tutkittiin pH-vaikutustestillä CEN/TS 14997. Testissä näytteen ja veden seoksen pH-arvo pidetään halutulla tasolla happo- tai emäslisäyksellä 48 tuntia automaattista titrauslaitteisto- ta käyttäen. Testissä pyritään lopulliseen L/S-suhteeseen 10, ja kokeen jälkeen seos suodatetaan ja suodoksesta tutkitaan halutut parametrit.

Liukoisuustestien suodokset analysoitiin seuraavasti:

- As-, Ba-, Cd-, Co-, Cr-, Cu-, Mo-, Ni-, Pb-, Sb-, Se-, V- ja Zn-pitoisuudet plasmamassaspektrometrisesti (ICP-MS) tai plasma-atomiemissio- spektrometrisesti (ICP-AES)
- Hg-pitoisuudet atomiabsorptiospektrometrisesti kylmähöyrymenetelmällä (CVAAS) tai atomifluoresenssispektrometrisesti (CV-AFS)
- Kloridi-, fluoridi- ja sulfaattipitoisuudet ionikromatografisesti (IC)
- DOC-pitoisuudet akkreditoidulla standardin SFS-EN1484:1997 mukaisella menetelmällä.

Metallinen alumiini määritettiin kierrätyspolttoainemenetelmän CEN/TS 15412 mukaisesti. Menetelmässä näyte käsitellään typpihapolla ravistelujassa. Tämän jälkeen näyte suodatetaan ja sakkaa keitetään NaOH-liuoksessa. Keiton jälkeen näyte suodatetaan jälleen, suodokseen lisätään typpihappoa ja liuos täytetään mittapullossa merkkiin. Alumiini mitattiin liuoksesta ICP-OES:llä.

Ekotoksisuustutkimuksina suoritettiin vesikirpputesti, levätesti ja valobakteeritesti. Vesikirpputestissä tarkastellaan näytteen, tässä tapauksessa yksivaiheisen ravistelutestin suodoksen, laimennosten aiheuttamaa liikkumisen estymistä vesikirpuille 24 ja 48 tunnin altistuksen aikana. Levätestissä seurataan näytteen laimennosten haitallisten aineiden aiheuttamaa levän kasvun vähenemistä mittaamalla näytteen absorbanssia spektrofotometrisesti 72 tunnin aikana. Valobakteeritestissä mitataan valobakteerin valontuoton vähenemistä bakteerien altistuessa haitallisille aineille.

Hiilen kokonaismäärä (TC) ja orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC) määritettiin standardin SFS-EN 13137 mukaisesti. Menetelmässä näyte poltetaan happivirrassa (1 400 °C) ja poltossa muodostuneen hiilidioksidin pitoisuus määritetään IR-detektorilla. TOC:n määrittämisessä näyte hapotetaan ennen polttoa fosforihapolla mahdollisen epäorgaanisen hiilen poistamiseksi. Epäorgaanisen hiilen kokonaismäärä (TIC) saadaan TC:n ja TOC:n erotuksena.

PCB- ja PAH-yhdisteet määritettiin kaasugromatografisesti (GC-MS).

4.2.3 Maarakennustekniset tutkimukset

Maarakennusteknisiä tutkimuksia suoritettiin ns. lopputuotteelle eli 4–20 mm:n kuonajakeelle, josta oli eroteltu magneettiset ja ei-magneettiset metallit. Teknisesti kokeita ei voi toteuttaa yli 16 mm:n materiaalille, joten tässä tutkitun 4–16 mm materiaalin katsotaan edustavan käsittelykokeissa saatua ”lopputuotetta”.

Proctor-kokeessa materiaalia tiivistetään vakioituissa olosuhteissa erilaisilla kosteuspitoisuuksilla. Kokeella määritetään materiaalin optimivesipitoisuus ja sitä vastaava kuivatilavuuspaino. Proctor-kokeilla saadaan materiaalille proctor-kuvaaja, josta voidaan päätellä vesipitoisuuden ja tilavuuspainon yhteys.

Rakeisuus määritettiin seulomalla ennen Proctor-koetta ja sen jälkeen, jotta voitiin nähdä miten materiaalin tiivistys vaikuttaa sen rakeisuuteen.

Routivuus. Polttokuonanäyte (4–16 mm) tiivistettiin 85 %:n Proctor-tiiviyteen vesipitoisuudessa $w = 15,0\%$. Polttokuonalle tehtiin routanousukokeet ns. avoimina kokeina. Avoimessa kokeessa näytteellä oli mahdollisuus saada lisävettä ulkopuolisesta vesilähteestä. Routanousukokeilla määritettiin polttokuona-

4. Esimerkkikuonan prosessointi

näytteen segregatiopotentialin suuruus. Segregatiopotentiali kuvaa materiaalin kykyä imeä vettä routarajalle routarajan ollessa paikallaan. Routanousukokeita tehtiin kaksi kappaletta. Kokeiden välissä näyte sulatettiin kuormituksella 20 kPa.

Kapillaarisuus määritettiin SAHI-kapillarimetrillä.

Lämmönjohtavuus. Lämmönjohtavuusnäyte rakennettiin 83 %:n Proctoriiviyteen vesipitoisuudessa $w = 13,5$ %. Sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet määritettiin laboratoriossa yksisondimenetelmällä (lämmönjohtavuustiku) (Kivikoski et al. 2006).

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

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

missä

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

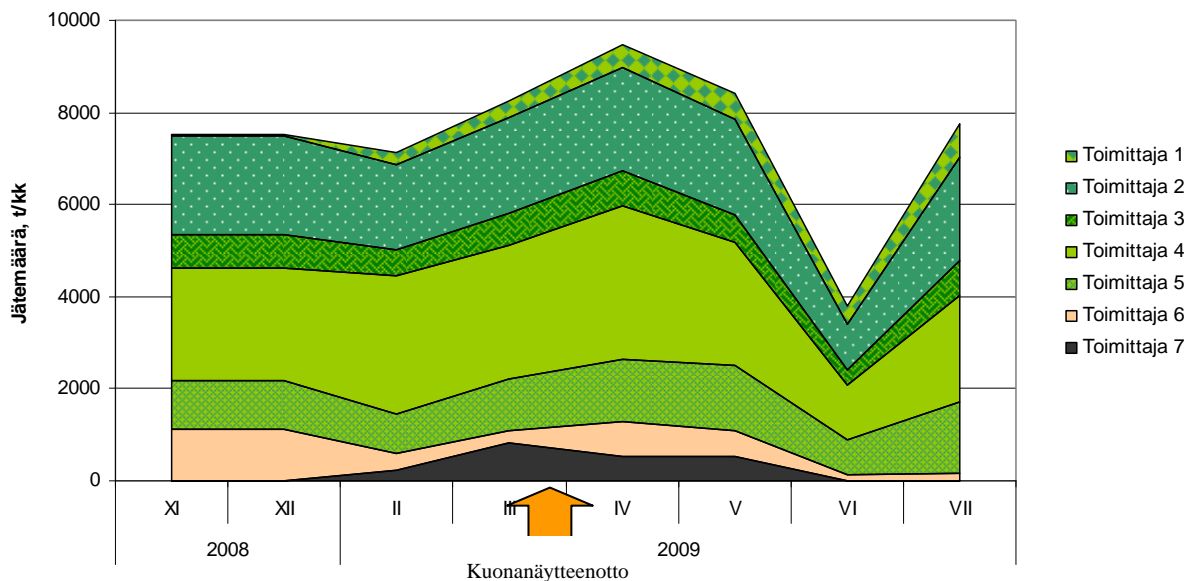
Lämmönjohtavuusmääritykset tehtiin sulana (lähtölämpötila +20 °C) ja jäätyneenä (lähtölämpötila -10 °C). Sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuus määritettiin kolmen mittaussarjan keskiarvona.

4.2.4 Esimerkkikuona ja sen ominaisuudet

Tutkimusta varten hankittiin esimerkkikuonaksi jätteenpolton pohjakuonaa n. 9 tonnin kertaluonteinen näyte-erä Kotkan Hyötyvoimalasta helmikuussa 2009. Kuonanäyte kuljetettiin Kotkasta Geologian tutkimuskeskukseen Outokumpuun, josta edelleen pienempi näyte-erä toimitettiin VTT:lle Espooseen. Loppuvuoden 2008 ja alkuvuoden 2009 ajalta tehtiin rajoitettu polttoaineselvitys Hyötyvoimalaan saapuneesta jätteestä.

4.2.5 Poltettava jäte

Kuvassa 5 on esitetty Kotkan Hyötyvoimalaan loppuvuoden 2008 ja alkuvuoden 2009 aikana saapuneen jätteen jakauma toimittajittain. Kuonanäyte hanketta varten otettiin 24.2.2009.



Kuva 5. Kotkan Hyötyvoimalaan tulleen jätteen jakauma toimittajittain.

Polttavasta jätteestä noin 85 % prosenttia on ollut normaalia kotitalousjätettä (jätteen toimittajat 1–5). Polttoon tullut teollisuusjäte on ollut lähinnä paikalliselta kierrätyskartonkitehtaalta (toimittaja 6) tulevaa rejektiä sekä rakennusjätteen käsittelyn alitetta (toimittaja 7). Polttoaineen lämpöarvo on ollut melko korkea, välillä 9,5–10,5 MJ/t. Syntyneen pohjakuonan massamäärä helmikuussa 2009 on ollut noin 15 % laitokseen syötettävän jätteen määrästä. Kuonan sekä lentotuhkan ja APC-jätteen määrä näyttää kevään 2009 aikana kasvaneen hieman, mutta selvityksen perusteella poltettavalla jätteellä tai yksittäisillä jätejakeilla ei näyttäisi olevan selkeää vaikutusta kuonan määrään, mutta kyllä sen laatuun (vrt. syötteen karakterisointitulokset myöhempänä). Sen sijaan poltto-olosuhteilla saattaisi tässä yhteydessä keskeisempi rooli. Biojätteen osuus polttoaineessa on myös ollut melko suuri, vaikka suurin osa kotitalousjätteestä tulee erilliskeräyksen piiristä.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

4.2.6 Esimerkkikuonan ominaisuudet

Kuvassa 6 on Kotkan Hyötyvoimalan pohjakuonanäyte kuvattuna Geologian tutkimuskeskuksessa Outokummussa.



Kuva 6. Tutkimukseen valittu esimerkkikuona.

Taulukoissa 7 ja 8 on esitetty esimerkkikuonan karakterisoinnin tuloksia. Lisäksi on esitetty aiemmissa tutkimushankkeissa (Kaartinen 2004, Kaartinen et al. 2007) muiden laitosten pohjakuonille saatuja vastaavia tuloksia.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

Taulukko 10. Esimerkkikuonan ja vertailukuonien alkuaineiden pitoisuuksia (XRF). Alkuaineiden pitoisuudet on ilmoitettu prosentteina (%).

Alkuaine, %	Esimerkkikuona	Pohjakuona I/S FASAN, Tanska	Pohjakuona Turku
Alumiini, Al	6,0	7,2	5,6–6,5
Fosfori, P	0,44	1,0	0,55–0,76
Kalium, K	1,6	1,2	1,6–2,1
Kalsium, Ca	10	11	8,8–13
Kloori, Cl	0,41	2,5	0,43–1,6
Magnesium, Mg	1,4	1,1	1,1–1,5
Natrium, Na	3,9	6,0	3,5–3,6
Pii, Si	25	20	21–23
Rauta, Fe	4,3	3,8	4,4–7,0
Rikki, S	1,8	0,46	0,70–1,1
Antimoni, Sb	0,02	< 0,01	0,005–0,02
Barium, Ba	0,15	0,08	0,1–0,26
Koboltti, Co	0,02	< 0,01	< 0,01
Kromi, Cr	0,04	0,04	0,04–0,07
Kupari, Cu	0,47	0,21	0,08–0,40
Lyijy, Pb	0,12	0,21	0,08–0,23
Nikkeli, Ni	0,03	0,01	< 0,01–0,01
Sinkki, Zn	0,38	0,29	0,16–0,49
Vanadiini, V	0,01	< 0,01	< 0,01

4. Esimerkkikuonan prosessointi

Taulukko 11. Esimerkkikuonan ja vertailukuonien liukoisuustuloksia kumulatiivisessa L/S-suhteessa 10. Liuenneiden haitta-aineiden määrät on ilmoitettu yksikössä mg/kg kuiva-ainetta.

Testi	Esimerkkikuona		Pohjakuona I/S FASAN, Tanska	Pohjakuona Turku
	Kaksivaiheinen ravistelutesti EN 12457-3	Läpivirtaus- testi CEN/TS 14405	EN 12457-3	EN 12457-3 / CEN/TS 14405
suodoksen pH	11,0	9,6–11,0	11,1	8,7–11,4
<i>Liuenneet aineet, mg/kg kuiva-ainetta (L/S 10)</i>				
Arseeni, As	0,01	0,02	< 0,01	< 0,01–0,02
Barium, Ba	1,2	0,58	0,23	0,60–2,0
Kadmium, Cd	< 0,001	< 0,0006	0,002	0,001–0,003
Koboltti, Co	0,003	0,006	-	-
Kromi, Cr	0,17	0,21	0,07	< 0,04–0,56
Kupari, Cu	1,7	1,2	7,0	0,49–7,4
Elohopea, Hg	< 0,001	< 0,0002	< 0,001	< 0,0005 – < 0,001
Molybdeeni, Mo	0,61	0,74	0,79	0,36–1,3
Nikkeli, Ni	0,03	0,1	0,03	0,02–0,08
Lyijy, Pb	0,04	0,03	0,16	0,01–1,27
Antimoni, Sb	0,03	0,03	0,19	0,27–0,58
Seleeni, Se	< 0,10	< 0,07	0,18	0,06–0,29
Vanadiini, V	0,18	0,21	-	-
Sinkki, Zn	0,13	0,04	0,29	0,08–0,67
Kloridi, Cl-	2 400	2 700	11 000	1 700–2 500
Fluoridi, F-	< 10	< 8,8	< 10	3,3–84
Sulfaatti, SO ₄ ²⁻	11 000	12 000	840	640–5 100
DOC	230	140	260	120–340

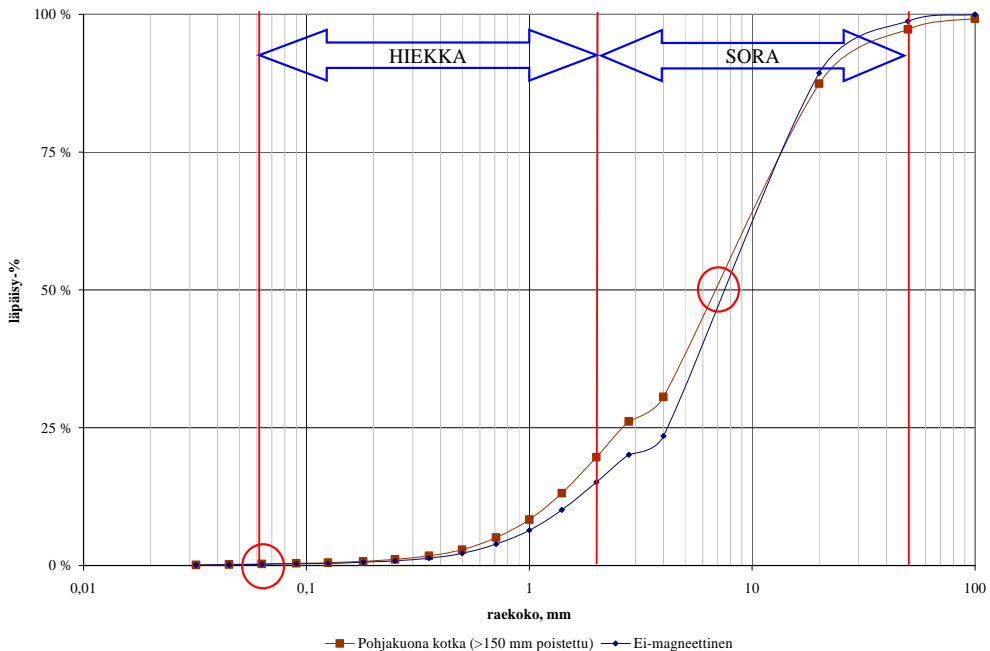
Esimerkkikuonan rikkipitoisuus oli korkea ja sitä kautta myös sulfaatin liukoisuus oli muista kuonista poikkeavan korkea. Edellä mainittujen voidaan päätellä johtuvan verrattain suuresta rakennusjätteen osuudesta (esim. kipsilevyt) laitoksella näytteenottoaikana. Muilta osin kuona vastasi koostumukseltaan muita

tunnettuja kuonia. Kuonasyötteen kuparin ja antimonin liukoisuus oli jopa hieman normaalia alhaisempi. Em. alhaisiin liukoisuuksiin tulee kuitenkin suhtautua hieman varauksella, sillä joissain tapauksissa korkea sulfaatin liukoisuus saattaa pidättää tai hidastaa muiden haitta-aineiden liukoisuutta, mitä ei näillä tutkimuksilla voida todentaa.

Vaikka kokonaispitoisuuksien osalta mm. antimonin, kromin, kuparin, nikkelin ja sinkin yhteenlaskettu pitoisuus kuonasyötteenä ylittää yhden jäteluokituksessa käytetyn kriteerin (1 %), ei ravistelutestien suodos ollut toksista tutkituille eliöille (levä, vesikirppu ja valobakteeri).

Orgaanisen aineksen osuus kuonasyötteenä oli pieni (TOC 0,33 %, LOI 2,3 %). Myös orgaanisten yhdisteiden (PCB ja PAH) pitoisuudet olivat erittäin pieniä.

Raekokojakauman (kuva 7) perusteella kuonasyöte on soraa, jossa hienoaineksen osuus on pieni. Näin ollen se ei vaikuttaisi olevan routivaa. Eimagneettisen osuuden raekokojakauma on pääosin yhteneväinen koko kuonan jakauman kanssa.



Kuva 7. Käsittämättömän pohjakuonan (syöte) ja ei-magneettisen osuuden raekokojakaumat.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

MLA-tutkimusten perusteella esimerkkikuona sisälsi 6,9 % rautaa ja 1,9 % metallista alumiinia. Lisäksi syöte sisälsi mm. ei-luonnollisia, kuten rakennustuoteperäisiä, silikaatteja (12 %), rautasilikaatteja (15 %), luonnon alkaalirikkaita silikaatteja (11 %) sekä luonnollisia karbonaatteja (6,4 %) ja lasia (18,4 %).

4.3 Käytetyt prosessointitekniikat

Koesuunnittelun pohjana on rikastusteknologian ja siihen liittyvän mineralogisen karakterisoinnin hyödyntäminen kuonien yksikköprosessien suunnittelussa.

4.3.1 Näytteen esikäsittely

Aivan ensimmäiseksi tutkittavasta kuonamateriaalista poistettiin kaikki suuret, arviolta halkaisijaltaan yli 150 mm:n metallikappaleet, tiilenkappaleet yms. manuaalisesti erilleen. Tämän jälkeen jäljelle jäänyt materiaali homogenisoitiin ja jaettiin neljään osaan. Tutkimuksen kohteeksi otettiin ¼ osa alkuperäisestä kuonamateriaalista (kuva 8).



Kuva 8. Ylhäällä suurten metalli- yms. kappaleiden poisto manuaalisesti, alhaalla jäljelle jääneen tutkittavan kuonamateriaalin jako neljään osaan.

Tutkittava kuonamateriaali kuivattiin jatkokäsittelyn helpottamiseksi. Kuivaamisen jälkeen kuonaa ”rummutettiin” kuivana rummussa (kuva 9). Tämän tarkoituksena oli saada toisiinsa agglomeroituneita partikkeleita erilleen sekä saada hienoaines irtoamaan kappaleiden pinnoilta. Prosessin aikana todettiin, että kuonamateriaalin tulisi olla erittäin kuivaa. Jos mukana on hiukankin kosteutta, rummutuksesta voi olla vain haittaa ja tällöin syntyy lisää agglomeroituneita partikkeleita. Rummutuksessa käytetty rumpu oli suljettu ”umpirumpu”. Seulova rumpu olisi todennäköisesti tehokkaampi, tällöin rummutuksessa irtoava hienoaines voitaisiin erottaa muusta materiaalista osittain erilleen jo tässä vaiheessa.



Kuva 9. Rummun täyttö kuonamateriaalilla.

4.3.2 Mekaanis-fysikaaliset tekniikat

4.3.2.1 Seulonta

Esikäsittelyn jälkeen materiaali kuivaseulottiin (kuva 10) eri raeluokkaan > 100 mm, 50–100 mm, 20–50 mm, 4–20 mm ja < 4 mm.

4. Esimerkkikuonan prosessointi



Kuva 10. Kuonamateriaalin seulontaa eri raeluokkiin.

4.3.2.2 Magneettierotus

Kaikille seulotuille fraktioille, lukuun ottamatta karkeinta > 100 mm fraktiota tehtiin magneettierotus (kuva 11) heikkomagneettisella hihnaerottimella. Käsitteilyn tuloksena saatiin erotettua rautapitoiset partikkelit erilleen muusta materiaalista.



Kuva 11. Magneettierotus heikkomagneettisella hihnaerottimella.

4.3.2.3 Eddy Current -erotus

Eddy Current -pyörrevirtaerotuksia tehtiin ei-magneettisille 4–20 mm:n ja 20–50 mm:n fraktioille. Käsittelyn tarkoituksena oli erottaa alumiini-, kupari- ja sinkkipitoiset partikkelit muusta kuonamateriaalista. Laboratoriokokeet tehtiin Luulajan teknillisessä yliopistossa Ruotsissa. Erilaisia muuttujia, kuten magneettiroottorin ja syöttöhihnan nopeuden vaikutusta, testattiin mahdollisimman selektiivisen erotuksen aikaansaamiseksi.

4.3.2.4 Painovoimaerotus ja vaahdotus

Ei-magneettisen < 4 mm:n fraktion käsittelyssä tutkittiin mm. painovoimaerotuksen ja vaahdotuksen soveltuvuutta. Painovoimaerotus tehtiin tärypöydällä (kuva 12). Aluksi materiaali murskattiin valssimurskaimella < 0,5 mm:n raekokoon, koska raekokojakauman tulee olla mahdollisimman kapea tehokkaan ja selektiivisen erotuksen aikaansaamiseksi.

Vaahdotuskokeita varten < 4 mm:n ei-magneettinen fraktio murskattiin < 1 mm:n raekokoon valssimurskaimella. Tämän jälkeen materiaali jauhettiin kuulamyllyllä. Erilaisia vaahdote-, kokooja- ja aktivaattorikemikaaleja testattiin. Lisäksi vaahdotusprosessia tehostettiin seulonnalla sekä liejunerotuksella.



Kuva 12. Painovoimaerotus tärypöydällä ei-magneettiselle < 4 mm:n fraktiolle.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

4.3.3 Bioliuotus

Kuonan sisältämien hyödynnettävissä olevien alkuaineiden liukenevuutta tutkittiin rikkiä ja rautaa hapettavien mikrobien avulla. Kokeissa tarkasteltiin kuonan soveltuvuutta bioliuotukseen sekä eri olosuhteiden, kuten kiintoainemäärän, raekoon ja liuotusajan, vaikutusta metallien liukenemiseen.

