

JÄTTEENPOLTON POHJAKUONAN VAIHTOEHTOINEN PROSESSOINTIMENETELMÄ

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Insinööri (AMK)
Ympäristö- ja energiatekniikka
Opinnäytetyö
Kevät 2019
Tuomas Knuters

Tiivistelmä

Tekijä(t) Knuters, Tuomas	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika Kevät 2019
	Sivumäärä 49	
Työn nimi JÄTTEENPOLTON POHJAKUONAN VAIHTOEHTOINEN PROSESSOINTIMENETELMÄ		
Tutkinto Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka		
Tiivistelmä Jätteenpoltto on Suomessa viime vuosina lisääntynyt valtavasti ja sen myötä myös arinapolttoisen pohjakuonan määrä on kasvanut. Kuonalle on jouduttu kehittämään vaihtoehtoisia ratkaisuja kaatopaikalle sijoittamisen sijasta. Yksi vaihtoehto on pohjakuonan käsittely, jossa kuonasta saadaan erotettua metalleja takaisin hyötykäyttöön sekä luonnonkiviaineeksi korvaavaa mineraalijaetta. Teoriaosuudessa käytiin läpi pohjakuonan käsittelyssä käytettäviä erilaisia kuivaerottelun tekniikoita, jätteenpolton kehittymisen vaiheita ja nykyisiä jätteenpolttotekniikoita. Lisäksi käsiteltiin myös pohjakuonaan vaikuttavaa lainsäädäntöä sekä pohjakuonan koostumusta ja ominaisuuksia. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia vaihtoehtoisia prosessointimenetelmää jätteenpolton pohjakuonan käsittelyyn. Tavoitteena oli osoittaa optimaalisin menetelmä tehokkaan metallien saannon ja tuotetun mineraalijakeen hyödyntämisen kannalta. Tarkoituksena oli täyttää jakavan kerroksen soran ja/tai suodatinkerroksen hiekan rakeisuusvaatimukset suhteuttamalla matemaattisesti eri raekoon jakeita. Tutkimuksessa suoritettiin neljä eri testiä, joiden tuloksien eroja verrattiin toisiinsa sekä tutkitulla menetelmällä tavoitettavaa parannusta normaalikäsitteilyyn verrattuna. Työ rajattiin käsittelemään geotekniikan osalta rakeisuusvaatimuksia. Tuloksista ilmenee kaikkien testien kohdalla olevan mahdollista tuottaa rakeisuusvaatimuksiltaan suodatinkerroksen hiekan ja osassa testejä myös jakavan kerroksen soran vaatimukset täyttävää materiaalia. Samalla myös saavutetaan korkeammat metallien saannot normaaliin käsitteilyyn verrattuna.		
Asiasanat Pohjakuona, geotekniikka, jätteenpoltto		

Abstract

Author(s) Knuters, Tuomas	Type of publication Bachelor's thesis	Published Spring 2019
	Number of pages 49	
Title of publication ALTERNATIVE PROCESSING METHOD FOR MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATION BOTTOM ASH		
Name of Degree Bachelor of Engineering		
Abstract Municipal waste incineration has become popular during the last ten years in Finland. It creates a lot of bottom ash which has become a challenge for waste management companies. It has created a need to develop new alternative ways to utilize bottom ash. One potential solution is to process and recycle bottom ash to recover valuable metals and to produce reusable mineral fraction for road construction. In this thesis different technologies to process bottom ash are presented and the development of waste incineration during the last centuries is also discussed. Modern incineration technologies are introduced, and the composition of bottom ash is described. The aim of this thesis was to study an alternative method to process municipal solid waste incineration bottom ash. The target of the study was to find the most ideal method to process bottom ash to recover metals as much as possible and the same time produce reusable mineral fraction which could be utilized in filtration and sub-base layers. The study was carried out with four different tests. The results of those tests were compared to each other and to results of a normal processing. It was found that the material produced by the alternative processing method was suitable to use in filtration and sub-base layers. There was also a great improvement in metal recovery results.		
Keywords Bottom ash, geotechnics, waste incineration		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	JÄTTEENPOLTON POHJAKUONA.....	2
2.1	Jätteenpolton nykytilanne	2
2.2	Pohjakuonaa koskeva lainsäädäntö	3
2.2.1	Ympäristönsuojelulaki (527/2014)	3
2.2.2	Jätelaki (646/2011)	4
2.2.3	Jäteverolaki (1126/2010)	4
2.2.4	Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (331/2013)	5
2.2.5	MARA-asetus (VNa 843/2017)	5
2.3	Polttotekniikat	7
2.3.1	Arinapoltto.....	7
2.3.2	Kaasutuspoltto	8
2.3.3	Leijupetipoltto.....	9
2.4	Kuonan koostumus	10
3	POHJAKUONAN KÄSITTELY.....	11
3.1	Käsittelyn vaiheet.....	11
3.2	Erottelutekniikat	12
3.2.1	Pyörrevirtaerotin	12
3.2.1	Sensoreihin perustuvat erottimet	13
3.2.2	Magneettierottimet	14
4	KUONAN HYÖTYKÄYTTÖ	17
4.1	Kiviaineksen käyttö maanrakennuksessa.....	17
4.2	Tekniset ominaisuudet.....	18
4.2.1	Rakennekerrokset ja rakeisuusvaatimukset	19
4.2.2	Routanousukoe.....	20
4.2.3	Syklinen ja staattinen kolmiaksiaalikoe.....	22
5	VAIHTOEHTOINEN PROSESSOINTIMENETELMÄ.....	23
5.1	Testattavat jakeet	23
5.2	Testattavien jakeiden tuottaminen	24
5.3	Testijakeiden käsittely.....	26
5.4	Käsiteltujen jakeiden metallin erottelu.....	27
5.5	Näytteiden käsittely ja analyysit.....	28
6	TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI	31

6.1	Tuotettujen massojen jakauma.....	31
6.2	Rakeisuudet.....	33
6.2.1	Testi 1	33
6.2.2	Testi 2	36
6.2.3	Testi 3	40
6.2.1	Testi 4	42
6.3	Metallin erottelun tulokset.....	45
6.4	Yhteenveto.....	45
7	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	46
	LÄHTEET	47

1 JOHDANTO

Jätteenpolton pohjakuonien määrä on ollut viime vuodet kasvussa jätteenpolton suuren kasvun vuoksi. Suurista kuonamääristä on tullut haaste jätteenkäsittelijöille, koska yksinkertaista käyttö- tai sijoituskohdetta ei kuonalle ole ollut. Pohjakuona kuuluu jäteverolain alaisuuteen, joten kaatopaikalle sijoittaminen tulisi kalliiksi. Kuonaa on ryhdytty käsittelemään, jolloin siitä saadaan talteen arvokkaita metalleja sekä maanrakennukseen käyttökelpoista mineraaliainesta.

Yhdyskuntajätteen arinapoltossa syntyvä pohjakuona on palamatonta ainesta, joka koostuu pääosin lasista, keramiikasta ja kuonasta eli kiviaineksista sekä metalleista. Sitä käsittelemällä saadaan erotettua arvokkaita raaka-aineita. Kuonasta erotellut metallit voidaan toimittaa jatkojalostukseen ja palauttaa takaisin kiertoon. Samassa prosessissa saadaan myös mineraalijatetta, jota voidaan käyttää tiettyjen ehtojen puitteissa luonnonkiviainesten korvaajana. Vuonna 2017 uudistettu eräiden jätteiden hyödyntämistä maarakennuksessa koskeva valtioneuvoston asetus eli MARA-asetus mahdollistaa sen helpomman hyötykäytön maarakennuksessa asetuksen määrittämien vaatimusten täyttyessä, eikä entistä aikaa vievää ja kallista ympäristölupaprosessia silloin tarvita.

Käsittelyyn on eri tekniikoita ja laitteita, joilla käsittely voidaan toteuttaa erilaisin menetelmin. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan yhtä vaihtoehtoista prosessointimenetelmää ja pyritään optimoimaan prosessisuunnittelulla sillä saavutettava metallien saanto ja tuotettavan mineraalijakeen hyödynnettävyys. Tavoitteena on vaatimusrakeisuuksien täyttäminen suodatinkerroksen hiekan tai jakavan kerroksen soran osalta. Tutkimukset toteutettiin pääosin Fortum Waste Solutions Oy:n Hausjärven teollisuusjätekeskuksessa sijaitsevalla kuonan käsittelylaitoksella sekä yhtiön maalaboratoriossa. Työssä käytetään aineistona kirjallisuutta ja tutkittujen näytteiden tuloksia.

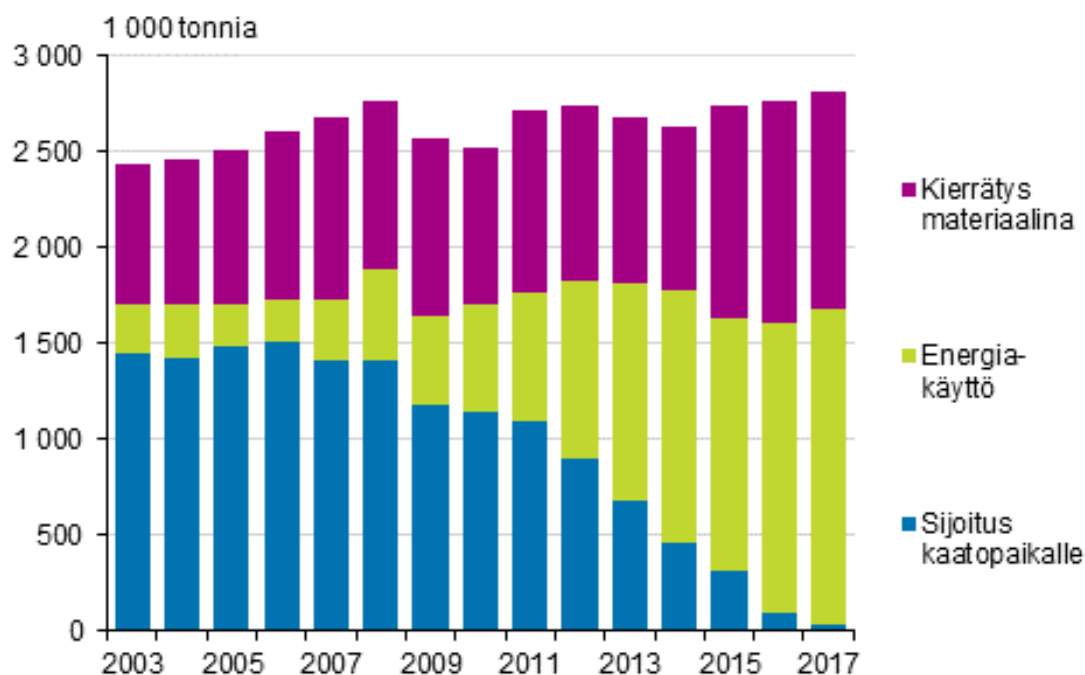
2 JÄTTEENPOLTON POHJAKUONA

2.1 Jätteenpolton nykytilanne

Jätteenpoltto aloitettiin Euroopassa vuonna 1874 Englannissa käyttöön otetun ensimmäisen jätteenpolttolaitoksen myötä. Ensisijainen tarkoitus poltolla oli parantaa kaupunkien hygieniää eikä energian tuottaminen tai materiaalin kierrätys ollut oleellista, kun kivihiilestä tai muista materiaaleista ei ollut pulaa. Hieman muista maista poiketen Englannissa alettiin hyödyntää jätteenpoltoista saatavaa energiaa jo 1800-luvun lopulla tuottamalla höyryä sitä käyttäville sähkögeneraattoreille ja viemäripumpuille. Euroopassa energian tuotanto liitettiin laitoksiin vasta 1970-luvulla öljyn hinnan noustua (Vesanto 2006). Vaikka jätteenpolttolaitosten lähialueiden asukkaat olivat valitelleet kitkeristä hajuista ja noesta, ei jätteenpolton savukaasujen mahdolliseen myrkyllisyyteen kiinnitetty virallisesti huomiota kuin vasta 80-luvun alussa, jolloin ensimmäisten tutkimukset paljastivat savukaasujen sisältävän hyvin suuria pitoisuuksia raskasmetalleja ja dioksiineja. Tämä johtikin siihen, että useille Euroopan maille asetettiin jätteenpolton savukaasuille tiukkoja päästörajoja. (Jätelaitosyhdistys 2019.) Suomessakin kokeiltiin jätteenpoltoa, kun vuonna 1962 Helsingin Kyläsaarella vihittiin käyttöön jätteenpolttolaitos. Tässäkään voimalassa ei ollut silloin käytössä savukaasujen puhdistusta, ja laitos suljettiinkin vuonna 1983 sen aiheuttamien päästöjen vuoksi. (Ojala 2013.)

Polttolaitosten tekniikka kehittyi nopeasti ja päästöt putosivat murto-osaan aikaisemmista myös savukaasujen puhdistamisen myötä. Suomessa otettiin kehitysaskelia 1990-luvulla, kun jätteestä alettiin lajitella leijupetikattiloissa poltettavaksi soveltuvaa materiaalia. Ensimmäisiä ns. uuden sukupolven jätteenpolttolaitoksia alettiin rakentaa vuonna 2006 Kotkaan ja Riihimäelle. (Jätelaitosyhdistys 2019.)

Kuviossa 1 on esitetty jätteenkäsittelyn jakauma polton, kierrätyksen ja kaatopaikkasijoituksen kesken. Jätteenkäsittely on viimeisen vuosikymmenen aikana muuttunut radikaalisti. Vaikka jätemäärät ovat pysyneet lähes samana, on kaatopaikalle sijoitettavan jätteen määrä romahtanut pääosin lisääntyneen jätteenpolton seurauksena. Vielä vuonna 2007 kaatopaikoille sijoitettiin noin puolet yhdyskuntajätteestä, kun vuonna 2017 se oli enää noin prosentin verran. Jätteen energiakäyttö on lisääntynyt kaatopaikalle sijoittamisen vähenemisen myötä mutta sen kierrätys materiaalina ei tosin ole viime vuosina merkittävästi lisääntynyt.



Kuvio 1. Yhdyskuntajätteen kertymät vuosina 2003 - 2017 (Suomen virallinen tilasto (SVT) 2019)

2.2 Pohjakuonaa koskeva lainsäädäntö

Jätteiden käsittelyä ohjaa lainsäädännön tuomat velvoitteet. Pohjakuonien tai muiden jätteiden käsittely ei saa vaarantaa ympäristöä eikä aiheuttaa haittaa ihmisille tai eläimille missään vaiheessa käsittelyprosessin aikana. Jätteen prosessoinnissa esikäsittely, varastointi, kuljetus, esikäsittely ja käyttö sekä sen jälkeiset toimenpiteet on huomioitava ympäristövaikutusten kannalta.

2.2.1 Ympäristönsuojelulaki (527/2014)

Ympäristönsuojelulain tarkoituksena on ensisijaisesti ehkäistä ympäristön pilaantumista ja siitä aiheutuvia haittoja, turvata luonnon monimuotoisuutta ja luonnonvarojen kestäväää käyttöä. Lakia täytyy soveltaa sellaiseen teolliseen tai muuhun toimintaan, joka mahdollisesti aiheuttaa haittaa tai vaaraa ympäristölle, siihen sisältyy jätteen käsittelyä ja sitä synnyttävää toimintaa. Ympäristönsuojelulain mukaan sellaiselle toiminnalle, joka saattaa aiheuttaa ympäristön pilaantumista, on haettava ympäristölupaa. Jätteen käsittely laitos- tai ammattimaisesti vaatii ympäristöluvan. (Ympäristönsuojelulaki 527/2014.)

2.2.2 Jätelaki (646/2011)

Jätelain tarkoituksena on edistää luonnonvarojen kestäväää käyttöä, vähentää jätteen syntyä ja siitä aiheutuvaa haittaa sekä lisätä sen hyödyntämistä. Tavoitteena on myös ehkäistä ja torjua jätteistä ja jätehuollosta aiheutuvaa haittaa terveydelle ja ympäristölle.

Suomessa jätelakiin kuuluu etusijajärjestys, jonka mukaan ensisijaisesti jätteen tuottoa on vältettävä. Jos jätettä kuitenkin syntyy, se täytyy käsitellä uudelleenkäytettäväksi tai toissijaisesti kierrätettävä materiaalina. Uudelleen käytettäväksi kelpaamaton materiaali täytyy hyödyntää energiana ja vasta viimeisenä vaihtoehtona on kaatopaikalle sijoitus. Laki velvoittaa noudattamaan etusijajärjestystä, jos se teknisesti on mahdollista, eikä se aiheuta taloudellisesti kohtuuttomia kustannuksia verrattuna muuhun käsittelyyn. (Jätelaki 646/2011.)

Jätelain määritelmän mukaan jäte on aine tai esine, joka on poistettu, tullaan poistamaan käytöstä tai jonka haltija on velvollinen poistamaan käytöstä. Lain tarkoituksena on vähentää ja ehkäistä jätehuollosta aiheutuvaa haittaa ja vaaraa ympäristölle sekä varmistaa jätehuollon toimintaa. Laki myös velvoittaa jätteen haltijaa kierrättämään ja hyödyntämään jätettä uusiokäytössä. Tämä velvoite koskee myös jätteenpolton pohjakuonia. (Jätelaki 646/2011.)

Jätelajeittain voidaan valtioneuvoston asetuksella antaa tarkempia säädöksiä siitä, milloin aine tai esine ei enää ole jätettä. Tämä pätee jos

- sille on suoritettu hyödyntämistoimi
- sillä on yleinen käyttötarkoitus
- sillä on kysyntää ja markkinoita
- se täyttää tekniset vaatimukset muihin vastaaviin tuotteisiin verrattuna
- se ei kokonaisuutena aiheuta vaaraa ympäristölle tai terveydelle. (Jätelaki 646/2011.)

2.2.3 Jäteverolaki (1126/2010)

Jäteverolaki asetettiin Suomeen vuonna 1996 vähentämään jätteen syntyä ja ohjaamaan sitä hyötykäyttöön (Ojala 2013). Se uusittiin ja vahvistettiin 2010, jolloin 1996 vuoden laki kumottiin. Jäteverolain mukaan kaikesta sellaisesta kaatopaikalle toimitettavasta jätteestä, jonka hyödyntäminen on teknisesti mahdollista ja perusteltua ympäristönsuojelun kannalta tai sen hyödynnettävyyttä olisi taloudellisesti jäteverolla mahdollista parantaa, tulee mak-

saa jäteveroa. (Ympäristöhallinto 2013.) Jätevero on mahdollista välttää, jos jätettä on tarkoituksena hyödyntää kaatopaikan perustamisen, käytön tai käytöstä poistamisen yhteydessä kaatopaikan välttämättömissä rakenteissa, joihin myös jätteenpolton pohjakuonaa käytetään (Jäteverolaki 1126/2010).

