

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Tomi Onttonen

PUUPOLTTOAINEITA KÄYTTÄVIEN LÄMPÖLAITOSTEN  
KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET JÄRVIMALMIN RIKASTAMISESSA

Opinnäytetyö  
Tammikuu 2014

**Vipuvoimaa**  
EU:lta  
2007–2013

**JOSEK** 



Pohjois-Karjalan  
Elinkeino-, liikenne- ja  
ympäristökeskus



**Euroopan unioni**  
**Euroopan sosiaalirahasto**



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Tammikuu 2014**  
**Ympäristötekniikan**  
**koulutusohjelma**

Sirkkalantie 12 A  
80100 JOENSUU  
013 260 6900

Tekijä  
Tomi Onttonen

Nimike  
Puupolttoaineita käyttävien lämpölaitosten käyttömahdollisuudet järvimalmin rikastamisessa

Toimeksiantaja  
Karelia-AMK ja Hajautetut biojalostamot -hanke

**Tiivistelmä**

Opinnäytetyössä tutkittiin järvimalmin rikastuksen mahdollisuuksia puupolttoaineita käyttävissä lämpölaitoksissa. Tutkimuksen lähtökohtana oli, että järvimalmi kerätään järvien kunnostusruoppausten yhteydessä. Tutkimuksissa selvitettiin järvimalmin ja järvien pohjasedimenttien ominaisuuksia painottaen polttoon vaikuttavia seikkoja. Järvimalmin rikastuksen kannattavuutta arvioitiin myös taloudelliselta kannalta.

Tutkimuksessa kahdesta itäsuomalaisesta järvestä otettiin pohjasedimenttinäytteitä, jotka sisälsivät järvimalmia. Pohjasedimenteille tehtiin alkuaineanalyysit, sekä pienen kokoluokan polttokokeita. Polttokokeista kerättiin pohjatuhkat, joille suoritettiin myös alkuaineanalyysit.

Alkuaineanalyysien ja aikaisempien tutkimusten perusteella sedimentin poltolle ei ole teknisiä esteitä. Opinnäytetyössä suoritettujen kustannuslaskennan perusteella järvimalmin jalostus ei ole tällä hetkellä kannattavaa toimintaa. Laskennassa lämpöyrittäjälle suurin tulonlähde muodostuu pohjasedimentin läjityksen kustannuksien säästöstä. Sedimentin läjitys rantavyöhykkeelle läjitysaltaaseen maksaa keskimäärin noin 10 €/m<sup>3</sup>. Pohjasedimentin lisäys kattilaan estää kattilan pohjatuhkan käyttämistä tuhkalannoitteena, paitsi jos lisätyn sedimentin määrä on alle 0,04 % puupolttoaineen painosta. Laskennassa suurin kuluerä syntyi pohjatuhkan loppusijoituksesta.

Jatkotutkimuksissa tulee selvittää sedimentin klooripitoisuus, koska kloori vaikuttaa sedimentin soveltuvuuteen polttoon. Sedimentille tulee tehdä suuren kokoluokan polttokokeet, joissa palotilan lämpötilat ovat samat kuin puupolttoaineita käyttävissä lämpölaitoksissa.

Kieli  
Suomi

Sivuja 66  
Liitteet 0  
Liitesivumäärä 0

Avainsanat  
Järvet, malmimineraalit, sedimentit, kiinteät polttoaineet, lämmöntuotanto, ruoppaus



**THESIS**  
**January 2013**  
**Degree Programme in**  
**Environmental Technology**

Sirkkalantie 12 A  
FIN 80100 JOENSUU FINLAND  
013 260 6900

Author  
Tomi Onttonen

Title  
Applications of using wood fuel heating plants on limonite enrichment

Commissioned by  
Karelia UAS and Decentralised Biorefineries project

Abstract

This thesis investigates limonite enrichment opportunities for using wood fuel heating plants. A basis for research was that the limonite collection is connected to lakes restoration dredging. The studies examined limonite and the bottom sediments of lakes, and the combustion characteristics of the factors influencing the emphasis. Limonite beneficiation profitability was also evaluated in economic terms.

Bottom sediment samples were picked up from two lakes in Eastern Finland. The samples contained limonite. Elemental analyzes were carried out on the bottom sediments, as well as small-scale combustion tests. Bottom ashes from the combustion tests were harvested, and carried out with elemental analyzes.

Elemental analyzes and previous studies prove that sediment incineration is not a technical obstacle. Calculations of the study show that limonite processing is not currently an economically viable activity. The largest source of income for the heat entrepreneur consists of the sediment stockpiling cost savings. Stockpiling of sediments at waterfront zones in stockpiling pools cost an average of about 10 €/m<sup>3</sup>. Increase of bottom sediment in the boiler prevents the usage of bottom ash as a fertilizer, except if the added amount of sediment is less than 0.04 % of the weight of the wood fuel. The largest cost item was the disposal of the bottom ash.

Further research should be done concerning the chlorine content of the sediment, as the chlorine affects the suitability of the sediment for combustion. Sediment suitability for combustion should be tested in a larger scale combustion test.

Language  
Finnish

Pages 66  
Appendices 0  
Pages of Appendices 0

Keywords  
Lakes, ore minerals, sediments, solid fuels, heat production, dredging

# Sisältö

1 Johdanto .....	7
2 Keskeiset käsitteet.....	9
3 Malmin jalostus.....	10
3.1 Historia.....	10
3.2 Nykyaika .....	10
3.3 Raudan pelkistys .....	11
4 Järvimalmi.....	14
4.1 Historia.....	15
4.2 Pasutus .....	17
4.3 Järvimalmimasuunit .....	17
5 Ruoppauksen toimintamallit .....	18
6 Järvien ruoppaus.....	19
6.1 Ruoppausmenetelmät .....	20
6.2 Ruoppausmassojen käsittely .....	21
6.3 Ruoppauksen kustannukset.....	22
6.4 Ruopatun sedimentin koostumus .....	22
6.5 Sedimentin tuhkaa muodostavat aineet.....	23
7 Puupolttoainetta käyttävien lämpölaitosten tekniikka .....	24
7.1 Palamisen vaiheet.....	24
7.2 Kattilatekniikka .....	26
7.2.1 Arinapoltto .....	26
7.2.2 Leijupetipoltto .....	27
7.3 Kiinteän polttoaineen ominaisuudet.....	29
7.4 Kosteuden merkitys polttoaineen ominaisuuksiin .....	30
7.5 Tuhkan sulaminen ja kattilan likaantuminen .....	34
7.6 Korroosio .....	34
7.7 Palamisen päästöt .....	35
8 Tutkimusmenetelmät ja tutkimusaineisto .....	37
8.1 Sedimenttinäytteet.....	37
8.2 Polttokokeet .....	45
9 Tulokset.....	51
9.1 Sedimenttinäytteet.....	51
9.2 Polttokokeet .....	53
10 Järvimalmin jalostuksen kannattavuuden case laskenta .....	54
10.1 Perustietoa laskennasta.....	54

10.2 Polttoaineen hinnan muodostuminen .....	55
10.3 Lämpölaitoksen muut käyttökustannukset .....	57
10.4 Järvimalmin jalostuksen kustannukset .....	59
11 Päättäntä .....	62
11.1 Uusia tutkimusaiheita .....	62
11.2 Virhearviointi .....	62
11.3 Toimenpidesuosituksset .....	64
Lähteet .....	65