4.3.3.1 Mikrobien kasvatus

Liuotuksissa käytetty mikrobisekaviljelmä koostui mm. seuraavista mikrobilajeista: *Leptospirillum ferrooxidans* CF12, *Acidithiobacillus ferrooxidans* ATCC23270, *Acidithiobacillus* sp. NO-37, *Acidimicrobium ferrooxidans* TH3 ja *Acidiphilium* sp. SJH. Liuotukseen käytettyä mikrobisekaviljelmää kasvatettiin ravistelupulloissa. Ravistelupullot olivat tasoravistelijassa, jonka kierrosnopeus oli 150 kierrosta minuutissa ja lämpötila 25 °C. Mikrobikasvatukset tehtiin 250 ml:n Erlenmeyer-pulloissa, joissa nestetilavuus oli 200 ml. Liuoksista tehtiin 10 % mikrobiviljelmien suhteen (20 ml mikrobiviljelmää ja 180 ml kasvatusliuosta). Kasvatusliuoksena käytettiin mineraalisuola- ja hivenaineliuosta, jonka pH oli 1,8 (pH säädettiin rikkihapolla). Kasvatusliuos tehtiin litran pulloihin laittamalla 20 ml mineraalisuolaliuosta, 1 ml hivenaineliuosta ja 20 ml ferrosulfaattiliuosta (1M FeSO₄ · 7 H₂O).

4.3.3.2 Ravistelupullokokeet

Bioliuotuskokeet suoritettiin esimerkkikuonalle käyttäen kolmea eri raekoko-fraktiota: karkea 4–8 mm, keskikarkea 1–4 mm ja hieno < 1 mm. Edellä mainituista fraktioista karkea fraktio seulottiin erilleen magneettisen erotuksen läpikäyneestä kuonasta, jonka partikkelikoko oli 4–20 mm. Hieno ja keskikarkea-fraktio erotettiin niin ikään magneettisen erotuksen läpikäyneestä kuonasta, jonka partikkelikoko oli < 4 mm. Kuonajakeiden bioliuotukset tehtiin ravistelukokein laboratoriomittakaavassa 250 ml:n Erlenmeyer-pulloissa, joita ravisteltiin vakionopeudella vakiolämpötilassa, 150 rpm ja 30 °C. Pisimmät pullokokein suoritettut bioliuotukset kyseisille kuonafraktioille kestivät puoli vuotta.

Ravistelukokeita varten mikrobisekaviljelmää siirrostettiin pulloihin 10 %. Ravistelukokeissa kiintoainepitoisuudet olivat 1 % ja 5 % (m/v pitoisuus). Taulukkoon 12 on kerätty eri fraktioille tehdyt kokeet. Taulukossa 9 on esitetty liuotuskokeiden kiintoaine määrät ja raekoot. 0-sarjan pulloihin ei lisätty mikro-

bisekaviljelmää ollenkaan. Kokeiden alussa liuosten pH:ta säädettiin noin 1,9. Liuosten pH:ta tarkkailtiin päivittäin ja säädettiin tarvittaessa 10-prosenttisella rikkihapolla. Liuotuksen aikana seurattiin redox-potentiaaleja ja lisättiin tarvittaessa rautaa (1M FeSO₄). Ferrorauta lisättiin ravistelupulloihin steriilinä ferrosulfaattiliuoksena suodattamalla 0,45 µm steriilisuodattimen läpi. Liuotuksen aikana bakteerien elävyyttä tarkasteltiin mikroskoopilla. Bakteerien määrää sen sijaan ei liuotuskokeen aikana laskettu. Bioliuotuskokeiden päätyttyä kiintoaine suodatettiin pois ja sakka pestiin vedellä. Kiintoaine kuivattiin ja kuiva sakka punnittiin. Suodatetusta liuoksesta otettiin tarvittava näytemäärä analyysijä varten ja loppu steriloitiin autoklaavilla.

Taulukko 12. Ravistelupullokokeet Kotkan kuonalle.

Materiaali	Kuona (g)	Kuonapitoisuus ^a (%)	Mikrobiseos (ml)	Kasvatusliuos (ml)
HIENO < 1 mm	2	1	20	180
HIENO < 1 mm	10	5	20	180
KESKIKARKEA 1–4 mm	2	1	20	180
KESKIKARKEA 1–4 mm	10	5	20	180
KARKEA 4–8 mm	2	1	20	180
KARKEA 4–8 mm	10	5	20	180
HIENO < 1 mm	10	5	-	200
KESKIKARKEA 1–4 mm	10	5	-	200
KARKEA 4–8 mm	10	5	-	200

^a Käytetty kasvatusliuos: 960 ml tislattua vettä + 20 ml "basal salts"-liuosta , 1 ml "trace elements" -liuosta.

4.3.3.3 Analyysit

Koesarjasta otettiin 10 ml:n näytteet 13 vuorokauden, kuukauden (33 vrk) ja kolmen kuukauden (91 vrk) päästä aloituksesta sekä puolen vuoden päästä, jolloin liuotukset lopetettiin. Näytteet suodatettiin mikro-suodattimilla ja lähetettiin analysoitavaksi (ICP). ICP:llä analysoidut alkuaineet: Ag, Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Sr, Ti, V ja Zn.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

4.3.4 Ikäännyttäminen

Pohjakuonan ikäännyttämiskokeissa oli tavoitteena selvittää kiihdytetyn ikäännyttämisen vaikutuksia kuonan ominaisuuksiin. Ikäännyttämiskokeissa käytettiin käsittelemätöntä kuonaa (syöte) murskattuna < 4 mm:n raekokoon. Kokeet suoritettiin vaiheittain seuraavasti:

1. CO₂-sidontakapasiteetin arviointi optimiolosuhteissa (vesiuutteen kuplitus CO₂-pitoisella ilmalla)
2. Ikäännyttäminen kosteuskammiossa CO₂-pitoisella (6 %) ilmalla (simuloi savukaasujen johtamista kuonaan, kokeiden kestot 6, 48 ja 96 h)
3. Ikäännyttäminen kosteuskammiossa normaalilla ilmalla (kiihdytetty ”luonnollinen” ikäännyttäminen), kokeen kesto 64 vrk.

Kuvassa 13 on esitetty ikäännyttämiskokeissa (vaiheet 2 ja 3) käytetty koejärjestely.



Kuva 13. Ikäännyttämiskokeiden koejärjestely.

Kolonnin läpi johdettiin 6 % hiilidioksidia sisältävää ilmaa. Ennen kokeita kuona oli kostutettu 15 %:n vesipitoisuuteen (kuivapainosta) hiilidioksidin sitoutumisen ja karbonoitumisen mahdollistamiseksi.

Normaalilla ilmalla tehdyssä kokeessa kuonanäyte kostutettiin viikoittain uudelleen noin 15 %:n vesipitoisuuteen karbonoitumisreaktioiden ylläpitämiseksi.

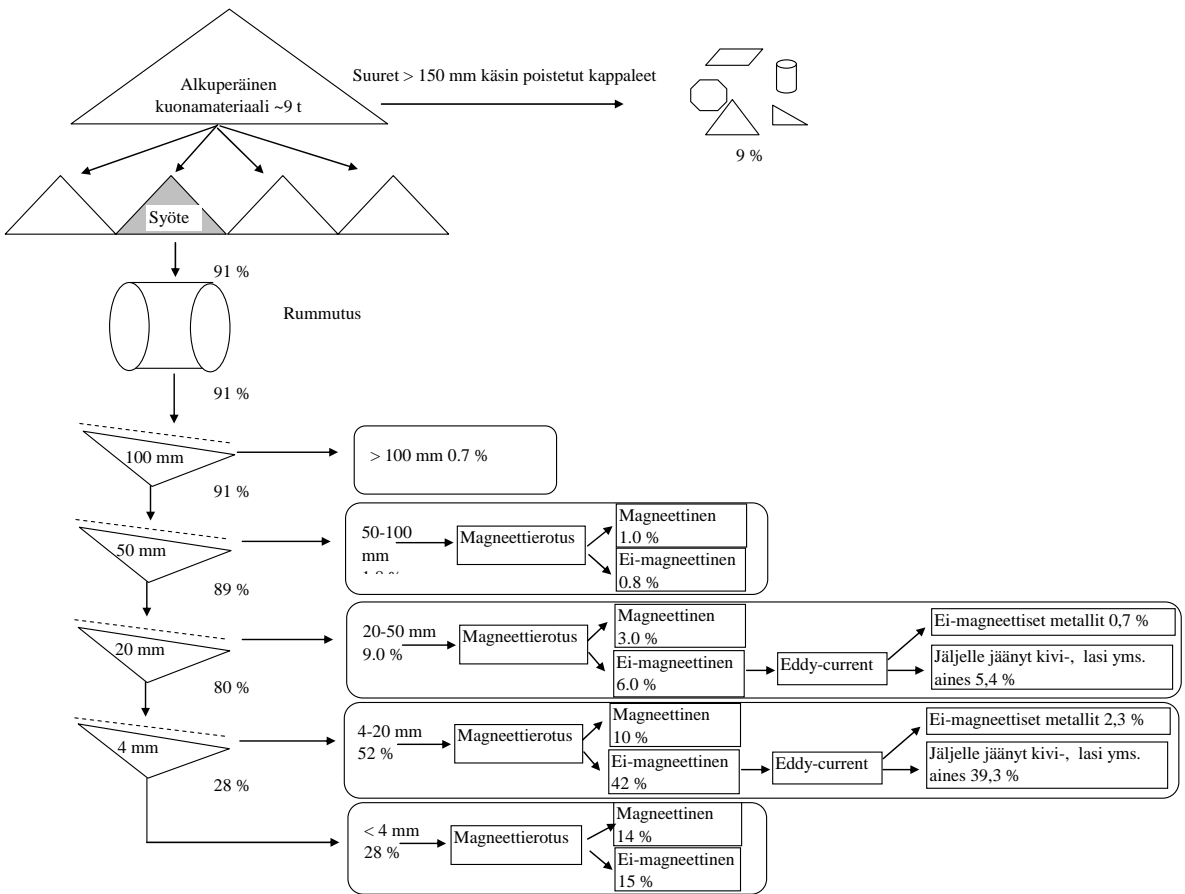
Kokeissa seurattiin kuonan epäorgaanisen hiilen (karbonaatit) pitoisuuden kehittymistä, pH:n muuttumista (vesiuute) sekä liukoisuusominaisuuksien muuttumista (ravistelutestit ennen ja jälkeen, vaiheissa 2 ja 3).

4.4 Prosessointikokeiden tulokset

4.4.1 Massataseet ja saannot

Kuonamateriaalin prosessointikaavio ja massataseet esikäsittelystä Eddy Current -erotukseen saakka on esitetty kuvassa 14. Alkuperäisen kuonamateriaalin määrä oli ~9 tonnia ja prosessointikokeiden varsinainen syötemateriaali ~2 tonnia. Käsini poistettujen suurten > 150 mm kappaleiden osuus oli 9 % koko kuonamateriaalista. Fraktion 4–20 mm osuus oli 52 % ja raeluokan < 4 mm osuus 28 %.

4. Esimerkkikuonan prosessointi



Kuva 14. Kuonamateriaalin prosessointikaavio ja massataseet esikäsitteystä Eddy Current -erotukseen saakka.

Magneettierotuksessa erilleen saadun rautapitoisen materiaalin osuus oli 28 % koko syötemateriaalista ja ei-magneettisen materiaalin osuus 64 %. Magneettierotusta ei tehty karkeille > 100 mm fraktiolle.

4.4.2 Magneettisten metallien talteenotto

Magneettisten ja ei-magneettisten fraktioiden pitoisuudet ja saannit tärkeimpien metallien osalta on esitetty taulukossa 13. Analyysit tehtiin XRF-menetelmällä. Fraktioiden 20–50 mm ja 50–100 mm magneettisia ja ei-magneettisia tuotteita ei kuitenkaan analysoitu tuotteiden hankalasta olomuodosta johtuen.

Fraktion < 4 mm osalta 81 % rautapitoisesta materiaalista saatiin magneettiseen tuotteeseen, rautapitoisuus oli tosin melko alhainen 17,15 %. Valtaosa kuparista 66,5 % saatiin ei-magneettiseen fraktioon. Magneettierotus ei toiminut yhtä selektiivisesti muiden alkuaineiden Al, Zn, S ja Ti osalta, vaan nämä jakautuivat melko tasaisesti sekä magneettiseen että ei-magneettiseen tuotteeseen. Fraktiossa < 4 mm magneettisen tuotteen osuus oli 48,3 % ja ei-magneettisen tuotteen osuus 51,7 %. Massaosuuksien ja analyysien perusteella vaikuttaa siltä, että joukossa oli vielä paljon agglomeroituneita partikkeleita joten magneettierotus ei ollut vielä kovin selektiivinen.

Magneettierotus toimi tehokkaammin karkeamman 4–20 mm:n fraktion osalta. Magneettisen tuotteen osuus oli 19,9 % ja ei-magneettisen tuotteen 80,1 %. Rautapitoisuus magneettisessa fraktiossa oli 31 % ja saanti 71,7 %. Suurin osa sinkistä 65,9 % ja puolet kuparista saatiin magneettiseen fraktioon. Tämä johtuu todennäköisesti monimetallisista komponenteista, jolloin kupari ja sinkki menevät raudan mukana magneettiseen tuotteeseen. Muut metallit saatiin pääasiallisesti ei-magneettiseen tuotteeseen Al 82 %, S 74,2 % ja Ti 74,1 %.

Taulukko 13. Tulokset magneettierotuksesta, fraktiot < 4 mm ja 4–20 mm.

Tuote	Massa %	Fe		Al		Cu		Zn		S		Ti	
		%	Saanti %	%	Saanti %	%	Saanti %	%	Saanti %	%	Saanti %	%	Saanti %
< 4 mm, M	48,3	17,15	81,0	5,96	43,7	0,50	33,5	0,40	44,5	2,93	57,0	0,66	48,5
< 4 mm, EM	51,7	3,76	19,0	7,16	56,3	0,93	66,5	0,46	55,5	2,06	43,0	0,65	51,5
< 4 mm M+EM	100,0	10,22	100,0	6,58	100,0	0,73	100,0	0,43	100,0	2,48	100,0	0,65	100,0
4-20 mm, M	19,9	30,97	71,7	6,96	18,0	2,06	50,0	1,96	65,9	1,54	25,8	0,58	25,9
4-20 mm, EM	80,1	3,03	28,3	7,86	82,0	0,51	50,0	0,25	34,1	1,10	74,2	0,41	74,1
4-20 mm M+EM	100,0	8,58	100,0	7,68	100,0	0,82	100,0	0,59	100,0	1,19	100,0	0,44	100,0

Myöhemmin haluttiin vielä selvittää, onko magneettisen < 4 mm fraktion laatua mahdollista parantaa murskauksen avulla. Magneettinen < 4 mm fraktio murskattiin valssimurskaimella ja seulottiin 1 mm:n seulalla. Agglomeroituneet partikkelit saatiin hajotettua murskaamalla ja > 1 mm magneettinen fraktio koostui lähes ainoastaan puhtaista metallipartikkeleista. Tulokset magneettiselle < 4 mm fraktiolle tehdystä murskauksesta on esitetty taulukossa 14.

Karkeamman 1–4 mm magneettisen tuotteen osuus oli 3,3 % syötteestä. Raudansaanti tähän tuotteeseen oli vain 8,6 %, mutta rautapitoisuus oli 45 %. Suoraan < 4 mm fraktiolle tehdyn magneettierotuksen jälkeen magneettisen < 4 mm tuotteen rautapitoisuushan oli vain 17,15 %.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

Alumiinin saanti magneettiseen 1–4 mm fraktioon oli 13,3 % ja pitoisuus 24 %, kuparipitoisuus 4,9 % ja saanti 31,8 %. Murskauksen ja seulonnan avulla voidaan siis parantaa selvästi magneettisen tuotteen laatua. Tällöin saadaan puhtaampi tuote ja korkeampia metallipitoisuuksia.

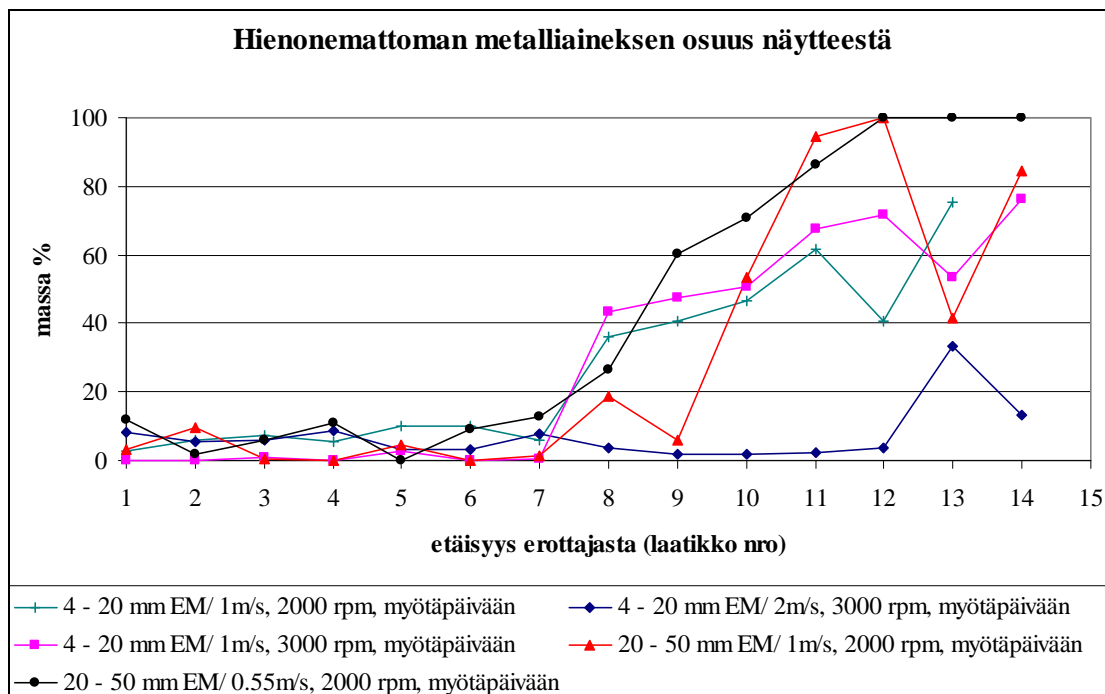
Taulukko 14. Tulokset, magneettisen < 4 mm fraktion murskaus.

Tuote	Massa %	Fe		Al		Cu		Zn		S		Ti	
		%	Saanti %	%	Saanti %	%	Saanti %	%	Saanti %	%	Saanti %	%	Saanti %
< 1 mm, M	96,7	16,20	91,4	5,35	86,7	0,36	68,2	0,38	93,4	3,01	99,4	0,64	94,1
1-4 mm, M	3,3	45,05	8,6	24,00	13,3	4,86	31,8	0,79	6,6	0,55	0,6	1,17	5,9
Lasy < 4 mm, M	100,0	17,15	100,0	5,96	100,0	0,50	100,0	0,40	100,0	2,93	100,0	0,66	100,0

4.4.3 Ei-magneettisten metallien talteenotto

Eddy Current -pyörrevirtaerotukset tehtiin fraktioiden 4–20 mm ja 20–50 mm ei-magneettisille tuotteille. Kokeissa testattiin erilaisia parametrejä, kuten magneetin pyörimisnopeuden ja hihnakuljettimen nopeuden vaikutusta metallien erotustehokkuuteen.

Tulosten mukaan (kuva 16) näyttää siltä, että Eddy Current -pyörrevirtaerotus toimi selektiivisemmin karkeammalla 20–50 mm:n materiaalilla. Syöttöhihnan nopeudella 0,55 m/s ja magneettiroottorin nopeudella 2 000 rpm saatiin täysin puhtaita metallijakeita kauimmaisiin keräyslaatikoihin 12–14. Hienommalla 4–20 mm:n fraktiolla ei saatu ainuttakaan täysin puhtaita metallijakeita sisältävää keräyslaatikkoa. Osasyyn tähän ovat agglomeroituneet partikkelit, eli metallien pinnoille on tarttunut hyvin pysyvästi hienojakoista kuonaa.

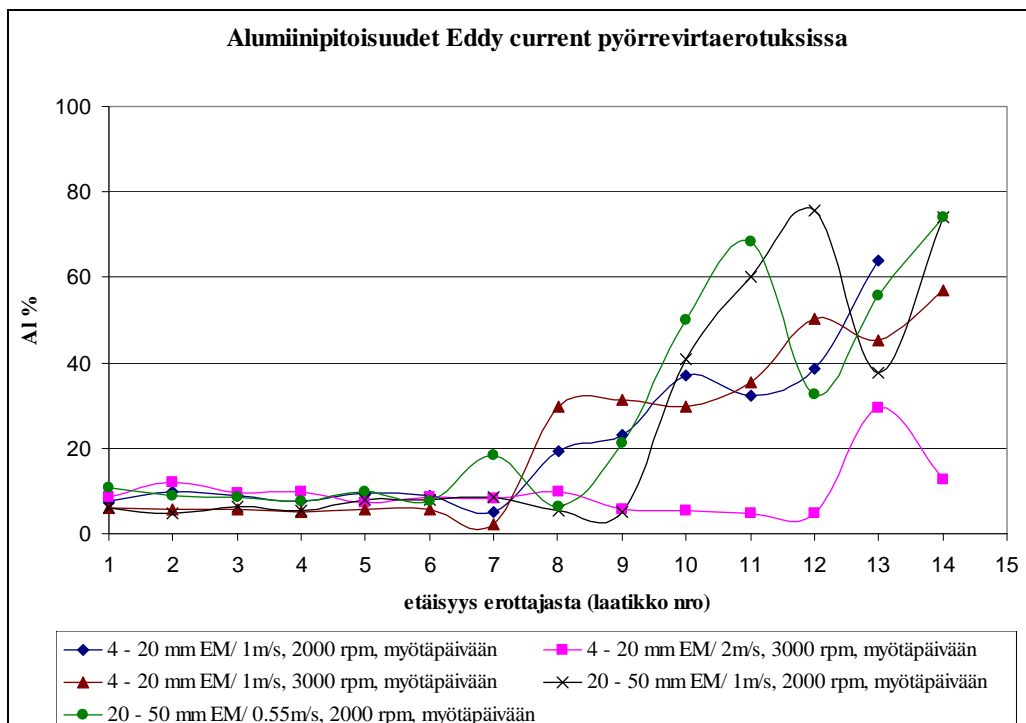


Kuva 15. Eddy Current -pyörrevirtaerotukset, metallisen materiaalin määrä eri keräyslaatikoissa.

Eddy Current -kokeissa saadut alumiinipitoisuudet on esitetty kuvassa 16. Alumiini rikastui laatikoihin nro 8–14, lukuun ottamatta fraktiolla 4–20 mm tehtyä koetta suurimmalla hihnanopeudella 2 m/s ja magneettiroottorin nopeudella 3 000 rpm, jossa rikastuminen tapahtui laatikoihin nro 13–14.

Laskennalliset alumiinin saannit ja pitoisuudet laatikoihin 8–14 on esitetty taulukossa 15. Hienommalla 4–20 mm:n fraktiolla alumiinin saannit olivat 15,9–31,5 % ja vastaavat pitoisuudet 18,4–35,3 %. Karkeammalla 20–50 mm:n fraktiolla alumiinin pitoisuus oli n. 42 % ja saanti 30–44 %. Yksittäisissä laatikoissa saavutettiin jopa yli 70 %:n alumiinipitoisuuksia karkeammalla 20–50 mm:n materiaalilla kuten yllä olevasta kuvasta nähdään. Kaiken kaikkiaan molemmilla syötefraktioilla saatiin melko korkeita alumiinipitoisuuksia, mutta alumiinin saannit olivat melko alhaisia.