2.2.4 Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (331/2013)

Asetuksen tavoitteena on torjua pohjaveden, pintaveden, maaperän ja ilman pilaantumista, sekä ilmastomuutosta ja siihen liittyviä ympäristövaikutuksia ohjaamalla kaatopaikkojen suunnittelua, rakentamista, käyttöä, hoitoa ja käytöstä poistamista siten, ettei niistä aiheudu vaaraa tai haittaa ympäristölle tai terveydelle. Asetus velvoittaa tutkimaan kaatopaikkakelpoisuuden kaatopaikalle sijoitettavista jätteistä ennen niiden toimittamista jätekeskukseen. (Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013). Kaatopaikalle sijoitettavan jätteen ehtoja kiristettiin vuoden 2016 alussa kun asetukseen tehtiin muutos orgaanisen jätteen osalta, jolloin sen sijoittamista kaatopaikalle alettiin rajoittaa.

2.2.5 MARA-asetus (VNa 843/2017)

Vuoden 2018 alussa tuli voimaan vuonna 2017 valtioneuvoston uudistama asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maanrakentamisessa. Käytännössä asetus mahdollistaa sen edellytyksien täytyessä tiettyjen materiaalien, esimerkiksi jätteenpolton pohjakuonan käytön maanrakennuksessa ilman ympäristönsuojelulain (527/2014) mukaista ympäristölupaa, joka on aikaisemmin ollut aikaa vievä ja kallis hyötykäyttöä hankaloittava prosessi. Nyt ympäristöluvan sijasta hyödyntämispaikan haltijan täytyy tehdä rekisteröinti-ilmoitus valtion valvontaviranomaiselle. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maanrakentamisessa 843/2017.) Tällä pyritään helpottamaan ja lisäämään maanrakennuksessa käytettävien luonnonkiviaineksien sijasta erilaisen jätteiden hyötykäyttöä, ja siten pienentämään luonnonvarojen käyttöä samaan hyödyntäen jätteitä.

Materiaalin hyödyntämisen edellytykset ympäristönsuojelu- ja jätelain lisäksi liittyvät sen fyysiseen kokoon ja kemiallisiin aineisiin sekä sen ominaisuuksiin, hyödyntämispaikan etäisyyteen vesistöistä sekä rakennepaksuuteen ja -tyyppiin. Materiaalin täytyy myös täyttää vaatimukset ja raja-arvot, jotka kohderakenteelle on yleisesti määrätty. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maanrakentamisessa 843/2017.)

Jätteenpolton pohjakuonan kohdalla tämä tarkoittaa sitä, että pohjakuonien käyttö on sallittua väylä- ja kenttärakenteissa sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteissa, kun siitä on poistettu metallit ja raekoko on enintään 50 mm. Näiden lisäksi on tutkittava

kuonan ympäristökelpoisuus eli määritettävä liukoisuudet antimonille, arseenille, bariumille, kadmiumille, kromille, kuparille, elohopealle, lyijylle, molybdeenille, nikkelille, vanadiinille, sinkille, seleenille, fluoridille, sulfaatille, kloridille ja liuenneelle orgaaniselle hiilille. Raja-arvot näille poikkeavat hieman kohteen laadusta ja rakenteesta riippuen. Esimerkiksi väylä tai kenttä rakenteessa päällystämättömällä tai päällystetyllä kohteella raja-arvot ovat erilaiset. Raja-arvojen lisäksi jätteen tulee täyttää rakennuskohteen rakennosien tekniset ja toiminnalliset laatuvaatimukset niitä koskevissa säädöksissä ja ohjeissa sekä rakennuttajan kohdekohtaisissa suunnitelmissa. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maanrakentamisessa 843/2017.)

Mara-asetuksen mukainen jätteen hyötykäyttö edellyttää myös jätteen laadunvarmistusjärjestelmää, jolla varmistetaan jätteen olevan kyseiseen hyödyntämispaikkaan asetuksen mukaisesti sopivaa. Se määrittelee jätteen luovuttajalle suoritettavat toimenpiteet, jotka hyödyntämispaikan haltijan on luovuttajalta edellytettävä. Noudattamalla järjestelmää saadaan yksilölliset ja jäljennettävät tiedot jätteen kuulumisesta asetuksen piiriin ja sille annettujen vaatimusten täyttämistä. Hyödynnettävän jätteen laadunvalvonnan suunnitelmallisuus ja sen säännöllisyys on varmistettava laadunvarmistusjärjestelmää käyttäen. Laadunvarmistusjärjestelmästä tulee selvitä vuosittaiset jätteet, jätteen nimikkeet ja laitoksen tuotannon ollessa kyseessä myös syntymäärät sekä laadunvalvontatutkimukset, joissa osoitetaan näytteenottopaikat- ja ajankohdat sekä näytteenottomenetelmät. Jos samalla laitoksella on monesta kohteesta käsiteltäviä jätteitä, on silloin oltava ohjeet jätteen varastointiin, käsittelyyn ja vastaanottoon. Lisäksi järjestelmä vaatii myös selvitettäväksi vastuuhenkilöt, auditointi- ja arviointisuunnitelman sekä seuranta- ja raportointia. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maanrakentamisessa 843/2017.)

Laadunhallintajärjestelmän mukaisesti jätteistä on tutkittava ympäristökelpoisuus edustavista kokoomanäytteistä, jotka on koottu kyseiselle jätteelle asetetusta määrästä osanäytteitä. Jätteenpolton pohjakuonan kohdalla suurin massamäärä, joka yhdellä kokoomanäytteellä voidaan tutkia, on 5000 t. Jokainen kokoomanäyte täytyy kuitenkin koostua vähintään 50 osanäytteestä. Näytteenotossa sovelletaan maanrakentamisalan standardeja, Euroopan standardoimisjärjestön teknisten raporttien periaatteita sekä jätteiden karakterisointia koskevaa standardia SFS-EN 14899. MARA-asetuksen mukaan laitospöydässä syntyvien jätteiden ympäristökelpoisuus on tutkittava säännöllisesti kohdentuen tutkimukset jatkuvaan jätevirtaan tai hyödynnettäväksi toimitettavaan käsiteltyyn jätteeseen. Ennen jätteen toimittamista hyödynnettäväksi on siitä tutkittava haitta-aineiden pitoisuudet ja liukoisuudet vähintään yhdestä kokoomanäytteestä. Mikäli jäte ei täytä sille

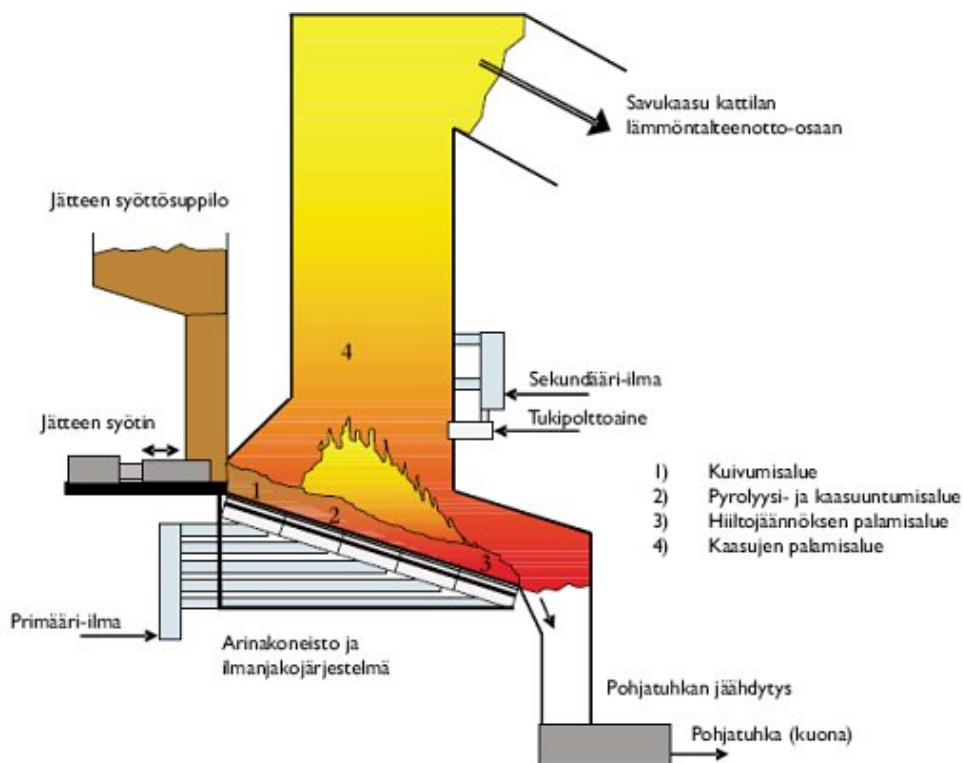
määritettyjä vaatimuksia, voidaan jätettä käsitellä eri tavoin ympäristökelpoisuuden parantamiseksi, ja sen jälkeen suoritettava edellä mainitut tutkimukset uudelleen. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maanrakentamisessa 843/2017.)

2.3 Polttotekniikat

Suomessa poltetaan syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä yhdeksässä voimalaitoksessa ympäri Suomen, jossa seitsemässä niistä on käytössä arinapolttotekniikka. Kahdessa voimalaitoksessa käytetään erilaista tekniikkaa. Lahti Energiolla Lahdessa on käytössä kaasutuspolttotekniikka ja Riikinvoimalla Leppävirralla leijupetiteknikka. Näiden tekniikoiden kuona ja sen käsittely poikkeavat arinapoltetusta eikä niiden käsittelyyn siksi tässä opinäytetyössä perehdytä.

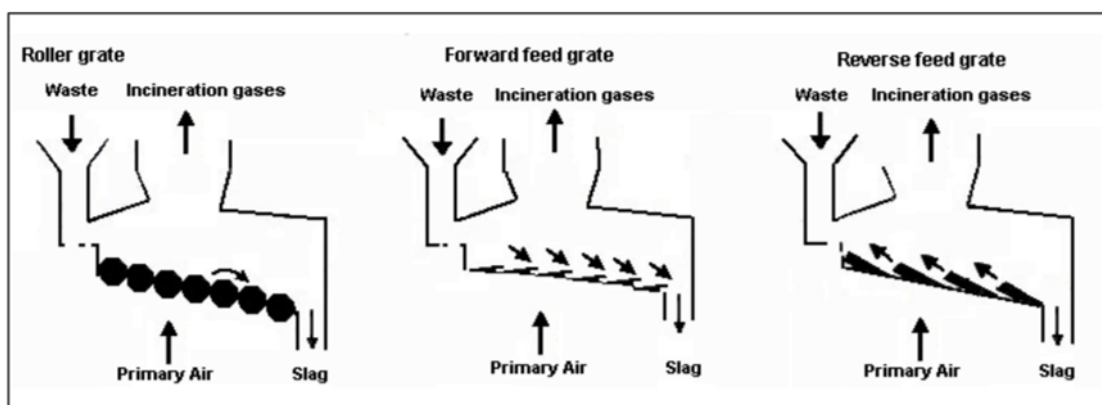
2.3.1 Arinapoltto

Arinapolttotekniikka on ollut käytössä pitkään sen soveltuessa hyvin yhdyskuntajätteelle, sillä poltettavan jätteen tuhkanpitoisuuden, kosteuden ja lämpöarvon vaihtelulla ei ole merkittävää haittavaikutusta prosessin toimivuudelle. Jäte ei myöskään vaadi suurta käsittelyä ennen polttoon siirtämistä, ja vain erittäin suurien kappaleiden rikkominen ja isoimpien metalliesineiden poisto on tarpeellista. (Jätelaitosyhdistys 2018.)



Kuva 1. Arinapolton periaate (Jätelaitosyhdistys 2018)

Kuvassa 1 on esitetty arinapolttotekniikan periaate. Pystysuoraan syöttösuppiloon jätettä syötetään kahmarilla, josta jäte siirretään eteenpäin arinalle hydraulisesti työntämällä. Jätettä liikutetaan arinalla sen sekoittamiseksi ja tasaisen palamisen saavuttamiseksi. Arinoita on kolme erilaista: valssi-, vasta- ja myötäsytötarina (kuva 2). Valssiarinassa jätettä siirtävät eteenpäin sylinterinmalliset pyörivät valssit, joiden pinnalla olevista reistä puhalletaan primääri-ilma polttoaineeseen. Vasta- ja myötäsytötarinoissa olevista tasoista joka toinen liikkuu toisen pysyessä paikallaan ja näin työntää jätettä eteenpäin. (Jätelaitosyhdistys 2018.)



Kuva 2. Arinapolttotekniikoiden kolme eri mallia: valssi-, myötä- ja vastasyötötarina (European Commission 2006)

2.3.2 Kaasutuspoltto

Suomessa ainoa kaasutintekniikkaa käyttävä voimalaitos on Lahdessa Lahti Energian Kymijärvi II. Pääpolttoaineena käytetään kierrätyspolttoaineesta ja -puusta eli materiaalikierätykseen kelpaamattomasta muovista, pahvista, paperista ja puusta tehtyä tuotekaasua. Polttoaineteho on 160 MW, josta kaukolämpö teho on 90 MW ja sähköteho 50 MW. Tavalista sekajätettä ei kaasutuksessa voida käyttää, vaan se on esikäsiteltyä sekajätteestä lajiteltua ja murskattua jaetta. Vielä ennen kaasutusta voimalaitoksella jätteestä poistetaan metallit ja suuret kappaleet ohjataan murskattavaksi. (Lahti Energia 2016.)

Kaasutuksessa käytetään kiertoleijukaasutinta, jonka petimateriaaleina käytetään kalkkia ja hiekkaa. Kaasuttimeen syötetään polttoainetta 850-900 celsiusasteisen petimateriaalin sekaan, jolloin petimateriaalin alta syötettävä ilma aiheuttaa niiden sekoittumisen. (Lahti

Energia 2016.) Riittävällä määrällä petimateriaalia lämpö säilyy riittävän korkealla. Kuumassa lämpötilassa polttoaine alkaa kuivaa ja kaasuuntua hiilivetyjen hajotessa pienemmiksi molekyyleiksi, jolloin syntyy erilaisia kaasuja, puuhiiltä ja vettä. Kun polttoaineen lämpötila nousee lähemmäksi 850 astetta, alkavat hiilivetyjen, puuhiilen ja syntyneiden kaasujen kemialliset sidokset hajota muodostaen uusia tuotekaasuja kuten metaania, hiili-monoksidia- ja dioksidia sekä vetyä. Prosessissa syötettävän ilman määrä on tärkeä pitää tarpeeksi pienenä, jotta polttoaine ei ala palaa vaan kaasuuntuu. (Basu 2010.)

Syntynyt raakakaasu jäädytetään reiluun 400 asteeseen, jotta kaasun sisältämät raskasmetallit muuttuvat kiinteään muotoon. Kaasu johdetaan puhdistukseen puhdistussammioihin, jossa siitä puhdistetaan pois tuhka, pöly ja pienhiukkaset. Tämän jälkeen se johdetaan poltettavaksi samantyyppiseen kaasukattilaan kuin maakaasu, joka on suunniteltu korkeille höyrynarvoille hyötysuhteen parantamiseksi. Polttolämpötila on noin 1100-1300 °C. (Lahti Energia 2016.)

2.3.3 Leijupetipoltto

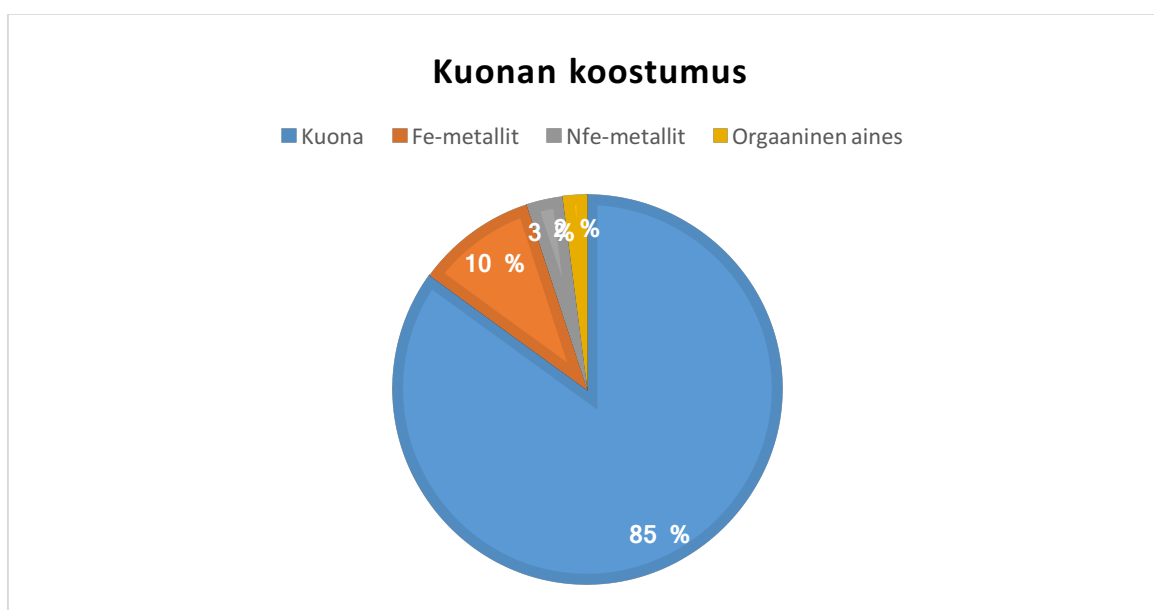
Leppävirralla 2017 käyttöön otetussa Riikinvoiman ekovoimalaitoksessa jäte poltetaan leijupetiteknikalla. Voimalan polttoaineteho on 54 MW. Samantyyppisesti kuin kaasutuspoltossa polttoaine kaasutetaan leijupetikaasuttimessa, leijupetipoltossa jäte poltetaan hehkuvan kuuman hiekan ja tuhkan seassa eli pedissä, jota leijutetaan alta puhallettavalla ilmalla. Polttoaine sekoittuu ja liikkuu hiekan seassa jatkuvasti, mikä takaa sille tasaisen palamisen sekä tehokkaan lämmön ja kaasujen siirtymisen. Leijupetipoltto on arinatekniikkaa paljon tuoreempi tekniikka, vaikka se on ollut käytössä jo muutamia vuosikymmeniä. (Vesanto 2006.)