## Kuvat, kuviot ja taulukot

Kuva 1.	Hematiitin pelkistysreaktio wüstiitiksi
Kuva 2.	Wüstiitin pelkistyminen hiilimonoksidin vaikutuksesta
Kuva 3.	Wüstiitin suora pelkistys
Kuva 4.	Hiilidioksidin reagointi hiilen kanssa
Kuva 5.	Järvimalmihauleja Loitimolta (Kuva: Tomi Onttonen)
Kuva 6.	Nykyisen toimintamallin kuvaus
Kuva 7.	Vaihtoehtoisen toimintamallin kuvaus
Kuva 8.	Loitimon sedimenttinäytteiden nostopaikat (Google maps 2013)
Kuva 9.	Jukajärven sedimenttinäytteiden nostopaikka (Google maps 2013)
Kuva 10.	Loitimon sedimentin nosto ja siinä käytetyt varusteet (Kuva: Tarmo Tossavainen)
Kuva 11.	Sedimenttinäytteen nosto sedimenttikairalla (Kuva: Tarmo Tossavainen)
Kuva 12.	Näytteet kerättiin pakasterasioihin sedimenttikairasta (Kuva: Tarmo Tossavainen)
Kuva 13.	Polttokokeeseen menevä osuus sedimentistä kerättiin pussiin, koska sedimentin määrä oli suurempi kuin ICP-analyysiin tarvittava määrä (Kuva: Tarmo Tossavainen)
Kuva 14.	Jukajärven sedimentin nosto suoritettiin myös sedimenttikairalla, mutta nosto tehtiin veneestä käsin (Kuva: Tarmo Tossavainen)
Kuva 15.	Polttokokeissa käytetty polttolaite (Kuva: Markus Hirvonen)
Kuva 16.	Sedimenttinäytteiden esivalmistelu (Kuva: Markus Hirvonen)
Kuva 17.	Sedimentin lisäys polttolaitteeseen (Kuva: Markus Hirvonen)
Kuvio 1.	Puun ja sedimentin poltossa vapautuvan energian taseet
Taulukko 1.	Suomen järvien pintasedimentin keskimääräinen kuiva-aineen alkuainekoostumus. A = järvien pinta-ala ja syvyys on näytteen ottopaikkojen syvyys (Mäkinen & Pajunen 2005, 174)
Taulukko 2.	Sedimenttinäytteiden nostopaikat, nostoajankohdat ja näytteiden tarkoitusperä
Taulukko 3.	Sedimenttinäytteiden kosteuden määrittäminen
Taulukko 4.	Sedimentin polttokokeet 14.5.2013, Joensuu Ahveninen
Taulukko 5.	Loitimon kokoomänäytteen sedimentin kemiallinen koostumus (ICP-analyysi). Taulukon arvot on ilmoitettu kuiva-ainetta kohti
Taulukko 6.	Loitimon näytepisteiden sedimentin kemiallinen koostumus (ICP-analyysi). Taulukon arvot on ilmoitettu kuiva-ainetta kohti

- Taulukko 7. Jukajärven sedimentin kemiallinen koostumus eri syvyyksistä (ICP-analyysi). Mitat on otettu sedimentin pinnasta alaspäin. Taulukon arvot on ilmoitettu kuiva-ainetta kohti
- Taulukko 8. Biopolttoaineiden ominaisuuksia (Alakangas 2000, 105)
- Taulukko 9. Polttokokeiden pohjatuhkien alkuaineanalyysin tulokset. Taulukon arvot on ilmoitettu kuiva-ainetta kohti
- Taulukko 10. Lämpölaitoksen polttoaineiden hinnat ja tuotetut energiamäärät
- Taulukko 11. Esimerkin lämpölaitoksen energiantuotantokulut
- Taulukko 12. Puun ja sedimentin ominaisuuksien vertailua
- Taulukko 13. Järvimalmin jalostuksesta syntyvät tuotot ja kustannukset yhteenlaskettuna

#### Lyhenteet

MWh	megawattitunti
kWh	kilowattitunti
MW	megawatti
MJ	megajoule
kJ	kilojoule
ppm	miljoonasosaa
m- %	massaprosentti
i-m <sup>3</sup>	irtokuutiometri
m <sup>3</sup> ctr	kiintoteoreettinen kuutiomäärä
mol	mooli
PAH	polysykliset aromaattiset hiilivedyt
CHP	lämmön ja sähkön yhteistuotanto
USD	Yhdysvaltain dollari

## 1 Johdanto

Suomessa tuotetaan puupolttoaineilla paljon energiaa sekä lämpönä, että sähköä. Suuressa osassa kaupunkeja lämmöntuotanto on toteutettu kaukolämmön avulla. Tästä johdettua Suomessa on laaja lämpölaiteverkosto.

Suomessa on järviä, joita tulisi kunnostaa. Kunnostukset ovat kuitenkin kalliita ja niiden tuomia taloudellisia hyötyjä on vaikea arvioida. Kunnostukset tuovat mukanaan myös ympäristölle haitallisia vaikutuksia. Toimintaketjut pyritään suunnittelemaan mahdollisimman kestäviksi sekä taloudellisesti, sosiaalisesti että ympäristön kannalta.

Opinnäytetyössä selvitetään järvimalmin jalostusmahdollisuuksia pienen kokoluokan puupolttoaineita käyttävissä lämpölaitoksissa. Tarkoituksena on järvien kunnostusruoppauksien tuottaman ruoppausmassan kuljetettaminen lämpölaitokselle poltettavaksi, jolloin sedimentin sisältämä järvimalmi jalostuisi. Tarkoituksena on myös selvittää asiaa sekä teknisestä että taloudellisesta näkökulmasta. Työssä selvitetään järvimalmin jalostusmahdollisuuksista kirjallisuuteen perustuvalla tutkimuksella. Aihe on haastava, koska työssä joutuu yhdistelemään paljon tietoa ja vastaavaa tutkimusta ei ole tehty aiemmin.

Järvimalmi ja sedimentti sisältävät vettä. Veden lisääminen lämpölaitoksen kattilaan alentaa palolämpötilaa, mikä huonontaa palamisen hyötysuhdetta ja lisää päästöjä. Taloudelliselta kannalta ajateltaessa lämpölaitoksen tuote on energian toimitus. Järvimalmin jalostus ottaa oman osansa tuotetusta energiasta ja tälle muutoin myydylle kaukolämpöenergialle voidaan laskea hinta. Toisaalta jalostettu järvimalmi voidaan myydä, jolloin lämpölaitokselle syntyy toinen tulonlähde.

Työstä on rajattu pois järvimalmin sisältämien muiden arvokkaiden aineiden (esim. mangaani ja alumiini) huomioonottaminen. Työn tarkastelun ulkopuolelle jää sedimentin polttoaineeseen sekoitukseen ja kattilaan kuljetuksen kuuluva tarkastelu ja tekniset sovellukset. Työstä rajautuu pois myös raudan tuhkasta erottamiseen liittyvät tekniikat.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Hajautetut biojalostamot -hanke. Hankkeen koordinaattori on Itä-Suomen yliopisto ja hankkeen tavoitteena on lisätä hajautettujen



biojalostamojen tunnettuutta ja luoda uutta osaamista Itä-Suomen alueelle. Hankkeen toteuttajina toimii Karelia-ammattikorkeakoulu ja Itäsuomen yliopisto. Tämän opinnäytetyön ohjaa on Markus Hirvonen.

## 2 Keskeiset käsitteet

**Malmi** on taloudellisesti hyödynnettävissä oleva metalli rikastuma (Geologian tutkimuskeskus GTK 2012).

**Järvimalmi** toiselta nimeltään limoniitti on pohjaveden rautaioneista hapettunutta ja saostunutta rautahydroksidia, jota esiintyy järvissä (Hietala, Tervo & Nenonen).

**Suomalmi** on samanlaista malmia kuin järvimalmi, mutta se esiintyy soissa. (Hietala ym.).

**Pienen ja keskisuuren kokoluokan lämpölaitos** on lämpölaitos jonka suurin lämpöteho on alle 20 MW.

**Kemiallinen kinetiikka** käsittelee kemiallisten reaktioiden tapahtumisen nopeutta alku- tuotteista välivaiheiden kautta lopputuotteiksi (Tahvanainen 2013).

**Sykloni** on lämpölaitoksen savukaasujen puhdistukseen tarkoitettu laite. Savukaasun sisältämät hiukkaset poistuvat kaasusta syklonin aiheuttaman keskipakovoiman vaikutuksesta. (Jalovaara, Aho, Hietämäki & Hyytiä 2003, 64.)

**Diffuusiol liekki** tarkoittaa liekkiä, jossa palava kaasu ja paloilma ovat erillään toisistaan. Palavat kaasut kulkeutuvat liekkirintamalle eri puolilta kuin paloilma. (Bioenergia-tieto 2012.)

### **3 Malmin jalostus**

Malmin jalostuksessa malmin sisältämät metallit pyritään saattamaan jatkojalostuksen kannalta parempaan muotoon. Malmista pyritään erottamaan pois kiviaines, jolloin jäljelle jäävät metallit, joilla on taloudellista arvoa.

#### **3.1 Historia**

Ruotsin vallan aikaan Suomen malmien oikeus kuului kruunulle. Kruunu luopui malmin yksinoikeudesta 1723, jonka jälkeen säädettiin uusi kaivoslaki. (Puustinen 2003, 15.) Malmin jalostuksesta ei ollut Suomessa juurikaan tietoa tai kokemusta ennen vuotta 1910, jolloin Outokummusta löytyi kuparimalmiesiintymä. Aluksi malmi jalostettiin käsin, pesemällä ja erottelemalla malmikivet sivukivistä. Malmin sulatusta kokeiltiin ulkomailla, mutta kuljetuksen kustannussyistä sulatto päätettiin rakentaa Suomeen. (Kontkanen 2006.)