4. Esimerkkikuonan prosessointi



Kuva 16. Eddy Current -pyörrevirtaerotukset, alumiinipitoisuudet eri keräyslaatikoissa.

Taulukko 15. Alumiinin rikastuminen laatikoihin 8–14, laskennalliset pitoisuudet ja saannit.

Eddy current kokeet	Laatikot	Massa		Al	
		g	%	%	Saanti %
4-20 mm EM/ 1m/s, 2000 rpm, myötöpäivään	Rikaste laatikot 8-13	459,5	4,7	29,5	15,9
	Laatikot 1-13 yhteensä	9681,1	100,0	8,8	100,0
4-20 mm EM/ 2m/s, 3000 rpm, myötöpäivään	Rikaste laatikot 13-14	583,9	9,3	18,4	24,0
	Laatikot 1-14 yhteensä	6252,5	100,0	7,2	100,0
4-20 mm EM/ 1m/s, 3000 rpm, myötöpäivään	Rikaste laatikot 8-14	808,4	6,2	35,3	31,5
	Laatikot 1-14 yhteensä	13137,5	100,0	6,9	100,0
20-50 mm EM/ 1m/s, 2000 rpm, myötöpäivään	Rikaste laatikot 8-14	1797,4	13,2	42,2	44,2
	Laatikot 1-14 yhteensä	13636,9	100,0	12,6	100,0
20-50 mm EM/ 0,55m/s, 2000 rpm, myötöpäivään	Rikaste laatikot 8-14	1525,6	8,8	41,9	30,2
	Laatikot 1-14 yhteensä	17251,7	100,0	12,2	100,0

Alumiinin lisäksi havaittiin kuparin ja sinkin rikastumista yksittäisiin laatikoihin. Syötefraktiolla 4–20 mm saatiin 5–6 %:n kuparipitoisuuksia 7–19 %:n saannilla ja 2–13 %:n sinkkipitoisuuksia 15–30 %:n saanneilla. Vastaavasti fraktiolla 20–50 mm saatiin 9 %:n kuparipitoisuuksia 85–96 %:n saanneilla ja 9–34 %:n sinkkipitoisuuksia 39–50 %:n saanneilla.

Kaiken kaikkiaan Eddy Current -pyörrevirtaerotukset toimivat paremmin ja selektiivisemmin karkeammalla 20–50 mm:n syötefraktiolla. Lisäksi näyttää siltä, että hitaammalla syöttöhihnan nopeudella ei-magneettisten metallien erotus on selektiivisempi. Tällöin keskipakovoima ei häiritse erotusta vaan ainoastaan magneettiroottorin aiheuttama voima vaikuttaa erotettaviin partikkeleihin.

Edellä mainittujen saantojen lisäksi seurattiin metallisen alumiinin jakautumista suurimman massavirran omaavissa käsittelyfraktioissa. Taulukon 16 tulosten perusteella metallinen alumiini vaikuttaa hieman rikastuvan < 4 mm fraktioon. Toisaalta 4–20 mm:n kuonan magneettisten ja ei-magneettisten metallien poistaminen eivät näytä juurikaan muuttaneen metallisen alumiinin pitoisuuksia jäljelle jääneessä kuonassa.

Taulukko 16. Metallisen alumiinin jakautuminen käsittelyfraktioissa.

Näyte	Syöte	< 4 mm	4–20 mm	”Lopputuote” 4–20 mm (n = 2)
Metallinen alumiini (m-%)	1,6	1,9	0,61	0,55–0,61

4.4.4 Painovoimaerotus

Painovoimaerotuksen soveltuvuutta < 4 mm ei-magneettisen fraktion käsittelyyn tutkittiin tärypöydällä, kokeen tulokset on esitetty taulukossa 17. Ennen varsinaista tärypöytäerotusta materiaali murskattiin < 0,5 mm:n raekokoon valssimurskaimella.

Taulukko 17. Tärypöytäkokeen tulokset: syötteenä < 4 mm ei-magneettinen fraktio joka murskattiin < 0,5 mm raekokoon valssimurskaimella.

Tuote	Massa %	Cu		Zn		Al		Fe		Pb	
		%	Saanti %	%	Saanti %	%	Saanti %	%	Saanti %	%	Saanti %
Tärypöytärikaste < 0.5 mm	7,1	3,2	45,5	0,9	10,8	5,1	5,0	13,9	23,2	0,7	31,9
Tärypöydän välituote < 0.5 mm	62,7	0,2	22,5	0,2	23,5	6,0	51,5	3,0	44,9	0,1	33,2
Tärypöydän jäte < 0.5 mm	25,4	0,2	11,4	0,3	13,9	5,9	20,5	3,7	22,3	0,1	18,0
> 0.5 mm metallit murskauksesta	4,9	2,1	20,7	6,4	51,8	34,6	23,1	8,3	9,5	0,5	17,0
Tärypöytärikaste ja > 0.5 mm metallit	11,9	2,8	66,1	3,2	62,6	17,1	28,0	11,6	32,7	0,6	48,9
Laskennallinen syöte	100,0	0,5	100,0	0,6	100,0	7,3	100,0	4,2	100,0	0,2	100,0

Tärypöytärikasteen kuparipitoisuus oli 3,2 % ja saanti 45,5 %, muiden metallien saannit olivat selvästi matalampia. Tutkimuksessa todettiin, että murskausprosessissa saadaan lähes puhdas pelkästään metalleja sisältävä > 0,5 mm fraktio

4. Esimerkkikuonan prosessointi

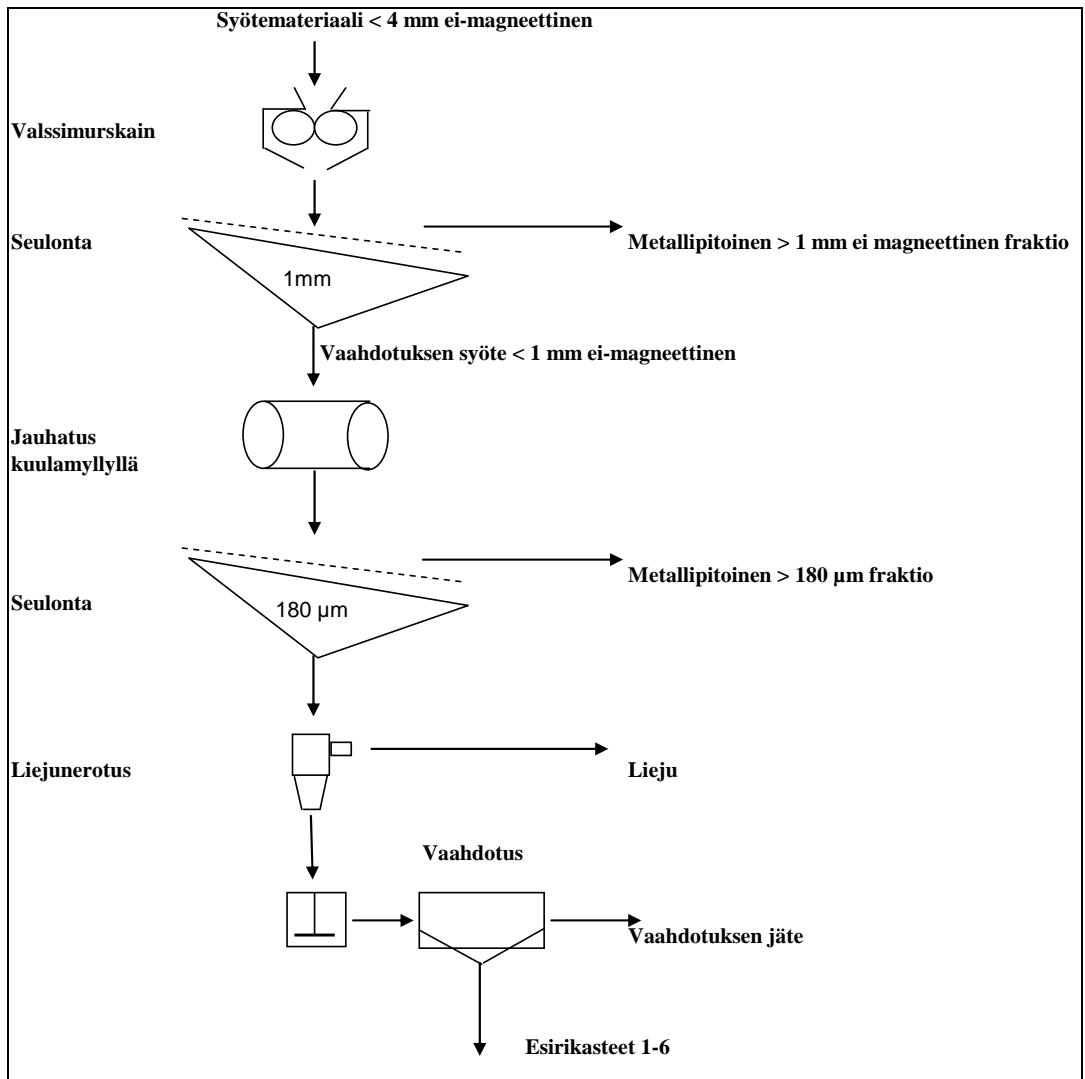
(kuva 17). Tämä murskauksessa syntyneen metallifraktion sinkkipitoisuus oli 6,4 % ja sinkin saanti 51,8 %, alumiinipitoisuus 34,6 % ja saanti 23,1 %, kupari-
pitoisuus 2,1 % ja saanti 20,1 %. Summattaessa yhteen sekä tärypöytärikaste että $> 0,5$ mm metallinen fraktio, kuparin saanti oli 66,1 % ja pitoisuus 2,8 %. Vastaavasti sinkkipitoisuus oli 3,2 % ja saanti 62,6 % sekä alumiinin saanti 28 % ja pitoisuus 17,1 %.



Kuva 17. Murskauksen yhteydessä pois seulottu $> 0,5$ mm metallifraktio.

4.4.5 Vaahdotus

Myös vaahdotuksen soveltuvuutta < 4 mm ei-magneettisen fraktion käsittelyyn tutkittiin. Kaiken kaikkiaan tehtiin 9 vaahdotuskoetta, joissa testattiin mm. erilaisia vaahdotuskemikaaleja, jauhatusaikoja ja vaahdotusprosessia tukevia yksikköprosesseja. Prosessikaavio vaahdotuksesta ja siihen liittyvistä yksikköprosesseista on esitetty kuvassa 18. Aluksi syötemateriaali murskattiin < 1 mm raekokoon valssimurskaimella. Murskauksen sivutuotteena saatiin lähes puhdas > 1 mm metalleja sisältävä fraktio, sama ilmiö todettiin jo aiemmin tehdyn painovoimaerotuskokeen yhteydessä.

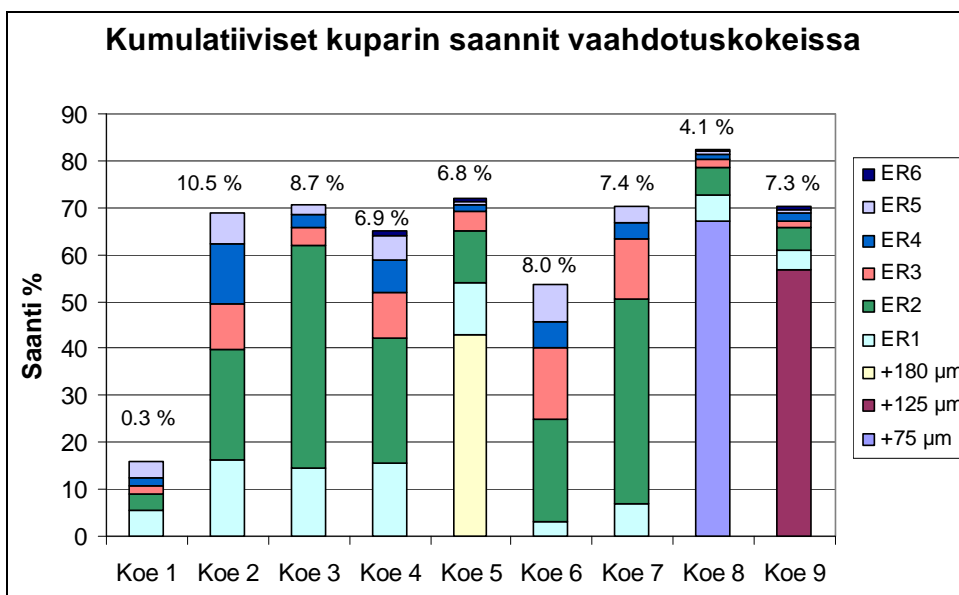


Kuva 18. Prosessikaavio vaahdotuksesta ja siihen liittyvistä yksikköprosesseista.

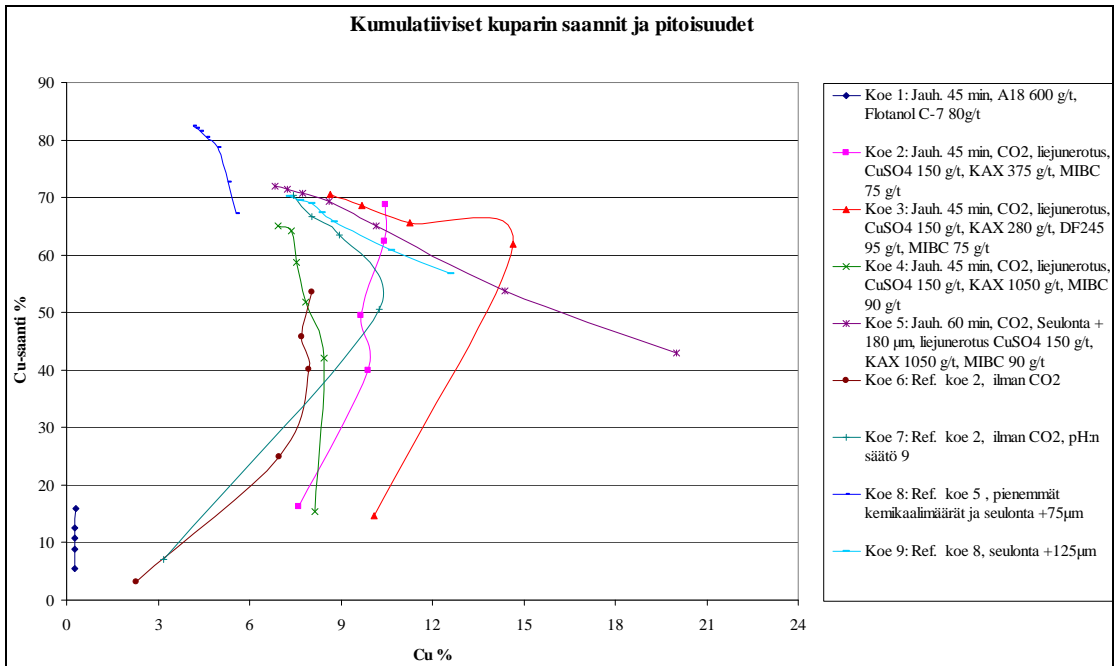
Vaahdotuskokeet tehtiin 1 kg:n näytteillä. Aluksi materiaali jauhettiin teräksisellä kuulamylyllä ja tämän jälkeen suurikokoiset metallipartikkelit seulottiin pois, koska ne ovat liian suuria vaahdottamalla talteen otettaviksi. Tämä voidaan todeta mm. erään vaahdotuskokeen jätteelle tehdystä mineralogisesta tarkastelusta (kohta 4.4.9). Koska hienojakeinen lieju haittaa vaahdotusta, tehtiin materiaalille seulonnan jälkeen liejunerotus kaikkein hienojakeisimman aineksen poistamiseksi.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

Vaahdotuksessa saatiin parhaat tulokset käytettäessä kuparisulfaattia aktivoijana ja ksantaattia kokoojakemikaalina. Kuvassa 19 on esitetty kumulatiiviset kuparipitoisuudet ja saannit vaahdotuskokeissa. Kuparipitoisuus vaahdotuksen syötössä oli 0,5–0,6. Esimerkiksi vaahdotuskokeessa nro 5 kuparin kumulatiivinen kokonaissaanti oli 72 % ja pitoisuus 6,8 %.



Kuva 19. Kumulatiiviset kuparin saannit ja pitoisuudet vaahdotuskokeissa eri rikastusvaiheiden jälkeen.



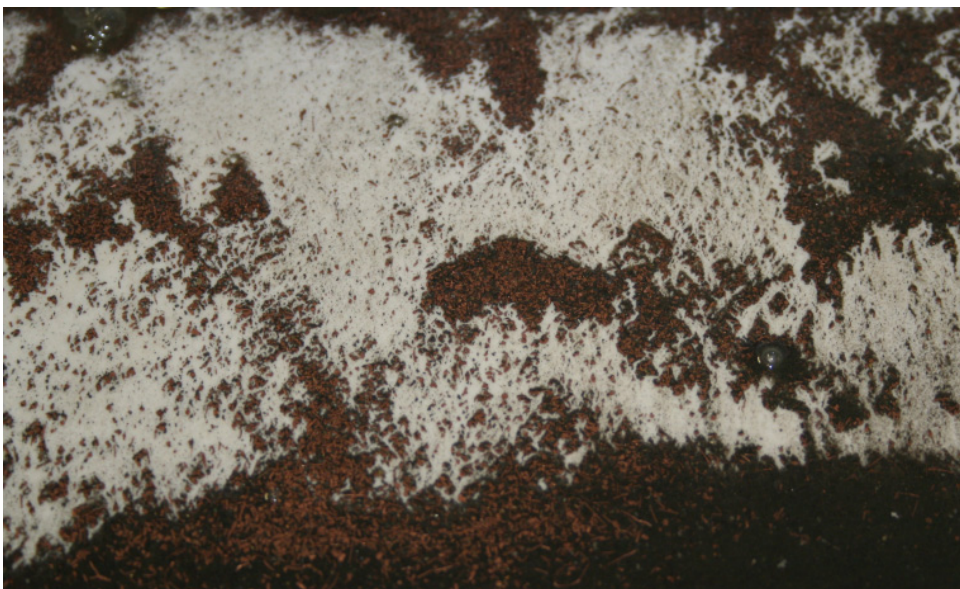
Kuva 20. Kumulatiiviset kuparin saannit ja pitoisuudet sekä eri muuttujat vaahdotuskokeissa.

Vaahdotuskokeiden kumulatiiviset kuparin saannit ja pitoisuudet sekä eri muuttujat on esitetty myös kuvassa 20. Vaahdotuskoe nro 5 onnistui rikastusteknisesti parhaiten. Kuvaajasta nähdään, että jauhatuksen jälkeen seulottujen suurten > 180 µm metallipartikkelien mukana saatiin jo 43 %:n kuparinsaanti 20 %:n pitoisuudella.

Muiden metallien, kuten alumiinin, osalta vaahdotus vaikuttaa hankalalta. Kuitenkin osa alumiinista voidaan saada talteen ennen vaahdotusta tehtävällä seulonnalla. Vaahdotuskokeessa nro 5 jauhatuksen jälkeen pois seulotun > 180 µm fraktion alumiinipitoisuus oli 48 % ja saanti 8 %.

Alustavien vaahdotuskokeiden perusteella näyttää siltä, että metallisen kuparin talteenotossa voidaan hyödyntää vaahdotusta ja siihen liittyviä yksikköprosesseja sekä saada kohtuullisen hyviä kuparirikasteita (kuva 21).

4. Esimerkkikuonan prosessointi



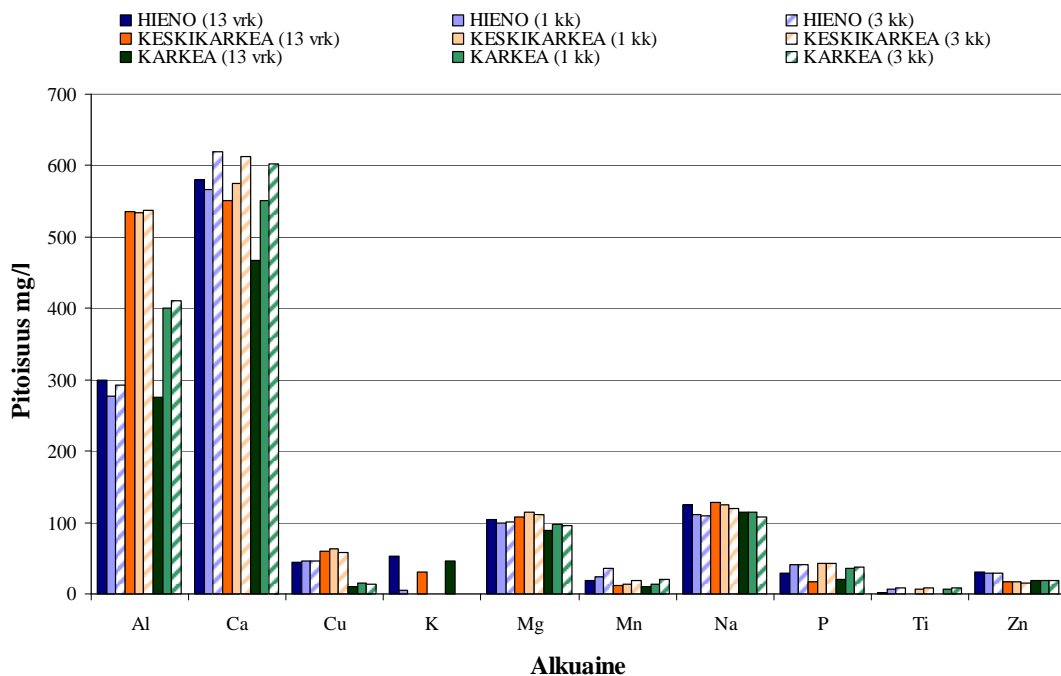
Kuva 21. Vaahdottamalla saatu kuparirikaste.

4.4.6 Bioliuotus

Liutuksen aikana tehdyistä analyyseistä voidaan päätellä, että bakteerit nopeuttavat metallien liukenemistä verrattuna perinteiseen kemialliseen liuotukseen. Erityisesti kuparin liukenevuuteen bakteereilla oli merkittävä vaikutus: kuparin saanto karkeista jäterakeista oli huomattavasti parempi verrattuna vastaavaan bakteerittomaan kemialliseen happoliuotukseen. Tulokset jätteiden bioliuotuksesta olivat lupaavia menetelmän soveltuvuudesta myös jätteiden käsittelyyn.