Leijupetipoltossa polttoaine syötetään tulipesään ruuvisyöttimellä tai pudotustorvella, jottei syöttöjärjestelmästä pääsisi hallitsemattomasti ilmaa tulipesään sekoittamaan kaasuvirtauksia ja leijutusta. Petinä käytetään hiekkaa ja palamisessa syntynyttä tuhkaa, joka voi jätteenpolton kohdalla olla melko suurikin määrä. Pedissä joskus käytetään myös kalkkia, jolla saadaan sidottua epäpuhtauksia lentotuhkasta. Tulipesän pohjalle putoaa palamaton karkeampi aines, kuten metallit ja lasit. Savukaasujen mukana hienojakoinen tuhka kulkeutuu pois tulipesästä savukaasujen puhdistukseen. (Vesanto 2006.)

Savukaasut johdetaan pois tulipesästä esijäähdytykseen, jossa höyrystyneet metallit ja epäorgaaniset yhdisteet tiivistyvät ja osa niistä saadaan eroteltua pois. Leijupetipoltossa ilmvirran nopeus on niin kova, että osa petimateriaalista kulkeutuu savukaasujen mukana. Sen vuoksi savukaasut johdetaan ensin sykloniin, jolla petimateriaali saadaan eroteltua ja johdettua takaisin tulipesään. (Vesanto 2006.)

2.4 Kuonan koostumus

Pohjakuona muodostuu arinalle jäävästä palamattomasta materiaalista, arinan läpi pudonneesta tai sulaneesta materiaalista. Se on heterogeeninen materiaali, joka sisältää vaihtelevissa määrin lasia, kiveä ja metallia. Kuonan fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet riippuvat kuitenkin polttoaineen koostumuksesta ja laadusta sekä polttotekniikasta; lämpötilalla, ilman syötöllä, palamisnopeudella, kattiloiden kunnolla ja tuhkaan talteenottojärjestelmällä voidaan myös vaikuttaa tuhkan laatuun ja sen ominaisuuksiin. Poltto-olosuhteiden optimointi on myös yksinkertainen tapa vaikuttaa kuonan laatuun. Tästä vaihtelusta johtuen jätteenpolttolaitosten pohjatuhkille- ja kuonille on asetettu operatiiviset raja-arvot orgaanisen aineksen määrälle direktiivissä 2000/76/EC (Art. 6.1), jossa sen raja-arvot ovat hehkutushäviöllä (LOI) mitattuna 5 % tai orgaanisen hiilen kokonaismääränä (TOC) mitattuna 3 %. (Kaartinen, Laine-Ylijoki, Koivuhuhta, Korhonen, Luukkanen, Mörsky, Neitola, Punkkinen & Wahlström 2011.)



Kuvio 2. Kuonan sisältämien aineiden jakauma (mukailtu Nielsen 2010, Kaartisen ym. 2011 mukaan)

Kuona on harmaata tai ruskeaa soraan ja hiekkaan verrattavaa ainesta, josta 80-85 % on kuonaa eli kiviaineksia, keramiikkaa ja lasia (kuvio 2). Magneettisia metalleja on noin kymmenen prosenttia, ei-rautametalleja noin 3 % ja yhdestä kolmeen prosenttiin kuonasta on palamattomaa orgaanista ainesta. (Nielsen 2010, Kaartisen ym. 2011 mukaan.) Suurimpina pitoisuuksina pohjakuonassa esiintyvistä yhdisteistä on alumiinin ja piin oksidit, joiden lisäksi alkali- ja maa-alkalimetallien yhdisteitä, sulfaatteja, klorideita, palamattomaa orgaanista ainesta sekä raudan ja muiden metallien yhdisteitä sisältyy usein kuonaan. (Kaartinen ym. 2011.)

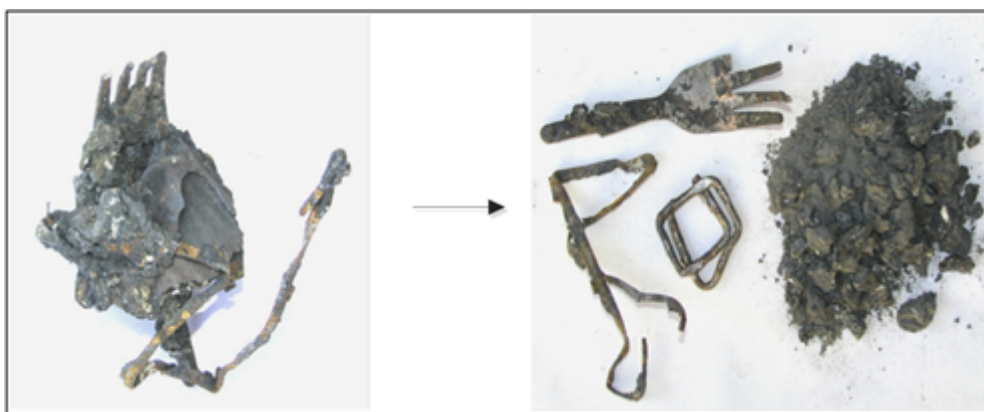
3 POHJAKUONAN KÄSITTELY

3.1 Käsittelyn vaiheet

Pohjakuonan käsittely muistuttaa monilta osin malmin käsittelyä. Pohjakuonasta erotellaan mekaanisesti metallit muusta massasta, jonka jälkeen metallikonsentraatti toimitetaan jatkojalostukseen. (Bunge 2017.)

Metallien erottamiseen mekaanisesti kuonan joukosta vaatii prosessissa toimenpiteitä, jotka ikään kuin suosivat metallikappaleita. Ehtona onkin siis löytää fyysinen ominaisuus, joka vaikuttaa metalliin enemmän kuin muuhun materiaaliin, eli sähkönjohtavuus, magneettisuus tai kappaleen tiheys. Toinen ehto tehokkaalle metallin erottelulle on se, että mineraali- ja metallikappaleet on saatu erotettua toisistaan. Jätteenpolton aikana kuona tarttuu metallikappaleisiin, ja osa metalleista saattaa olla kokonaan sulaneen kuonan sisällä (kuva 3). Koska erottelu on mahdollista vain kuonan jähmettymisen jälkeen, on oleellista saada metallit irti kuonasta, mikä saavutetaan esimerkiksi kuonan murskaamisella. Murskauksenkin jälkeen kuonan raekoko vaihtelee nollasta yli sataan milliin, eikä tehokkuuden saavuttamiseksi ole kannattavaa ajaa kuonaa suoraan erottimelle. Kuonaa seulomalla ensin muutamaaan raekokoon lisätään käsittelyn tehokkuutta huomattavasti. Käsittely voi daankin jakaa kolmeen vaiheeseen:

- murskaus metallikappaleiden vapauttamiseksi
- kuonan seulonta muutamaaan raekokoon erottelun tehostamiseksi
- erottelu metallikonsentraattiin ja mineraalijakeeseen. (Bunge 2017.)



Kuva 3. Vasemmalla murskaamaton kuonakappale ja oikealle se murskattuna ja eroteltuna (Bunge 2017)

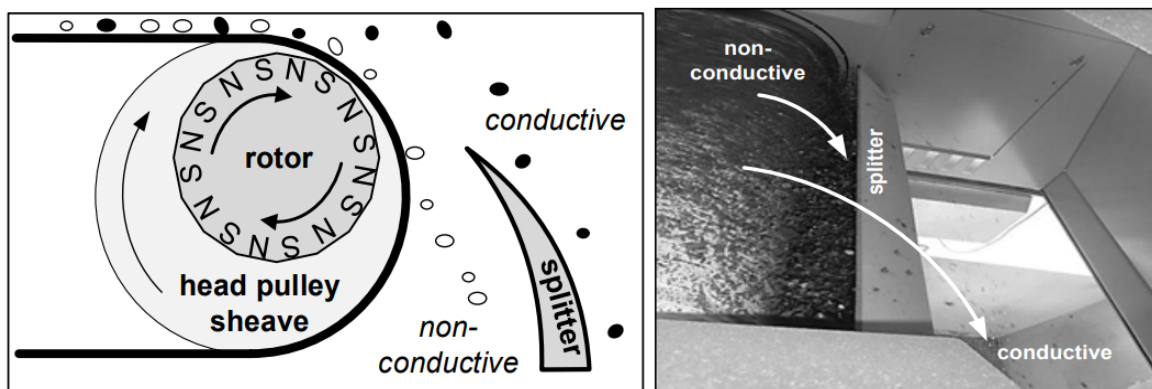
Kuonan ollessa melko haurasta ja huokoista materiaalia se murskatessa hajoaa pienirakeiseksi metallien säilyessä kokonaisina tai niiden hieman litistytessä. Jos kuonasta haluttaisiin saada vain murskainta käyttämällä mahdollisimman puhdasta metallikonsentraattia, voisi samaa kuonaa murskata useampaan kertaan, jotta mineraalijae murskautuisi hyvin pieneksi. Sen jälkeen 2 mm seulalla seulomalla hienontunut mineraalijae putoaisi seulasta läpi jättäen seulalle ehjänä säilyneet metallit. Vaikka tällä saataisiin metallit tehokkaasti erotettua kuonasta, menetettäisiin siinä huomattava määrä myös murskaantunutta metallia hienojakeen joukkoon. Varsinkin pehmeämpiä metalleja kuten kuparia ja alumiinia moninkertainen murskaaminen kuluttaisi ja hienontaisi voimakkaasti. Sen lisäksi se kuluttaisi myös itse murskaimia huomattavasti enemmän. Laboratoriossa tämä on kuitenkin toimiva tapa näytteiden metallipitoisuuden tutkimiseen. (Bunge 2017.)

3.2 Erottelutekniikat

Kuonan käsittelyssä käytetään monia erilaisia erottimia, joilla metalli on tarkoitus saada kuonasta erilleen. Yleisimpiä käytössä olevia erottimia ovat pyörrevirtaerottimet sekä erilaiset magneettierottimet. Edellisiä hieman harvemmin on käytössä myös sensoreihin perustuvia menetelmiä kuten kameroihin tai sähköä johtavien kappaleiden tunnistamiseen perustuvat erottimet. Luvussa esitettyihin esimerkkeihin eivät monet eri mahdollisuudet kuitenkaan rajoitu.

3.2.1 Pyörrevirtaerotin

Magneettisten metallien erottelun jälkeen kuonasta erotellaan ei-magneettiset metallit käyttäen pyörrevirtaerottimia (eddy current separator). Se koostuu kuljetinhihnasta, sitä pyörittävästä hihnapyörästä, jonka sisällä on erillään hihnaa nopeampaa vauhtia pyörivä roottori. Roottorin pinnalla on vierekkäin vahvoja eri napaisia magneetteja, jotka pyöriesään synnyttävät voimakkaan vaihtuvan magneettikentän. Tämä aiheuttaa sähköä johtavissa kappaleissa pyörrevirtoja, jotka vuorostaan saa aikaa kappaleissa oman vastakkaisen magneettikentän ja hylkivät näin roottoria. Nämä roottoria hylkivät kappaleet lentävät muuta materiaalia pidemmälle omaan astiaansa (kuva 4). Tuotetusta metallipitoisesta jakeesta käytetään nimitystä metallikonsentraatti tai nfe-jae (non-ferrous metals). Jäljelle jäävä toinen jae on mineraalijaetta, jota kutsutaan myös nimellä EC-drop.



Kuva 4. Pyörrevirtaerotin (Bunge 2017)

Pyörrevirtaerottimessa materiaaleista enemmän sähköä johtavat kappaleet synnyttävät suuremman repulsiovoiman ja siten lentävät pidemmälle. Gravitaatiovoima kuitenkin vetää kappaleita alaspäin ja lyhentää painavamman kappaleen lentomatkaa, jonka takia tiheyden ja sähköön johtavuuden suhde kertoo pelkkää sähköön johtavuutta paremmin kappaleen erottuvuudesta. Metallien erottuvuuspotentiaali kuvattu taulukossa 1. (Bunge 2017.)

Taulukko 1. Eri metallien erottumispotentiaali (mukailtu Bunge 2017)

Hyvä erottuvuus	Alumiini = magnesium
↓	Kupari = hopea
↓	Kulta = sinkki
↓	Messinki = tina = pronssi
↓	Lyijy
Huono erottuvuus	Ruostumaton teräs

3.2.1 Sensoreihin perustuvat erottimet

ISS-erotinta (induction sorting system) käytetään metallien erottamiseen muun materiaalin seasta. Se koostuu kuljetinhihnan loppupäässä olevasta rivistä sensoreita ja paineilmaa puhaltavista suuttimista. Kun hihnalla sähköä johtava kappale osuu sensorin kohdalle, sensori tunnistaa kappaleen ja aktivoi juuri oikeaan aikaan sen kohdalla olevan paineilmasuuttimen, joka puhalttaa kappaleen erilleen muusta materiaalista. (Syc, Simon, Biganzoli, Grosso & Hyks 2018.) Laitteen asetuksia voidaan säätää monipuolisesti syötettävän materiaalin ja halutun lopputuloksen mukaan ja se voidaan asettaa esimerkiksi erottamaan vain tietyt metallit muiden joukosta. Kappaleiden muoto ja epäsäännöllisyys vaikuttavat kappaleiden erottumiseen sensoreiden tunnistessa ne eri tavalla. (Mesina, de Jong & Dalmijn, 2007, Marttilan 2010 mukaan.)

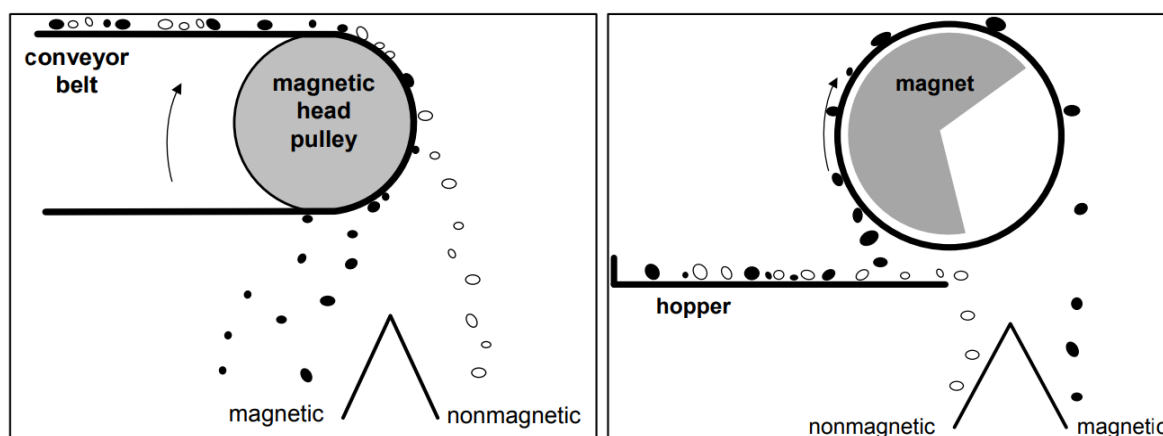
Muita sensoreilla toimivia tekniikoita on esimerkiksi röntgensäteiseen perustuva erottelija, jolla on mahdollista erottaa materiaaleja tiheyden mukaan, esimerkiksi painavampia metalleja kevyemmistä. Sen lisäksi röntgensensorierottelijaa on mahdollista käyttää samoin tavoin myös muillekin materiaaleille kuin metalleihin. (Steinert magnetic & sensor sorting solutions 2019.) Käytössä on myös optisia sensoreita, joiden kamerat voivat tunnistaa liukuhihnalla kulkevat materiaalit hyvin tarkasti kappaleen muodon tai värin perusteella (Sycym. 2018). Pohjakuonalle se ei kuitenkaan sovellu koska metallit ovat kontaminoituneita eikä metallin kirkasta tunnistettavaa pintaa ole näkyvissä (Marttila 2010). Nämä ovat harvemmin käytössä niiden monimutkaisuuden ja hintavuuden vuoksi (Bunge 2017).

3.2.2 Magneettierottimet

Magneettierottimia käytetään yleensä murskauksen jälkeen ennen seulomista ja ennen pyörrevirtaerottimia. Kuonan käsittelyssä käytetään kolmen tyyppistä erotinta: rumpumagneettia, head pulley -magneettia ja hihnamagneettia.

Rumpumagneetti

Rumpumagneettia käytetään muun muassa ennen pyörrevirtaerotinta. Erottimelle materiaalin siirtävässä kuljetinhihnan on toisen pään hihnapyörässä sisällä kiinteä magneetti, joka pitää magneettiset kappaleet kiinni hihnassa, kunnes ne putoavat omaa kasaansa. Kuvassa 5 oikealla on esitetty rumpumagneetti sijoitettuna kuljetushihnan yläpuolelle, mutta sen sijoittaminen kuljetushihnan pään alapuolelle on myös mahdollista. (Bunge 2017.)



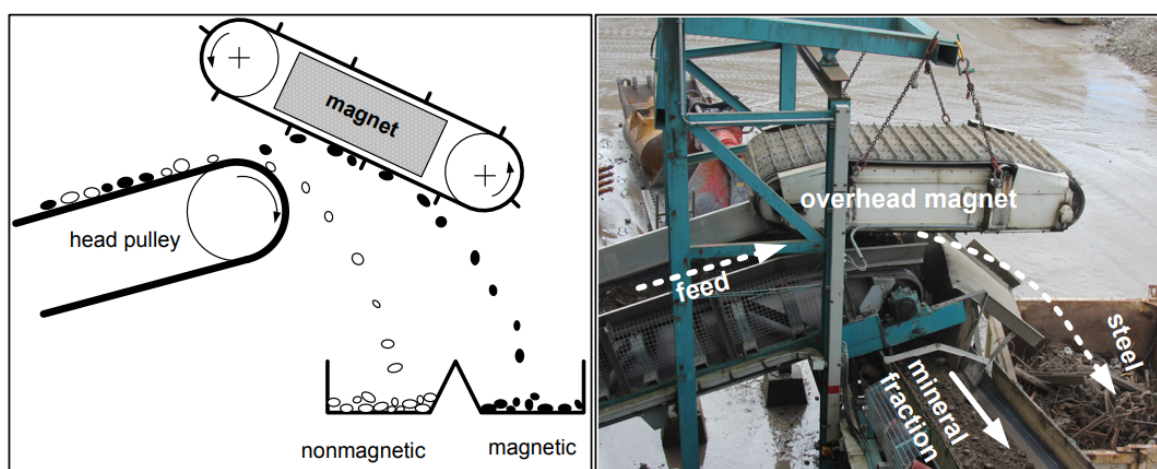
Kuva 5. Head pulley-magneetti vasemmalla ja oikealla rumpumagneetti (Bunge 2017)

Head pulley-magneetti

Head pulley-magneetissa kuljetinhihnan päässä perinteinen hihnapyörä on korvattu magneetin sisältävällä hihnapyörällä. Tällöin kuljetinhihnan päällä liikkuva magneettinen materiaali jää kiinni hihnapyörään ja ohjaa sen toiseen astiaan muun materiaalin liikkuesssa kuljettimen päästä luonnolliseen suuntaansa vasemmalla kuvassa 5 osoitetulla tavalla.