#### **3.2 Nykyaika**

Suomessa kaikki malmi tulee maaperästä (vuorimalmi), koska nykytekniikalla malmin kaivaminen maaperästä on taloudellisesti kannattavampaa, kuin järvimalmin nosto. Malmin jalostus alkaa malmin etsinnällä, joka tehdään koeporauksilla. Niiden avulla kartoitetaan malmiesiintymien taloudellinen kannattavuus. Kaivospiiri perustetaan paikkaan, jossa malmi on riittävän rikasta.

Kaivoksen perustamisen jälkeen malmi irrotetaan kallioperästä, jonka jälkeen se murskataan ja jauhetaan seuraavaan prosessiin sopivaksi. Sopivassa palakoossa oleva malmi rikastetaan, joko kemiallisesti tai mekaanisesti. Tässä vaiheessa malmin muusta kiviaineksesta erottuu mineraali- tai metalliaines. (Kauppila, Räisänen & Myllyoja 2011, 18.)

Malmi louhitaan irti kallioperästä joko avolouhoksella malmin ollessa lähellä maan pintaa tai maanalaisella louhoksella sen ollessa syvemmillä maaperässä. Malmin mukana tulee taloudellisesti arvotonta sivukiveä, josta malmi tulee erottaa. Avolouhoksilla sivukiven määrä vaihtelee Suomen metallikaivoksilla suhteissa 14,5:1–1:1 malmin määrään. Sivukiveä syntyy kaivoksen alkuvaiheessa vähemmän kuin lopussa. Maanalaisilla louhoksilla sivukiveä pyritään louhimaan huomattavasti vähemmän. Maanalaisten louhosten sivukiven suhde malmiin voi olla luokkaa 0,5:1. (Kauppila ym. 2011, 19–20.)

Louhittu malmi murskataan sopivaan palakokoon. Kuljetuslaitteisto rajoittaa malmikiven palakokoa, joten ylisuuret kivet rikotaan ennen kuljetusta. Ensimmäinen murskaus suoritetaan maanpinnalla murskaamossa yleensä leuka- tai karamurskaimella. Tämän jälkeen malmi yleensä murskataan ja seulotaan useassa vaiheessa sopivampaan palakokoon seuraavaa prosessia varten. Malmi hienonnetaan jauhatuksella niin pieneen palakokoon, että malmin sisältämien arvomineraalit ovat omina riittävän puhtaina rakeina. Tämä mahdollistaa arvomineraalien erottamisen rikastusprosessissa. Metallimalmit jauhetaan yleensä pyörivissä vaakasuorissa myllyissä vesilietteessä. (Kauppila ym. 2011, 22, 24.)

Rikastuksessa arvomineraalien pitoisuutta pyritään nostamaan rikasteessa, jolloin arvon sivukivi erottuu pois malmista. Metallin jalostuksessa rikastus tapahtuu yleensä vaahdotuksella, ominaispainoerotuksella, magneettisella rikastuksella tai liuotusmenetelmällä. (Kauppila ym. 2011, 26.)

### **3.3 Raudan pelkistys**

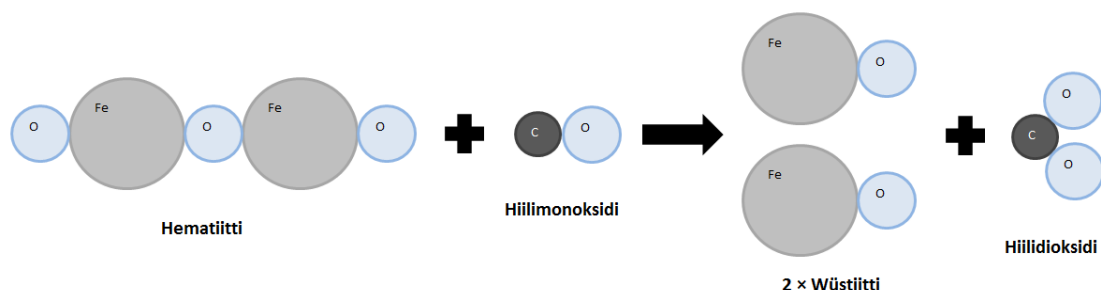
Rautamalmi sisältää raudan oksideja, joista on poistettava happi, jotta rauta saadaan käyttökelpoiseen muotoon. Malmi sisältää hematitiittiä ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ja magnetiittiä ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Näiden erotettavien arvoaineiden lisäksi malmi sisältää kuonaa muodostavia aineita, kuten piin, kalsiumin, alumiinin sekä magnesiumin oksideja. (Metallinjalostajat 2009, 20.)

Hapen poisto raudan oksideista tapahtuu pelkistämällä. Pelkistävänä aineena käytetään ainetta, joka pystyy erottamaan hapen raudan oksidista. Masuuniprosessissa raudan ok-

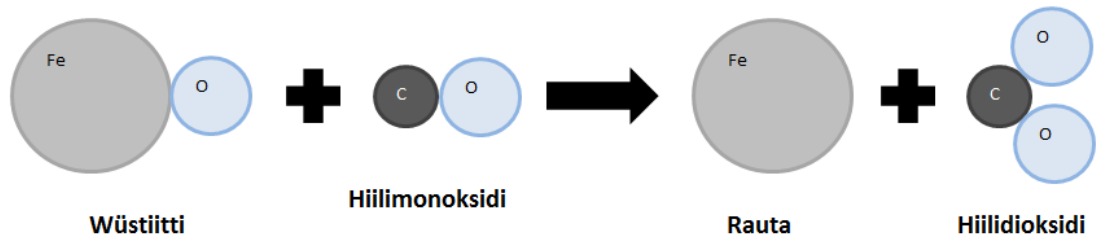
sidit pelkistetään hiilimonoksidilla (CO), vedyllä (H) ja hiilellä (C). Pelkistimet sitovat raudan oksidien hapen, jolloin muodostuu kaasua. Kaasut kulkeutuvat masuunikaasuina masuunista ulos. Hiilimonoksidia ja vetyä syntyy masuunissa koksien ja öljyn palaessa. Pelkistysreaktiot ovat endotermisiä, joten ne tarvitsevat lämpöä. Masuuniin puhallettava ilma esikuumennetaan 1 000–1 300 °C:seen ennen puhallusta. Esikuumennus tapahtuu polttamalla kierrätetyt masuunikaasut, jolloin syntyy lämpöenergiaa. (Metallinjalostajat 2009, 20.)

Nykyaikaisten masuunien alaosissa puhallusilmahormien läheisyydessä lämpötila on 2 000–2 400 °C, jolloin koksien hiili alkaa reagoida suoraan raudan oksidien kanssa. Palokaasut virtaavat masuunissa ylöspäin samalla pelkistäen raudan oksideja. Masuunissa alaspäin valuva malmi kuumenee, koska palokaasut luovuttavat malmiin lämpöä. Samalla palokaasujen lämpötila laskee. Poistuessaan masuunista palokaasujen lämpötila on 120–230 °C. (Metallinjalostajat 2009, 21.)

Masuunin yläosassa hematiitti ja megnetiitti reagoivat hiilimonoksidin kanssa (kuva 1), jolloin syntyy wüstiittiä (FeO). Tätä reaktiota sanotaan epäsuoraksi pelkistymiseksi, koska hiili ei osallistu suoraan reaktioon. Osa wüstiitista pelkistyy hiilimonoksidin vaikutuksesta raudaksi (kuva 2) jo masuunin yläosassa. Koksien seassa polttoaineena voidaan käyttää öljyä, jolloin ylöspäin virtaavat pelkistävät kaasut sisältävät myös vetyä. Vety toimii myös pelkistäjänä, jolloin lopputuotteena syntyy vettä. Masuunin yläosassa lämpötila ei ole riittävän korkea, jotta hiili reagoisi suoraan raudan oksidien hapen kanssa. (Metallinjalostajat 2009, 21.)