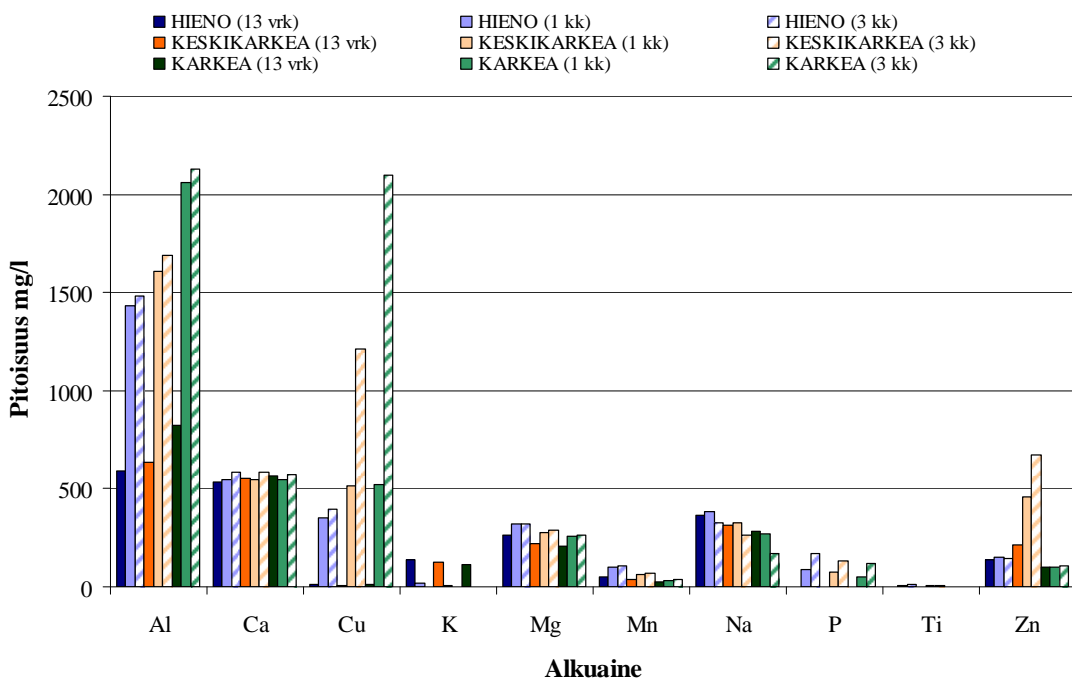
Kuviin 22 ja 23 on koottu vertailu mikrobeja sisältävien liuotuskokeiden alkuainepitoisuuksista liuotusajan edetessä. Kuvissa on esitetty kolmen kuukauden ICP-tulosten mukaiset alkuainemäärät. Kokeen loputtua otetuissa näytteissä ei ICP-tulosten mukaan ollut enää huomattavaa eroa kolmen kuukauden jälkeen otettuihin alkuainepitoisuuksiin. Tässä kuvassa ei ole huomioitu nollaliuoksia eli pelkkiä happoliuotuskokeita. Pylväitä vertailtaessa on huomioitava, että kyseessä on alkuainepitoisuudet (mg/l) tietyllä ajan hetkellä liuotuksissa.

4. Esimerkkikuonan prosessointi



Kuva 22. Alkuainepitoisuuksien vertailu eri liuotusajoilla: Kuonapitoisuus 1 % (2 g/200 ml). Kuvassa on esitetty vain mikrobiliuotukset, ei happoliuotuksia. Yksiväriset tummasävyiset pylväät kuvaavat alkuaineiden pitoisuuksia 13 vrk:n jälkeen, yksiväriset vaaleammat sävyt 33 vrk:n jälkeen ja raidoitettut vastaavia pitoisuuksia 91 vrk:n jälkeen.

4. Esimerkkikuonan prosessointi



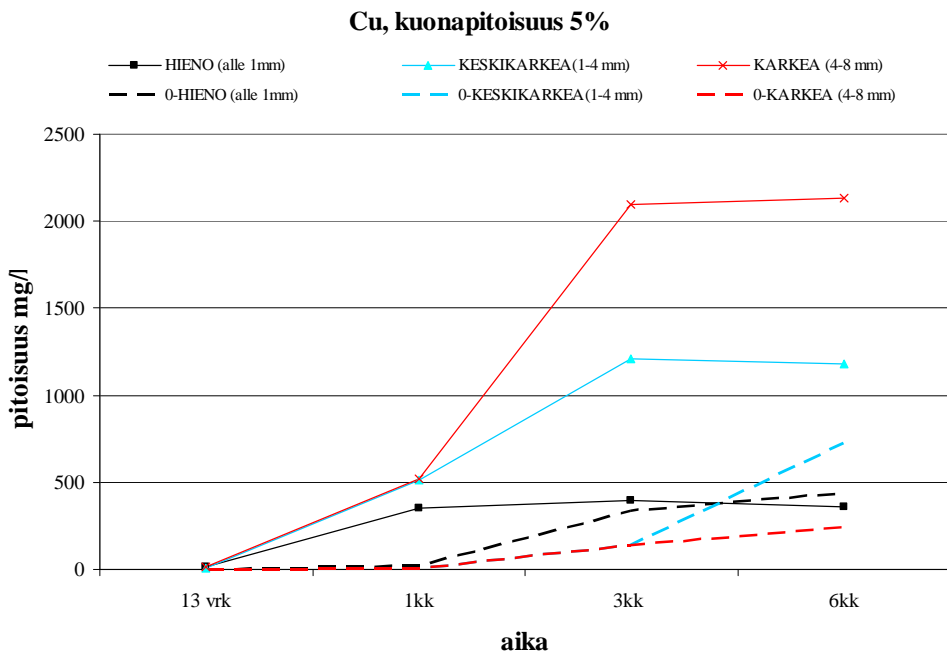
Kuva 23. Alkuainepitoisuuksien vertailu eri liuotusajoilla: Kuonapitoisuus 5 % (10 g/200 ml). Kuvassa on esitetty vain mikrobiliuotukset, ei happoliuotuksia. Yksiväriset tummasävyiset pylväät kuvaavat alkuaineiden pitoisuuksia 13 vrk:n jälkeen, yksiväriset vaaleammat sävyt 33 vrk:n (1 kk) jälkeen ja raidoitettuja vastaavia pitoisuuksia 91 vrk:n (3 kk) jälkeen.

ICP-tulosten perusteella kuonasta on selkeimmin liennut alumiinia, kalsiumia, kuparia, kaliumia, magnesiumia, mangaania ja sinkkiä. Kuonasta on vähäisessä määrin liennut myös nikkeliä, booria ja titaania. Muiden alkuaineiden pitoisuus liuksissa on alle 1 mg/l. Esimerkiksi arseenia, antimonia tai kadmiumia ei koesarjan näytteistä löytynyt juuri lainkaan, pitoisuudet alle 0,3 mg/l.

Kalsiumin, strontiumin ja magnesiumin kohdalla ei bioliuotuksella pelkkään happoliuotukseen ole juurikaan eroa. Kalsiumpitoisuudet ovat samaa suuruusluokkaa kaikissa liuotuskokeissa riippumatta raekoosta, kuonapitoisuudesta ja liuotusajan pituudesta.

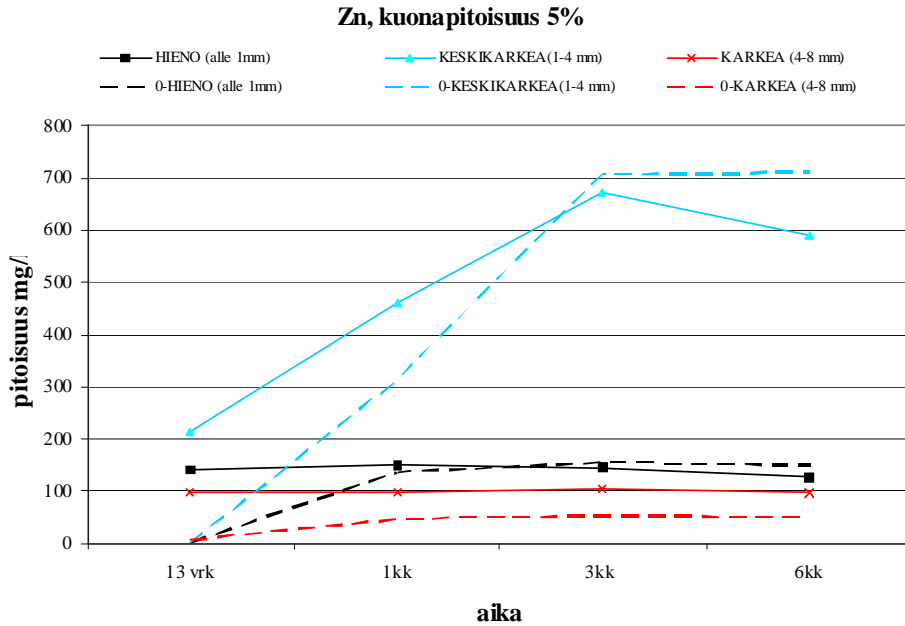
Oletetusti liuotusajan pidentyessä alkuaineiden pitoisuudet näytteissä kasvoivat. Selkein ero havaittiin kuparilla. Kuparin pitoisuudet kymmenkertaistuivat liuotusajan pidentyessä. Alussa kuparia liukeni parhaiten niissä liuotuksissa, joissa oli kaksi grammaa kuonaa. Näissä liuksissa bakteerit toimivat alussa tehokkaimmin. Liuotusajan pidentyessä kuitenkin kuparia liukeni selkeimmin 10 gramman kuonapitoisuuksista ja karkeasta kuonasta (kuva 24). Myös alumiinin

tapauksessa karkeasta fraktiosta liukeni eniten alumiinia (kuva 26). Kolmen kuukauden kohdalla muissa liuotuskokeissa 5 %:n kiintoaineella ei ollut suuria eroja alumiinin liukenevuuteen. Bioliuotuskokeissa 5 %:n kuonapitoisuudella sinkkiä liukeni parhaiten alle 4 millin raekokofraktiosta (kuva 25). Raekokoja ja alkuaainepitoisuuksia verrattaessa pitää muistaa, että ravistelupullojen kuonien metallipitoisuudet voivat vaihdella jo kuonan heterogeenisuudenkin vuoksi etenkin karkealla raekoolla ja pienellä kahden gramman kiintoainemäärällä.

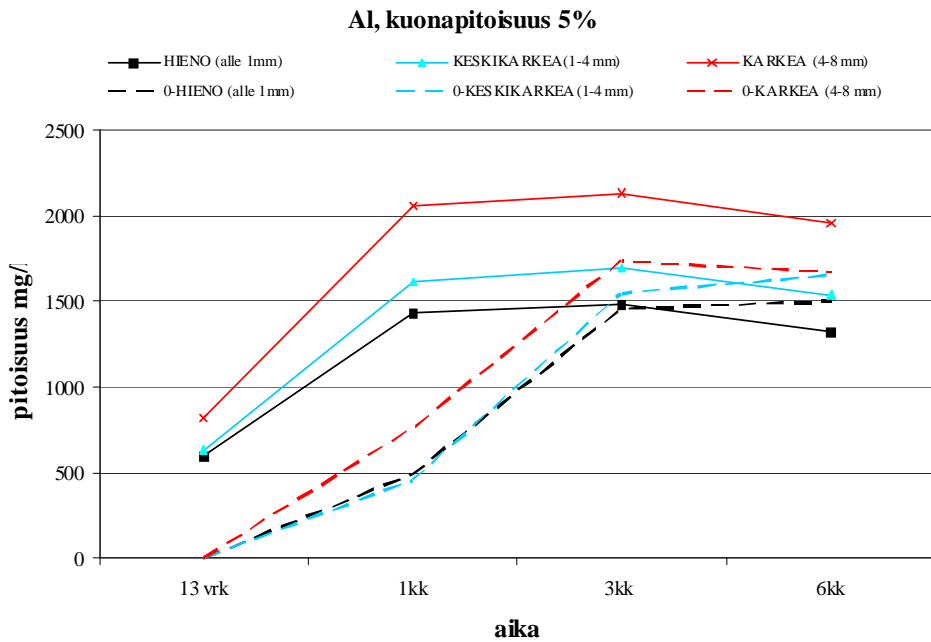


Kuva 24. Liuenneen kuparin pitoisuus (mg/l) ajan funktiona. Kuonapitoisuus 5 % (10 g/200 ml). Kuvassa on esitetty mikrobiliuokset sekä katkoviivalla vastaavat happoliuotukset (0-sarjan liuotukset).

4. Esimerkkikuonan prosessointi



Kuva 25. Liuenneen sinkin pitoisuus (mg/l) ajan funktiona. Kuonapitoisuus 5 % (10 g/200 ml). Kuvassa esitetty mikrobiliuokset sekä katkoviivalla vastaavat happoliuotukset (0-sarjan liuotukset).



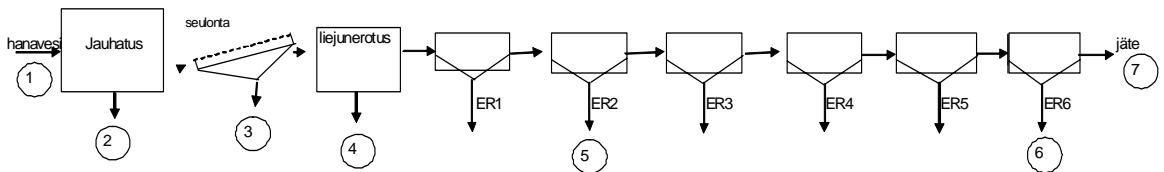
Kuva 26. Liuenneen alumiinin pitoisuus (mg/l) ajan funktiona. Kuonapitoisuus 5 % (10 g/200 ml). Kuvassa esitetty mikrobiliuokset sekä katkoviivalla vastaavat happoliuotukset (0-sarjan liuotukset).

4.4.7 Prosessiveden ominaisuudet

Kuonan käsittelyssä kokonaisprosessin eri vaiheissa muodostuu hienoaainesta ja alkuaineita sisältäviä jätevesiä. Vesiä käytetään suuria määriä, joten niillä on vaikutusta ympäristöön ohjattavan veden laadulle. Prosessivesien laadun tarkkailulla pyrittiin selvittämään eri prosessivaiheiden vaikutusta prosessivesien kemialliseen koostumukseen.

Prosessivesistä otetuista näytteistä analysoitiin sekä suodatetut että suodattamattomat näytteet. Analysoitavat näytteet otettiin prosessissa käytetystä hanavedestä (1), liuoksesta jauhatuksen jälkeen (2), seulonnan jälkeen (3), liejunerotuksesta (4), kahdesta vaahdotusvaiheesta (5 ja 6) sekä jätteestä. Suodatetuista vesinäytteistä analysoitiin liukoinen ja suodattamattomista kokonaisalkuainepitoisuus ICP-AES-tekniikalla. Suodatetuista näytteistä analysoitiin myös pH, alkaliteetti, sähköjohtokyky, TOC, kloridi, nitraatti ja sulfaatti.

Yksityiskohtaiset prosessivesitulokset on esitetty liitteessä A.



Kuva 27. Vaahdotuksen virtauskaavio. Vesinäytteiden ottokohtat on merkitty numeroilla 1–6.

Yhteenvedona prosessivesikokeista voidaan todeta seuraavaa:

- Vesinäytteiden tulokset ovat verrattavissa MLA-tuloksiin. Mineralogian sekä vesinäytteiden tuloksista on nähtävissä kuonanäytteen sisältävän eniten silikaatteja. Silikaatit sekä lasi- ja keraamiset yhdisteet sisältävät yleisesti kalsiumia, natriumia, kaliumia, magnesiumia, alumiinia ja rautaa. Nämä alkuaineet esiintyvät suurimpina pitoisuuksina myös prosessivedessä.
- Antimonin pitoisuus on verrattain korkea prosessivesinäytteissä. Pitoisuus vaihtelee välillä 19,3–84,0 µg/l ja on korkeimmillaan jauhatuksen jälkeisessä fraktiossa. Antimoni on liukoisessa muodossa (suodatetut vs. suodattamattomat näytteet), mikä tekee sen ongelmallisemmaksi. Runsaasti veteen liukenevat aineet leviävät yleensä ympäristössä laajalle ja ovat kasvien ja

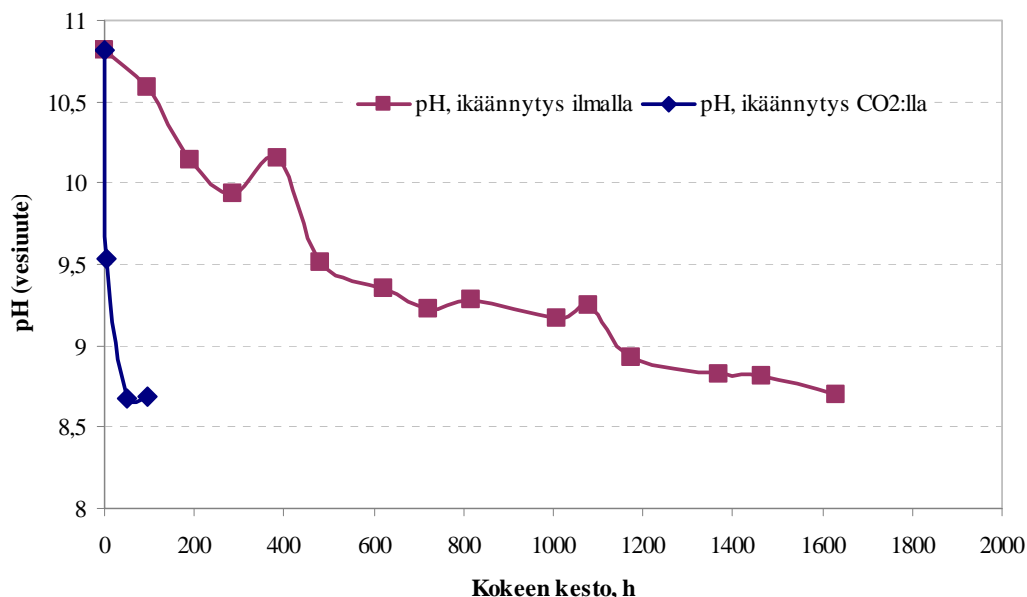
4. Esimerkkikuonan prosessointi

eläinten käytettävissä. Hienoainekseen sitoutuneena (suspensiona) alkuaineet jäävät lähelle päästölähdettä mm. saostumalla.

- Kuparin määrä on muihin metalleihin verrattuna prosessivesissä alhainen. Tämä selittyy toimivalla vaahdotuksella, jossa oli tarkoituskin erottaa kupari kuonasta.
- Tässä tutkimuksessa vettä ei kierrätetty. Kierrätettäessä veden laatu tulee vaihtelemaan verrattuna tämän tutkimuksen tuloksiin. Tässä lisättiin jokaisessa vaiheessa puhdasta hanavettä prosessiin. Vettä kierrätettäessä siihen liuenneet yhdisteet pääsevät vaikuttamaan pidemmän aikaa käsiteltävään näytteeseen ja sitä kautta muuttamaan myös veden koostumusta.
- Sulfaatin suuri määrä prosessivesissä saattaa olla ongelmallinen ympäristön lisäksi prosessikemian kannalta.

4.4.8 Ikäännytys

Ikäännytyskokeiden esikokeena tehdyssä kuplituskokeessa, jossa kuplitettiin kuonan vesiuutteeseen hiilidioksidia, todettiin kuonan voivan sitoa hiilidioksidia. Esikokeen perusteella päätettiin edetä ikäännytyskokeiden seuraaviin vaiheisiin (kuvattu luvussa 4.4.4). Kuvassa 27 on esitetty kuonasyötteen vesiuutteen pH-arvon kehittyminen ikäännytyskokeissa. Vesiuutteen pH määritettiin ottamalla 10 g:n näyte ilmalla tehdyssä kokeessa viikoittain kolonnista ja hiilidioksidilla tehdyissä kokeissa vastaavan kokoisesta näytteestä kunkin kokeen jälkeen (kokeiden kestot 6, 48 ja 96 h).



Kuva 28. Kuonan vesiuutteen pH:n kehittyminen CO₂-pitoisella ilmalla suoritetuissa kokeissa (sininen kuvaaja) ja ilmalla suoritetussa kokeessa (punainen kuvaaja).

Kokeiden perusteella voidaan todeta 15 % kosteutta sisältävän kuonan pH:n laskevan verrattain nopeasti hiilidioksidilla (ilmassa 6 %) käsiteltäessä tasolle, joka vastaa lähes teoreettista tasapainoarvoa (pH 8,3) ilman hiilidioksidin ja kuonan karbonaattien välillä. Sen sijaan pelkällä ilmalla käsiteltäessä pH:n laskuun kuluu moninkertaisesti aikaa.

Taulukossa 18 on esitetty kuonan epäorgaanisen hiilen pitoisuuden kehittyminen ikäännytykskokeissa. Kaikki epäorgaaninen hiili kuonassa ei välttämättä ole karbonaattihiiltä, mutta ikäännytykskokeissa lisääntyneen epäorgaanisen hiilen määrän voidaan katsoa olevan seurausta karbonoitumisesta.

Taulukko 18. Pohjakuonan epäorgaanisen hiilen (TIC) pitoisuuden kehittyminen ikäännytykskokeissa.

Koe	Käsittelemätön kuona	Kuplitus koe	Ikäännytys CO ₂ -pitoisella ilmalla			Ikäännytys tavallisella ilmalla
			6 h	2 vrk	4 vrk	
Kokeen kesto	-	6 h	6 h	2 vrk	4 vrk	64 vrk
TIC, g/kg	5,3	8,0	5,8	9,0	8,9	9,5

4. Esimerkkikuonan prosessointi

CO₂-pitoisella ilmalla käsiteltäessä todettiin kuuden tunnin olleen liian lyhyt käsittelyaika karbonaattien muodostumiselle. Toisaalta käsittelyn pidentäminen kahdesta neljään vuorokauteen ei enää kasvattanut kuonan karbonaattipitoisuutta. Kuonaa kostuttamalla käsittelyn aikana olisi mahdollisesti voitu edelleen tehostaa karbonoitumisreaktioita, sillä kuona oli jo täysin kuivunut kahden vuorokauden käsittelyn jälkeen.

4.4.9 Fraktioiden mineralogia ja koostumus

Prosessikokeiden tuotteiden mineralogista tarkastelua tehtiin, jotta saataisiin tarpeellista tietoa yksikköprosessin toimivuudesta metallien rikastamiseen pohjakuonasta. Prosessijätettä tutkimalla muun muassa nähdään, olisivatko jätteesen jääneet metallit voitu rikastaa, esim. lisäämällä jauhatusvaiheita ja -aikaa.

Karakterisointia sovellettiin tärypöytäerotuksen ja vaahdotuksen tuotteille sekä lisäksi vaahdotuksen syötteelle (kuonamurske –1 mm).

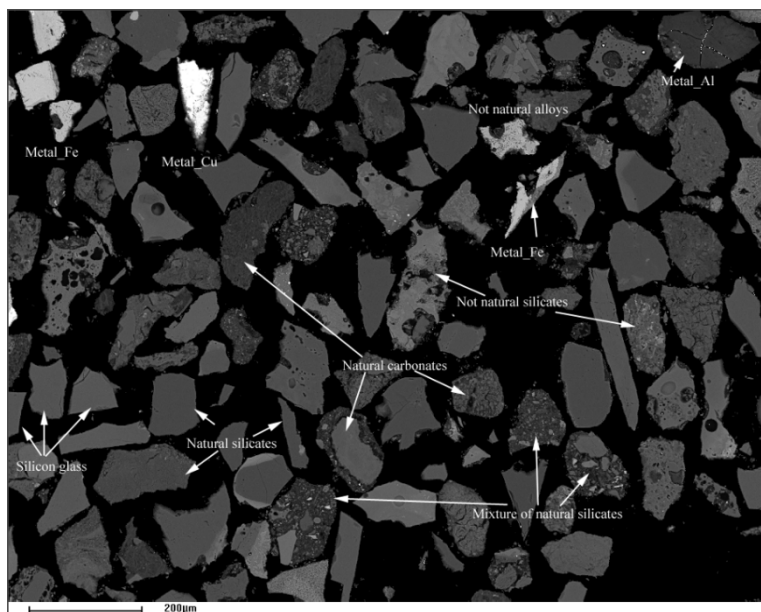
4.4.9.1 Vaahdotuksen tuotteet

Kuonamurskeessa (murskattu, ei-magneettinen ennen Eddy Currentia, < 1 mm) alumiini ja kupari ovat tasaisesti jakautuneet eri kokoluokkiin. Sen sijaan rauta vaikuttaisi rikastuvan hienoihin fraktioihin. Tulosten perusteella jauhatus selvästi parantaa metallien liberaatioastetta kuonamurskeessa.