Hihnamagneetti

Hihnamagneetti on usein käytössä käsittelyprosessin alkuvaiheessa, vaikka myös myöhemmissä vaiheissa sellainen voidaan lisätä magneettisen aineksen poistamisen tehostamiseksi. Kuljetinhihnan yläpuolelle tai sen päähän roikkuvaksi sijoitettava hihnamagneetti koostuu kesto- tai sähkömagneetista, jonka ympärillä pyörii kuljetinhihna. Hihnan avulla magneetti puhdistaa itsensä mutta myös siirtää magneettisen materiaalin omaan kassansa kuvan 6 mukaisesti. (Bunge 2017.) Magneetti voidaan myös kuvasta poiketen sijoittaa poikittain kuljetinhihnaan nähden, jolloin magneettinen materiaali saadaan poistettua jo hihnalta ja loppu materiaali voidaan johtaa suoraan seuraavaan käsittelyvaiheeseen.



Kuva 6. Hihnamagneetti kuljetinhihnan päässä (Bunge 2017)

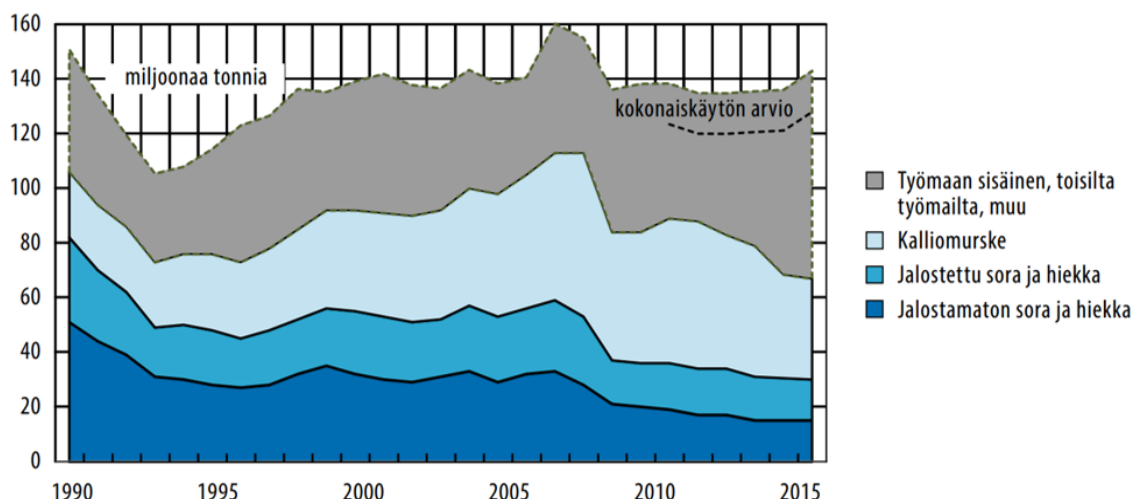
Magneettisten kappaleiden poistaminen kuonasta ennen pyörrevirtaerottimia on käsittelyn kannalta tärkeää, sillä voimakkaasti magneettiset kappaleet estävät niitä lähellä olevia sähköä johtavia partikkeleita synnyttämästä pyörrevirtoja ja vaikeuttavat näin niiden erotumista pyörrevirtaerottimessa. Sen lisäksi hätäpysäytyksen sattuessa pyörrevirtaerottimen kuljetinhihna pysähtyy välittömästi, mutta sisällä oleva magneettinen roottori pysäh-

tyy hitaasti vasta minuuttien päästä. Magneettiset metallit tarttuvat kiinni magneettiin, jolloin niihin kohdistuvat pyörrevirrat synnyttävät lämpöä ja voivat kuumeta niin kuumaksi, että kuljetinhihna voi jopa sulaa. (Bunge 2017.)

4 KUONAN HYÖTYKÄYTTÖ

4.1 Kiviaineksen käyttö maanrakennuksessa

Kiviaineksen käyttö yhdyskunnan rakentamisessa ja sen ylläpidossa on välttämätöntä, sillä muun muassa väylien ja rakennusten pohjatöihin ja perustamiseen sekä erilaisten maanrakenteiden ja niiden muokkaamiseen tarvitaan hiekkaa, soraa ja kalliomursketta. Kiviaineksia louhitaan ja kaivetaan Suomessa vuosittain yhteensä noin 200 miljoonaa tonnia, josta maa-ainesten ottoalueilta kaivetun neitseellisen kiviaineksen määrä on noin 70 miljoonaa tonnia. Sen määrä on kuitenkin pienentynyt vuodesta 2008, kokonaiskäytön kuitenkin pysyessä suurin piirtein samana (kuvio 3). Tämä selittyy osittain vuonna 2008 tapahtuneen talouden laskusta mutta myös suoraan työmailta sisäisesti saatavilla tai toiselta työmaalta siirretyltä kiviainekselta. Koska rakennuspaikoilla kiviaineksen louhimiseen ja kaivamiseen ei tarvita maa-aineslain edellyttämää ottolupaa, se ei näy kiviaineksenotto-tilastoissa. (Huhtinen, Palolahti, Räisänen & Torppa 2018.)



Kuvio 3. Kiviaineksen käytön määrä Suomessa vuosina 1990 - 2016. Käytön määrään liittyvä epävarmuus on merkitty katkoviivalla (Huhtinen ym. 2018)

Neitseellisten kiviainesten ollessa uusiutumaton luonnonvara, tulisi sen käyttöä vähentää. Se on kuitenkin haasteellista, sillä esimerkiksi betonin valmistuksessa käytettävää harkitusoraa on hankala korvata muilla aineksilla (Huhtinen ym. 2018). Korvaavia uusiomateriaaleja kuitenkin kehitetään kiviainesten tilalle osana kiertotalouden tavoitteita, joista yksi on jätteenpoltosta tulevan pohjakuonan hyödyntäminen.

Jalostamalla talteen saatavien metallien ja niiden uusiokäytön lisäksi siitä saadaan myös hyötykäyttöön sopivia mineraalijakeita. Maanrakennusmateriaalina pohjakuona on lähtö-

kohtaisesti hyvä materiaali. Se on ominaisuuksiltaan samankaltaista kuin luonnonkiviainekset eikä rakentaminen merkittävästi poikkea niihin verrattuna. Sillä on tiettyjä työn aikana rakentamisessa huomioon otettavia luonnonkiviaineksesta poikkeavia ominaisuuksia mutta myös erityisominaisuuksia, jotka tukevat sen monipuolisuutta. Esimerkiksi vesipitoisuuden huomioiminen on tärkeää, sillä liian kuiva tai märkä kuona ei tiivisty suunnitellulla tavalla. Tästä johtuen se ei voi myöskään sijaita kosketuksissa pinta- tai pohjavesiin eikä rakentamista voida tehdä kovalla sateella (Räsänen 2018). Tyypillisiä maanrakentamisen sovelluksia, joissa pohjakuonaa on mahdollista käyttää, on maanrakenteiden alusrakenteet ja alustäytöt. Päällysrakenteissa sitä voidaan käyttää jakavaan tai suodatinkerrokseen kevyen liikenteen väylissä ja ulkoiluteissa, pysäköintialueissa, urheilukentissä ja varastokentillä. Näiden lisäksi erilaiset ympäristörakenteet kuten maisemointitäytöt, tukimuurien taustatyöt ja meluvallit on teknisesti mahdollista rakentaa kuonaa hyödyntäen. (Kaartinen ym. 2011.)

Vaikka pohjakuonan ominaisuudet ovatkin paljon samanlaisia kuin luonnonkivellä, haasteena on luonnonkiviaineksille suunniteltujen tutkimusmenetelmien soveltuvuus kuonalle. Menetelmät on luotu kiviaineksille ja kuonan ollessa huokoisempaa materiaalia se käytätty muun muassa routivuuskokeessa eri tavalla kuin luonnonkiviainekset, ja aiheuttavat epävarmuutta tuloksiin. Myöskään pesuseulonnan soveltuvuus kuonalle ei ole yksinkertaista kuonan haurauden ja murenevyyden vuoksi. Pesuseulonnessa standardin SFS-EN 933-1 mukaan näytettä liotetaan ja sekoitetaan vedessä hienoaineksen irrottamiseksi, jonka jälkeen näyte kaadetaan 0,063 mm seulalle. Näytettä huuhdotaan seulalla, kunnes läpi tuleva vesi on kirkasta. Kun pesun aikana näytettä sekoitetaan ja käännellään, kuonan hauraan koostumuksen vuoksi kuonapartikkeleista irtoaa pestäessä hieman hienojakoista pölyä eikä siksi pesuvesi muutu täysin kirkkaaksi pitkänkään huuhton jälkeen. Pitkä huuhdonta on voinut kuitenkin irrottaa hienojaetta vaikuttaen näytteen rakeisuuteen.

4.2 Tekniset ominaisuudet

Väyliä tai muiden kenttäalueiden rakenteet koostuu rakennekerroksista, jotka voidaan jakaa alus- ja päällyskerroksiin. Päällysrakenne koostuu rakennekerroksista, jotka vastaanottaa sen päälle aiheutuvan kuorman jakaen sen tasaisesti jokaiselle kerrokselle ja mahdollisimman laajalle alueelle aluskerrokseen ja toimii myös rakenteena routanousuja vastaan. (Lätti 2016.) Rakenteet on rakennettava siten, ettei kerrokset ei pääse sekaantumaan keskenään. Routivan alusrakenteen sekoittuessa ylempiin kerroksiin se tekee myös muista kerroksista routivia. (Ehrola 1996.) Huolellisella suunnittelulla ja oikeiden materiaalien valinnalla voidaan estää routimisesta aiheutavaa maanpinnan pystysuuntaista nousua ja siitä johtuvia ongelmia kuten maanpinnan halkeilua ja

epätasaisuutta sekä sulamispehmeyttä. Sen lisäksi samalla myös tienrakenteen kestävyyttä voidaan parantaa.

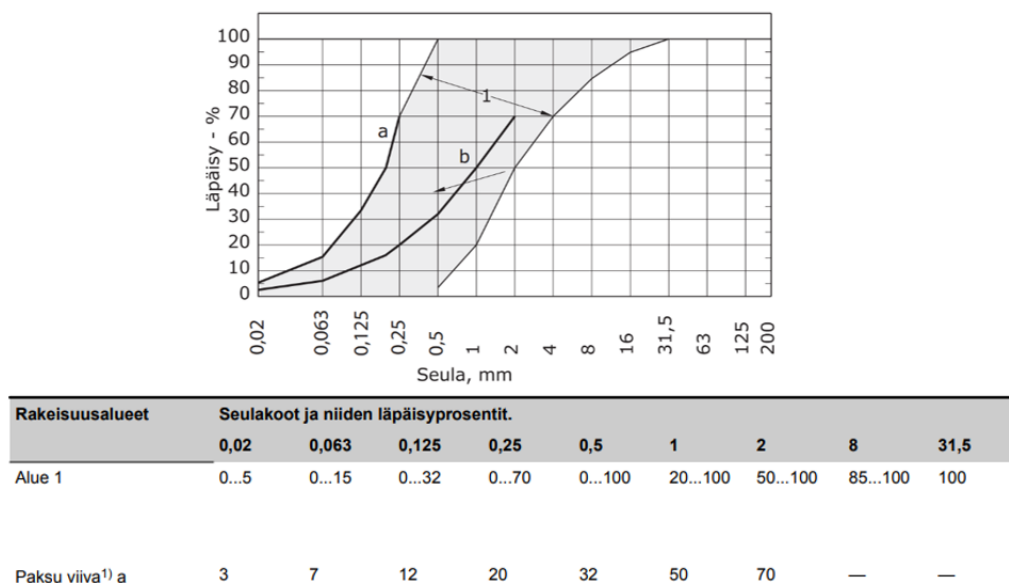
4.2.1 Rakennekerrokset ja rakeisuusvaatimukset

Ylin päällysrakenteen kerroksista on kulutuskerros, jonka tehtävän on muodostaa huonosti vettä läpäisevä kerros minimoimaan veden pääsyä tierakenteeseen ja sen myötä parantamaan sen kestävyyttä. Kulutuskerros jäykimpänä kerroksena vastaanottaa kovimman kulutuksen ja tien käyttäjien aiheuttaman voiman, ja siten sen täytyy olla myös tien käyttäjälle turvallinen ja käyttäjäystävällinen. (Lätti 2016.)

Kantava kerros on kulutuskerroksen alla oleva jäykkä ja kantava alusta, joka tukee kulutuskerrosta ja jakaa sille kohdistuvat voimat tasaisemmin. Samoja ominaisuuksia on seuraavana olevassa jakavassa kerroksessa, joka tehtävältään muistuttaa kantavaa kerrosta. Kantavan kerroksen tapaan se jakaa rakenteeseen kohdistuvan voiman tasaisemmin koko rakenteeseen vaimentaen alapuolisille kerroksille kohdistuvia rasitteita ja antaa lujan pohjan päällysteelle. Molemmat kerrokset läpäisevät vettä ja toimivat näin routimattomina materiaaleina, jotka yleensä rakennetaan käyttäen luonnonsoraa tai kalliomursketta. (Ehrola 1996.)

Suodatinkerros on alin rakennekerroksista ennen pohjamaata. Se pitää pohjamaan ja jakavan kerroksen omina kerroksinaan ja estää niiden sekottumista toisiinsa.

Suodatinkerros on vettä läpäisevää ja toimii siten kuivattavana rakenteena ja estää myös kapilaarisen veden nousua ylöspäin rakenteissa. Sen rakentamisessa käytetään yleensä luonnonkiviaineksia tai vaihtoehtoisesti suodatinkangasta. (Ehrola 1996.) Kuviossa 4 on kuvattu suodatinkerroksen hiekan rakeisuusvaatimukset.



Kuvio 4. Suodatinkerroksen hiekan rakeisuuskäyrän ohjealue sekä sen raja-arvot. Rakeisuuskäyrä ei saa ylittää viivaa b nuolen osoittamassa suunnassa (InfraRyl 2018)

Pohjakuonan käyttö rakennekerroksissa on mahdollista ympäristöluvalla tai MARA-asetuksen (VNa 843/2017) mukaisten ehtojen käyttöä rekisteröinti-ilmoituksella.

Pohjakuonaa on periaatteessa mahdollista käyttää kaikissa rakennekerroksissa, mutta parhaiten se ominaisuuksiltaan soveltuu jakavaan ja suodatinkerrokseen.

Rakeisuusvaatimusten täyttämiseksi esimerkiksi jakavaan kerrokseen MARA-asetuksen mukaisesti pohjakuona vaatii yleensä esikäsittelyä sekä eri raekokojen suhteuttamista sopivan jakeen tuottamiseksi tai vaihtoehtoisesti ympäristöluvan. InfraRyl 2018/1 mukaan uusiomateriaaleja käytettäessä niiden on teknisiltä ominaisuuksiltaan ja maanrakennuskelpoiseltaan oltava tasalaatuisia ja niiden on sovellettava suunniteltuun kohteeseen. Kuormitetuissa rakenteissa materiaalin pitkäaikaiskestävyys on osoitettava toteutetuilla kohteilla ja siihen liittyviä riskejä on pienennettävä ennen käyttöä laboratorio- ja kenttäkokeilla.

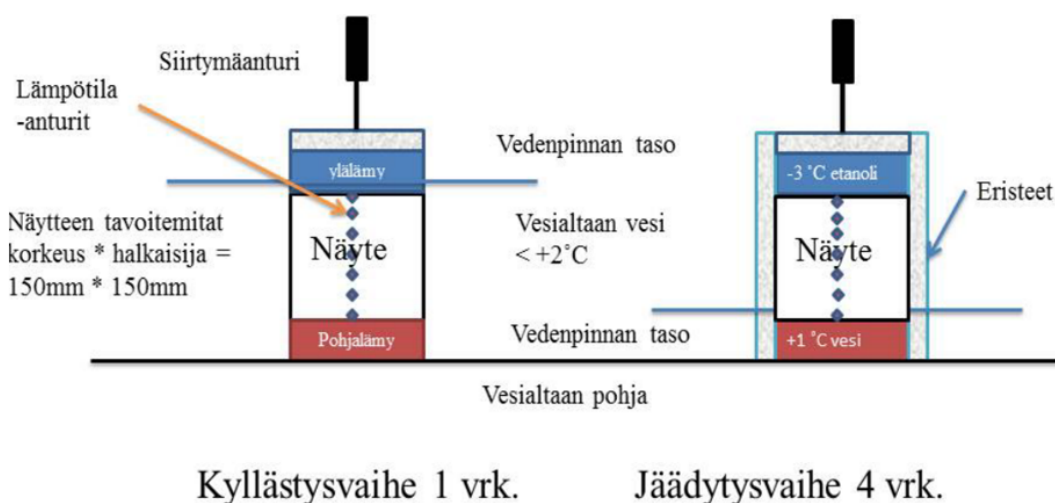
4.2.2 Routanousukoe

Routaantumiseksi kutsutaan tilannetta, kun ilman lämpötilan laskiessa nollan alapuolelle ja maan ollessa ilmaa lämpöisempi, maasta ilmaan kulkeutuva lämpöenergian määrä kasvaa ja aiheuttaa maassa olevan huokosveden jäätymistä kovettaen maata. Pakkasmäärä on keskilämpötilojen summa pakkasjakson aikana, millä on suurin vaikutus roudan syvyyteen. (Ehrola 1996.) Routaantumiseen vaikuttaa kuitenkin myös maalaji, lumenpaksuus tai kasvipeite sekä maan kosteus. Kaikilla maalajeilla tapahtuu routaantumista mutta vain osa niistä routii, joka tarkoittaa routaantumista johtuvaa maassa olevan veden jäätymistä ja

sen aiheuttamaa maanpinnan pystysuuntaista nousua. Routiminen vaatii kolme tekijää: vettä, pakkasta ja routivan materiaalin. (Penttilä 2012.)

Routiintumista on pyrittävä estämään oikeanlaisella rakenteiden suunnitellulla ja materiaaleilla. Tällöin materiaalin täytyy olla routimatonta eli hyvin vettä läpäisevää vähintään routarajaan asti, jottei vesi pääse rakenteessa jäätymään. Muutoin rakenteessa jäätyvän veden tilavuus kasvaa ja aiheuttaa maanpinnan nousua, josta voi aiheutua kulutuskerroksen halkeilua ja epätasaisuutta tai sulamispehmyyttä.