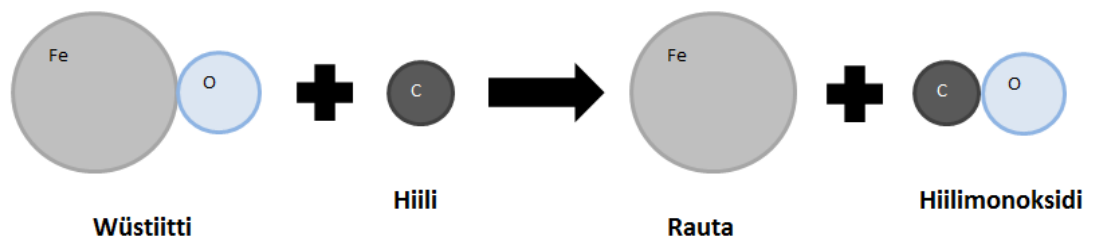


Kuva 1. Hematiitin pelkistysreaktio wüstiitiksi

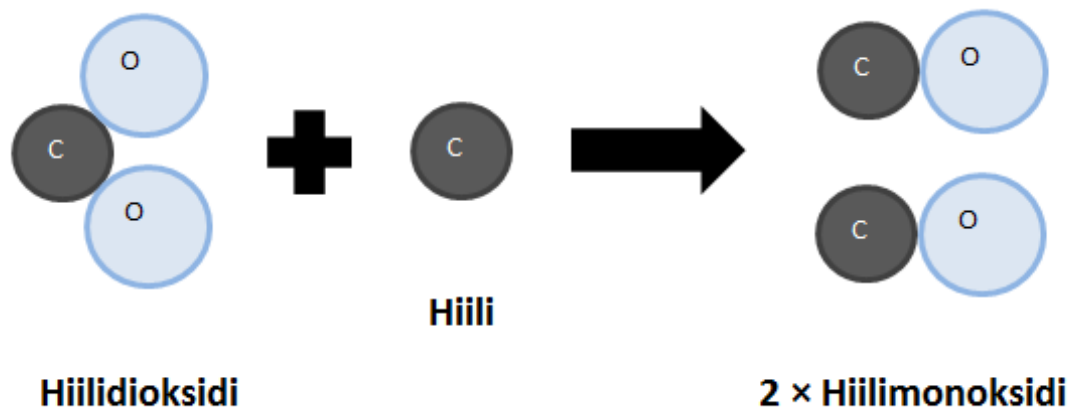


Kuva 2. Wüstiitin pelkistyminen hiilimonoksidin vaikutuksesta

Hiilimonoksidin ja wüstiitin reagoidessa syntyy hiilidioksidia (kuva 3). Hiilidioksidi reagoi kuitenkin välittömästi hiilen kanssa synnyttäen hiilimonoksidia (kuva 4). Täten hiilimonoksidi toimii vain välittäjänä pelkistyksessä. Hiili pelkistää myös suoraan raudan oksideja masuunin alaosassa. Suora pelkistys vaatii paljon lämpöenergiaa ja noin 30 % koko lämmöstä kuluu masuunin alaosassa tapahtuviin pelkistysreaktioihin. (Metallinjalostajat 2009, 21.)



Kuva 3. Wüstiitin suora pelkistys



Kuva 4. Hiilidioksidin reagointi hiilen kanssa

## 4 Järvimalmi

Järvimalmin synnylle on välttämätöntä, että järvessä on vettä läpäisevä sorakerros. Malmi saostuu 1–5 metrin syvyyteen hiekkapohjaisiin järviin rantojen läheisyyteen. Rauta synnyttää saostuessaan 20–30 cm:n malmikerroksia. Järvimalmin syntyyn luultiin aiemmin liittyvän rautabakteeri, mutta sittemmin on todistettu, että malmi syntyy saostumalla pohjavedestä. (Vartiainen 1992, 17–18.)

Rauta liukenee pohjaveteen kivi- ja maalajien rapautuessa. Pohjavesi kulkeutuu järviin joko vedenalaisten lähteiden kautta tai kulkeutumalla vettä läpäisevien kerrosten läpi. Pohjaveden sisältämä rauta saostuu jonkin kiinteän kappaleen ympärille, jolloin syntyy järvimalmia. Järvimalmia syntyy runsaasti järvissä, joissa on paljon vettä läpäiseviä maakerroksia (sora tai hiekka). (Vartiainen 1992, 17–18.) Järvimalmi syntyy saostumalla pohjavesien sisältämästä kahdenarvoisista ferroioneista. Ferroioni hapettuu ferri-ioniksi ja saostuu, jolloin syntyy järvimalmia (Tuisku & Piispanen 2005).



Kuva 5. Järvimalmihauleja Loitimolta (Kuva: Tomi Onttonen)

Järvimalmi on uusiutuva luonnonvara. Se saostuu samoille paikoille joista sitä on nostettu. Järvimalmin uudistumisnopeus riippuu pohjavesivirtauksista sekä virtaavan pohjaveden rautapitoisuudesta. Järvimalmi sisältää raudan lisäksi mangaania ja fosforia.

(Vartiainen 1992, 18.) Järvimalmiesiintymät sijaitsevat yleensä järvien rantojen läheisyydessä (Tuisku & Piispanen 2005).

Järvimalmityyppejä on useita ja malmin väritys voi olla keltaista, ruskeaa tai lähes mustaa. Koostumus voi olla joko kiinteää tai haurasta. Malmi voidaan jaotella myös ulkonäön perusteella. Malmi voi olla hauli-, herne-, raha-, korppu- tai perunamalmia, joista herne- ja haulimalmit ovat parhaita laadultaan ja korppumalmi huonointa. Levymäistä korppumalmia on myös vaikeinta nostaa. (Vartiainen 1992, 18.) Kuvassa 5 näkyy 17.4.2013 Loitimolta nostettua järvimalmia. Kuvan järvimalmi on haulimaista ja se oli sekoittuneena savimaiseen kovaan sedimenttiin järven pohjassa.

Järvimalmin rautapitoisuus voi vaihdella suuresti eri järvissä, sekä samassa järvestä eri nostopaikoilla. Möhkön ruukin nostamassa malmissa rautapitoisuus oli keskimäärin 36,9 % kuiva-aineesta (vuosina 1858–1907). Järvimalmi sisältää keskimäärin 0,336 % fosforia. (Vartiainen 1992, 18.) Järvimalmi voi sisältää parhaimmillaan yli 60 % rautaa (Tuisku & Piispanen 2005).

Järvimalmi sisältää vettä, joka tulee poistaa ennen malmin masuunijalostusta. Veden haihdutus on tarkoitus suorittaa tässä tutkimuksessa puupolttoainetta käyttävässä lämpölaitoksessa. Järvimalmi ja mahdollinen sedimentti sekoitetaan polttoaineen sekaan ja syötetään lämpölaitoksen kattilaan. Kattilassa vesi haihtuu järvimalmista. Järvimalmi on tarkoitus kerätä tuhkasta talteen magneetilla ja myydä jatkojalostukseen.

#### **4.1 Historia**

Lounais-Suomen ruukkien pääraaka-aine oli Ruotsista tuotu vuorimalmi. Savon, Pohjois-Karjalan ja Kainuun alueella esiintyi runsaasti järvimalmia, jota alueiden rautaruukit alkoivat hyödyntää 1700-luvulla. Itä-Suomeen rakennettiin 1800-luvun alkupuolella runsaasti järvimalmin jalostukseen soveltuvia harkkohyttejä ja masuuneja. (Vartiainen 1992, 5.) Suomessa 1800-luvulla rautaruukkien pääraaka-aineita olivat järvi- ja suomalmi. Suomen järvimalmivarannoista ei ole tehty kattavaa selvitystä, mutta suurin osa malmista sijaitsee Sisä- ja Itä-Suomessa. (Puustinen 2003, 300.)



Vanhimmissa kuilu-uuneissa rautaa valmistettiin niin sanotulla suoralla menetelmällä, jossa jokaista panosta varten muurattiin oma uuni savesta. Uuni täytettiin puulla ja malmilla. Ilman puhallukseen hyödynnettiin tuulta ja palkeita. Puhalluksen loputtua uuni murrettiin ja pesästä poistettiin raudan ja kuonan sekainen kappale, joka esitaottiin niin puhtaaksi raudaksi kuin mahdollista. Esitaonnan jälkeen kappale kuumennettiin ja taottiin uudelleen kiinteämmäksi. 1400-luvun lopulla käytettiin talonpoikaisuuneja, jotka olivat isompia kuin ensimmäiset kuilu-uunit. Talonpoikaisuuneja voitiin myös käyttää useita kertoja. Talonpoikaisuunit muurattiin kivistä ja savilaastista. (Vartiainen 1992, 6.)

Talonpoikaisuunit olivat yleisiä Suomessa vielä 1600- ja 1700-luvulla. Harkkohenittien tekniikan kehityksen myötä ne syrjäyttivät talonpoikaisuunit 1800-luvulla. Harkkohenittisissä valmistettiin teollisesti kankirautaa, joka oli taottavissa. Teollisen tuotannon myötä uuneja suurennettiin ja puhallustehoa kasvatettiin, jolloin uunien lämpötila kohosi niin korkealle, että hiili alkoi liueta rautaan enenevissä määrin. Hiilipitoisuuden lisäys aiheutti sen, että uuneihin muodostui takomiskelvotonta takkirautaa. Takkiraudan taottavuuden parantamiseksi takkirauta mellotettiin, jolloin liika hiili poistui raudasta. Mellotukseen käytettiin erilaisia ahjoja. (Vartiainen 1992, 6.)

Itä-Suomessa teollisuus jalosti 1800-luvulla paljon malmia, koska alueella oli runsaasti raaka-aineita. Lisäksi kosket tarjosivat käyttövoimaa ja hyvät kulkureitit. Savon ja Karjalän ratojen valmistuttua 1800-luvun lopulla liikenneyhteydet paranivat entisestään. Venäläiset rahoittivat suuren osan Itä-Suomen rautatehtaista. (Vartiainen 1992, 5–6.)