Vaahdotuskokeisiin nähtiin tärkeäksi lisätä liejunpoisto vaahdotusta häiritsevän hienoaineksen (~20 µm) poistamiseksi ennen vaahdotusta. Erään vaahdotuskokeen jäte fraktioitiin raekokoihin +75 µm ja –75 µm ja molemmat fraktiot karakterisoitiin MLA-laitteistolla. Myös saman kokeen liejufraktion faasikoostumusta tutkittiin.

Taulukko 19. Jauhetun kuonamurskeen faasikoostumus.

ID	Mineral	+125µm Wt (%)	90-125µm Wt (%)	75-90µm Wt (%)	45-75µm Wt (%)	32-45µm Wt (%)	20-32µm Wt (%)	-20µm Wt (%)	Head Wt (%)
1	Metal_Al	4.9	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	2.7
2	Metal_Ca	0.7	0.8	1.0	1.1	1.4	1.9	1.3	1.0
3	Metal_Ni	0.0	0.0	0.0		0.0			0.0
4	Metal_Cu	2.9	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	1.1
5	Metal_Zn	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3
6	Metal_Fe	2.6	4.7	4.4	4.7	6.6	6.6	9.1	4.8
7	Stainless steel	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	Metal_Mn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
9	Not natural alloys	0.6	0.9	0.9	1.0	1.4	1.1	2.1	1.0
10	Oxides and hydroxides of metals	0.3	0.3	0.3	0.6	0.5	0.6	1.0	0.5
11	Mixture of metals and natural minerals	1.6	1.5	1.8	2.4	2.4	2.8	3.7	2.2
12	Alkaline rich mixture of metals and natural minerals	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
13	Not natural silicates	7.7	9.5	8.8	8.6	10.0	9.3	6.5	8.3
14	Alkaline rich not natural silicates	3.9	4.4	3.7	3.3	3.8	3.3	2.3	3.6
15	Ferrosilicate	0.4	0.5	0.5	0.4	0.6	0.4	0.3	0.4
16	Natural silicates	17.7	20.0	18.2	16.5	17.0	14.3	12.5	16.9
17	Alkaline rich natural silicates	15.0	15.8	15.3	13.4	15.1	13.7	9.1	14.0
18	Natural sulfides	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1
19	Not natural sulfides	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6	0.1
20	Natural carbonates	10.5	9.6	11.7	14.6	8.0	9.6	10.3	10.7
21	Natural sulfates	1.0	1.4	1.1	0.9	1.1	1.6	4.4	1.6
22	Concrete	0.6	0.7	1.0	1.3	2.7	3.8	5.8	1.9
23	Smectite	1.3	0.9	1.1	1.4	1.5	1.2	0.8	1.2
24	Mixture of natural silicates	3.5	3.3	3.4	3.3	3.5	4.3	4.6	3.7
25	Mixture of not natural silicates	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
26	Alkaline rich mixture of natural silicates	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3
27	Other natural minerals	0.9	1.3	1.5	1.6	1.6	2.0	2.3	1.4
28	Alkaline rich other natural minerals	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.4	0.2
29	Silicon rich organic compound	1.0	1.1	1.3	1.9	1.2	1.2	1.5	1.3
30	Alkaline and silicon rich organic compound	6.0	5.7	6.4	6.9	6.5	8.1	10.6	7.0
31	Silicon glass	12.7	12.2	11.8	10.6	9.6	8.2	5.3	10.7
32	Alkaline rich silicon glass	3.0	2.7	3.0	2.8	2.2	2.5	2.3	2.8
33	Unclassified	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3
	Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Measured particles	23404	20376	29574	24580	13932	22323	24137	158326



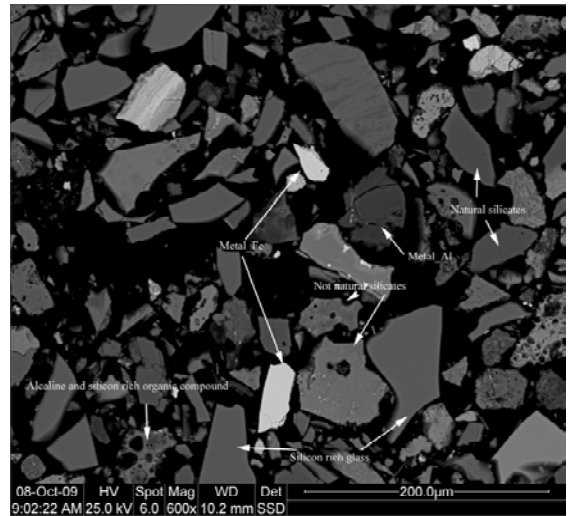
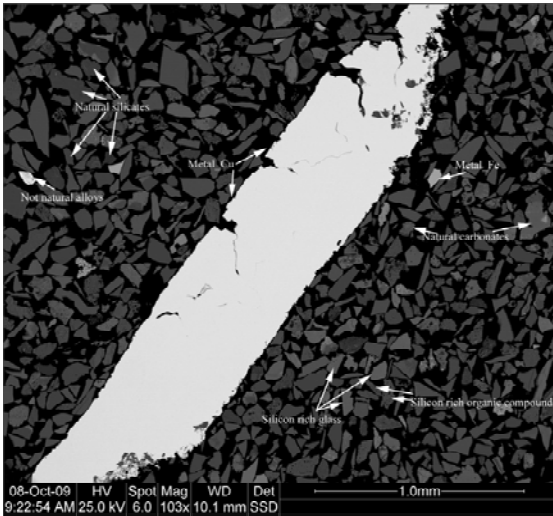
Kuva 29. MLA-kuva jauhetusta kuonamurskeesta.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

Taulukko 20. Vaahdotuksen lieju- ja jätefraktioiden faasikoostumukset.

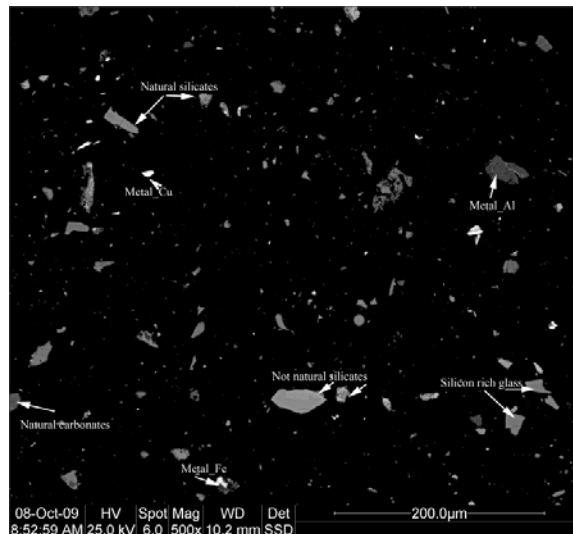
ID	Mineral	Koe4 / s lime Weight (%)	Koe4 / tailing -75µm Weight (%)	Koe4 / tailing +75µm Weight (%)
1	Metal_Al	1,5	1,3	7,0
2	Metal_Ca	0,9	1,3	0,7
3	Metal_Ni		0,0	
4	Metal_Cu	0,0	0,0	2,1
5	Metal_Zn	0,2	0,2	0,2
6	Metal_W	0,0		0,0
7	Metal_Fe	6,0	6,3	2,3
8	Stainless steel	0,1	0,0	0,3
9	Metal_Mn	0,1	0,0	0,0
10	Not natural alloys	1,0	1,0	0,6
11	Oxides and hydroxides of metals	0,5	0,4	0,2
12	Mixture of metals and natural minerals	2,7	1,5	1,0
13	Alkaline rich mixture of metals and natural minerals	0,1	0,0	0,0
14	Not natural silicates	6,6	11,8	9,6
15	Alkaline rich not natural silicates	2,3	4,5	4,4
16	Ferrosilicite	0,3	0,7	0,5
17	Natural silicates	13,2	22,0	20,6
18	Alkaline rich natural silicates	10,6	16,3	16,3
19	Natural sulfides	0,4	0,0	0,0
20	Not natural sulfides	0,8	0,0	0,0
21	Natural carbonates	11,6	2,5	1,8
22	Natural sulfates	4,3	0,2	0,0
23	Concrete	3,6	1,7	0,5
24	Smectite	1,1	0,9	1,3
25	Mixture of natural silicates	4,0	2,8	2,4
26	Mixture of not natural silicates	0,0	0,0	0,1
27	Alkaline rich mixture of natural silicates	0,3	0,4	0,3
28	Other natural minerals	1,5	1,6	1,0
29	Alkaline rich other natural minerals	0,3	0,2	0,1
30	Silicon rich organic compound	2,2	0,9	0,8
31	Alkaline and silicon rich organic compound	12,2	4,6	4,2
32	Silicon glass	8,7	13,3	18,5
33	Alkaline rich silicon glass	2,6	3,1	3,1
34	Unclassified	0,3	0,2	0,2
	Total	100,0	100,0	100,0
	Measured particles	81183	106731	105869

4. Esimerkkikuonan prosessointi



Kuva 30. Jätefraktiot +75 μm (vasen) ja -75 μm (oikea).

Tulosten perusteella vaahdotuksen liejussa ja jätefraktioissa alumiini on rikastunut karkeaan fraktioon; luultavasti osittain jauhatuksen aikaansaaman valssautumisen takia. Lisäksi jätteen karkeammassa fraktiossa (+75 μm, kuva 30) on nähtävissä kuparilangan pätkiä. Tästä voidaan päätellä, että vaahdotusolosuhteita optimoimalla on mahdollista edelleen tehostaa metallien rikastumista.



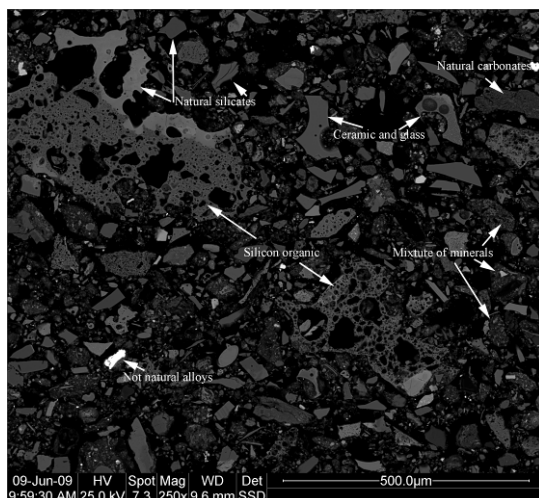
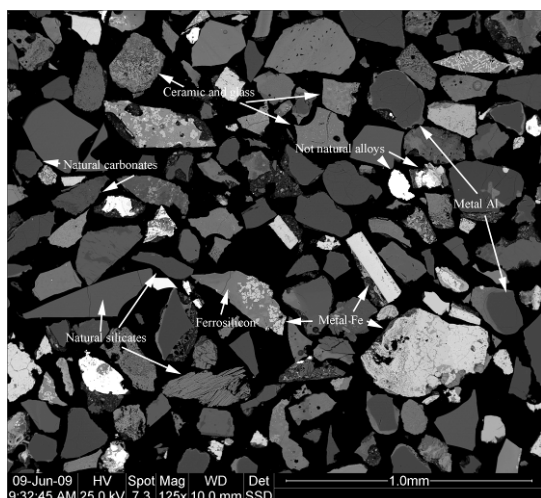
Kuva 31. MLA-kuva liejufraktiosta.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

Karakterisointitulosten perusteella vaahdotus osoittautui selkeästi toimivaksi menetelmäksi tiettyjen metallien, kuten Cu, Al, Fe ja Zn, rikastamiseksi hienommasta kuonafraktiosta.

4.4.9.2 Tärypöytäerotuksen tuotteet

MLA-kuvien perusteella voidaan todeta, että metallit ja mineraaliset faasit ovat kulkeutuneet rikasteeseen. Jätteessä on nähtävissä pääasiassa orgaanisia ja muita kevyitä faaseja, ilmeisesti sulaneita muoviyhdisteitä ja niiden agglomeraatteja, mikä osoittaa erottumista tapahtuneen. Tuloksen perusteella voidaan olettaa, että painovoimaerotus voisi olla potentiaalinen yksikköprosessimenetelmä pohjakuonan käsittelyyn tietyissä tapauksissa.



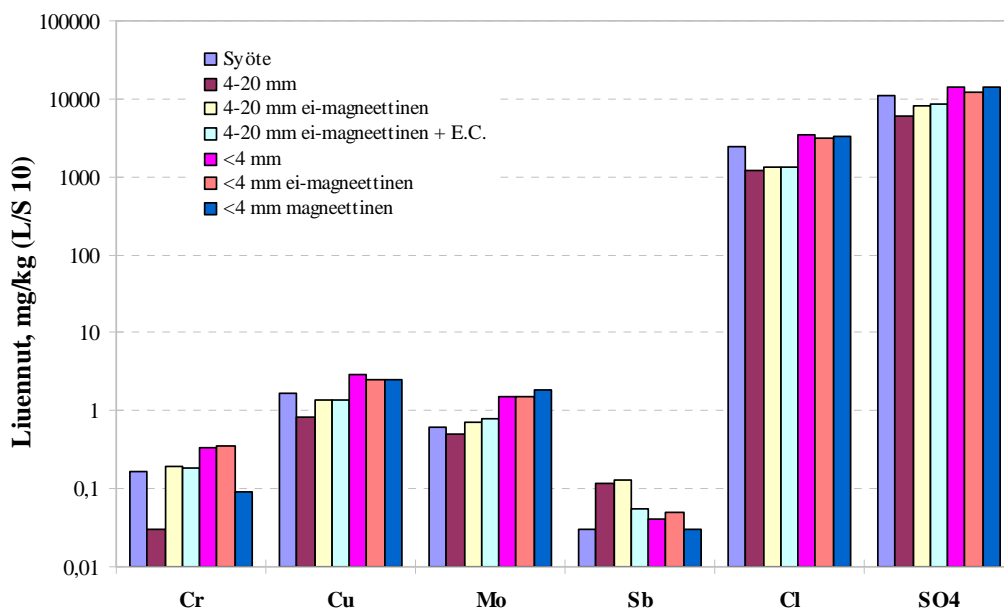
Kuva 32. Tärypöytäerotuksen tuotteet: vasemmalla rikaste ja oikealla jäte.

4.4.10 Käsittelyfraktioiden ympäristöominaisuudet

Luvussa 4.5.1 on esitetty kuonan jakautuminen käsittelyfraktioihin. Tässä luvussa esitetään yhteenveto massamääräisesti suurimpien kuonafraktioiden (< 4 mm ja 4–20 mm) ja ikäännytetyn kuonasyötteen ympäristöominaisuuksista lähinnä liukoisuustutkimuksiin perustuen.

4.4.10.1 Fysikaalisesti erotellut fraktiot

Kuvassa 33 on esitetty fysikaalisten erottelumenetelmien vaikutus pohjakuonan liukoisuusominaisuuksiin ympäristökelpoisuuden kannalta kriittisimpien aineiden osalta.

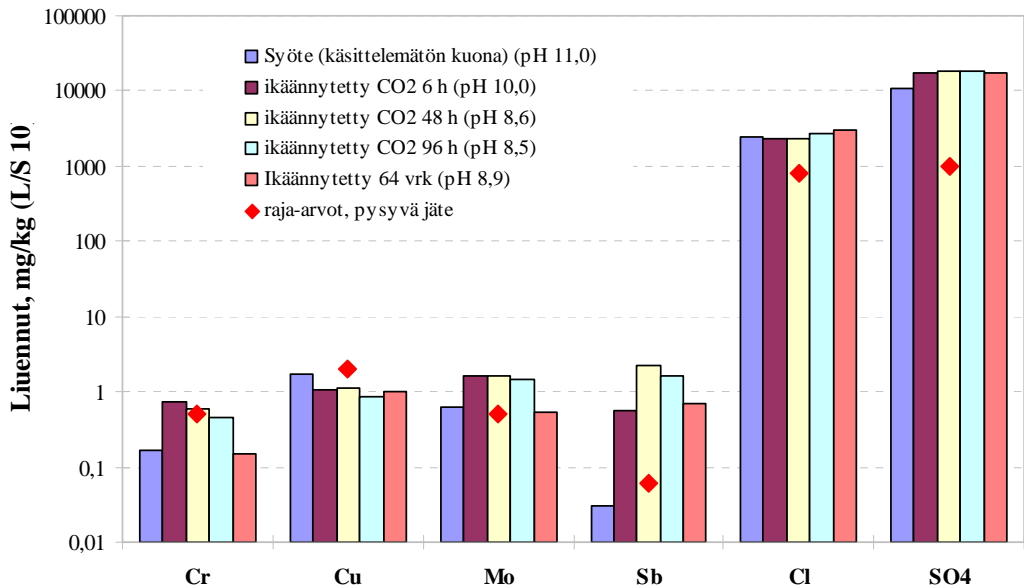


Kuva 33. Fysikaalisten erottelujen vaikutus pohjakuonan liukoisuusominaisuuksiin tutkituna kaksivaiheisella ravistelutestillä L/S-suhteessa 10. Liuenneiden aineiden määrät on ilmoitettu yksikössä mg/kg kuiva-ainetta.

Kaikkien kuvan 33 haitta-aineiden liukoisuus on suurempi < 4 mm:n fraktiossa kuin syötteessä. Vastaavasti antimonia lukuun ottamatta haitta-aineiden liukoisuus on pienempi 4–20 mm:n fraktiossa kuin syötteessä. Sen sijaan magneettisten ja ei-magneettisten (4–20 mm) metallien (EC) erottelulla ei ole saavutettu haitta-aineiden liukoisuuden vähenemistä.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

4.4.10.2 Ikäännytetty kuona



Kuva 34. Ikäännyttämisen vaikutus pohjakuonan liukoisuusominaisuuksiin ravistelutesteillä tutkittuna kumulatiivisessa L/S-suhteessa 10. Liuenneiden aineiden määrät on ilmoitettu yksikössä mg/kg kuiva-ainetta.

Kuonan ikäännyttämisen seurauksena koeolosuhteissa pienentyy lähinnä kuparin liukoisuus. Sen sijaan erityisesti molybdeenin ja antimoinin liukoisuus vaikuttaa lisääntyvän ikäännyttämisen seurauksena. Ikäännytyessään pohjakuonan pH on laskeutunut arvosta 11 tasolle 8,5–8,6, mikä selittää etenkin antimoinin liukoisuuden lisääntymisen.

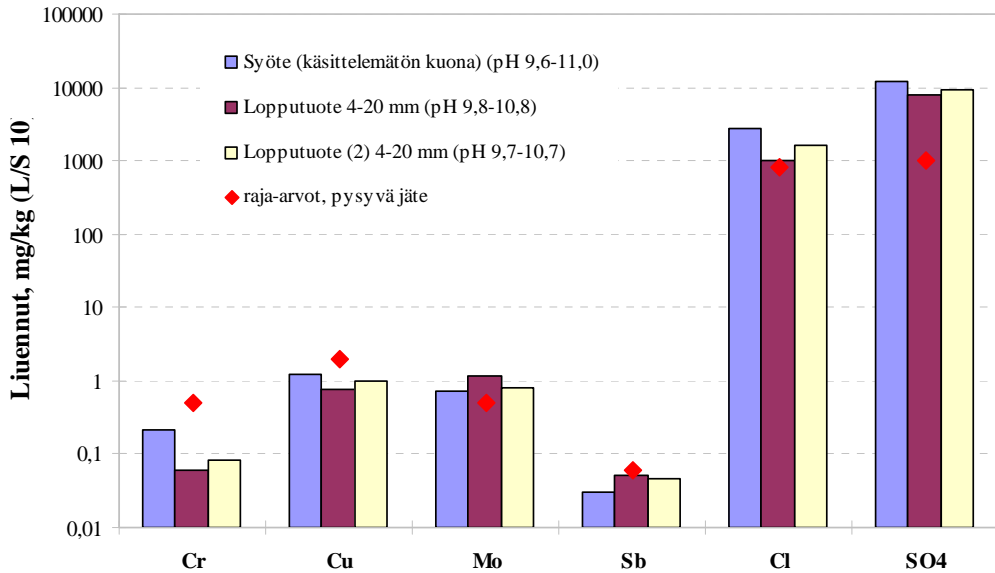
4.5 Lopputuotteen ominaisuudet ja hyötykäyttökelpoisuus

Lopputuotetta edustaa tässä mahdollisesti maarakennuskäyttöön soveltuva 4–20 mm:n pohjakuonajae, josta on eroteltu magneettiset ja ei-magneettiset metallit.

4.5.1 Ympäristöominaisuudet

Kuvassa 35 on esitetty kuonasyötteen ja lopputuotteen ympäristökelpoisuuden kannalta kriittisimpien aineiden liukoisuuksia. Lopputuote ja lopputuote 2 on

saatu samasta lähtömateriaalista soveltamalla Eddy Current -erotuksessa hieman erilaisia ajoparametreja.



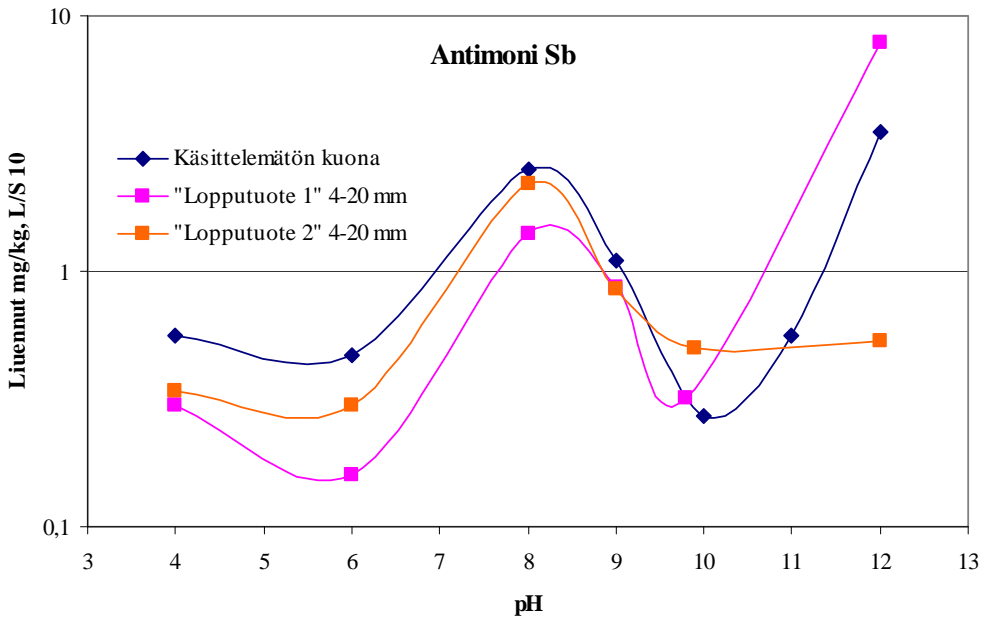
Kuva 35. ”Lopputuotteen” liukoisuusominaisuuksia tutkittuna läpivirtaustestillä kumulatiivisessa L/S-suhteessa 10. Liuenneiden aineiden määrät on ilmoitettu yksikössä mg/kg kuiva-ainetta.