Routanousukokeella tutkitaan maa-aineksen routimista jäljittelemällä luonnollista routaantumista laboratoriossa. Kokeelle ei ole standardisoitua menetelmää ja siitä johtuen myös koetulosten vertailu on haastavaa. Kuvassa 7 on kuvattu esimerkkinä yksi mahdollinen tapa suorittaa routanousukoe mutta myös muita menetelmiä käytetään. Koekappale ensin kyllästetään vedellä ja sitten suoritetaan jäädytysvaihe. Näytekappaleen alareuna on vedenpinnan alapuolella jatkuvan veden saannin varmistamiseksi. Näytteen alapää pidetään +1 asteisena, ja yläpäästä näytettä jäädytetään -3 asteisella jäähdytysnesteellä. Näytteen sivut on eristetty. Näytekappaleeseen asetetaan lämpötila-antureita pystysuunnassa 25 mm välein mittaamaan lämpötilan muuttumista kappaleessa. Jäädytysvaiheessa tietokone mittaa ja tallentaa mitatut lämpötilat muutaman minuutin välein neljän vuorokauden ajan. Kappaleen yläpuolelle sijoitettu siirtymäanturi kuvaa routanousun korkeutta. Kokeen jälkeen ennen näytekappaleen sulamista se jaetaan kolmeen osaan, jossa alin osa kappaleesta on yleensä sula, ja keskimäinen ja ylin osa ovat jäätyneet. Näiden osien vesipitoisuudet tutkimalla saadaan selville veden jakautuminen routakokeen aikana näytekappaleeseen. (Penttilä 2012.)



Kuva 7. Esimerkki routanousukoemenetelmästä (Penttilä 2012)

4.2.3 Syklinen ja staattinen kolmiaksaalikoe

Kolmiaksaalikokeella voidaan määrittää laboratorio-olosuhteissa maa aineksen jäykkyyssominaisuuksia ja kantavuutta. Syklisessä kolmiaksaalikokeessa sylinterin muotoista näytettä kuormitetaan pulssimaisella jännityksellä, jossa näytteen keskiosan yläpuolelta mitataan laitteiston tekemien pulssien vaikutusta siirtymämittareilla aksiaalista kuormitusta kohtisuoraan sekä sen suuntaisesti. Kokeessa näyte on sijoitettuna selliin, jossa se on paineistettuna todellista rakennetta vastaavassa paineessa. (Ehrola 1996.)

Palautuvia muutoksia tutkittaessa näytteeseen kohdistetaan 0,1 s pituisia kuormituspulsseja 0,9 s välein, jonka aikana kappaleen annetaan palautua. Menetelmä kuvaa melko hyvin liikenteen aiheuttamaa kuormitusta. Kuormituspulsseja suoritetaan normaalisti 100, jolloin kappale oletetaan kimmoisaksi ja sille voidaan määrittää resilient-moduulin arvo. Pysyviä muodonmuutoksia tutkittaessa suoritetaan pitkä kuormitussarja todellisia olosuhteita vastaavia pulsseja yhdellä jännitystasolla, mistä siten voidaan määrittää palautumattomien muutosten määrä halutulla liikennekuormitusmäärällä. (Ehrola 1996.)

Staattisessa kolmiaksaalikokeessa näytteeseen kohdistetaan tasaisesti ja hitaasti kasvava jännitys pulssien sijaan. Syklisen kolmiaksaalikokeen on todettu toimivan paremmin vastaamaan hitaasti liikkuvan pyöräkuorman aiheuttamaa kuormitusta staattiseen kokeeseen verrattuna. (Sweere 1990, Lätin 2016 mukaan.)

5 VAIHTOEHTOINEN PROSESSOINTIMENETELMÄ

5.1 Testattavat jakeet

Opinnäytetyöhön sisältyvien kokeiden materiaalit olivat samasta kuonasta, mutta testeihin tuotettiin neljä eri jaetta, jotka on kuvattu taulukossa 2. Kaikille testijakeille tehtiin samat toimenpiteet, mutta yhdelle neljästä testijakeesta toimenpiteet suoritettiin hieman eri järjestyksessä. Testin 3 jae seulottiin jo ennen metallien liberointia eikä enää sen jälkeen, kun taas muissa kolmessa testissä jakeet seulottiin vain liberoinnin jälkeen. Testeistä 2 ja 4 pois seulotut jakeet ajettiin myös pyörrevirtaerottimen läpi, jotta saatiin kokeiltua myös niiden kohdalla metallien erottumista, mutta näitä jakeita ei tarkemmin tässä työssä analysoida.

Taulukko 2. Testattavat jakeet

Testi nro	Jae ja käsittely
Testi 1	Jae A vaihtoehtoiseen käsittelyyn, muutoin normaali käsittely.
Testi 2	Jae B vaihtoehtoiseen käsittelyyn, muutoin normaali käsittely.
Testi 3	Muutoin samat toimenpiteet kuin testissä 2, mutta jae seulottu ensin.
Testi 4	Jae D vaihtoehtoiseen käsittelyyn, muutoin normaali käsittely.



Kuva 8. Kuonankäsittelylaitos Hausjärven teollisuusjätekeskuksessa

5.2 Testattavien jakeiden tuottaminen

Testijakeet tuotettiin Hausjärven teollisuusjätekeskuksessa (kuva 8). Tuotettavat materiaalit olivat jae A, jae B ja jae D. Testin 3 testijae eli jae C seulottiin myöhemmin jakeesta B. Kokeisiin varattua raakakuonaa oli kokonaisuudessaan 40 tonnia, josta puolet käytettiin jae D jakeen tuottamiseen, ja lopusta 20 tonnista tuotettiin loput kolme jaetta. Kuonaa säilytettiin hallissa sateelta suojassa, kunnes kuonasta alettiin tuottaa testijakeita.

Raakakuonasta tuotettiin jae D referenssinäytettä varten, eli siitä poistettiin suurimmat kappaleet sekä magneettiset metallit hihnamagneetilla. Ennen ajoa laitos putsattiin koeajoa varten ja laitoksen pyörrevirtaerottimet kytkettiin pois päältä kaikilta kolmelta linjalta. Raakakuonaa ajettiin 20 t, josta tuotettiin jae A, jae F ja jae G. Jakeet punnittiin erikseen, jonka jälkeen ne sekoitettiin yhdeksi jakeeksi ja siirrettiin halliin säilöön. Haluttua jaetta D syntyi 15,66 t. Loput syötetystä kuonasta tuottamisessa syntynyttä ylitettä, magneettista jaetta ja hävikkiä.

Kasan sekoittamisen jälkeen pyöräkuormaaja levitti kauhallisen kuonaa maahan matoksi näytteenottoa varten. Maahan levitetty materiaali jaettiin neljään osaan, jonka kaksi vastakkaisista kulmaa valittiin näytteeksi (kuva 9). Tavoitteena oli ottaa edustava sekä massaltaan vähintään 150 kg näyte. Toteutuneen näytteen kokonaispaino oli 209 kg.



Kuva 9. Näytteenotto jakeesta D

Jakeita A ja B varten suoritettiin kaksi ajoa, joista ensimmäisessä tuotettiin jae A. Ajon aikana ohessa tuotetuista jakeista (jae F ja jae G) otettiin näytteet materiaalien suhteistusta varten. F2 ja G2 -jakeet otettiin kokonaan talteen laboratorioon punnitusta varten, koska näytteitä oli vain noin 40-50 kg ja niiden punnitus paikan päällä pyöräkuormaajan kauhassa tai autovaa'alla olisi ollut liian epätarkkaa.

F1 ja G1 jakeista otettiin pistonäytteet suoraan kuljetinhihnan alta. Tavoitteena oli ottaa noin 30 l näytettä, joka olisi edustava määrä mutta olisi käsiteltävissä laboratoriossa. Näytteenotto toteutettiin asettamalla jätesäkki kuljetushihnan päälle hetken ajaksi, jotta kaikki hihnalta tuleva materiaali saatiin säkkiin. Saatu materiaali siirrettiin sen jälkeen 10 l ämpäreihin.

Toisessa ajossa tuotettiin jae B kytkemällä pyörrevirtaerottimet pois päältä jakeiden A ja F linjoilta. Jakeet sekoitettiin yhdeksi jakeeksi ja siirrettiin halliin odottamaan suursäkkeihin säkittämistä.

Testin 3 jae eli jae C tuotettiin seulomalla jaetta B. Jaetta oli tarkoitus seuloa siten, että saataisiin suursäkillinen ylitettä. Seulonta suoritettiin kaatamalla siirtolavalla olleesta jakeesta B pyöräkoneen kauhaan silmämääräisesti arvioiden seulontaan riittävä määrä, josta se kaadettiin seulalle. Seulonnan alite ja ylite kerättiin kummatkin suoraan kuljetinhihnan alta suursäkkiin.

5.3 Testijakeiden käsittely

Metallien liberointi aloitettiin jakeesta D sitä ollessa eniten, kun tavoitteena oli saada myös tutkittua massataseita. Koetta kerettiin ajamaan noin vartin verran, kunnes kuljettimeen tulleen häiriön vuoksi testit jouduttiin keskeyttämään. Tästä johtuen myös massojen määrät eivät olleet enää tarkasti tiedossa.

Liberointia jatkettiin jakeella D. Siirtolavalla säilytettyä kuonaa kipattiin kauhakuormaajan kauhaan, joka siirsi kuonan käsittelyyn johtavalle kuljetushihnalle. Näyte käsittelystä kuonasta otettiin pistonäytteenä kuljettimen alta suoraan pyöräkuormaajan kauhaan. Materiaalin annettiin aluksi hetken virrata kuljettimesta ja materiaalivirran tasaantua ennen kuin kauha ajettiin alle. Näytettä kerättiin vajaa kauhallinen, arviolta noin 1-2 tonnia.

Pyöräkuormaajan kauhaan kerätyt näytteet kaadettiin kauhasta suoraan seulalle (kuva 10), jotta materiaalista saatiin alite erotettua. Seulotut näytteet kerättiin suoraan kuljetinhihnan päästä suursäkkeihin, jonka aikana samalla myös otettiin alitteesta pistonäyte suoraan 10 l ämpäriin.



Kuva 10. Liberoidun kuonan seulomista

5.4 Käsiteltyjen jakeiden metallin erottelu

Metallien erottelu suoritettiin ajamalla jakeiden ylitteet pyörrevirtaerottimen läpi. Suursäkissä oleva näyte punnittiin punnitsevalla pumppukärryllä, minkä jälkeen se nostettiin kurottajalla pyörrevirtaerottimen yläpuolelle. Suursäkin pohjaan tehtiin reikä, josta kuona valutettiin tasaisesti kevyenä virtana erottimen kuljetinhihnalle. Tuotetut jakeet kerättiin erottimelta suursäkkeihin (kuva 11).



Kuva 11. Testinäytteiden ajamista pyörrevirtaerottimen läpi

Näytteet jäännösmetallianalyysiä varten otettiin kokoomanäytteenä pistonäytteistä vaihtamalla kuljetinhihnan suuntaa ja keräämällä kuona kuljetinhihnan päästä isoon jätesäkkiin (kuva 12). Pistonäytteitä otettiin ajon aikana muutaman kerran edustavuuden parantamiseksi.



Kuva 12. Liberoidun kuonan ajamista pyörrevirtaerottimien läpi. Näytteenottoaikka merkitty punaisella.

5.5 Näytteiden käsittely ja analyysit

Laboratorioon toimitetuista näytteistä otettiin testinäytteet vuorokauden sisällä näytteen saapumisesta. Testinäytteet otettiin käyttäen näytteenjakajaa (kuva 13), jolla saadaan jaettua jakajaan kaadettu määrä aina puoliksi ja siten myös otettua riittävällä jakomäärällä sopivan kokoinen mutta edustava testinäyte. Laboratoriossa näytteille tehtiin jäännösmetallianalyysi ja määritettiin vesipitoisuus, sekä rakeisuus pesuseulonnalla.

Näytteiden jäännösmetallit tutkittiin Alankomaiden teknisen järjestelyn (NTA) jätevoimaloiden pohjatuhkia koskevan komitean (8191) antamaan jäteyritysten yhdistyksen määräykseen 2014-05 perustuvalla menetelmällä, joka on tarkoitettu jätteenpolton pohjakuonan sisältämän metallipitoisuuden määrittämiseen. Se sisältää ohjeet kokoomanäytteenottoon sekä siitä otettavan testinäytteenottoon edustavin näytteenotto- ja jakomenetelmin.



Kuva 13. Testinäytteenottoa näytteenjakajalla

Testeihin käytetystä raakakuonasta seulotusta jakeesta D otettiin näyte metallipitoisuuden määrittystä varten aiemmin luvussa 5.2. kuvatulla tavalla. Laboratoriossa näyte seulottiin jakeisiin 0-0,5 mm, 0,5-2 mm, 2-5,6 mm, 5,6-12,5 mm, 12,5-20 mm ja >20 mm (kuva 14) standardin SFS-EN 933-2 mukaisilla seulaverkoilla. Jakeista kaksi suurinta eli 12,5-20 mm ja >20 mm jae tutkittiin itse omassa laboratoriossa mutta pienemmät lähetettiin ulkopuoliselle toimijalle tutkittavaksi. Tavoitteena oli määrittää kuonan määrä alkuperäisessä jakeessa, jota voitaisiin sitten verrata murskattuihin jakeiden tuloksiin.



Kuva 14. Jakeesta D seulotut jakeet referenssinäytettä varten. Raekoot vasemmalta oikealle ylhäältä alas: <0,5 mm, 0,5-2 mm, 2-5,6 mm, 5,6-12,5 mm, 12,5-20 mm ja >20 mm

Ennen seulontaa näyte kuivattiin 105 °C:n lämpökaapissa kuivapainon punnitsemiseksi. Myös seulonta edellyttää kuivan näytteen, muuten seulaverkot tukkiutuisivat kosteasta näytteestä. Näytteen massa ennen kuivausta oli 209 kg. Näytteen kuivuttua se punnittiin, ja sitä seulottiin noin pari kiloa kerrallaan, jottei yksittäisillä seuloilla olisi liikaa materiaalia ja näin estäisi eri raekokojen erottumista.

6 TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI

6.1 Tuotettujen massojen jakauma

Testin eri jakeita varten kuonaa ajettiin käsittelylaitoksen läpi kolmessa erässä. Referenssinäytettä ja testiä 4 varten raakakuonaa ajettiin noin 20 t, josta jaetta D saatiin tuotettua 15,7 t. Tuottamisessa syntyneitä ylitteitä ja magneettista jaetta ei tuottamisen yhteydessä punnittu. Taulukkoon 3 on lisätty nykyisen toteuman massajakauma, joka poikkeaa testijakeista varsinkin jakeen F ja jakeen G kohdalla.

Taulukko 3. Jaetta D varten tuotettujen jakeiden määrä ja niiden osuudet syötetystä 20 t massasta

Jae	Massa	m-%
Jae A	8,46	54,0 %
Jae F	4,61	29,4 %
Jae G	2,59	16,5 %
Summa	15,66 t	100,0 %

Testin 1 jaetta A tuottaessa syötteenä käytettiin 4100 kg raakakuonaa. Taulukossa 4 on esitetty ajossa syntyneet jakeet. Tuotettujen jakeiden F ja G osuudet poikkeavat verrattuna nykyiseen toteumaan. Testin 1 ajossa jaetta F on reilusti jaetta G enemmän, kun nykyisessä toteumassa niitä on lähes yhtä paljon. Edempänä luvussa 6.3. metallisaantoja laskiessa käytetään kuitenkin tämän jakauman tuloksia. Jaetta B tuotettaessa punnittiin vain tuotetut jakeet A ja F, joten jakaumaa tästä ajosta ei ole saatavilla.

Taulukko 4. Testin 1 jakeen A tuottamisessa syntyneet jakeet sekä nykyisen toteuman mukainen jakauma. Tähdellä (*) merkityt osuudet laskettu kyseisen jakeen massasta

Jae	Kg	Osuus syöt- teestä	Osuus jakeesta D	Nykyinen toteuma
Syötetty massa	4100	100 %		
Fe	180	4,4 %		
Jae A	1740	42,4 %	54,2 %	54,3 %
Jae F	850	20,7 %	26,5 %	22,4 %
Jae F1	800	94,1 %*		
Jae F2	50,4	5,9 %*		
Jae G	617	15,0 %	19,2 %	23,3 %
Jae G1	580	94,0 %*		
Jae G2	37,0	6,0 %*		
Jae H	260	6,3 %		
Jae I	50	1,2 %		

Testijakeiden seulonnan alitteiden ja ylitteiden jakaumat on taulukossa 5. Testin 1,2 ja 4 jakeille on suoritettu metallien liberointi ja sen jälkeen jae on seulottu, josta on saatu taulukossa esitetty alite ja ylite. Testin 3 jae on puolestaan ennen liberointia seulottu, josta on saatu taulukossa esitetty alite. Toisin sanoen testin 3 jakeen alite on käytännössä käsittelemätöntä jaetta. Sen ylitteelle on suoritettu liberointi, jonka jälkeen jaetta ei ole enää seulottu.