Järvimalmista jalostettu kankirauta oli huonolaatuista järvimalmin sisältämän fosforin takia. Fosfori teki kankiraudasta kylmäaurasta, mutta tämä ongelma poistui uuden mellostekniikan kehityksen myötä. Uusi tekniikka oli putlaus, jossa polttoaine ja rauta eivät olleet samassa tilassa. Raudan sulatus tapahtui suljetussa lieskauunissa. Putlaustekniikan yleistyttyä se alkoi syrjäyttää harkkohenittit, koska järvimalmista saatiin hyvälaatuista rautaa halvemmalla ja tehokkaammin kuin harkkohenittistä. Järvimalmia raaka-aineena käyttäviin ruukkeihin rakennettiin 1850-luvulla putlauslaitoksia. (Vartiainen 1992, 6–7.)

Itä-Suomen järvimalmiraudasta suuri osa meni vientiin Venäjälle. Vienti hidastui 1880-luvulla, kun Venäjä asetti kiintiöt joiden yli menevästä viennistä tuli maksaa tullia. Seurauksena Suomen raudan tuotantoa tuli supistaa ja 1900-luvun taitteessa Suomen raudan vienti Venäjälle väheni jyrkästi Venäjän oman tuotannon kasvaessa. Kotimaassa raudan hinta aleni ja suurin osa Itä-Suomen järvimalmiruukeista lopetti toimintansa 1900-luvun alussa. (Vartiainen 1992, 7.)

## **4.2 Pasutus**

Malmin pasutuksessa malmista on tarkoitus poistaa vesi sekä haitallisia aineita, kuten rikki- ja hiilihappoa, jolloin malmin jatkojalostus helpottuu. Vesi ja hiilihappo jäädyttävät masuunia haihtuessaan, mikä huonontaa masuunin toimintaa. Pasutettu malmi myös pelkistyy helpommin masuunissa. (Vartiainen 1992, 26.) Pasutus suoritettiin ennen järvien rannalla kasaamalla puuta ja järvimalmia kerroksittain. Kasa sytytettiin, jolloin puun palamisen tuottama lämpö pasutti malmin.

## **4.3 Järvimalmimasuunit**

Rautamasuunit käyttivät polttoaineenaan koksia tai puuhiiltä. Polttoaine ja malmi panostetaan uunin yläosassa olevasta panostusaukosta. Rauta ja kuona kasautuvat masuunin pohjalla sijaitsevaan pesään, josta ne poistetaan ajoittain. Sula rauta kasaantuu pesän pohjalle, josta se valutetaan muotteihin. Kuona jää raudan päälle kevyempänä, joten sen erottaminen on helppoa. Polttoilma puhalletaan hormeja pitkin masuunin pesän yläpuolelta. Panostason alapuolella ovat torvet, jotka johtavat ylöspäin nousevat palokaasut pois masuunista. Palamisilmaa puhallettaessa masuunin panostusaukko on pidettävä suljettuna. (Vartiainen 1992, 10.)

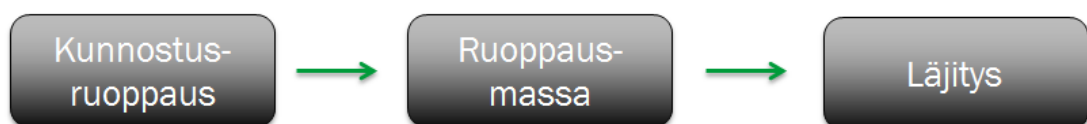
Masuunin panosaukkoon kaadetaan panos, joka sisältää malmia, puuhiiltä ja kalkkia. Panos kuumenee masuunin yläosassa, jolloin se kuivuu. Malmi pelkistyy asteittain panoksen valuessa masuunin kuilussa alaspäin. Pelkistykseen vaaditaan hiilimonoksidia, jota syntyy polttoaineen (yleensä puuhiiltä) palaessa. Pelkistyminen alkaa epäsuorana pelkistymisenä noin 200 °C:ssa. Masuunissa alemmas mentäessä lämpötila nousee 800

°C:seen, jolloin alkaa malmin suora pelkistyminen. Suorassa pelkistymisessä panoksen sisältämä hiili vaikuttaa suoraan malmiin pelkistävästi. Masuunissa panoksen kalkki hajoaa kalsiumoksidiksi, joka sitoo piihappoa ja rikkiä muodostaen kuonaa. (Vartiainen 1992, 10.)

Masuunit olivat 1800-luvulla 20–30 metriä korkeita. Samalla vuosisadalla masuuneissa alettiin käyttää kylmäpuhalluksen sijaan lämmitettyä puhallusilmaa. Puhallusilma lämmitettiin masuunikaasujen kierrätystä apuna käyttäen. (Väisänen 2010, 10.) Nykyaikaiset masuunit ovat paljon suurempia, jopa 70 metriä korkeita ja pesän halkaisija luokkaa 15 metriä. Suurimmat rautamasuunit tuottavat 12 000 tonnia raakarautaa vuodessa. Nykyaikaisissa rautamasuuneissa polttoaineena toimii kivihiilestä valmistettu koksi. (Metallinjalostajat 2009, 20.) Nykyaikaisissa masuuneissa on siirrytty käyttämään kaksin sijasta öljyä ja sähköä, sekä puhallusilman sijasta puhdasta happea. Teräksen tuotannossa masuuniprosessille ei ole varteenotettavaa korvaavaa menetelmää. (Väisänen 2010, 11 & 33.)

## 5 Ruoppauksen toimintamallit

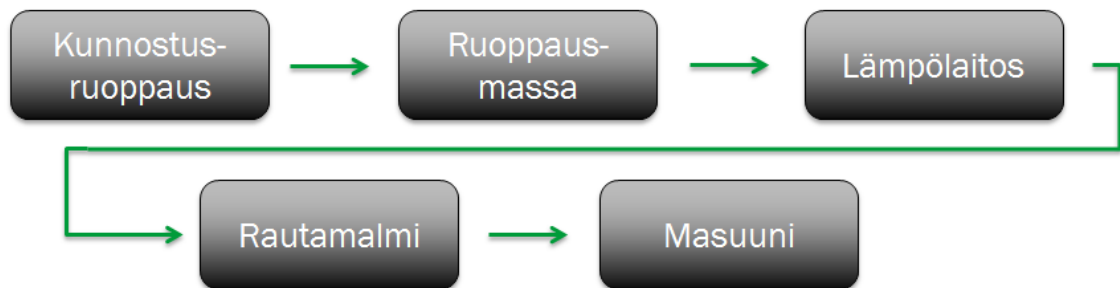
Nykyisessä toimintamallissa ruoppausmassa siirretään ruoppauslaitteesta läjitysalueelle joko pumppaamalla tai maansiirto kalustoa käyttäen (kuva 6). Joissakin tapauksissa järvestä ruopattu sedimentti voidaan hyötykäyttää, joka on läjitystä edullisempi ratkaisu. Nykyinen toimintamalli on yksinkertainen ja siihen ei liity useita eri toimijoita. Läjitysalueelle sijoitetun sedimentin sisältämät haitalliset aineet jäävät läjitysalueelle.



Kuva 6. Nykyisen toimintamallin kuvaus

Toisessa toimintamallissa ruoppausmassa kuljetetaan ruoppausalueelta läheiselle lämpövoimalalle, jossa ruoppausmassa sekoitetaan polttoaineeseen ja poltetaan. Ruop-

pausmassan sisältämä järvimalmi jalostuu prosessissa, jolloin se voidaan myydä jatkojalostukseen (kuva 7).



Kuva 7. Vaihtoehdoisen toimintamallin kuvaus

Vaihtoehdoisessa toimintamallissa on enemmän toimijoita kuin nykyisessä toimintamallissa, joka voi hankaloittaa toimintaa. Vaihtoehtoinen toimintamalli tuo säästöjä sedimentin läjityksessä, mutta sedimentti tulee kuljettaa kauemmas ruoppausalueelta. Ruopatun sedimentin sisältämät haitta-aineet ovat sedimentin kuivumisen jälkeen helpommin hallittavissa.