Liukoisuuksien osalta käytetyillä fysikaalisilla erotusmenetelmillä on ympäristökelpoisuuden kannalta positiivista vaikutusta lähinnä jonkin verran kuparin liukoisuuteen. Muilta osin liukoisuudet ovat melko lähellä käsittelykokeiden syötettä, josta tosin on jo poistettu suurimmat kappaleet. Toisaalta käsittelyillä kuonatuotetta homogenisoidaan ja sitä kautta todennäköisesti parannetaan sen käytettävyyttä sekä ominaisuuksien hallintaa.

Vaikka alkuperäinen kuona ei tehtyjen ekotoksisuustestien perusteella ollut toksinen, lopputuote oli tehdyissä tutkimuksissa lievästi toksista levälle. Levien tiedetään olevan erityisen herkkiä mm. kuparille, lyijylle ja molybdeenille, joista ainakin molybdeenin liukoisuus oli lopputuotteesta suurempi kuin alkuperäisestä käsittelemättömästä kuonasta.

Ikääntymiskokeet antoivat viitteitä kuonan ikääntymisen aikana tapahtuvien ilmiöiden vaikutuksista liukoisuusominaisuuksiin. Erityisesti antimoinin liukoisuuden todettiin mahdollisesti nousevan ikääntyneellä kuonalla ympäristökelpoisuuden kannalta kriittiseksi. Kuva 36 osoittaa käsittelemättömälle kuonalle ja ”lopputuotteelle” tehtyjen pH-vaikutuskokeiden tuloksista vastaavan ilmiön.

4. Esimerkkikuonan prosessointi



Kuva 36. Antimonin liukoisuus muuttuvissa pH-olosuhteissa käsittelemättömällä ja käsitellyllä kuonalla.

Käsittelemättömän ja käsitellyn esimerkkikuonan pH on ollut tässä hankkeessa välillä 10–11. Siirryttäessä pH-arvon 8 lähistölle on antimonin liukoisuus kasvanut kaikissa tapauksissa noin yhden kertaluokan suuremmaksi.

4.5.2 Tekniset ominaisuudet

Tässä esitetään yhteenveto ”lopputuotteelle” 4–20 mm suoritettujen maarakennusteknisten tutkimusten tuloksista. Yksityiskohtainen kuvaus tuloksista on liitteessä B.

Proctor-kokeilla määritetty maksimikuivatilavuuspaino oli $\gamma_{dmax.} = 17,75 \text{ kN/m}^3$ ja optimivesipitoisuus $w_{opt.} = 14,4 \text{ paino-}\%$. Kuonan rakeisuus muuttui selvästi hienommaksi Proctor-kokeessa. Routanousukoe- ja lämmönjohtavuusnäytteet tiivistettiin muotteihin Proctor-menettelyä löyhemmin, jotta materiaalin rakeisuus ei muuttuisi. Tämän johdosta saavutetut tiiviydet olivat routanousukokeessa 85 % ja lämmönjohtavuuskokeessa 83 % Proctor-kokeella määritetystä maksimitiiviydestä.

Lajikkeilla 4–8 mm ja 4–16 mm tehtyjen kapillaarisuusmääritysten ja routanousukokeiden perusteella materiaali oli routimaton.

Kuonalle mitatut sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet olivat alhaisia (0,15 ja 0,17 W/Km) vastaten lähes tyypillisen routaeristeenä käytettävän kevytsoran arvoja.

Rakeisuudeltaan 4–16 mm:n kuona soveltuisi lämpöteknisten ominaisuuksiensa puolesta hyvin esim. tie-, katu-, kenttä- tai piha-alueiden routasuojusmateriaaliksi päällysrakenteen jakavan kerroksen alle. Päälystetyillä tie- ja katualueilla alhaisen lämmönjohtavuuden omaavaa materiaalia ei voi sijoittaa päällysrakenteen yläosaan kantavaan tai jakavaan kerrokseen liukkausriskin takia. Kuonan käyttö esim. routasuojusmateriaalina edellyttäisi huolellista rakennekerroksen tiivistyksen suunnittelua, jotta materiaalin rakeisuus ei tiivistyksen vaikutuksesta hienontuisi. Hienontumisen seurauksena olisi riski, että materiaali muuttuisi routivaksi ja hyvät lämpötekniset ominaisuudet menetettäisiin.

4.6 Jalostusprosessin toimivuuden arviointi

4.6.1 Yksikköprosessien toimivuus, hyöty ja vaikutus kuonan ominaisuuksiin

4.6.1.1 Kuonan esikäsittely

Pilot- ja laboratoriomittakaavan prosessikokeiden perusteella rummutus on tälle kuonalle tarpeellinen, sillä käsittelyssä merkittävän osan (n. 30 %) hienoaineksesta havaittiin kiinnittyneen rautakappaleisiin tai olevan esineiden, kuten purkkien, sisällä. Rummutuksen tehoa vähensi hieman kuonan kosteus, minkä vuoksi rummutus jouduttiin toistamaan kuivauksen jälkeen. Syötteen kosteus haittasi myös seulontaa.

4.6.1.2 Metallien erottelu

Magneettisen aineen erottaminen ei ollut kovin tehokasta hienon alle 4 mm:n fraktion osalta, sillä ko. fraktio jakaantui magneettierotuksessa kutakuinkin kahtia magneettiseen ja ei-magneettiseen. Tämä johtunee magneetin erotuskyvyn heikkenemisestä materiaalin sisältämien agglomeraattien ja materiaalin pinnan epäpuhtauksien vuoksi.

Pyörrevirtaerotuksen (Eddy Current) toimivuuden kannalta keskeistä on hihnan nopeus. Mikäli hihnan nopeutta nostetaan liiaksi, kiviaines alkaa keskipakovoiman vuoksi sekoittua metalleihin, eikä erottuminen enää ole yhtä tehokasta.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

Paras erotuskyky ja puhtaimmat metallifraktiot kokeissa saatiin alhaisilla hihnan nopeuksilla ja karkealle (20–50 mm) fraktiolle. Parhaimmillaan Eddy Currentilla saavutettiin karkeasta (20–50 mm) fraktiosta yli 70 %:n alumiinipitoisuuksia 30–40 %:n saannoilla. Lisäksi oleellista on ”katkaisurajan” asettaminen oikeaan kohtaan. Luulajassa tehdyissä kokeissa käytettiin useita pieniä laatikoita, ja osa näytteistä kimpoihi laatikoiden reunoista väärin laatikoihin. Käytännössä olisi järkevää käyttää vain kahta ”laatikkoa”.

Toisaalta metallinen alumiini näyttää rikastuvan alle 4 mm:n fraktioon, mikä ei puolla pyörrevirtaerottimen tarvetta, sillä alumiinin poistossa sen tiedetään soveltuvan parhaiten yli 10 mm:n raekoolle.

4.6.1.3 Painovoimaerotus

Gravimetrinen erotus tärypöydällä tehtiin ei-magneettiselle < 4 mm:n fraktiolle. Ennen tärypöytäerottelua fraktio murskattiin (< 0,5 mm), jolloin syntyi ”valssautumalla” lähes puhdas metallinen fraktio (> 0,5 mm), jonka sinkkipitoisuus oli 6,4 % ja saanti 45,5. Tärypöytärikasteen kuparipitoisuus oli vastaavasti 3,2 % ja saanti 45,5 %. Näin ollen tärypöytärikasteelle ja murskauksessa valssautuneelle metallille saatiin kuparipitoisuudeksi 2,8 % ja saanniksi 66,1 %. Vastaavat lukemat sinkille olivat 3,2 % ja 62,6 %. Tärypöytäerotus ei toimi alumiinille, mutta murskauksessa saadaan osa alumiinista talteen (Al-pitoisuus 34,6 % ja saanti 23,1 %).

4.6.1.4 Vaahdotus

Vaahdotuskokeita tehtiin alle 4 mm:n ei-magneettiselle fraktiolle. Vaahdotusta edelsi murskaus sekä metallien litistäminen ja seulonta. Huomionarvoista oli, että jo litistämällä (ts. valssaamisella) ja seulonnalla saatiin erotetuksi erittäin puhtaita metallifraktioita.

Vaahdotuskokeet tehtiin ”luonnollisessa pH:ssa” (pH 9–10), aktivoijana CuSO_4 , kokoojana KAX ja vaahdotteena MIBC. Vaahdotuksen syötteessä oli keskimäärin kuparia 0,54 % ja alumiinia 6,6, %. Vaahdotus toimi varsin hyvin kuparille, ja kuparin osalta päästiin noin 70 %:n keskimääräisiin saanteihin ja 7–10 %:n pitoisuuksiin rikasteessa. Alumiinille saanti oli parhaimmillaan 12–24 % ja pitoisuus 5–14 %. Vaahdotuksen tehoa voidaan parantaa seulonnalla, esimerkiksi 180 μ :n seulalla saadaan jo yli puolet vaahdotuksessakin saatavasta kuparista talteen.

4.6.1.5 Bioliuotus

Bioliuotuskokeissa suuremmalla kuona-ainepitoisuudella erityisesti alumiinia ja kuparia on saatu liukenemaan hyvin, parhaiten karkeasta (4–8 mm) fraktiosta. Tulos antaa viitteitä bioliuotuksen toimivuudesta metallien erotusmenetelmänä kuonasta. Pitkäaikaiskokeiden perusteella liukeneminen tapahtuu melko nopeasti, sillä kolmen ja kuuden kuukauden liuotustuloksilla ei juuri ollut eroa.

4.6.1.6 Ympäristökelpoisuus

Liukoisuuksien osalta käytetyillä fysikaalisilla erotusmenetelmillä on ympäristökelpoisuuden kannalta positiivista vaikutusta lähinnä kuparin liukoisuuteen. Muilta osin liukoisuudet ovat melko lähellä käsittelykokeiden syötettä, josta tosin on jo poistettu suurimmat kappaleet. Toisaalta käsittelyillä kuonatuotetta homogenisoidaan ja sitä kautta todennäköisesti parannetaan sen käytettävyyttä sekä ominaisuuksien hallintaa.

Kuonan ikäännyttämiskokeiden perusteella pH:n lasku materiaalin sisältämän kalsiumkarbonaatin ja ilman hiilidioksidin tasapainotilaan (pH-arvo 8,3) tapahtuu optimiolosuhteissa (CO₂-rikastettu ilma) melko nopeasti. Sen sijaan kokeiden perusteella voidaan päätellä ilmiön olevan normaaliolosuhteissa ns. luonnollisena ilmiönä erittäin hidas.

Ikääntymisen seurauksena haitta-aineista ainoastaan kuparin liukoisuus vaikuttaisi alenevan. Sen sijaan monen muun haitta-aineen, esimerkiksi antimonin, molybdeenin ja sulfaatin liukoisuus ikääntyneestä kuonasta oli huomattavasti korkeampi kuin tuoreesta. Näin ollen oleelliselta vaikuttaa erityisesti kuonan ominaisuuksien tunteminen tasapainotilanteen (pH 8,3) läheisyydessä.

4.6.2 Kustannustarkastelu

Prosessointikokeissa saatujen tulosten perusteella suoritettiin karkeita kustannusarvioita mahdollisille kuonan käsittely- ja sijoitusskenaarioille. 1-skenaariossa kuonalle suoritetaan tässä hankkeessa esimerkkikuonalle tehdyt prosessoinnit (seulonnat, magneettierottelut ja pyörrevirtaerottelut). Lisäksi oletetaan, että ns. lopputuote, eli 4–50 mm:n kuona, josta on eroteltu magneettiset ja ei-magneettiset metallit, soveltuu maarakennuskäyttöön. 0-skenaariossa kuonasta ainoastaan seulotaan > 50 mm:n kappaleet pois ja loppuosuus sijoitetaan kaatopaikalle. Kustannustarkastelussa käytettyjä parametreja on esitetty taulukossa 21.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

Taulukon 21 massaosuus-sarakkeessa on esimerkkikuonan prosessointikokeissa saadut massaosuudet: +/- -sarake ilmaisee onko ko. massavirta tulo- (+) vai menolähde (-) ja €/t -sarake sisältää arvioita ko. jakeesta saatavista tuloista tai kustannuksista.

Kuonan käsittelykustannuksia ei ole tässä tarkastelussa jaettu investointi- ja käyttökustannuksiin vaan on käytetty kansainvälisiä esimerkkejä käsittelyketjujen kokonaiskustannuksista.

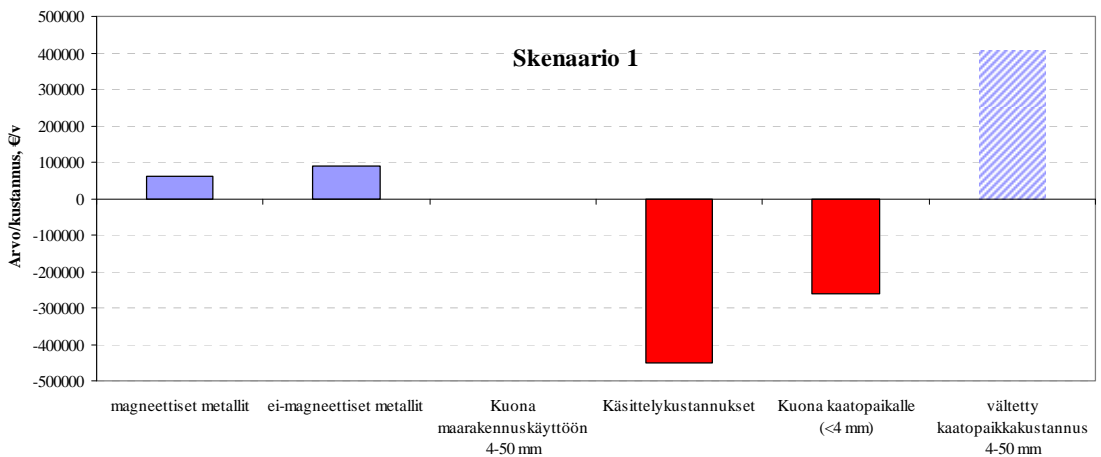
Taulukko 21. Kustannustarkastelussa käytettyjä parametreja.

Kustannuslaji	Massaosuus, %		+/-	€/t
	0-skenaario	1-skenaario		
Magneettiset metallit	0	14 *	+	10–50
Ei-magneettiset metallit	0	3,0	+	100–600
Kuona maarakennuskäyttöön	0	45	+/-	0
Käsittelykustannukset (seulonta, magneettierottelu ja Eddy Current -erottelu)			-	10–30
Kuona kaatopaikalle	89	29	-	30–80

* < 4 mm magneettista fraktiota ei huomioitu (kaatopaikalle)

Kustannusten muodostumista 15 000 pohjakuonatonnin tapauksessa yhden vuoden aikana on havainnollistettu 1-skenaariota koskien kuvassa 37. Oletuksina on käytetty taulukon 21 vaihteluväleistä seuraavia: magneettiset metallit 30 €/t, ei-magneettiset metallit 200 €/t, käsittelykustannukset 30 €/t ja kaatopaikkamaksu 60 €/t.

4. Esimerkkikuonan prosessointi

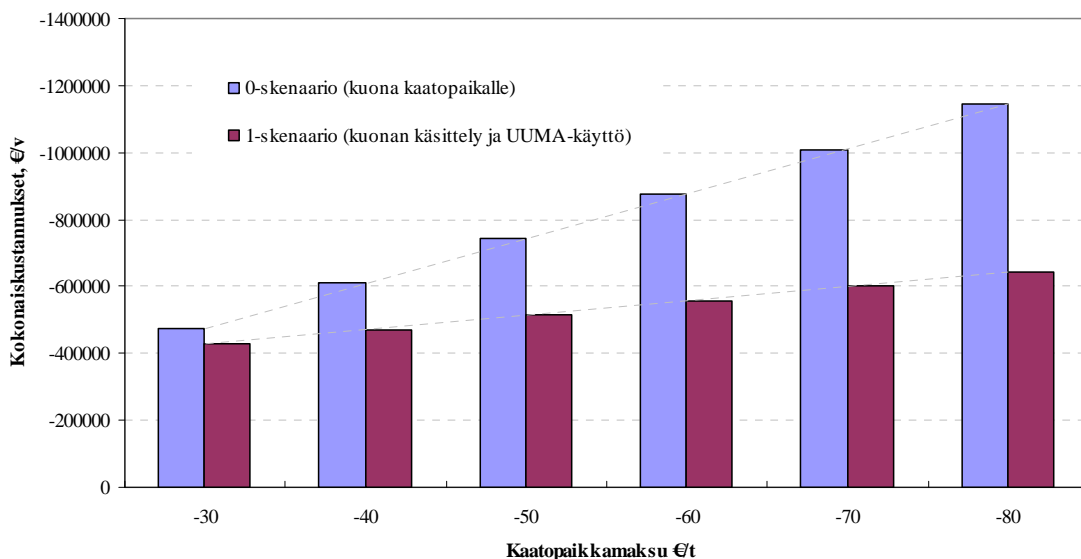


Kuva 37. Esimerkki kustannusten muodostumisesta mahdollisessa pohjakuonan käsittely- ja hyötykäyttöskenaariossa.

Kokonaistulos tarkastelussa on selkeästi negatiivinen, eli menot ovat suuremmat kuin tulot. Käytännössä kokonaistuloksen positiiviseksi tekeminen vaatisi metalleista saatavia erittäin korkeita hintoja ja/tai tulojen saamista myös maarakennuskelpoisesta kuonasta.

Käsittelyn kannattavuutta onkin käytännössä verrattava tilanteeseen, jossa kuonaa ei juurikaan käsitellä, vaan suurin osa kuonasta sijoitetaan kaatopaikalle (0-skenaario). Tällöin keskeiseksi muodostuu edellä mainittujen kustannustekijöiden lisäksi erityisesti kaatopaikalle sijoitettavasta kuonasta maksettava hinta. Kuvasssa 38 on esitetty 1-skenaarion kokonaiskustannusten vertailu 0-skenaarioon muuttuvilla kaatopaikkamaksuilla, kun 1-skenaariossa on käytetty edelleen yllä mainittuja oletuksia.

4. Esimerkkikuonan prosessointi



Kuva 38. Kuonan käsittely-/sijoitusskenaarioiden kustannusten vertailu muuttuvilla kaatopaikkamaksuilla.

Kaatopaikkamaksun kasvaessa kuonan käsittelyskenaario muuttuu luonnollisesti yhä kannattavammaksi verrattuna kaatopaikkasijoituspainotteiseen skenaarioon. Yksinkertaistettuna voidaan todeta, että kuonatonnin käsittelyyn on kannattavaa käyttää enintään kaatopaikkamaksun verran, jos käsitelystä jakeesta tai jakeista ei saada tuottoja mutta ne välttävät näin kaatopaikkasijoituksen tai muut maksut. Käsittelyn kannattavuutta lisää tietysti käsitellyistä tai erotelluista jakeista mahdollisesti saatavat tulot.

5. Kuonan jalostusprosessin suunnittelu ja malliprosessi

5.1 Kuonan karakterisointi ja esikäsitely

Monissa tapauksissa kuona on hyvä esikäsitellä rummuttamalla ja antamalla sen kuivua, sillä merkittävä osa hienoaineksesta on usein kiinnittyneenä rautakappaleisiin tai esineiden, kuten purkkien, sisällä. Hienoaines laskee raudasta saatavaa hintaa merkittävästi. Esimerkiksi Tanskassa rauta pestään ja harjataan erotuksen jälkeen erikseen ennen myyntiä. Kuonan kosteus myös vähentää rummutuksen tehoa sekä haitata seulontaa. Rummutusta voitaisiin myös tehostaa puhaltamalla ilmaa panostyyppisesti toimivaan rumpuun.

5.2 Yksikköprosessien valinta

Murskauksella ja seulonnalla saadaan jo varsin puhtaita metallifraktioita. Metallipartikkelien pinnoille agglomeroitunut hieno kuonamateriaali saadaan murskauksen yhteydessä tapahtuvan seulonnan alitteena murskautumattomasta metalliaineksesta erilleen. Murskauksessa metallit, kuten alumiini, muokkautuvat ”levymäisiksi” partikkeleiksi, ja tämä hyvin metallipitoinen materiaali on siten helppoa erottaa hienosta kuonamateriaalista erilleen seulonnalla. Pienellä raekoolla (< 4 mm) magneetin erotuskyky heikkenee selkeästi materiaalin sisältämien agglomeraattien ja materiaalin pinnan epäpuhtauksien vuoksi. Liukoisuuskäytännön osalta fysikaalisilla erotusmenetelmillä on ympäristökelpoisuuden kannalta positiivista vaikutusta lähinnä kuparin liukoisuuteen. Muilta osin liukoisuudet voivat olla melko lähellä syötettä, josta tosin on jo poistettu suurimmat kappaleet. Toisaalta käsittelyillä kuonatuotetta homogenisoidaan ja sitä kautta todennäköisesti parannetaan kuonan käytettävyyttä sekä ominaisuuksien hallintaa.

5. Kuonan jalostusprosessin suunnittelu ja malliprosessi

Kuonan jatkuva hienontuminen käsittelyn aikana vaikuttaa merkittävästi prosessointiin. Käsittelyssä tapahtuva hienontuminen ei puolla pienimmän raekoon poistamista seulomalla käsittelyprosessin alussa, sillä pienempien raekokojen osuus näyttäisi pysyvän koko prosessin ajan melko samana.

Pyörrevirtaerotuksen toimivuuden kannalta keskeistä on hihnannoisuus. Mikäli hihnannoisuutta nostetaan liiaksi, kiviaines alkaa keskipakovoiman vuoksi sekoittua metalleihin, eikä erottuminen enää ole yhtä tehokasta. Paras erotuskyky ja puhtaimmat metallifraktiot saadaan tulosten perusteella alhaisilla hinnanopeuksilla ja karkeille (20–50 mm) fraktioille. Lisäksi oleellista on ”katkaisurajan” asettaminen oikeaan kohtaan.

Yhteenvetona fysikaalisten erottelujen vaikutuksesta ”tuotteen” ympäristöominaisuuksiin voidaan todeta, että metallinen alumiini näyttää rikastuvan alle 4 mm:n fraktioon. Tämä ei puolla pyörrevirtaerotuksen tarvetta, sillä pyörrevirtaerotuksen tiedetään soveltuvan parhaiten yli 10 mm:n raekoolle. Pyörrevirtaerotuksen tehoa pienemmällä fraktiokoolta voidaan parantaa asettamalla erillinen magneettierotin juuri ennen pyörrevirtaerotinta.

Vaahdotus toimii melko hyvin kuparin erotukseen kuonasta. Ennen vaahdotusta tehty liejunerotus saattaa edelleen lisätä vaahdotuksen tehoa. Lisäksi vaahdotuksen tehoa voidaan parantaa seulonnalla, esimerkiksi 180 µ:n seulalla saadaan jo yli puolet vaahdotuksessa saataavasta kuparista talteen.