Taulukko 5. Seulottujen testijakeiden alitteiden ja ylitteiden jakauma

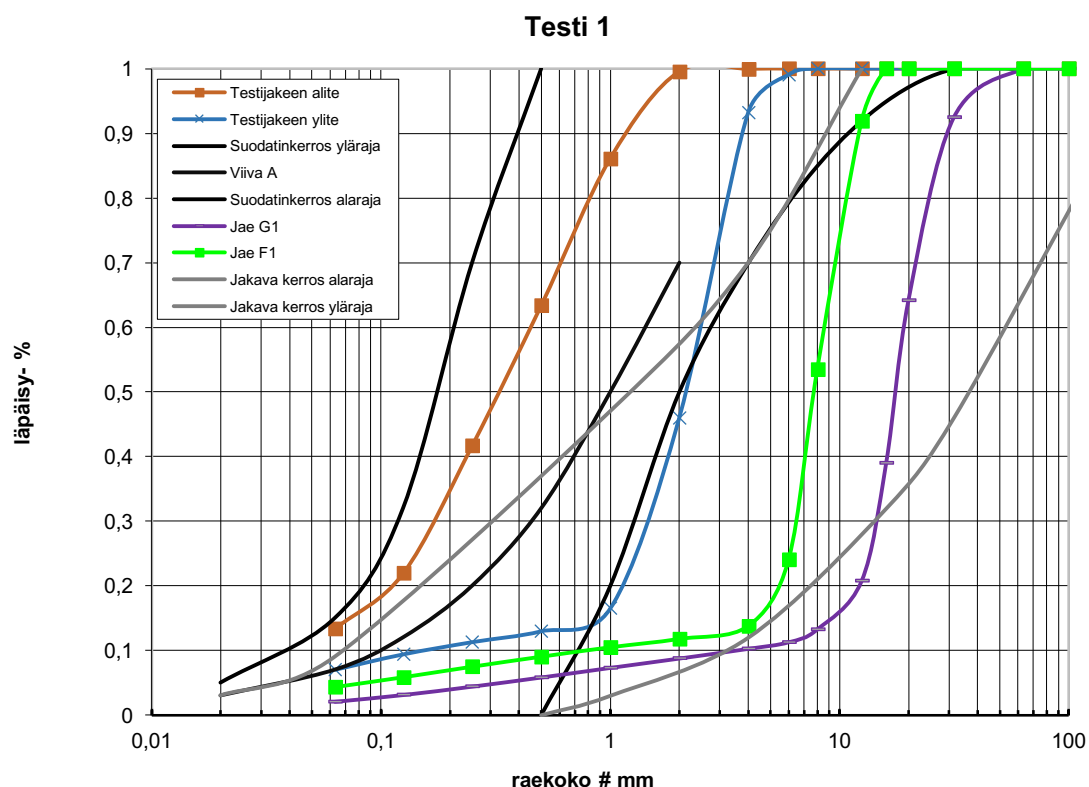
	Testi 1		Testi 2		Testi 3		Testi 4	
Alite	726 kg	78,4 %	877 kg	67,5 %	806,5 kg	56,4 %	1046,5 kg	64,6 %
Ylite	200 kg	21,6 %	422 kg	32,5 %	623 kg	43,6 %	574,1 kg	35,4 %

6.2 Rakeisuudet

Testien rakeisuudet tutkittiin pesuseulonnoin. Tuloksissa on esitetty erikseen jokainen testiin kuulunut jae sekä niistä rakennekerroksiin suhteutetut jakeet. Rakeisuustaulukoihin on lisätty suodatinkerroksen ja jakavan kerroksen soran ohjealueet havainnollistamaan tuloksia.

6.2.1 Testi 1

Testissä 1 testijakeena käytettiin jaetta A. Kuviossa 5 on kuvattu rakeisuudet liberoidun ja seulotun testijakeen alitteesta ja ylitteestä, sekä liberoimattomista jakeista F1 ja G1. Kaikki jakeet on esitetty pesuseulonnin tuloksilla ja taustalle on lisätty suodatinkerroksen ja jakavan kerroksen soran rakeisuusvaatimusten ohjealueet.



Kuvio 5. Jakeen A ylitteen ja alitteen sekä jakeiden F1 ja G1 pesuseulonnat. Kuvioon lisätty myös suodatinkerroksen ja jakavan kerroksen ohjealueen rajat

Taulukossa 6 on esitetty testissä tuotetut jakeet ja niiden osuudet jakeesta D sekä suhteutettuna jakavan kerroksen soran ja murskeen rakeisuusvaatimuksiin. Jakeista suhteutettiin mahdollisia jakavan kerroksen sekä suodatinkerroksen materiaaleja käyttäen pesu-

seulonnan tuloksia. Jakeista alitetta muodostuu käsittelyn aikana suurin osuus, mikä selaisenaan sijoitettuna sopii suodatinkerroksen ohjealueelle pesuseulonnan tuloksilla vaikkakin hienojakeen määrä on lähellä ylärajaa (kuvio 6).

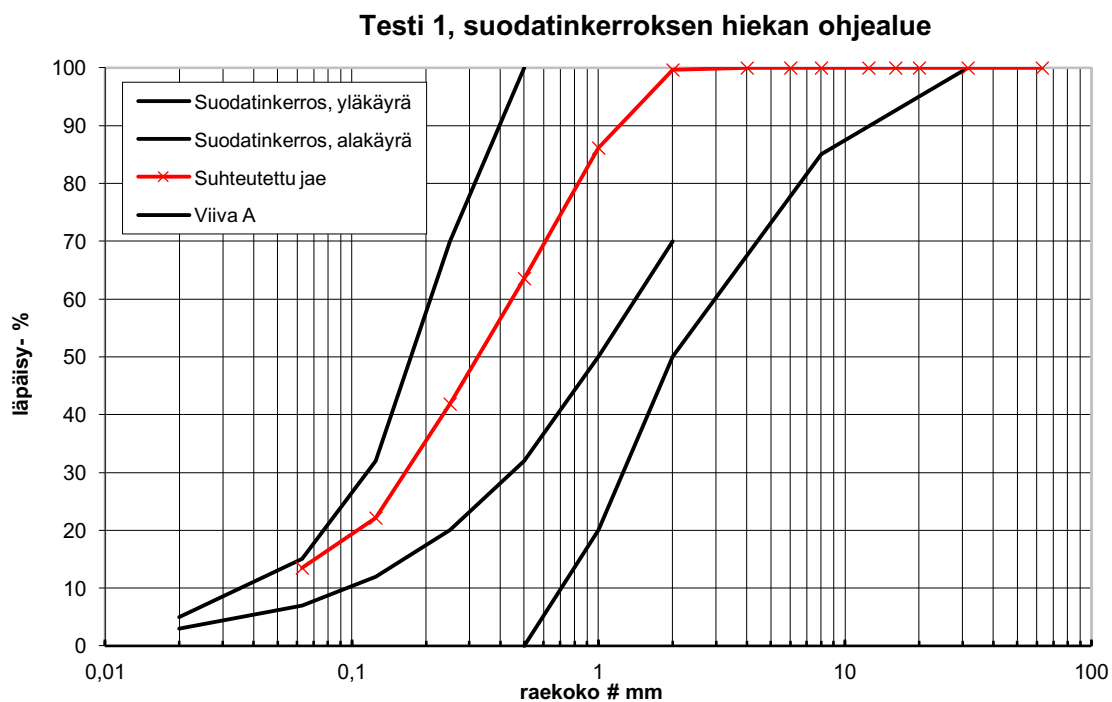
Taulukko 6. Testin 1 käytettävissä olevat jakeet ja niistä jae suhteutettuna jakavan kerroksen soran sekä murskeen ohjealueelle. Osuudet on laskettu jakeesta D

Testin massajakauma (m-% jakeesta D)	
Jae	m-%
Alite	44,1
Ylite	11,2
Jae F1	25,9
Jae G1	18,8

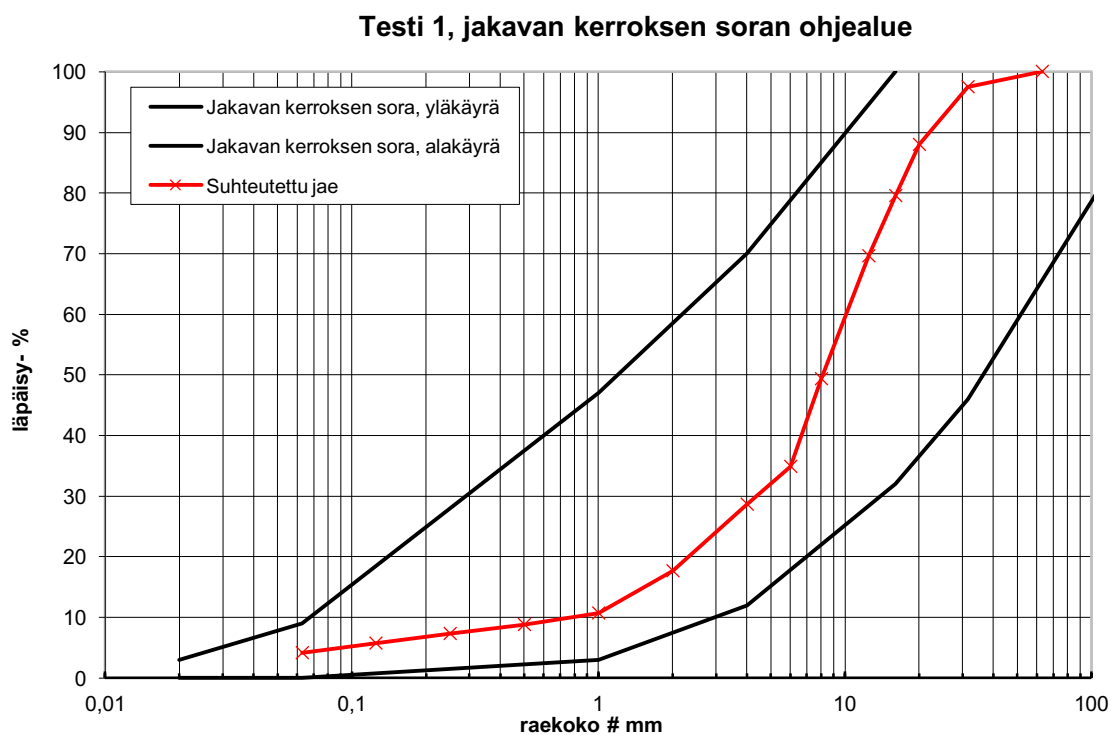
Suhteutetut massat (jakavan kerroksen sora)		Suhteutetut massat (jakavan kerroksen murske)	
Jae	m-%	Jae	m-%
Alite	0,0	Alite	10,0
Ylite	20,1	Ylite	21,0
Jae F1	46,3	Jae F1	19,0
Jae G1	33,5	Jae G1	50,0

Jakavaan kerroksen soran rakeisuusvaatimuksiin suhteutettuun käyrään on jakeet muuten alkuperäisessä suhteessa, mutta alite on otettu kokonaan pois (kuvio 7). Käyrä asettuu hyvin ohjealueelle. Testissä tuotetut jakeet olisi mahdollista siis käyttää kokonaisuudessaan suodatinkerrokseen ja jakavaan kerrokseen hyvin yksinkertaisella tavalla, hienoin jae suodatinkerrokseen ja muut sekoitettuna jakavaan kerrokseen.

Kuviossa 7 jakavan kerroksen rakeisuuskäyrä on kuitenkin hieman ”kuopalla”, jota on mahdollisuus hieman suoristaa eri suhteilla. Alitetta noin 25 % lisäämällä rakeisuuskäyrää saataisiin suoremaksi mutta samalla saadaan se pysymään vielä hyvin ohjealueen sisäpuolella pesuseulonnan tuloksia käyttäen. Samoin suodatinkerrokseen soveltuvan alitteen sekaan on mahdollista sekoittaa ylitettä esimerkiksi 30 %, jolloin käyrästä saadaan hieman loivempi ja hienojakeen määrää noin 2 % pienemmäksi.

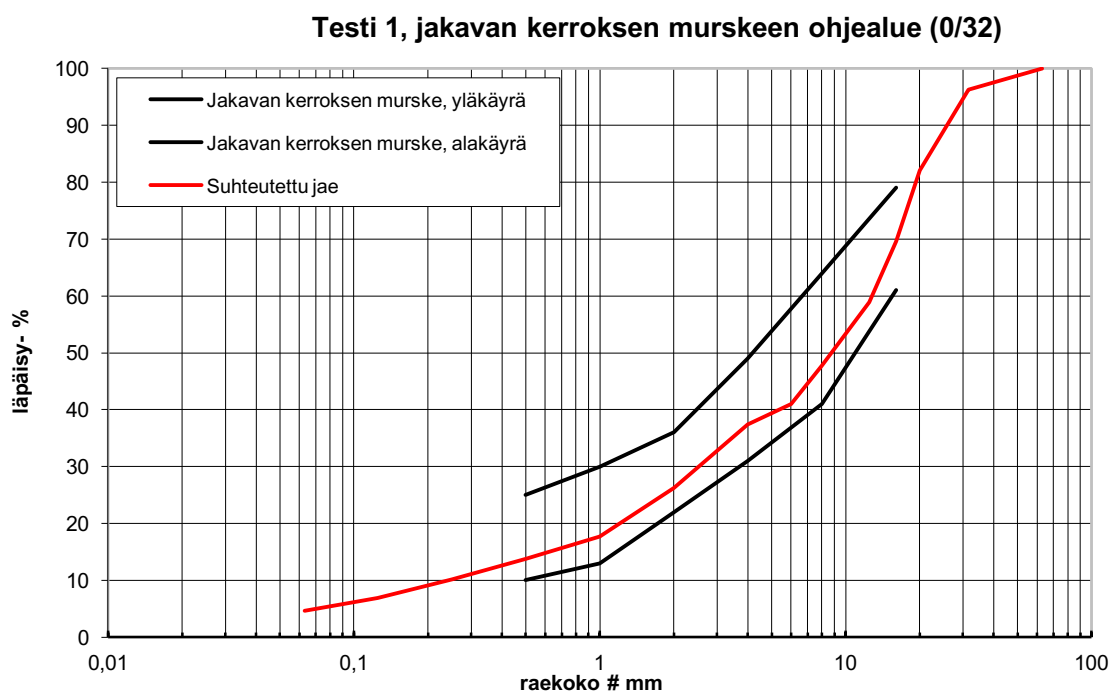


Kuvio 6. Testin 1 suhteutus suodatinkerrokseen pesuseulonnoin



Kuvio 7. Testin 1 suhteutettu rakeisuuskäyrä pesuseulontatuloksilla jakavan kerroksen soran ohjealueella.

Testin 1 jakeista on periaatteessa mahdollista suhteuttaa myös jakavan kerroksen murskeen ohjealueen täyttävää materiaalia (kuvio 8). Käyrä kuitenkin menee lähelle rajoja ohjealueen kummassakin päässä. Näin lähellä rajoja olevan materiaalin jatkuva tuottaminen pitäen se ohjealueen sisällä voi olla laadunvalvonnan kannalta haasteellista kuonan laadun luonnollisesta vaihtelusta johtuen. Taulukossa 6 on esitetty jakeiden osuudet.

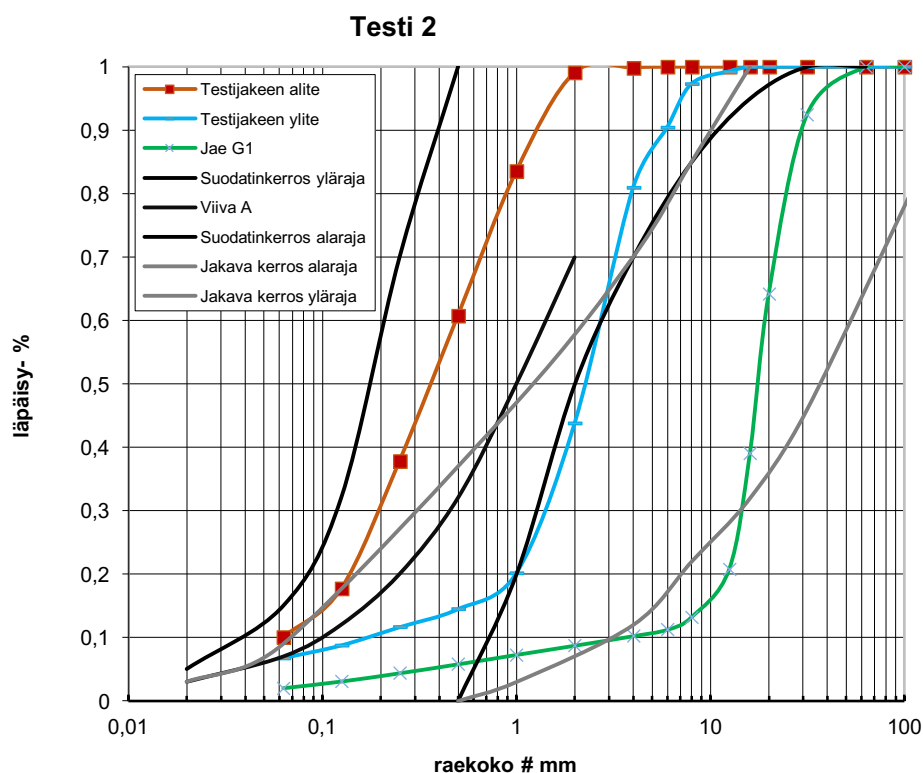


Kuvio 8. Testin 1 suhteutettu materiaali jakavan kerroksen soran ohjealueella

InfraRyl 2017 mukaan jakavaan kerrokseen käytettävän materiaalin on täytettävä rakeisuusvaatimukset standardin SFS-EN 933-1 mukaisella pesuseulonnalla. Hienoinenpitoisuus eli 0,063 mm seulan läpäisyprosentti on oltava enintään 5 paino-%, muussa tapauksessa 0,02 mm seulan läpäisy on määritettävä hydrometrikokeella. Jos 0,063 mm seulan läpäisyprosentti on 5-9 paino-%, on vaihtoehtoisena menetelmänä mahdollisuus käyttää pesuseulontaa, jossa seulotaan 0-2 mm jae 0,02 mm seulaa käyttäen. Läpäisyvaatimus 0,02 mm seulalle molemmiin menetelmiin on $\leq 3,0$ %.

6.2.2 Testi 2

Testissä 2 käytettiin testijakeena jaetta B, jonka tuottamisen ohessa tuotettiin myös jaetta G1. Kuviossa 9 on esitetty testin jakeiden rakeisuudet käsittelyjen jälkeen pesuseulonnan tuloksilla. Testijae käsiteltiin vaihtoehtoisen prosessimenetelmän mukaan, josta tuloksena sen ylite ja alite. Jae G1 on käsitelty normaalin menetelmän mukaan.