## 6 Järvien ruoppaus

Järvien kunnostushankkeissa yhtenä kunnostusvaihtoehtona on ruoppaus. Yleensä ruoppaus ei ulotu kovin syväälle. Järven pohjasta poistetaan pohja-ainesta ja sedimenttiä alle metrin paksuudelta. (Viinikka, Mäkinen & Ulvi 2005, 211.) Pilaantumaton ruoppausmassa ei ole jätettä, joten sitä ei luokitella jätteenpolttoaineeksi eikä se vaadi jätteenpolttolupaa (Jätelaki 646/2011 3 §). Pilaantunut ruoppausmassa on jätettä, jolloin sen käyttäminen polttoaineena vaatii jätteenpolttoluvan. Sedimentti on pilaantunutta kun siihen on kertynyt ympäristön kannalta haitallisia aineita yli ympäristöministeriön asettaman raja-arvon (Ympäristöministeriö 2004, 23).

## 6.1 Ruoppausmenetelmät

Ruoppausmenetelmistä yleisin on kauharuoppaus. Kauharuoppaus voidaan tehdä rannalta, rantavedestä, kelluvalta lautalta tai ruoppauksen ajankohdasta riippuen jään päältä. Ruoppauskoneeksi käy pyörä- tai tela-alustainen kaivinkone tai traktorikaivuri. Ruoppaukseen on myös kehitetty kelluvia ruoppausaluksia. Kaivulaitteena käytetään kuokkakauhaa tai erikoistapauksissa pumppukauhaa. (Viinikka ym. 2005, 213–214.)

Kauharuoppaus soveltuu kaikille maalajeille hyvin, lukuun ottamatta erittäin vesipitoista liejua. Yleensä muta ja turve hajoavat ja liettyvät kauharuoppauksessa. Tällaisissa paikoissa imuruoppaus voi olla ainoa vaihtoehto. Järvien kunnostuksissa ei yleensä kaiveta kovia maalajeja. Sora- ja hiekkapitoisia maalajeja on helppo kaivaa, mutta ne hajoavat helposti vedessä. Savimassoja on helppo kaivaa ja kuljettaa. Kuokkakaisu voidaan suorittaa myös paikoissa jossa on paljon vesikasvien juuristoa. Juuret voiva jopa helpottaa kaivamista sitomalla maa-ainesta ja estää sen hajoamista. (Viinikka ym. 2005, 213–214.)

Imuruoppauksessa vesistön pohjalta poistettava massa imetään pumpulla ruoppaajaan. Ruoppaajasta massa pumpataan paineputkistoa pitkin läjitysalueelle. Erittäin pehmeät sedimentit saatetaan voida imeä pohjasta ilman massan sekoitusta veteen. Kovemmillä sedimenteillä massa sekoitetaan leikkurilla, vesisuihkulla tai kauhapyörällä, jonka jälkeen sedimentti imetään pois imuputkella. Imuruoppauksessa imetään sekä vettä, että sedimenttiä putkia pitkin läjitykseen. Vesi pienentää kitkaa putkistossa. Imuruoppauksella keskimääräinen imetyn massan kiintoainepitoisuus on 10 %. Pehmeää savea ja eloperäistä sedimenttiä imettäessä kiintoainepitoisuus voi olla korkeampi, mutta hiekkaa pumpattaessa yleensä alle 10 %. (Viinikka ym. 2005, 216.)

Imuruoppauksessa putkistossa tulee olla vähintään 3,5 m/s virtausnopeus, muuten massa erottuu putkeen, josta seuraa putkivastuksen kasvu. Pumppausmatka on pienillä pumppaajilla kohtuullisen rajattu. Pumppausmatkaa voidaan kasvattaa välipumppaamalla. Imuruoppaus kannattaa vain suurissa ruoppauskohteissa. Imuruoppaus vaatii noin kolme kertaa ruopattavan alueen kokoisen läjitysalueen. Imuruoppaus soveltuu hyvin hienojakoisille sedimenteille, joiden nostaminen kauhalla on vaikeaa. Imuruoppauksessa ruoppauskaistan leveys on 20–60 metriä koneesta riippuen. (Viinikka ym. 2005, 216.)

Pumppukauharuoppaus on kauha- ja imuruoppauksen yhdistävä ruoppausmenetelmä. Pumppukauhassa pumppujen nielut on sijoitettu kuokkakauhan pohjalle. Pumppukauhaa voidaan käyttää tavallisen kauhan tilalla normaalissa kauharuoppaukseen soveltuvassa kalustossa. Massa pumpataan kauhasta haluttuun paikkaan läjitykseen. Pumppukauhalla ruopattu massa sisältää keskimäärin 10 % kiintoainesta, mikä on yhtä paljon kuin imuruoppauksessa. Pumppukauhassa on suurempi massan irrotusvoima kuin imuruoppauksen jyrksimessä. Pumppukauha tyhjenee itsestään kaivun aikana, joten ruoppauskoneen ei tarvitse kääntyä kauhan tyhjennykseen. (Viinikka ym. 2005, 216–217.)

## 6.2 Ruoppausmassojen käsittely

Rehevöityneessä matalassa järvessä ruoppauksesta syntyy massaa läjitykseen keskimäärin yksi kuutio ruopattua neliometriä kohden, joten massojen määrät muodostuvat suuriksi. Suuri massan määrä aiheuttaa kustannuksia kuljetuksessa ja läjityksessä. Massat sijoitetaan yleensä läjitykseen, mutta niitä voidaan käyttää myös esimerkiksi peltoviljelyssä, maisemointityössä tai viherrakentamisessa. Hyötykäyttö voi vaikuttaa oleellisesti ruoppauksen kustannuksiin. (Viinikka ym. 2005, 217.)

Ruoppausmassojen läjitys tapahtuu lähes poikkeuksetta kuivalle maalle, koska vesistöön läjittäminen aiheuttaa ympäristöhaittoja (esim. veden voimakas samenneminen, kiintoaine- ja ravinnepitoisuuksien kasvu sekä alueen mataloituminen). Maalta tai jäältä suoritettavassa kaivuruoppauksessa ruopatut massat lastataan suoraan maansiirtokalustoon ja kuljetetaan läjitykseen. Ruoppausaluksella tai kaivinkoneella ja työlautalla suoritettavassa ruoppauksessa massat kuljetetaan joko proomulla tai pumppuputkella. Massat lastataan proomulta maansiirtokalustoon kaivinkoneella ja maansiirtokalusto kuljettaa massat läjitykseen. Imuruoppauksessa massat johdetaan putkea pitkin suoraan läjitysalueelle. (Viinikka ym. 2005, 217–218.)

Läjitysalue on suunniteltava siten, että ruoppausmassat pysyvät läjitysalueella. Tämä edellyttää niin korkeaa paikkaa, ettei järvivesi voi missään olosuhteissa nousta läjitysalueelle. Ruoppausmassan ominaisuudet (plastisuus, vesipitoisuus, saastuneisuus ja eloperäisen aineksen määrä) vaikuttavat läjitysalueen valintaan. Kustannuksien kannalta

läjitysalue tulisi olla mahdollisimman lähellä ruoppauskohdetta. Läjitysalueen kuivumisvedet eivät saa virrata suoraan takaisin vesistöön. Veden virtauksen on oltava hidasta, että kiintoaine ehtii laskeutua. Suurin osa kuivumisvedestä poistuu läjitysalueelta ylivuotopadon kautta. Pienempi osa suodattuu alapuoliseen maahan ja sitä kautta pohjaveteen tai vesistöön. Imuruoppauksessa läjitysalueeseen joudutaan rakentamaan penkkeet. (Viinikka ym. 2005, 218–219.)

### 6.3 Ruoppauksen kustannukset

Ruoppaus maksaa 1,5–4,2 €/m<sup>3</sup> ktr (kiintoteoreettinen kuutiomäärä), riippuen ruoppausmenetelmästä ja ajankohdasta. Jään päältä tapahtuvaan ruoppaukseen tarvittava jään vahvistus maksaa 0,15 €/m<sup>2</sup>. Edullisin ruoppausmenetelmä on rannalta kaivu kesä aikaan, joka maksaa noin 1,5 €/m<sup>3</sup> ktr. Sama toimenpide talvella maksaa 2,2 €/m<sup>3</sup> ktr. Imuruoppauksen hinta on 2,9 €/m<sup>3</sup> ktr, joka asettuu ruoppauskustannuksien keskivaiheelle. Talvella jään päältä tapahtuva ruoppaus maksaa 3,5 €/m<sup>3</sup> ktr ja kesällä lautalta tapahtuva kaivu joka on kallein ruoppausmenetelmä, maksaa 4,2 €/m<sup>3</sup> ktr. (Viinikka ym. 2005, 222.)

Massojen kuljetus ja läjitys aiheuttaa merkittävän osan ruoppauksen kustannuksista. Yli 1,5 km kuljetusmatka nostaa kustannuksia olennaisesti. (Viinikka ym. 2005, 218.) Vesivälskäri (2001) arvioi ruoppauksen kustannuksiksi rannalta ruopatessa 5 045–8 409 €/ha, jäältä ruopatessa 13 455–20 182 €/ha, sekä imuruopatessa 6 727–16 818 €/ha. Näissä kustannusarvioissa ei ole kerrottu ruoppauksen syvyyttä.