Ikääntymisen seurauksena monen haitta-aineen esimerkiksi antimonin, molybdeenin ja sulfaatin liukoisuus ikääntyneestä kuonasta oli huomattavasti korkeampi kuin tuoreesta. Poikkeuksena tähän on lähinnä vain kupari. Näin ollen oleelliselta vaikuttaa erityisesti kuonan ominaisuuksien tunteminen tasapainotilanteen (pH 8,3) läheisyydessä.

5.3 Malliprosessit ja niiden tarkastelu

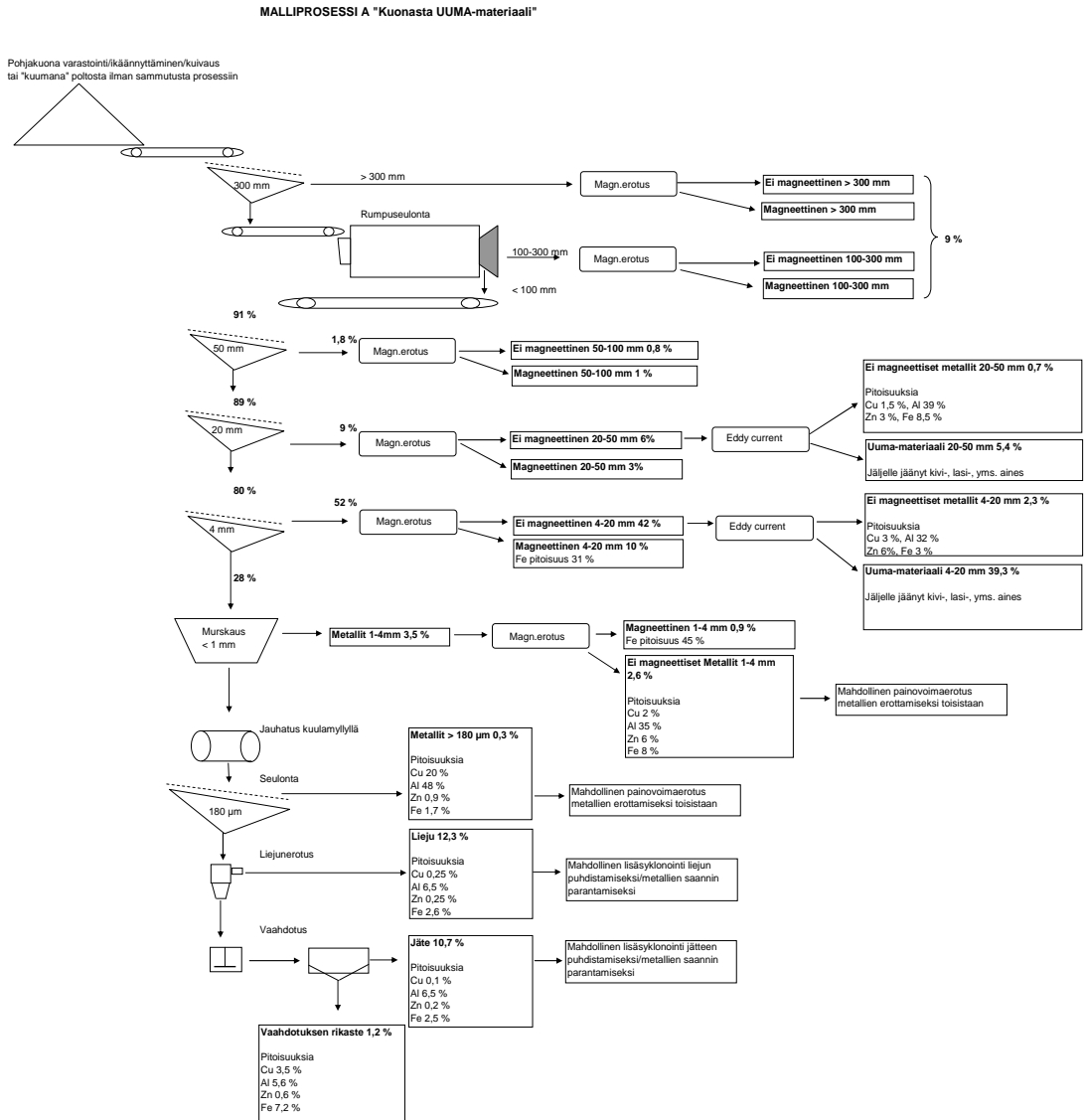
Malliprosessit A ”Kuonasta UUMA-materiaali” ja B ”Kuonasta uusiomalmi” (kuvat 39 ja 40) suunniteltiin esimerkkikuonalle tehtyjen prosessointikokeiden perusteella. Molemmissa malleissa jäännösfraktiot (raekoko < 4 mm tai < 50 mm) käsiteltäisiin erillisissä ”rikastamoissa”. Tuotantomääristä riippuen monessa tapauksessa kannattaisi suurikokoisimmat kappaleet ja metalli erotella jo polttolaitoksella.

Malliprosessissa A on tarkoituksena tuottaa UUMA-materiaalia maanrakennuskäyttöön sekä saada metallit mahdollisimman hyvin talteen ja kierrätykseen. Tässä vaihtoehdossa pohjakuona tulisi suoraan poltosta ilman sammutusta prosessiin

tai se kuivattaisiin. Aluksi kuonasta seulotaan kaikkein suurimmat > 300 mm:n kappaleet pois. Hienompi < 300 mm:n materiaali menee 100 mm:n rumpuseulontaan, jossa saadaan ainakin osa partikkelien pinnoille kiinnittyneestä hienoaineksesta erilleen. Rumpuseulonnan jälkeen seulotaan vielä 50 , 20 ja 4 mm:n fraktiot erilleen. Seulonnan jälkeen kaikille fraktioille (4 – 20 mm, 20 – 50 mm, 50 – 100 mm, 100 – 300 mm ja > 300 mm) tehdään magneettierotus. Eddy Current -erotus tehdään magneettierotuksen jälkeen ei-magneettisille 20 – 50 mm:n ja 4 – 20 mm:n fraktioille ei-magneettisten metallien talteen ottamiseksi. Eddy Current -erotuksen jälkeen jäljelle jäänyt kuonamateriaali voidaan mahdollisesti hyödyntää uusiomateriaalina maanrakennuksessa.

Hieno < 4 mm:n fraktio käsiteltäisiin erillisessä rikastamossa. Aluksi tämä materiaali murskataan < 1 mm:n raekokoon. Murskauksen sivutuotteena saadaan seulonnalla erilleen varsin puhdas > 1 mm:n metallifraktio, jolle tehdään magneettierotus. Murskattu < 1 mm:n fraktio menee jauhatuksen, seulonnan ja liejunerotuksen jälkeen vaahdotukseen, jossa saadaan talteen hieno metallinen kupari. Jauhatuksen jälkeen tehtävällä seulonnalla saadaan talteen metallipartikkelit, jotka ovat liian suuria vaahdottamalla talteen otettavaksi. Murskauksen, seulonnan, liejunerotuksen ja vaahdotuksen tuotteiden laatua voidaan mahdollisesti parantaa painovoimaerotuksilla ja syklonoinnilla.

5. Kuonan jalostusprosessin suunnittelu ja malliprosessi



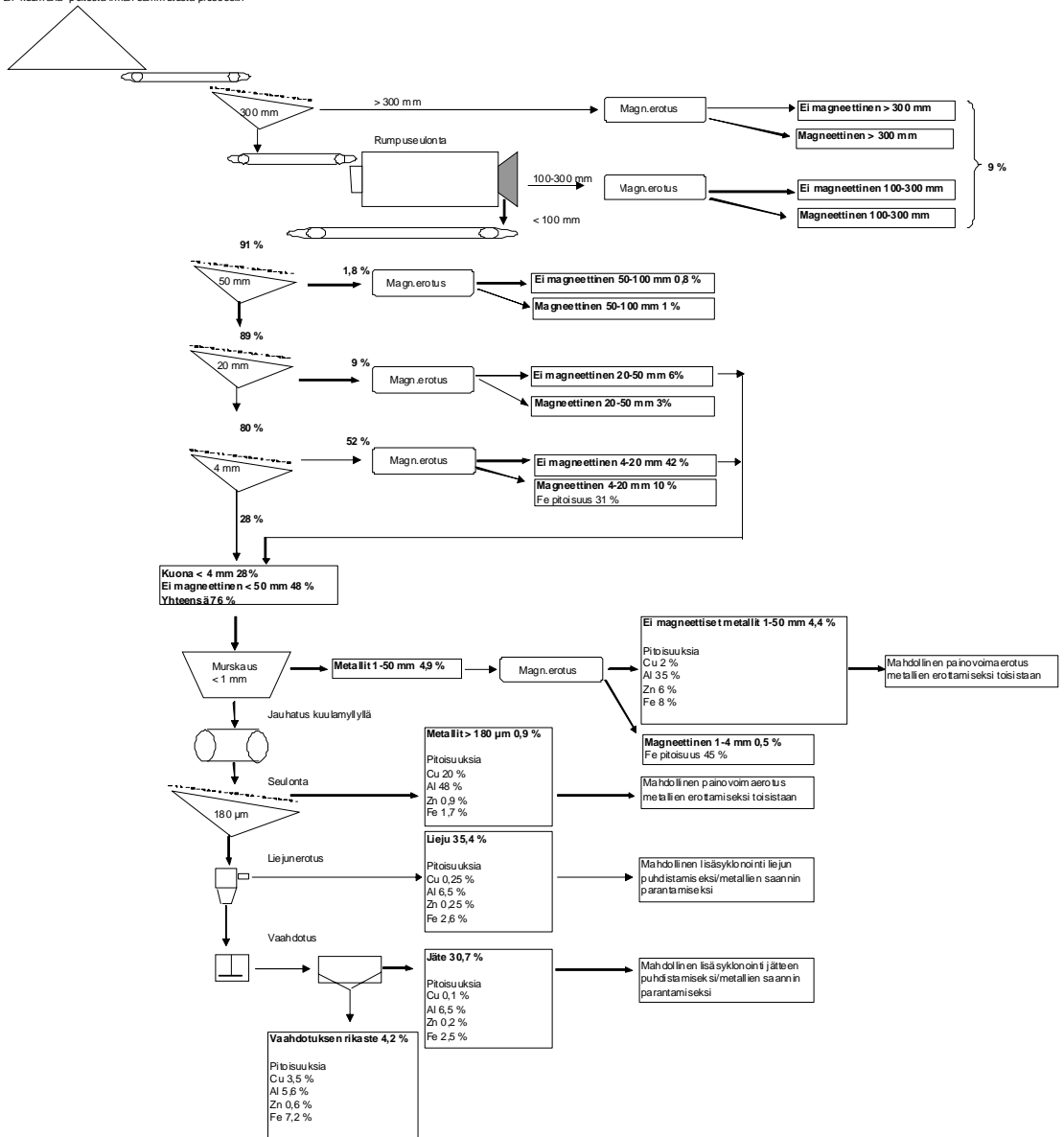
Kuva 39. Malliprosessi A "Kuonasta UUMA-materiaali".

Malliprosessissa B kuonamateriaali käsitellään "uusiomalmiina" tarkoituksena keskittyä pelkästään metallien talteenottoon ja hyödyntämiseen. Malliprosessi B on yksinkertaisempi, ja erillisellä rikastamalla käsiteltävä massamäärä olisi 76 % kun se malliprosessissa A oli vain 28 %. Suurempi käsiteltävä massamäärä tekisi erillisestä kuonamateriaalin rikastamosta taloudellisesti kannattavamman.

5. Kuonan jalostusprosessin suunnittelu ja malliprosessi

Malliprosessi B "Kuonasta uusiomalmi"

Pohjakuonan varastointi/käännyttäminen kuivaus tai "kuumana" poltosta ilman sammutusta prosessiin



Kuva 40. Malliprosessi B "Kuonasta uusiomalmi".

5. Kuonan jalostusprosessin suunnittelu ja malliprosessi

Malliprosessia B ”yksinkertaistettiin” jättämällä Eddy Current -erotukset pois. Kaikki < 50 mm:n raekoon omaavat, ei-magneettiset metallit murskattaisiin, yhdessä < 4 mm:n fraktion kanssa. Murskauksessa syntyvä ”valssautuva” 1–50 mm:n metalliaines seulottaisiin pois ja tälle tehtäisiin tämän jälkeen magneettierotus. Tämä tuntuisi järkevältä ainakin tapauksissa, joissa polttokuona on hyvin sekaraakeista ja sisältää paljon agglomeraatteja. Murskauksen avulla metalliaines saadaan ”vapautettua” muusta kuona-aineksesta. Muilta osin kuonamateriaali prosessoitaisiin samalla tavoin kuin malliprosessissa A.

6. Kuonien jalostuksen ja hyödyntämisen tulevaisuudennäkymät

Jätteenpolton pohjakuona on lähtökohtaisesti erinomainen uusiораaka-aine, jota jalostamalla saadaan talteen arvometalleja ja tuotetaan muita hyödynnettäväksi soveltuvia materiaali-jakeita. Samalla jalostusprosessilla ei kuitenkaan saada kuonasta sekä arvoaineita mahdollisimman hyvin talteen että valmisteta hyvää maarakentamiseen soveltuvaa aggregaattia, vaan molempia ”lopputuotteita” varten jalostusprosessi tulee suunnitella ja optimoida erikseen. Keskeistä tässä on siten yksikköprosessien ja koko prosessin optimointi ja kannattavuuden kannalta haasteellisten jakeiden, kuten hienoaineksen, jatkokäsittely ja hyödyntäminen.

Pohjakuonasta jalostettu kuona-aggregaatti soveltuu lämpöteknisten ominaisuuksiensa puolesta hyvin routasuojausmateriaaliksi maarakennuskäyttöön. Jalostetun kuonan käyttö, esimerkiksi routasuojausmateriaalina, edellyttää kuitenkin koerakenteita ja selkeiden rakentamis- ja suunnitteluohjeiden laadintaa. Näin taataan, ettei materiaalin rakeisuus tiivistyksen vaikutuksesta hienonnu, jolloin seurauksena voi olla routivuus ja lämpöteknisten ominaisuuksien menetys. Lisätietoa ja koerakenteita tarvitaan myös liittyen kuona-aggregaatin mahdollisiin ympäristövaikutuksiin erilaisissa rakenteissa.

Kuona on myös erinomainen uusiomalmi, sillä sen metallipitoisuudet ovat usein monikymmenkertaisia normaalimalmeihin verrattuna. Tehokkailla ja oikeanlaisilla käsittely- ja rikastusmenetelmillä heterogeenisestä pohjakuonasta voidaan erottaa arvometalleja kustannustehokkaasti, sillä metallit ovat periaatteessa kuonista helpommin rikastettavissa kuin näiden metallien mineraaleista. Kuonametallien fysikaaliset ominaisuudet, kuten sähkönjohtavuus, magneettisuus ja ominaispainoerot, ovat selvästi suurempia kuin vastaavien metallien mineraaleilla. Näin ollen jalostuksessa vältetään useita prosessivaiheita verrattuna neitseellisiin malmeihin. Tämän lisäksi saataisiin parempia lopputuotteita ilman metallurgisia prosesseja ja melko yksinkertaisilla laitteilla.

6. Kuonien jalostuksen ja hyödyntämisen tulevaisuudennäkymät

Bioliuotuksen ja vaahdotuksen avulla kuonasta voidaan tutkimuksen perusteella erottaa tehokkaasti kuparia ja alumiinia, mutta myös sinkkiä ja muita metalleja. Lupaavia tuloksia saatiin myös arvokkaiden metallien erottamisessa kuonan hienommista fraktioista. Jatkossa nyt testattuja yksikköprosesseja tulisi edelleen kehittää erityisesti kuonan käsittelyn sovelluksiksi. Tässä tarvittaisiin laitekehitystä mm. fraktiointiin rumpuseulonnan osalta. Lisäksi tulisi ottaa huomioon normaalien rikastusprosessien kierrot ja kertaukset, jolloin metallien saanti paranisi vielä huomattavasti. Prosessin hallittavuutta tulisi myös kehittää parantamalla monitorointia ja prosessinohjausta. Lisäksi kuonan jatkoprosessointi tulisi ottaa huomioon nykyistä paremmin jo jätettä poltettaessa. Prosessoinnin kannalta olisi esimerkiksi parempi, ettei kuonaa sammutettaisi vedellä polton jälkeen vaan se ohjattaisiin poltosta kuivana tai muun jäähdytyksen jälkeen suoraan rumpuseulaan.

Tärkeää on myös taata jalostusprosessille riittävä määrä syötettä sekä logistisesti oikea paikka. Esimerkkinä voidaan sanoa, että metallurgisen kuonan jalostus on ollut kannattavaa jo 30 000–50 000 tonnin vuotuisilla määrillä. Talteenotetuille jakeille ja jalostuksen lopputuotteille tulee myös löytää ”oikeat positiivisen hinnan omaavat osoitteet” ja samalla minimoida loppusijoitettavien prosessijätteen määrää ja käsittelykustannukset. Ideaalitapauksessa kuonan jalostusprosessoinnin jälkeen koko materiaali on saatu hyötykäyttöön, metallit kierrätykseen ja loppukuona uusioaggregaatiksi.

Lähdeluettelo

Afatek A/S (2004). Tutkimuslaskelma 3.8.004. Julkaisematon.

Arm, M. (2003). Mechanical Properties of Residues as Unbound Road Materials – experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag. Doctoral Thesis 2003, Stockholm, Sweden. KTH Land and Water Resources Engineering.

Baun, D.L., Kamuk, B. & Avanzi, P. (2007). Treatment of bottom ash from waste to energy plants: Overview and experiences. Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 1–5 October 2007.

Bobelyn, J. (2010). Vierailu Indaverissa helmikuussa 2010.

Cappai, G., Favaretti, M. & Stimamiglio, C. (1999). Mechanical and hydraulic properties of MSW incineration slags. Proceedings Sardinia99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, 4–8 October 1999, Italy.

Chandler, A., Eighmy, T., Hatrén, J., Hjelmar, O., Kosson, D., Sawell, S., van der Sloot, H. & Vehlow, J. (1997). Municipal solid waste incinerator residues. Studies in Environmental Science 67. Elsevier 1997.

Grönholm, R. (2008). Waste Incineration and Treatment of Bottom Ash at Sysav, PREWIN General Assembly Meeting, Milan 12.11.2008 ja vierailu SYSAV AB:ssa joulukuussa 2008.

Izquierdo, M., Vazquez, E., Querol, X., Barra, M., López, A. & Plana, F. (2001). Use of bottom ash from municipal solid waste incineration as a road material. 2001 International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Research, University of Kentucky, Paper #37.

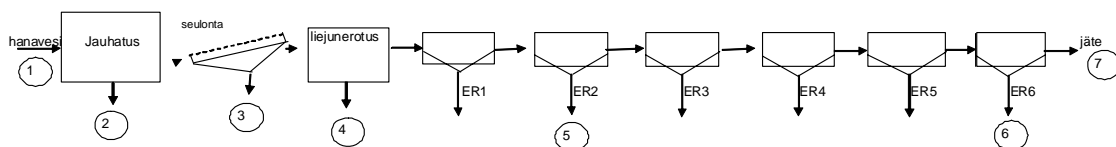
Kaartinen, T., Laine-Ylijoki, J. & Wahlström, M. (2007). Jätteen termisen käsittelyn tuhkien ja kuonien käsittely- ja sijoitusmahdollisuudet. VTT Tiedotteita 2411, 44 s. + liitt. 20 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2411.pdf>.

Kinnunen, M. (2006) A Study on Physical Separation Techniques for Recovery of Metals from Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Bottom Ash. Diplomityö, Teknillinen Korkeakoulu, Materiaalitekniikan osasto. 105 s. + liitt. 65 s.

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

- Laine-Ylijoki, J., Mroueh, U.-M., Vahanne, P., Wahlström, M., Vestola, E., Salonen, S. & Havukainen, J. (2005). Yhdyskuntajätteiden termisen käsittelyn kuonista ja tuhista hyötykäytettäviä ja loppusijoitettavia tuotteita. Kansainvälinen esiselvitys [Current International Status of MSW Ashes and Slags]. Espoo 2005. VTT Tiedotteita – Research Notes 2291. 83 s. + liitt. 4 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2291.pdf>.
- Nielsen, P. (2010). MSWI bottom ash treatment in Central Europe – Current state and future trends. VTT:n ja GTK:n järjestämä pohjakuonan jalostukseen liittyvä kutsuvierasseminaari 14.4.2010, GTK, Espoo.
- Reid, J. M. (2001). ALT-MAT: Alternative materials in road construction. Report No.: WP6.TRL.002, Final Report. 188 s.
- TFHRC. Turner-Fairbank Highway Research Center, Federal Highway Administration, U.S. Department of transportation. <http://www.tfrc.gov>.
- Vrancken (2001). Vergelijking van verwerkingsscenario's voor restfractie van HHA en niet-specifiek categorie II bedrijfsafval, VITO.
- Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J., Kaartinen, T., Rautiainen L., Hjelmar, O., Oberender A., Bendz, D., Wik, O., Gustafsson, H., Engelsen, C. J. & Birgisdottir, H. (2009). Handbook: Environmental assessment of construction products – An introduction to test methods and other procedures related to CE-marking. Nordtest Technical Report 618.
- Wiles, C. C. (1996). Municipal solid waste combustion ash: state-of-the-knowledge. J. Hazardous Mater. Vol. 47, s. 325–344.

Liite A: Prosessivesikokeiden tulokset



Kuva A1. Vaahdotuksen virtauskaavio. Vesinäytteiden ottokohdat on merkitty numeroilla 1–6.

Prosessivesistä otetuista näytteistä analysoitiin sekä suodatetut että suodattamattomat näytteet. Analysoitavat näytteet otettiin prosessissa käytetystä hanavedestä (1), liuksesta jauhatuksen jälkeen (2), seulonnan jälkeen (3), liejunerotuksesta (4), kahdesta vaahdotusvaiheesta (5 ja 6) sekä jätteestä. Suodatetuista vesinäytteistä analysoitiin liukoinen ja suodattamattomista kokonaisalkuainepitoisuus ICP-AES-tekniikalla. Suodatetuista näytteistä analysoitiin myös pH, alkaliteetti, sähköjohtokyky, TOC, kloridi, nitraatti ja sulfaatti.

Liite A: Prosessivesikokeiden tulokset

Taulukko A1. Suodatettujen vesinäytteiden alkuainepitoisuudet (ICP-AES).