Kuvio 9. Testin 2 liberoidun testijakeen B ylitteen ja alitteen pesuseulonta sekä liberoimattoman G1 jakeen pesuseulonta. Kuvioon lisätty myös suodatinkerroksen ja jakavan kerroksen ohjealueen rajat

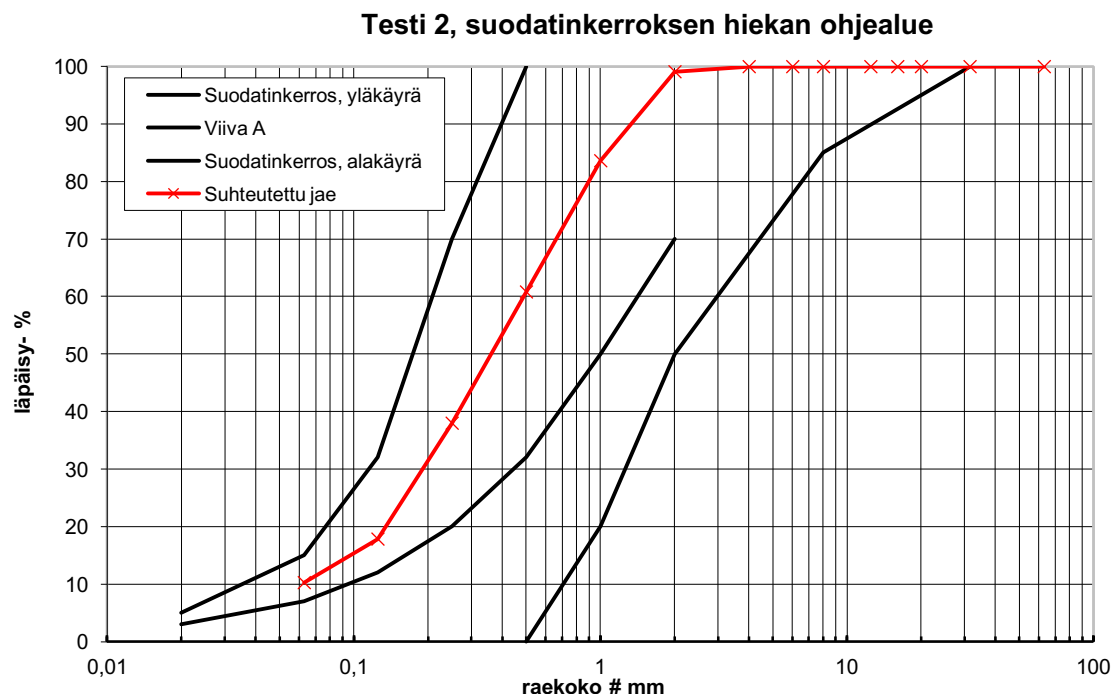
Taulukko 7. Testin 2 käytettävissä olevat jakeet ja niiden suhteutus jakavaan kerrokseen. Osuudet on laskettu jakeesta D

Testin massajakauma (m-% jakeesta D)	
Jae	m-%
Alite	55,9
Ylite	25,2
Jae G1	18,9

Suhteutetut massat (jakava kerros)	
Jae	m-%
Alite	19,0
Ylite	46,3
Jae G1	34,7

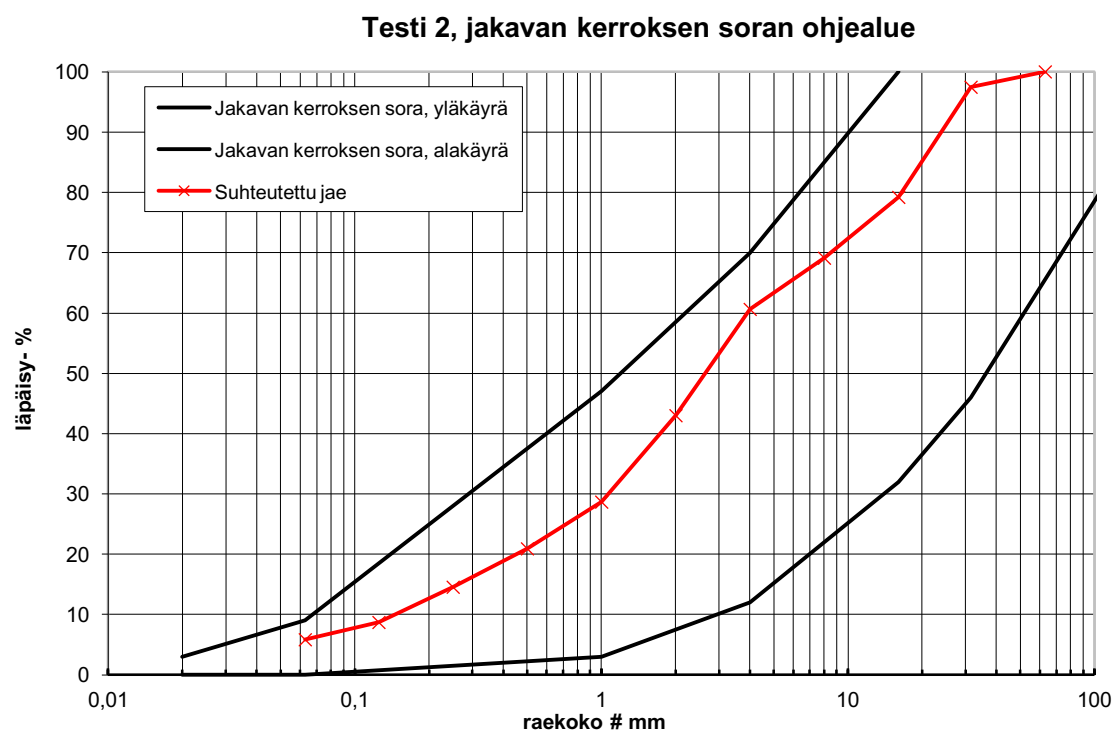
Taulukossa 7 on esitetty testissä tuotetut jakeet ja niiden osuudet jakeesta D, sekä jakavan kerroksen soran rakeisuusvaatimukseen suhteutetut massat. Testin jakeista suhteutettiin sekä jakavaan kerrokseen että suodatinkerrokseen sopivaa materiaalia. Kuviossa 10

on esitetty jakeen B alite, joka on sellaisenaan sopiva suodatinkerroksen ohjealueelle pesuseulonnoin. Käyrää on mahdollista saada hieman loivemmaksi lisäämällä ylitettä mukaan.



Kuvio 10. Testin 2 alite sijoitettuna suodatinkerroksen ohjealueelle pesuseulonnoin

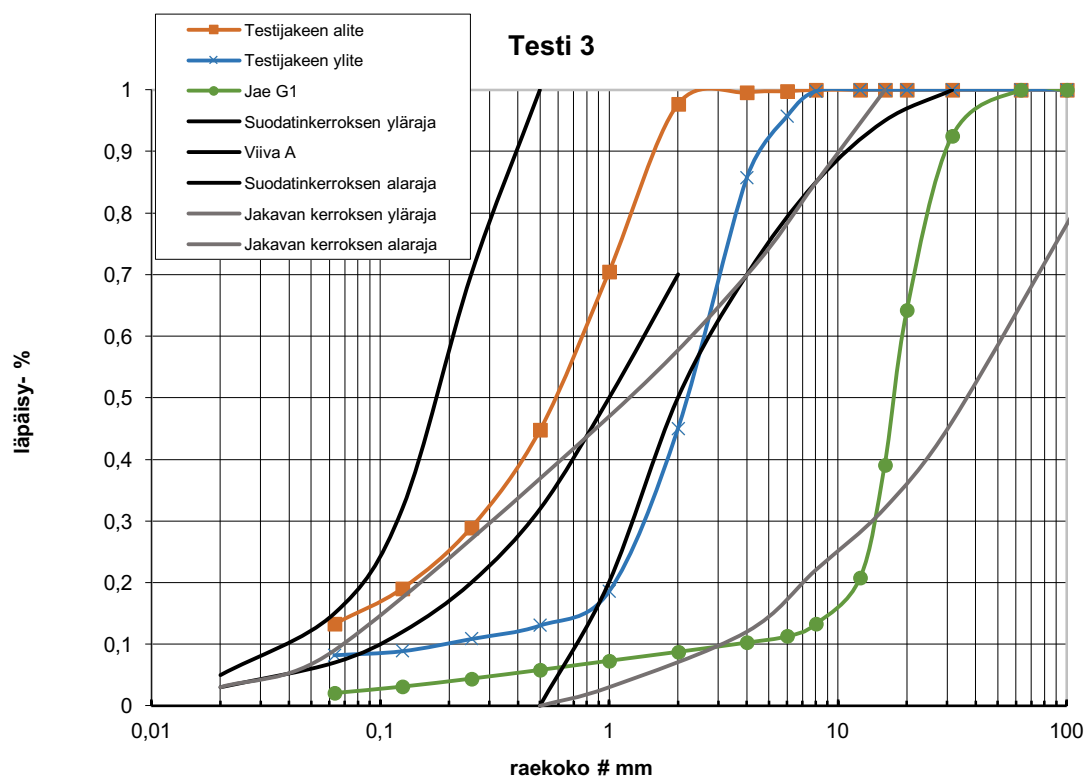
Jakavan kerroksen soran rakeisuusvaatimuksiin suhteutettu materiaali on kuvattu kuviossa 11. Pesuseulonnan rakeisuuskäyrä sopii hyvin ohjealueelle. Suhteutetussa materiaalissa on alkuperäiseen jakaumaan verrattuna alitteen määrää vähennetty alle puoleen, josta loput voidaan kuitenkin hyödyntää suodatinkerroksessa. Rakeisuuskäyrä sopii ohjealueiden sisään myös jättämällä alite kokonaan pois, mutta silloin käyrä jää voimakkaasti kuopalle. Molemmilla tavoilla toteutettuna tuotetut kuonajakeet on kuitenkin mahdollista käyttää suodatinkerrokseen ja jakavaan kerrokseen kokonaisuudessaan.



Kuvio 11. Testin 2 jakeista jakavaan kerrokseen suhteutettu materiaali

6.2.3 Testi 3

Testissä 3 käytettiin testijakeena jaetta C, jonka tuottamisen ohessa tuotettiin myös jaetta G1. Kuviossa 12 on esitetty testin jakeiden rakeisuudet käsittelyjen jälkeen. Testijae käsiteltiin vaihtoehtoisen prosessointimenetelmän mukaan, josta tuloksena jakeiden alite ja ylite. Jakeelle G1 on suoritettu normaali käsittely. Kaikista jakeista rakeisuus on tutkittu pesuseulonnoin.



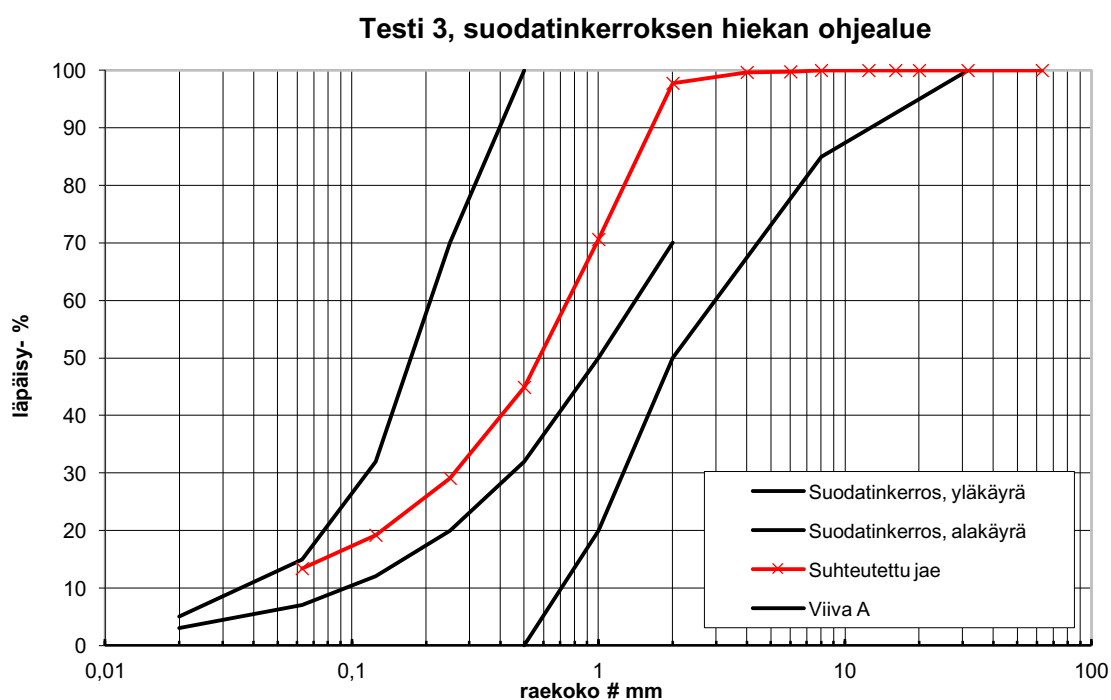
Kuvio 12. Testin 3 jakeen C alitteen ja ylitteen sekä jakeen G1 pesuseulonnat

Taulukossa 8 on esitetty testissä tuotetut jakeet ja niiden osuudet jakeesta D, sekä jakavan kerroksen soran rakeisuusvaatimuksiin suhteutetut massat. Testin jakeista suhteutettiin sekä jakavaan kerrokseen että suodatinkerrokseen sopivaa materiaalia. Kuviossa 13 on esitetty testijakeen alite, joka sellaisenaan kyllä sopii suodatinkerroksen ohjealueelle mutta pesuseulonnin käyrä on hienojakeen kohdalla ylärajoilla. Jos mukaan lisää ylitettä, hienojakeen määrä hieman laskee mutta käyrä liikkuu silloin vastaavasti lähelle viivaa A. Jaolla 60 % alitetta ja 40 % ylitettä, käyrä ylittää jo viivan A kiellettyyn suuntaan hienojakeen määrän pienentyessä vain 2 prosenttia.

Taulukko 8. Testissä 3 käytettävissä olevat jakeet ja niiden suhteutus jakavaan kerrokseen. Osuudet on laskettu jakeesta D

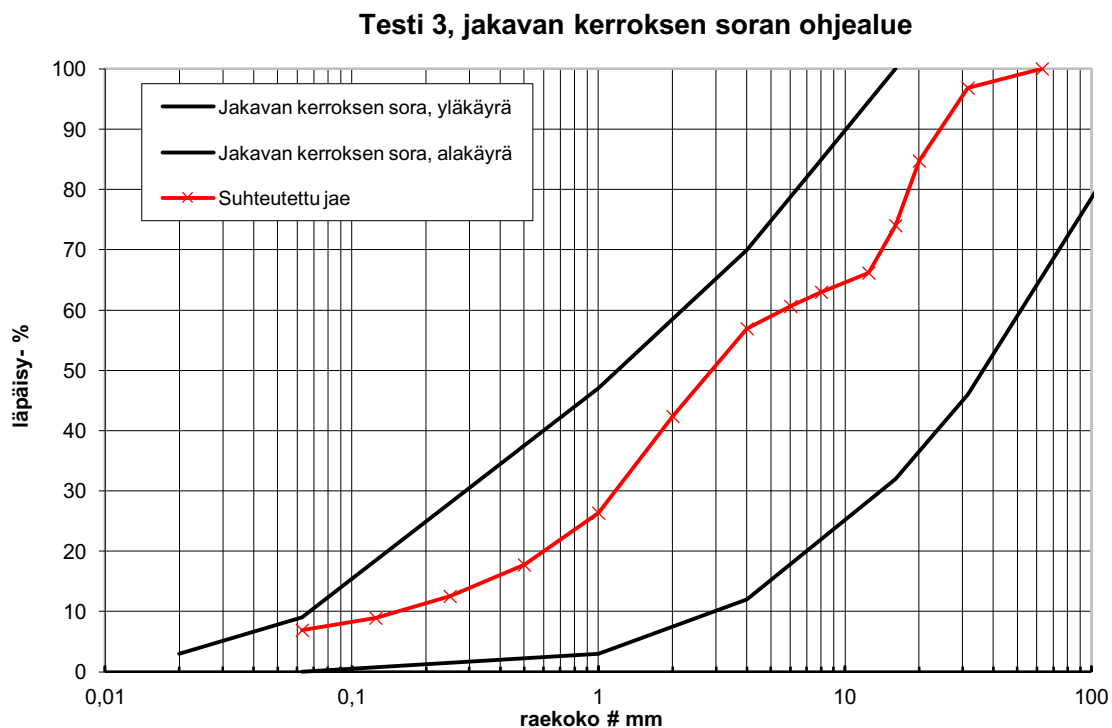
Testin massajakauma (m-% jakeesta D)	
Jae	m-%
Alite	47,2
Ylite	33,7
Jae G1	19,1

Suhteutetut massat (jakava kerros)	
Jae	m-%
Alite	24,2
Ylite	33,1
Jae G1	42,7



Kuvio 13. Testin 3 alite suodatinkerroksen ohjealueelle sijoitettuna pesuseulonnoin

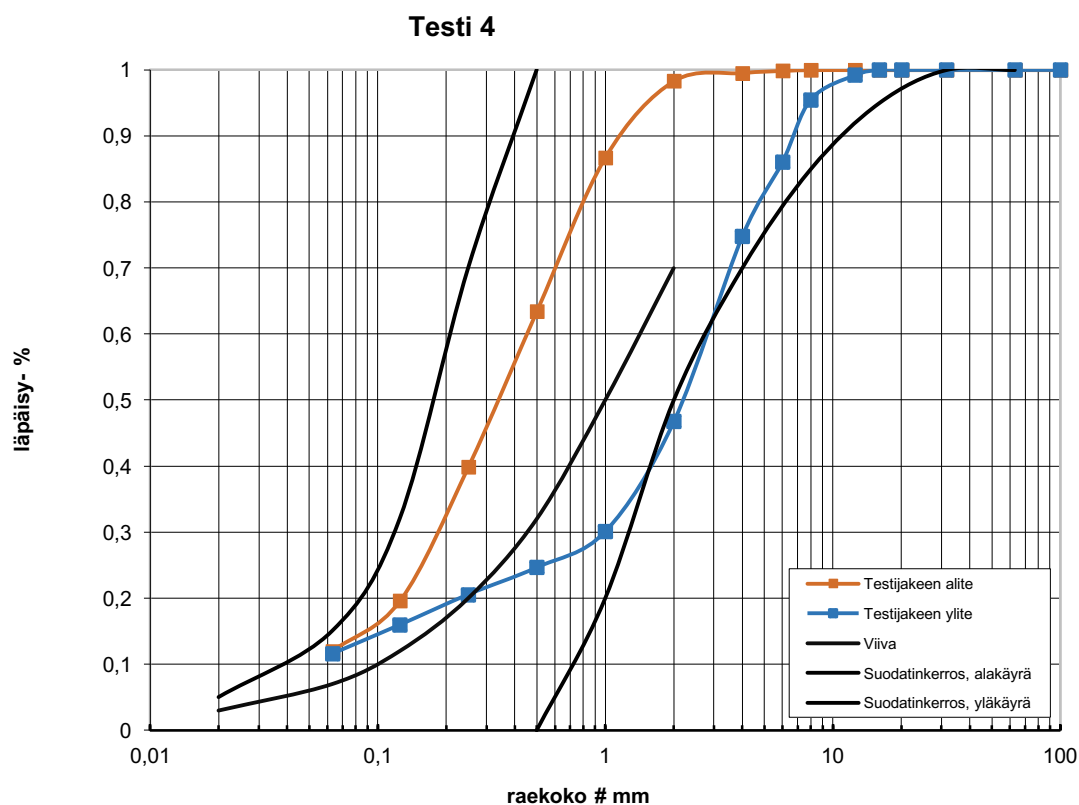
Jakavan kerroksen soran rakeisuusvaatimuksiin suhteutettu materiaali on kuvattu kuviossa 14. Pesuseulonta osuu ohjealueelle mutta hienojakeen määrä on lähellä ylärajaa. Ilman alitetta hienojakeen määrä laskee mutta myös käyrä jää hieman luonnottomaan muotoon kuopalle. Käyrää on suoristettu lisäämällä alitetta sen verran, että se kuitenkin pysyy ohjealueella. Testin jakeet sopivat suodatinkerroksen ja jakavan kerroksen rakeisuusvaatimuksien rajojen sisälle, mutta eivät yhtä hyvin kuin testissä 1 ja 2.