### 6.4 Ruopatun sedimentin koostumus

Sedimentti on kiintoainekerrostuma vesistön pohjassa. Sedimentti muodostuu vesistöjen pohjaan ulkoisten voimien vaikutuksesta. Sedimentti sisältää valuma-alueelta huuhtoutuneita mineraalihiukkasia, mineraalihiukkasiin sitoutuneita orgaanisia aineita sekä kemiallisia sakkoja. Sedimentin mineraalihiukkasten koko ja orgaanisten aineiden pitoisuus vaikuttaa haitallisten aineiden sitoutumiseen. Useimmat metallit ja orgaaniset hait-

ta-aineet sitoutuvat helpommin pieniin kuin isoihin partikkeleihin. (Valtion ympäristöhallinto 2011.)

Sedimenttien koostumus vaihtelee voimakkaasti eri järvissä. Vaihtelua voi olla myös pohjan eri kohdissa samassa järvessä. Vesistöihin on huuhtoutunut ihmistoiminnan seurauksena suuria määriä kemikaaleja ja raskasmetalleja (Valtion ympäristöhallinto 2011). Vesistössä haitta-aineet ovat sitoutuneet sedimenttiin, joten sedimentin koostumukseen vaikuttaa suuressa määrin paikalliset olosuhteet (Valtion ympäristöhallinto 2011).

Taulukossa 1 on pintasedimentin koostumuksien keskimääräiset alkuainepitoisuudet. Aineistosta puuttuu sedimentin klooripitoisuus, joka on merkittävä ajateltaessa sedimentin soveltuvuutta polttoon. Polton kannalta myös kalium, natrium ja rikki ovat merkittäviä alkuaineita. Sedimentin vesipitoisuus vaikuttaa myös olennaisesti sen palamisen ominaisuuksiin. Vesipitoisuus vaihtelee jonkin verran sedimenttipatjassa syvyyden mukaan ollen noin 70–80 %.

Taulukko 1. Suomen järvien pintasedimentin keskimääräinen kuiva-aineen alkuainekoostumus. A = järvien pinta-ala ja syvyys on näytteenottoaikkojen syvyys (Mäkinen & Pajunen 2005, 174)

Ryhmä	Al (%)	Ba (ppm)	Ca (%)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Fe (%)	K (%)	Mg (%)	Mn (%)	N (%)	Na (%)
1	1,89	133	0,45	9	35	20	2,79	0,23	0,37	0,07	0,99	0,02
2	2,21	215	0,47	15	46	25	6,23	0,26	0,45	0,21	1,31	0,03
3	2,61	281	0,43	22	51	28	8,67	0,31	0,55	0,43	1,67	0,04
Keskiarvo	2,24	210	0,45	15	44	24	5,90	0,27	0,46	0,24	1,32	0,03

Ryhmä	Ni (ppm)	P (ppm)	S (ppm)	Sr (ppm)	Ti (ppm)	V (ppm)	Zn (ppm)	C (%)	Fe/Mn	C/N	A (km <sup>2</sup> )	Syvyys (m)
1	15	1391	2359	30	818	35	83	14,33	46,20	11,57	88	10
2	20	1656	2062	31	913	50	115	10,88	52,18	10,50	235	17
3	23	1969	1399	31	1133	61	127	6,79	25,93	9,49	332	22
Keskiarvo	19	1672	1940	31	955	49	108	10,67	41,44	10,52	218	16

## 6.5 Sedimentin tuhkaa muodostavat aineet

Sedimenttien kuiva-aineen hehkutushäviö on Suomessa keskimäärin 20 % (Pajunen 2004, 265). Hehkutushäviö kuvaa sedimentin kuiva-aineen orgaanisen aineen määrää (Schultz, Vuori & Wallin 2011, 1). Hehkutushäviötä määritettäessä oletetaan, että kaikki orgaaninen aines poistuu hehkutuksen aikana. Sedimentin pienestä hehkutushäviöstä johtuen sedimentin poltossa muodostuu paljon tuhkaa.



Sedimentin poltosta syntyvä tuhka olisi hyvä saada hyötykäyttöön, mutta tuhkalannoitteessa raaka-aine voi poiketa 3 % sallituista raaka-aineista, mikäli tuhkaa käytetään metsien lannoitukseen. Tuhkanlannoitteen raaka-aineen tulee olla mekaanisesti tai sähköisesti erotettua lentotuhkaa tai kattilan pohjatuhkaa, joka on peräisin puhtaasta puumateriaalista, peltobiomateriaalista tai turpeesta. (MMM 24/11, 7, 9).

## **7 Puupolttoainetta käyttävien lämpölaitosten tekniikka**

Puupolttoaine käyttöiset lämpölaitokset käyttävät polttoaineenaan pääsääntöisesti haketta. Joissakin tapauksissa lämpölaitokset voidaan suunnitella käyttämään pellettejä. Puupolttoaineiden rinnalla voidaan polttaa myös turvetta ja fossiilisia polttoaineita kuten kivihiiltä. Pienen kokoluokan lämpökattilat ovat yleensä kiinteän arinan kattiloita, joissa polttoaineen palaminen tapahtuu arinan päällä. Pienessä ja keskisuuressa kokoluokassa on myös liikkuvalla arinalla varustettuja kattiloita, joissa polttoainetta ja tuhkaa liikutetaan mekaanisesti eteenpäin arinalla kohti tuhkanpoistojärjestelmää.

Pienen ja keskisuuren kokoluokan kattiloissa on myös kaasuttavia kattiloita, joissa palaminen tapahtuu kahdessa eri vaiheessa. Ensin polttoaine kaasutetaan, minkä jälkeen kaasu poltetaan eri polttimella. Tämä mahdollistaa myös pienemmän kokoluokan CHP -tekniikan. Suuressa kokoluokassa yleisin kattilatyyppe on leijupetikattila, jossa on yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto (CHP). Leijupetikattiloissa polttoaine syötetään kattilaan, jossa se palaa leijuvassa vyöhykkeessä. Tämä muodostuu puhaltamalla ilmaa, mikä saa hiekan leijumaan. Hiekka nopeuttaa lämmönsiirtoa ja parantaa palamista. Hiekka kiertää yleensä savukaasujen mukana, ja se erotellaan syklonilla ja kierrätetään takaisin kattilaan.

### **7.1 Palamisen vaiheet**

Kiinteän polttoaineen palamisessa on eri vaiheita. Ensin partikkeli lämpenee kuivumislämpötilaan, jossa partikkelin sisältämä kosteus poistuu. Kosteuden poistumisen jälkeen alkaa pyrolyysivaihe, jota seuraa jäännöshiilen palaminen. Pienissä partikkeleissa pala-

minen tapahtuu vaiheittain, mutta suurissa polttoainepartikkeleissa (esim. halko) kaikki palamisen vaiheet voivat tapahtua samaan aikaan yhdessä partikkelissa. Kiinteän polttoaineen paloreaktion nopeutta säätelevät sen kemialliset, fysikaaliset ja rakenteelliset ominaisuudet. Palaminen vaatii aina polttoainetta, riittävän lämpötilan ja happea. Kattiloissa tehonsäätö tapahtuu pääasiassa polttoaineen syöttöä säätelemällä. Palamiseen voidaan vaikuttaa myös palolämpötilan (ilman esilämmitys) tai hapen syötön säädöllä. (Raiko, Saastamoinen, Hupa & Kurki-Suonio 2002, 188.)

Kiinteän polttoaineen palamisessa lämpötila on niin korkea, että vesi höyrystyy lähellä kiehumispistettä. Aineensiirto on nopeaa, koska veden höyrystyessä sen tilavuus laajenee, joka synnyttää paine-eron. Lämmönsiirto nopeus rajoittaa kuivumisnopeutta. Polttoaine lämpenee sekä kaasusta siirtyvän, että kaasusta säteilevän lämmön johdosta. Syttymiseen vaikuttaa hiukkaskoko, kaasun lämpötila, kaasun happipitoisuus sekä polttoaineen ominaisuudet. Biopolttoaineilla haihtuvien aineiden osuus on suuri, joka osaltaan alentaa syttymislämpötilaa. (Raiko ym. 2002, 189, 192.)