Parametri	Yksikkö	Näytteenottopiste						
		1 (hana-vesi)	2 (jauhatuksen jälkeen)	3 (seulonnan jälkeen)	4 (lieju)	5 (Esi rikaste 2)	6 (Esi rikaste 6)	7 (jäte)
Al	µg/l	5,02	2350	2280	963	827	903	1370
Sb	µg/l	0,02	84	58,6	22,1	19,3	19,7	26,5
As	µg/l	0,05	1,01	0,50	0,54	1,07	0,89	1,46
Ba	µg/l	9,68	96,3	73,3	58,9	39,5	45,9	37,5
B	µg/l	1,56	610	389	110	60,9	66,6	104
Cd	µg/l	0,02	0,50	0,27	0,04	0,04	0,02	0,02
Co	µg/l	0,02	0,23	0,06	0,03	0,11	0,02	0,02
Cr	µg/l	0,20	0,20	0,20	0,74	1,62	2,47	4,56
Cu	µg/l	9,06	198	126	28,5	9,60	0,55	1,02
Pb	µg/l	0,10	1,84	1,00	0,30	0,25	0,06	0,05
Mn	µg/l	0,94	227	145	36,3	15,1	13,6	4,64
Mo	µg/l	0,48	213	115	18,6	5,78	8,74	13,2
Ni	µg/l	5,16	14,2	9,27	3,60	5,16	3,35	4,65
Se	µg/l	0,50	6,40	3,31	0,83	0,50	0,50	1,31
Zn	µg/l	2,40	9,46	6,32	2,12	1,99	2,09	0,67
V	µg/l	0,15	0,43	0,21	0,95	1,64	2,58	3,67
Fe	mg/l	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
S	mg/l	3,49	652	471	175	36,2	44,1	52,9
SO42-	mg/l	-	1820	1402	504	99	107	127
Alkali-teetti	mmol/l	0,83	1,7	1,30	1,05	1,06	1,04	0,93
EC	mS/m	0,11	5,54	3,81	1,23	0,36	0,34	0,44
Cl ⁻	mg/l	1,00	> 300	> 300	35,0	5,00	36,0	29,0
pH	mg/l	7,9	8,4	8,7	8,93	8,78	9,11	9,21
TOC	mg/l	2,02	25,5	13,8	1,48	5,94	21,4	17,3
NO3-	mg/l	0,20	1,72	0,98	0,34	0,29	0,13	0,18

Taulukko A2. Suodattamattomien näytteiden kokonaispitoisuudet.

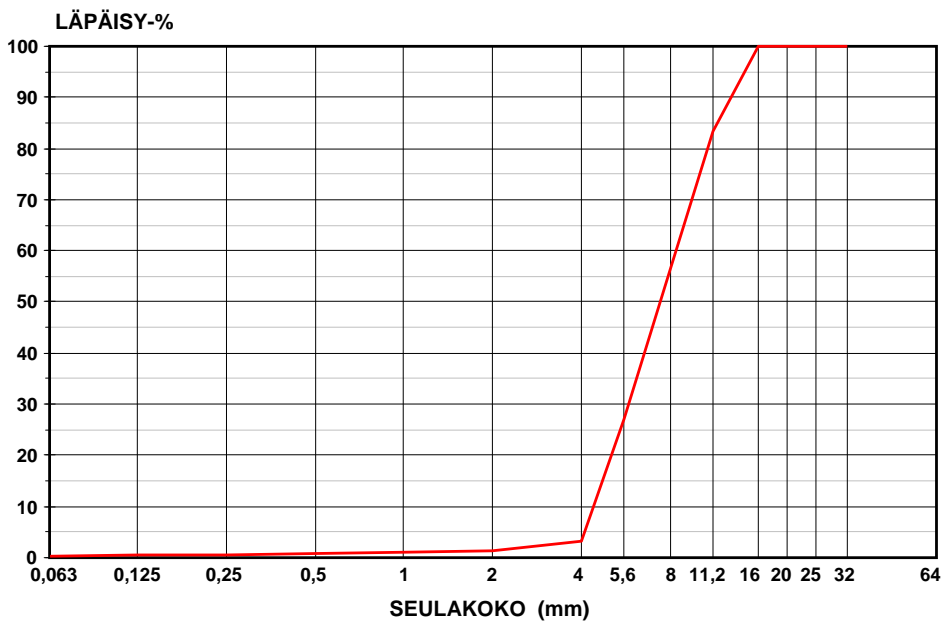
Parametri	Yksikkö	Näytteenottopiste						
		1 (hana- vesi)	2 (jauhatuksen jälkeen)	3 (seulonnan jälkeen)	4 (lieju)	5 (Esi- rikaste 2)	6 (Esi- rikaste 6)	7 (jäte)
Al	µg/l	14,7	9380	5300	10800	2170	1630	1605
Sb	µg/l	< 0,2	89,6	63,6	42,4	23,1	22,4	27,6
As	µg/l	0,32	3,12	1,53	4,37	1,78	1,23	1,79
Ba	µg/l	10,1	298	160	335	81,9	67,7	45,7
B	µg/l	4,00	539	409	163	70,6	79,5	98,7
Cd	µg/l	0,10	1,67	0,72	1,60	0,41	0,23	0,10
Co	µg/l	0,14	5,47	2,12	6,50	1,62	0,53	0,26
Cr	µg/l	3,14	25,7	9,88	32,2	11,7	9,61	8,02
Cu	µg/l	46,0	825	349	753	264	44,7	70,6
Pb	µg/l	< 0,6	232	89,9	283	47,4	20,5	5,39
Mn	µg/l	2,00	669	322	616	99,7	51,5	20,8
Mo	µg/l	0,55	189	117	24	6,96	9,84	14
Ni	µg/l	5,32	36,6	19,2	31,7	14,6	7,54	7,43
Se	µg/l	1,00	5,6	3,28	1,29	1,00	1,00	3,32
Zn	µg/l	5,76	703	252	793	127	67,2	27,9
V	µg/l	0,94	6,84	3,02	9,46	3,64	3,79	4,60
Fe	mg/l	0,04	6,85	2,58	8,31	2,28	0,65	0,21
S	mg/l	3,40	647	560	173	35,7	38,6	45,7

Liite B: ”Lopputuotteen” maarakennustekniset ominaisuudet

Rakennusteknisten tutkimusten menetelmät on kuvattu luvussa 4.2.3

1. RAKEISUUS

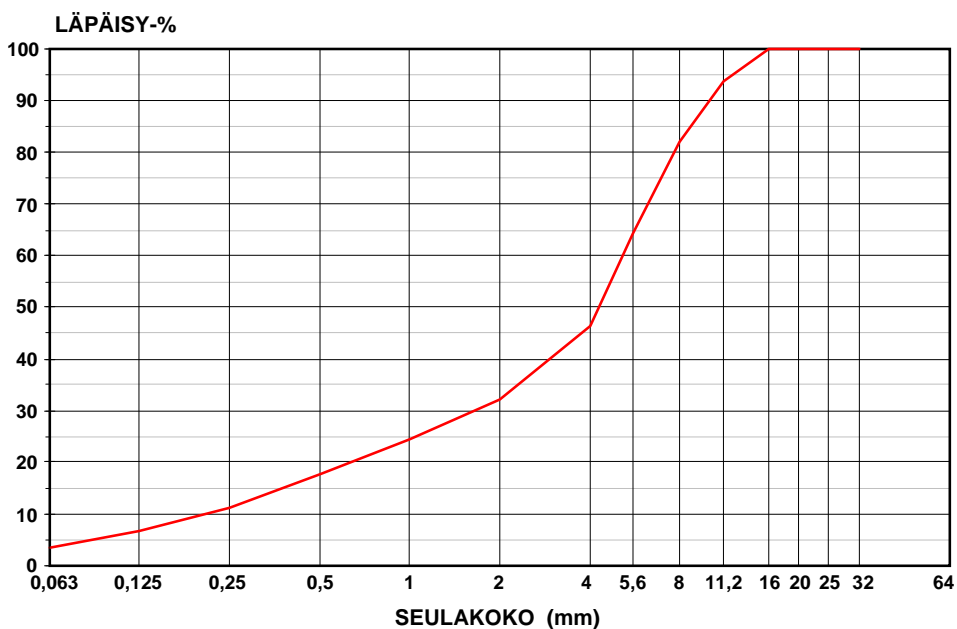
Kuvassa B1 on esitetty tutkitun kuonanäytteen rakeisuus.



Kuva B1. Tutkitun kuonanäytteen rakeisuus.

Rakeisuusmäärityksen perusteella 4 mm seulan läpäisi 3 painoprosenttia materiaalista.

Rakeisuusmääritys tehtiin myös Proctor-kokeen jälkeen (kuva B2).

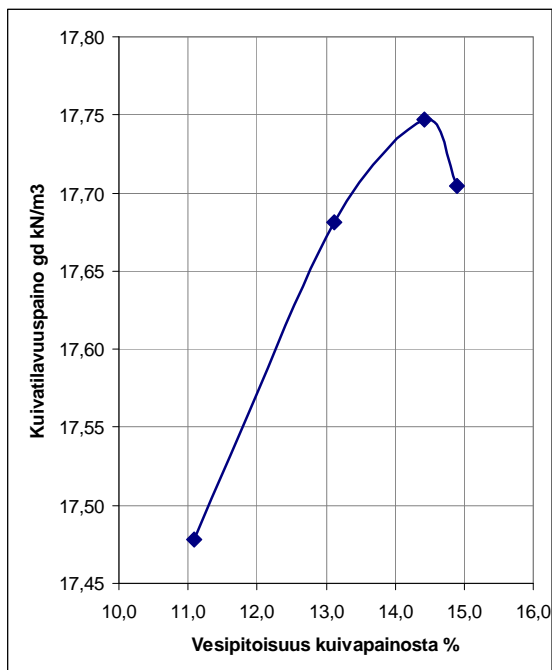


Kuva B2. Kuonanäytteen rakeisuus Proctor-kokeen jälkeen.

Kuvasta B2 voidaan havaita, että kuonanäytteen rakeisuus muuttui selvästi hienommaksi Proctor-kokeessa.

2. MAKSIMIKUIVATILAVUUSPAINO JA OPTIMIVESIPITOISUUS

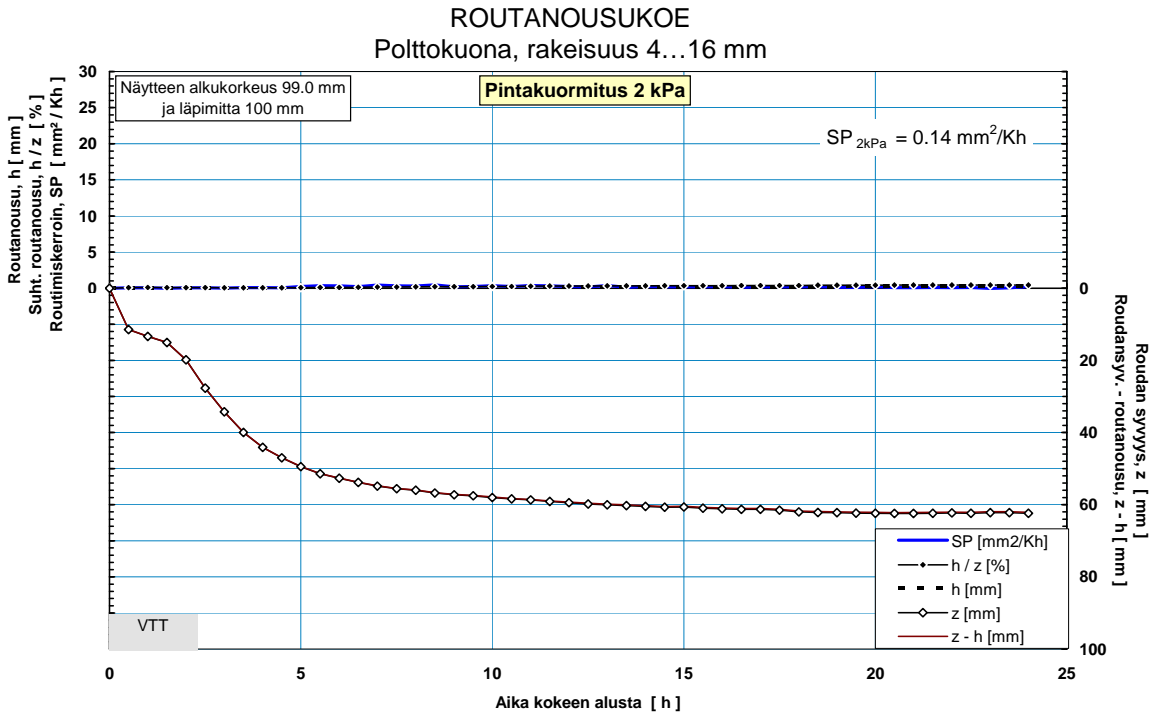
Kuonalle tehtiin Proctor-kokeet, joissa maksimikuivatilavuuspainoksi saatiin $\gamma_{dmax.} = 17,75 \text{ kN/m}^3$ ja optimivesipitoisuudeksi $w_{opt.} = 14,4 \%$. Kuvassa B3 on esitetty kuonalle tehdyn Proctor-kokeen tulokset.



Kuva B3. Kuonalle (lajite 4–16 mm) tehdyn Proctor-kokeen tulokset.

3. ROUTIVUUS

Kuvassa B4 on esitetty 2 kPa:n kuormituksella tehdyn routanousukokeen tulokset. Segregaatiopotentiaalin suuruus vaihteli kokeiden aikana välillä 0,14–0,20 mm²/Kh (keskiarvo 0,17 mm²/Kh). Routanousun suuruus 2 kPa:n kuormituksella vaihteli välillä 0,2–0,3 mm (24 h) ja routanousun suhde jäätymissyvyyteen kokeen lopussa välillä 0,4–0,5 %.



Kuva B4. Routanousukokeen tulokset 2 kPa:in kuormituksella.

Segregaatiopotentiaalin (SP) suuruuteen perustuvan routivuusluokituksen /1/ perusteella kuona (4–16 mm) oli routimaton ($SP < 0,5 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, kuormitus 2 kPa).

4. KAPILLAARISUUS

Kuonan (4–8 mm) kapillaarisuus määritettiin SAHI-kapillarimetrillä. Kapillaarinen nousukorkeus vaihteli kahdella kokeella määritettynä välillä 0,8–0,85 m. Taulukossa B1 on esitetty routivuuskriteeri kapillaarisuuden perusteella.

Taulukko B1. Routivuuskriteeri kapillaarisuuden perusteella /2/.

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

Taulukon B1 routivuuskriteerin /2/ perusteella kuonan kapillaarisuus vastasi routimatonta materiaalia.

5. LÄMMÖNJOHTAVUUS

Taulukossa B2 on esitetty mitatut lämmönjohtavuudet.

Taulukko B2. Kuonan (4–16 mm) sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuus (kolmen mittauksen keskiarvo).

	Lämmönjohtavuus, W/Km
Sula	0,15
Jäätynyt	0,17

6. KIRJALLISUUS

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

/2/ Kivikoski, H., Saarelainen, S., Ahonen, M., Huttunen, E. & Kujala, K. (2001) Lämmönjohtavuuden määrittäminen. TPPT, Tien Pohja- ja Päälysrakenteet Tutkimusohjelma, Menetelmäkuvaus TPPT 8. 2001. 12 s.

<http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/8-lammonjoht.pdf>.



Tekijä(t) Tommi Kaartinen, Jutta Laine-Ylijoki, Auri Koivuhuhta, Tero Korhonen, Saija Luukkanen, Pekka Mörsky, Raisa Neitola, Henna Punkkinen & Margareta Wahlström		
Nimeke Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi		
Tiivistelmä Lähitulevaisuudessa yleistyvän jätteenpolton myötä syntyy Suomessakin uudenlaisia kuonia ja tuhkia, joiden käsittely vaikuttaa merkittävästi polttolaitoksen käyttökustannuksiin ja jotka läjitettyinä, ilman hyötykäyttöä, kuormittavat kaatopaikkoja. Jätelainsäädäntö edellyttää mahdollisuuksien mukaan kuonien ja tuhkien hyödyntämistä ja uusi valtakunnallinen jätesuunnitelma painottaa toimia jätteiden kierrätyksen tehostamiseksi. Jättemateriaalien hyötykäytön tehostamiseksi onkin meneillään lukuisia sekä kansallisia että EU-tason kehittämistoimia. Vuonna 2006 Suomessa hyväksyttiin asetus (591/2006) "Eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa", jonka soveltamisalaa on tavoitteena laajentaa nykyistä useampiin jättemateriaaleihin. Yhtenä tällaisena uutena, asetuksen piiriin soveltuvana uusiomateriaalina, myös valtakunnallisessa jätesuunnitelmassa, nähdään jätteenpoltossa muodostuva pohjatuha ja -kuona, jota arvioidaan Suomessa muodostuvan tulevaisuudessa noin 200 000 t/a. Tämän Tekesin rahoittaman hankkeen tavoitteena oli parantaa jätteenpolton pohjakuonan maarakentamishyötykäyttömahdollisuuksia jalostamalla kuonaa malmien rikastuksessa käytettyjen teknologioiden pohjalta ja kehittämällä siten uusia, innovatiivisia jättemateriaalien kierrätyks- ja jalostusteknologioita. Hankkeessa selvitettiin pohjakuonalle soveltuvia kustannustehokkaita käyttökohteita ja prosessoinnin mahdollisuuksia parantaa maarakentamishyötykäytön edellytyksiä. Lisäksi hankkeessa koottiin pohjakuonan jalostamiseen keskittynyt kansainvälinen asiantuntijaverkosto. Hankkeessa saatujen tulosten perusteella jätteenpolton pohjakuona on lähtökohtaisesti erinomainen uusioraaka-aine, jota jalostamalla saadaan talteen arvometalleja ja tuotetaan muita hyödynnettäväksi soveltuvia materiaali-jakeita. Samalla jalostusprosessilla ei kuitenkaan saada kuonasta sekä arvoaineita mahdollisimman hyvin talteen että valmisteta hyvää maarakentamiseen soveltuvaa aggregaattia, vaan molempia jalostuksen "päätuotteita" varten jalostusprosessi tulee suunnitella ja optimoida erikseen. Keskeistä tässä on siten yksikköprosessien ja koko prosessin optimointi ja kannattavuuden kannalta haasteellisten jakeiden, kuten hienoaineksen, jatkokäsittely ja hyödyntäminen.		
ISBN 978-951-38-7679-1 (nid.) 978-951-38-7680-7 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinnumero 27015
Julkaisuaika Joulukuu 2010	Kieli Suomi, eng. tiiv.	Sivuja 98 s. + liitt. 8 s.
Projektin nimi PUUMA		Toimeksiantaja(t) Tekes
Avainsanat Waste incineration, bottom ash, processing, utilization, earth construction, enrichment		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374



Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2567
VTT-TIED-2567

Author(s) Tommi Kaartinen, Jutta Laine-Ylijoki, Auri Koivuhuhta, Tero Korhonen, Saija Luukkanen, Pekka Mörsky, Raisa Neitola, Henna Punkkinen & Margareta Wahlström		
Title Refining of bottom ash from municipal solid waste incineration		
Abstract <p>New kinds of slags and ashes will be created by waste incineration, which will become more common in Finland in the near future. The processing of these slags and ashes will contribute significantly to the operating costs of incineration plants, and will burden landfill sites when dumped unutilised. Waste legislation requires, where possible, the utilisation of slags and ashes, and the new National Waste Plan emphasises the efforts to improve waste recycling. Numerous ongoing national and EU-level development activities are engaged in increasing the utilisation of waste materials. In 2006, Finland adopted the Government Decree (591/2006) "concerning the recovery of certain wastes in earth construction". The aim is to expand its scope to include more waste materials. The bottom ash formed as a result of waste incineration is seen as one such new recovered material, which would fall under the Decree and would also be included in the National Waste Plan. According to estimates, the future yearly production of these in Finland would be approximately 200,000 tonnes. The Tekes-funded project in question aimed at improving the utilisation of waste incineration bottom ash in earth construction, by refining it with technologies used in ore enrichment and by using these to develop new, innovative waste material recycling and processing technologies. The project examined cost-effective applications suitable for bottom ash and the processing possibilities for improving the conditions for utilisation of earth construction. In addition, the project compiled an international network of experts focusing on bottom ash processing.</p> <p>The project results indicate that, in principle, waste incineration bottom ash is an excellent recovered raw material, giving up precious metals as well as other materials suitable for reuse. However, as this same bottom ash refining process is unsuitable for optimum recovery of precious materials and for producing good aggregate suitable for earth construction, the production process for both "main products" should be designed and optimised separately. Central to this, therefore, is the optimisation of both the unit processes and the entire process, as well as the further processing and utilisation of challenging materials – from a viability point of view – such as fine particles.</p>		
ISBN 978-951-38-7679-1 (soft back ed.) 978-951-38-7680-7 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 70465
Date December 2010	Language Finnish, engl. abstr.	Pages 98 p. + app. 8 p.
Name of project PUUMA		Commissioned by Tekes
Keywords Waste incineration, bottom ash, processing, utilization, earth construction, enrichment		Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374

VTT Tiedotteita – Research Notes

- 2550 Turpeen tuotanto ja käyttö. Yhteenvedo selvityksistä. Arvo Leinonen (toim.). 2010. 104 s.
- 2551 Auli Kuusela-Lahtinen, Ulla-Majja Mroueh, Pasi Vahanne, Terhi Kling, Anu Kapanen, Maarit Priha, Eevaliisa Laine & Esko Rossi. Ympäristö- ja terveystieteiden arviointimenetelmien vertailu. 2010. 130 s. + liitt. 52 s.
- 2552 Eija Kaasinen, Mari Ainasoja, Elina Vulli, Heli Paavola, Riina Hautala, Pauliina Lehtonen & Esa Reunanen. User involvement in service innovations. 2010. 64 p.
- 2553 Kimmo K. Mäkelä, Jouni Huopana, Tomi Seppänen, Jari Ulkuniemi, Markku Kananen, Markku Valtonen, Jouko Heikkala & Jussi A. Karjalainen. Tyviko-projektin loppuraportti. 2010. 74 s. + liitt. 6 s.
- 2554 Mikko Malmivuo & Juha Luoma. Talvirenkaiden kunnan kehittyminen 2001–2010. 2010. 41 s. + liitt. 11 s.
- 2555 Anu Tuominen, Heidi Auvinen, Heikki Kanner & Toni Ahlqvist. Liikennejärjestelmän visiot 2100. Esiselvitys. 2010. 41 s. + liitt. 11 s.
- 2556 Sebastian Teir, Jens Hetland, Erik Lindeberg, Asbjørn Torvanger, Katarina Buhr, Tiina Koljonen, Jenny Gode, Kristin Onarheim, Andreas Tjernshaugen, Antti Arasto, Marcus Liljeberg, Antti Lehtilä, Lauri Kujanpää & Matti Nieminen. Potential for carbon capture and storage (CCS) in the Nordic region. 2010. 188 p. + app. 28 p.
- 2558 Veli-Pekka Kallberg. Linja-autojen paloturvallisuus Suomessa 2000–2009. 2010. 34 s. + liitt. 9 s.
- 2558 Ali Harlin & Minna Vikman (eds.). Developments in advanced biocomposites. 2010. 94 p.
- 2559 Anna Leinonen & Sirkku Kivisaari. Nanotechnology perceptions. Literature review on media coverage, public opinion and NGO perspectives. 2010. 55 p. + app. 1 p.
- 2560 Hanna Pihkola, Minna Nors, Marjukka Kujanpää, Tuomas Helin, Merja Kariniemi, Tiina Pajula, Helena Dahlbo & Sirkka Koskela. Carbon footprint and environmental impacts of print products from cradle to grave. Results from the LEADER project (Part 1). 2010. 208 p. + app. 35 p.
- 2562 Tuomo Rinne, Kati Tillander & Peter Grönberg. Data collection and analysis of evacuation situations. 2010. 46 p. + app. 92 p.
- 2563 Marja-Leena Haavisto, Kaarin Ruuhilehto & Pia Oedewald. Rautateiden liikenteenohjaus ratatöiden aikana ja ratatöiden hallinta. 2010. 79 s. + liitt. 7 s.
- 2567 Tommi Kaartinen, Jutta Laine-Ylijoki, Auri Koivuhuhta, Tero Korhonen, Saija Luukkanen, Pekka Mörsky, Raisa Neitola, Henna Punkkinen & Margareta Wahlström. Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi. 2010. 98 s. + liitt. 8 s.