Kuvio 14. Testin 3 jakeista jakavaan kerrokseen suhteutettu materiaali pesuseulonnoin

6.2.1 Testi 4

Testin 4 jae D käsiteltiin vaihtoehtoisen prosessointimenetelmän mukaan, josta saatiin testijakeen alite ja ylite. Kuviossa 15 on kuvattu näiden jakeiden rakeisuudet pesuseulonnalla sekä suodatinkerroksen ohjealue. Taulukossa 9 on testin jakeiden osuus jakeesta D ja suhteutetut massat jakavaan kerrokseen.

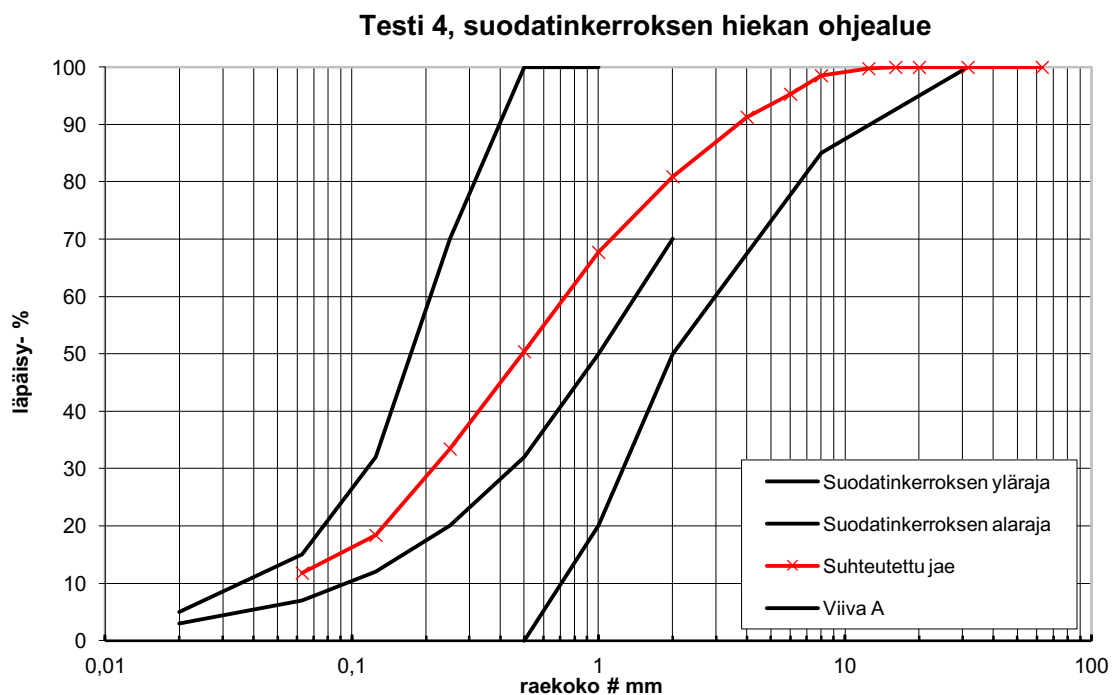


Kuvio 15. Testin 4 jakeet pesuseulonnoin sekä suodatinkerroksen ohjealue

Taulukko 9. Testissä 4 käytettävissä olevat jakeet ja niiden suhteutus jakavaan kerrokseen. Osuudet on laskettu jakeesta D

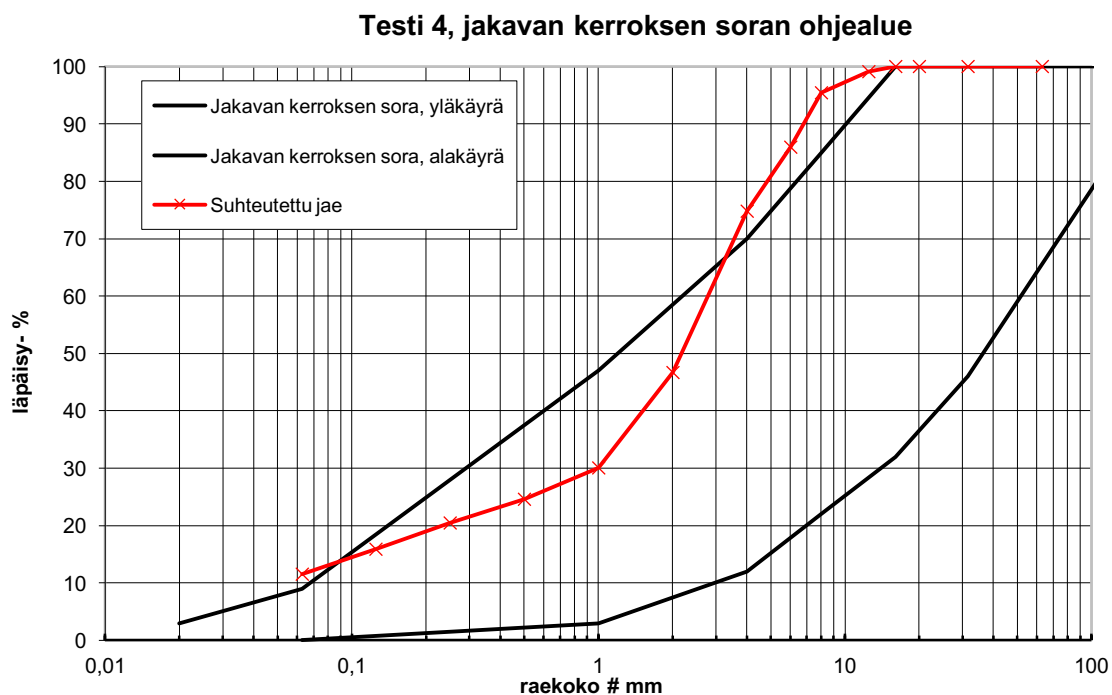
Testin massajakauma (m-% jakeesta D)	
Jae	m-%
Alite	66,3
Ylite	33,7

Suhteutetut massat (jakava kerros)	
Jae	m-%
Alite	0
Ylite	100



Kuvio 16. Testin 4 jakeista suhteutettu suodatinkerroksen materiaali pesuseulonnoin

Kuviossa 16 on kuvattu suodatinkerroksen ohjealueet ja siihen sopiva materiaali. Testissä saadut jakeet ovat alkuperäisessä suhteessa kokonaan käytettynä. Rakeisuus käyrä sopii ohjealueelle hyvin pesuseulonnann tuloksilla.



Kuvio 17. Testin 4 suhteutettu materiaali jakavaan kerrokseen pesuseulonnoin

Jakavaan kerrokseen suhteutettu materiaali on kuvattu kuviossa 17 pesuseulonnan tuloksilla. Suhteutukseen on käytetty pelkästään testijakeen ylitettä, mutta hienojakeen määrä ylittää silti pesuseulonnalla ohjealueen ylärajan.

6.3 Metallin erottelun tulokset

Metallin erottelun tulokset ovat luottamuksellisia.

6.4 Yhteenveto

Rakeisuuksia verratessa jokaista testiä tarkasteltiin yhtenä kokonaisuutena. Siihen kuului jakeesta D tuotetut jakeet: testijae, jolle suoritettiin liberointi sekä testijakeen tuottamisen ohella tuotetut normaalisti käsitellyt jakeet. Tavoitteena oli selvittää optimaalisin menetelmä rakeisuuksien ja metallisaannon suhteen.

Kaikissa testeissä saatiin sopivat mineraalijakeet käytettäväksi joko jakavaan kerrokseen ja/tai suodatinkerrokseen. Testissä 4 jakeet sopivat vain suodatinkerrokseen, koska koko materiaalille suoritettiin liberointi eikä karkeampia jakeita silloin jäänyt jäljelle suhteistusta varten. Suodatinkerroksen ohjealueelle rakeisuuskäyrä kuitenkin asettuu hyvin.

Testeissä 1, 2 ja 3 tuotetuista jakeista saatiin suhteutettua jakavaan kerrokseen ja suodatinkerrokseen sopivaa materiaalia. Rakeisuudet asettuivat kummankin kerroksen ohjealueiden sisään pesuseulonnan tuloksilla. Näistä testin 1 ja 3 rakeisuuskäyrät ovat hienojakeen kohdalla lähellä suodatinkerroksen hiekan ohjealueen ylärajaa, mutta testi 2 sopii ohjealueen rajoihin paremmin.

Metallipitoisuuksissa tuloksia tarkasteltiin myös kokonaisuuksina rakeisuuksien tapaan. Testeistä 1, 2 ja 4 tutkitut metallipitoisuudet ovat lähellä toisiaan sekä myös referenssinäytteen pitoisuutta, joka tukee saatuja testien tuloksia. Näiden testien käsittelyssä toteutuneen metallin määrä on kaikissa yhtä hyvällä tasolla. Testeistä 3 eroaa muista poikkeuksellisen korkealla metallipitoisuudellaan, jota ei voida pitää täysin yksiselitteisenä ja realistisena tuloksena.

Testien metallisaannoissa ei esiinny suuria poikkeuksia toisiinsa nähden. Testien 1,2 ja 3 tulokset ovat reilun prosentin sisällä, mutta testissä 4 saatiin noin viisi prosenttia muita parempi saanto. Testien toteumaa verratessa nykyiseen toteumaan, voidaan testeissä toteutunutta metallien määrää pitää noin 37 % parempana.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tutkittiin vaihtoehtoista prosessointimenetelmää jätteenpolton pohjakuonan käsittelyyn. Tarkoituksena oli selvittää vaihtoehtoisen prosessimenetelmän vaikutus metallisaantoon sekä mineraalijakeen soveltuvuuteen suodatinkerroksen hiekan ja jakavan kerroksen soran rakeisuusvaatimuksiin. Vaatimukset pyrittiin täyttämään pesuseulonnan tuloksilla suhteuttamalla eri raekoon jakeita. Työssä tutkittiin neljän eri jakeen tuloksia tavoitteena osoittaa niistä optimaalisin vaihtoehto metallien saannon ja rakeisuuden tulosten suhteen.

Kaikista testeistä saatiin kelvollisia tuloksia rakeisuuksien osalta. Rakeisuusvaatimuksiin sopivin vaihtoehto löytyi testistä 2, jonka jakeista saatiin suhteutettua suodatinkerroksen hiekan ja jakavan kerroksen soran ohjealueille sopivat materiaalit. Käsittelyssä muodostuvat jakeet on mahdollista käyttää kokonaan näihin kahteen rakennekerrokseen. Testin 1 tulokset ovat samankaltaisia mutta hienojakeen määrä on hieman testiä 2 korkeampi. Testissä 1 saadaan kuitenkin vielä lisäksi jakavan kerroksen murskeen täyttävää materiaalia vaikkakin se on melko lähellä ohjealueen rajoja. Kummatkin testeistä ovat kuitenkin potentiaalisia vaihtoehtoja.

Testien metallisaannot olivat lähellä toisiaan, mutta metallipitoisuuksissa testin 3 tulos erottui suurella metallipitoisuudellaan. Se johtuu mahdollisesti näytteeseen sattumalta osuneesta suuremmasta metallimäärästä ja tästä johtuen testin metallipitoisuuden tuloksia ei voi pitää täysin yksiselitteisinä ja todenmukaisina. Huomioitavaa on myös sen mahdollinen vaikutus testin rakeisuuksiin. Testi tulisi toistaa luotettavan tuloksen saamiseksi.

Sekä rakeisuuden että metallisaantojen kannalta suotuisimmaksi testiksi voidaan todeta testi 2 sekä myös testi 1 mahdollisena vaihtoehtona. Suoritetusta neljästä testistä yhdenkään tulokset eivät olleet käyttökelvottomia. Jokaista tutkittua vaihtoehtoa on mahdollisuus toteuttaa riippuen siitä, minkälainen lopputuote halutaan ja missä tuotettu mineraalijae on mahdollisesti tarkoitus hyödyntää. Hyödyntäminen vaatii tietenkin myös ympäristöluvan tai MARA-asetuksen asettamien muiden ehtojen täyttämisen ennen mineraalijakeen hyödyntämistä. Tämän työn osalta voidaan todeta tutkimuksen kohteena olleen prosessointimenetelmän parantaneen metallin erottelun tulosta noin 37% normaaliin toteumaan verrattuna sekä tuottaneen rakeisuudeltaan käyttökelpoista materiaalia.

LÄHTEET

Basu, P. 2010. Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory. Kidlington, UK: Elsevier Inc.

Bunge, R. 2017. Recovery of metals from waste incinerator bottom ash [viitattu 3.12.2018]. Saatavissa:

[https://www.umtec.ch/fileadmin/user_upload/umtec.hsr.ch/Dokumente/Doku-Download/Publikationen/Metals from MWIBA 2017.pdf](https://www.umtec.ch/fileadmin/user_upload/umtec.hsr.ch/Dokumente/Doku-Download/Publikationen/Metals_from_MWIBA_2017.pdf)

Circhubs 2018. Jätteenpolton tuhkat ja kuonat [viitattu 8.11.2018]. Saatavissa:

<https://circhubs.fi/tietopankki/jatteenpolton-tuhkat-ja-kuonat/>

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Tampere: Rakennustieto Oy.

European Commission 2006. Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration [viitattu 21.11.2018]. Saatavissa:

http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf

Huhtinen, T., Palolahti, A., Räisänen, M. & Torppa, A. 2018. Ympäristöministeriön raportteja: Kiviaineshuollon kehittämien. Helsinki: Ympäristöministeriö [viitattu 8.2.2019].

Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4791-3>

InfraRYL 2018/1. 2018. 21100 Suodatinrakenteet [viitattu 13.3.2019]. Saatavilla InfraRYL

Net-palvelussa: <https://www.rakennustieto.fi/infraryl/extra/yleista.html.stx>

Jätelaitosyhdistys. 2019. Jätteenpolton ja energiahyödyntämisen kehitysvaiheita [viitattu 6.2.2019]. Saatavissa: <http://vanha.jly.fi/energia11.php?treeviewid=tree3&nodeid=11>

Jätelaitosyhdistys. 2018. Arinapoltto [viitattu 8.11.2018]. Saatavissa:

<http://vanha.jly.fi/energia31.php?treeviewid=tree3&nodeid=31>

Jätelaki. 646/2011. Finlex [viitattu 6.2.2019]. Saatavissa:

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>

Jäteverolaki. 1126/2010. Finlex [viitattu 6.2.2019]. Saatavissa:

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20101126>

Kaartinen, T., Laine-Ylijoki, J., Koivuhuhta, A., Korhonen, T., Luukkanen, S., Mörsky, P., Neitola, R., Punkkinen, H. & Wahlström, M. 2011. Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi. Kuopio: VTT [viitattu 21.11.2018]. Saatavissa:

<https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2567.pdf>

Lahti Energia. 2016. Kymijärvi II vuosirapotti.

Lätti, E. 2016. Vaihtoehtoisten maarakennusmateriaalien mekaaniset ominaisuudet. Helsinki: Liikennevirasto [viitattu 8.2.2019]. Saatavilla:

https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/opin_2016-02_vaihtoehtoisten_maarakennusmateriaalien_web.pdf

Marttila, A. 2010. Metallierottelu yhdyskuntajätteen polton pohjakuonasta. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.

Ojala, E. 2013. Polttava ratkaisu. Kamppailu arinapolton soveltuvuudesta jätealan rakennemuutokseen. Pro gradu- tutkielma. Tampereen yliopisto. Tampere [viitattu 19.2.2019]. Saatavissa:

<https://tampub.uta.fi/bitstream/handle/10024/85133/gradu07156.pdf?sequence=1>

Penttilä, J. 2012. Havaitun ja laskennallisen roudan syvyyden ja routanousun vertailu radalla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere [viitattu 5.3.2019].

Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201303131078>

Räsänen, I. 2018. Jätteenpolton pohjakuonat ja niiden hyödyntäminen infrarakentamisessa. AMK -opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tampere [viitattu 6.2.2019]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201804275719>

SFS-EN 933-1. 2012. Kiviainesten geometrisen ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

Steinert magnetic & sensor sorting solutions. 2019. STEINERT XSS® T x-ray sorting system [viitattu 12.4.2019]. Saatavilla: <https://steinertglobal.com/magnets-sensor-sorting-units/sensor-sorting/x-ray-sorting-systems/steinert-xssr-t/>

Suomen virallinen tilasto (SVT). 2019. Jätetilasto. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu 6.2.2019]. Saatavilla: http://www.stat.fi/til/jate/2017/13/jate_2017_13_2019-01-09_tie_001_fi.html

Syc, M., Simon, F., Biganzoli, L., Grosso, M. & Hyks, J. 2018. Resource recovery from incineration bottom ash: Basic, concepts, principles. Teoksessa: Holm, O. & Thomé-Kozmiensky, E. (toim.). Removal, treatment and utilisation of waste incineration bottom ash. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH. 6-7.

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maanrakentamisessa. 843/2017. Finlex [viitattu 5.2.2019]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170843>

Vesanto, P. 2006. Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä. Jätteenpolton BREF 2006. Helsinki: Suomen ympäristökeskus (SYKE) [viitattu 26.2.2019]. Saatavilla:

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38712/SY_27_2006.pdf?sequence=3

Ympäristöhallinto. 2013. Jättemaksut ja -verot [viitattu 6.2.2019]. Saatavissa:

<https://www.ymparisto.fi/fi->

[FI/Kulutus_ja_tuotanto/Jatteet_ja_jatehuolto/Jatemaksu_ja_verot](https://www.ymparisto.fi/fi-Kulutus_ja_tuotanto/Jatteet_ja_jatehuolto/Jatemaksu_ja_verot)

Ympäristöministeriö. 2018. Jätteet [viitattu 19.11.2018]. Saatavissa: <http://www.ym.fi/fi->

[FI/Ymparisto/Jatteet](http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Jatteet)

Ympäristönsuojelulaki 527/2014. Finlex [viitattu 27.2.2019]. Saatavissa:

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140527#Pidp446727904>