Pyrolyysissä polttoaineen sisältämät haihtuvat aineet muuttuvat lämmön vaikutuksesta kaasu- ja tervamaiseen muotoon. Pyrolyysikaasut kulkeutuvat partikkelin pintaan diffuusion ja kaasuvirtauksen aiheuttaman paine-eron vaikutuksesta. Palamisolosuhteissa pienien partikkelien pyrolyysinopeutta rajoittaa kemiallinen kinetiikka, kun suurissa partikkeleissa rajoittavana tekijänä on lämmön- (ympäristöstä partikkeliin) tai aineensiirto (tuotteiden poistuminen partikkelista). Partikkelikoon ollessa 50 – 500 mikrometriä pyrolyysinopeuteen vaikuttavat sekä lämmön- ja aineensiirron nopeudet, että kemiallinen kinetiikka. (Raiko ym. 2002, 192–193.) Puupolttoaineita käytettäessä partikkelien koko on aina verrattain suuri, jolloin rajoittavaksi tekijäksi voidaan ajatella siirtoprosessien nopeudet.

Puupolttoaineilla haihtuvien aineiden määrä on suuri (n. 80 %) verrattuna hiileen (10–40 % riippuen hiiltymisasteesta). Puupolttoaineiden palaessa noin puolet syntyvästä lämpöenergiasta syntyy pyrolyysivaiheessa. Pyrolyysi ja jäännöshiilen palaminen eroavat toisistaan suuresti. Pyrolyysikaasujen muodostus edellyttää lämmönsiirtoa ympäristöstä polttoaineeseen. Jäännöshiilen palamisessa reagoivat molekyylit (happi) siirtyvä diffuusion vaikutuksesta kappaleen pinta- ja sisäosiin, jossa ne reagoivat heterogeenisesti jäännöshiilen kanssa. Partikkelien lämpötila ja koko vaikuttavat jäännöshiilen pa-

laminopeuteen merkittävästi. Suurella partikkelikoolla palamisnopeutta rajoittaa hapen diffuusio rajakerroksen läpi partikkelin pinnalle, ja pienellä partikkelikoolla rajoittava tekijä on kemiallinen kinetiikka. (Raiko ym. 2002, 193, 202.)

## **7.2 Kattilatekniikka**

Lämpölaitoskokoluokan kattiloissa on puupolttoaineille kaksi yleistä vaihtoehtoa, joko leijupeti- tai arinakattila. Kolmantena vaihtoehtona on poltinpoltto. Puupolttoaineen tulee olla erittäin hienossa partikkelikoossa, jotta se soveltuu poltinpolttoon.

### **7.2.1 Arinapoltto**

Pienissä ja keskisuurissa laitoksissa arinapoltto on yleisin kiinteän polttoaineen polttoratkaisu. Arinakattiloita on 15 – 80 000 kW teholuokassa, jossa pienimmät ovat omakotikokoluokan kattiloita ja suurimmat ovat teollisuuskattiloita. Yli 5 MW kattilat ovat Suomessa nykyään usein leijupetikattiloita, ja tämän teholuokan alapuolella arinakattilat ovat yleisimpiä kattilaratkaisuja. Arinakattilat soveltuvat monille eri polttoaineille ja erilaisia arinarakenteita on monia. (Raiko ym. 2002, 466.) Arinakattiloiden hyötysuhde on 85 – 87 % (Jalovaara ym. 2003, 18).

Polttoaine palaa arinalla normaaleja palamisen vaiheita noudattaen, joten ensin haihtuu kosteus, seuraavaksi aine pyrolysoituu ja haihtuvat aineet palavat. Viimeisenä palaa jäännöshiili. Yksittäinen polttoainepartikkeli käy kaikki vaiheet läpi tässä järjestyksessä, mutta arinalla on eri vyöhykkeitä palamisen eri vaiheille. Biopolttoaineiden kosteus on yleensä 30–60 % kattilaan syötettäessä. Kosteuden haihduttamiseen tarvitaan arinalta paljon pinta-alaa. Kosteuden poiston tulisi tapahtua mahdollisimman nopeasti, koska veden haihtuminen ottaa paljon energiaa, jolloin tulipesän keskilämpötila laskee. Kosteuden poistoa helpottaa polttoaineen pieni palakoko sekä esilämmitetty ensiöilma. Tulipesän geometrialla voidaan myös lyhentää kuivumisaikaa. (Raiko ym. 2002, 467.)

Arinakattiloissa palamisilmaa syötetään yleensä sekä arinan alta primääri-ilmana että palotilaan sekundääri-ilmana. Polttoteknisesti paras lopputulos saavutetaan, jos primääri-

ri-ilman syöttöä voidaan säätää erikseen kuivaus-, pyrolyysi- ja jäännöshiilen palamisvaiheeseen. Sekundääri-ilmansyöttö tulee toteuttaa niin, että sen sekoittuminen palokaasuun on mahdollisimman tehokasta. (Jalovaara 2003, 31.) Tällöin palokaasut palavat lopputuotteiksi mahdollisimman hyvin.

Pyrolyysivaiheessa polttoaineesta muodostuu palamattomia ja palavia kaasuja sekä nestemäisiä terva-aineita. Palavat kaasut ja terva-aineet palavat lopputuotteiksi, mikäli happi ja lämpöä on riittävästi. Tulipesän rakenteella voidaan vaikuttaa palavien kaasujen viipymäaikaan ja lämpötilaan, mikä mahdollistaa kaasujen täydellisen palamisen. Pyrolyysi alkaa endotermisena, mutta lämpötilan noustessa muuttuu eksotermiseksi. Pyrolyysivaiheessa suurin osa polttoaineen haihtuvista aineista palaa. Biopolttoaineissa haihtuvia aineita on paljon, mikä vaikuttaa kattilarakenteeseen. Polttoaine palaa arinapoltossa diffuusioliekillä, joten paloilmän ja palavien kaasujen sekoittuminen on erittäin tärkeää hyvän polttotuloksen kannalta. (Raiko ym. 2002, 468.)

Pyrolyysivaiheen jälkeen polttoaineesta jää jäljelle kiinteä hiili, jota kutsutaan jäännöshiileksi. Jäännöshiili palaa partikkelien pinnalta ilman näkyvää liekkiä. Jäännöshiilen palaminen on hidasta, ja se tarvitsee paljon pinta-alaa arinalta. Jäännöshiilen palaminen nopeutuu partikkelikokoa pienentämällä tai nostamalla tulipesän lämpötilaa. Lämpötilan nosto voi kuitenkin johtaa tuhkan sulamiseen, josta voi syntyä käyttöhäiriöitä. Arinapoltossa suurin osa tuhkasta poistuu pohjatuhkana ja vain pieni osa savukaasujen mukana lentotuhkana. (Raiko ym. 2002, 468.)

### **7.2.2 Leijupetipoltto**

Leijupetipolttotekniikan kehitys alkoi 70-luvulla, ja Suomi on ollut yksi tekniikan kehityksen johtavista maista. Leijupetikattila on joustava polttoaineen suhteen, sillä leijupetillä voi polttaa huonolaatuista ja vaihtelevaa polttoainetta ilman erikoisjärjestelyjä. Leijupetipoltossa syntyy vähän typenoksidipäästöjä sekä epätäydellisestä palamisesta johtuvia päästöjä. (Raiko ym. 2002, 490.)

Leijupetikattilat voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin. Toinen on kupliva leijukerroskattila ja toinen kiertoleijukerroskattila. Kuplivassa leijukerroskattilassa petihiekka pysyy palo-

tilassa. Kiertoleijupedissä petihiekka kiertää savukaasujen mukana pois palotilasta, jonka jälkeen se erotetaan ja kierrätetään takaisin palotilaan. Leijupetikattiloissa lämpötila on 750–950 °C. (Raiko ym. 2002, 490.) Leijupetikattiloiden hyötysuhde on arinakattiloita hieman parempi 88–91 % (Jalovaara ym. 2003, 18).

Petihiekan hiukkaskoko eroaa kuplivassa leijupedissä ja kiertoleijupedissä toisistaan. Kuplivassa pedissä käytetään suurempaa, noin 1 mm halkaisijalta olevaa hiekkaa. Kiertoleijupedissä hiekan halkaisija on yleensä alle 0,5 mm. Kaasun virtausnopeus on kuplivassa pedissä 1–3 m/s, kun kiertopedissä se voi olla jopa 8–10 m/s. Nopeampi virtaus luo suuremman maksimitehon pedin pinta-alaa kohden. Kupliva leijukerroskattila soveltuu hyvin märille polttoaineille, mutta se tuottaa enemmän typen- ja rikinoksidipäästöjä. Kiertoleijupetikattila soveltuu useammille erityyppisille polttoaineille, mutta on monimutkaisesta tekniikastaan johtuen kalliimpi rakentaa. (Raiko ym. 2002, 490–491.)

Leijutila synnytetään puhaltamalla kaasua petihiekan läpi. Hiukkasten leijuminen alkaa kun kaasun virtausnopeus ylittää minimileijutusnopeuden. Kuplivan leijukerroksen kaasun enimmäisnopeus määräytyy partikkelien vapaan pudotusnopeuden eli terminaalinopeuden perusteella. Tilassa, jossa kaasun nopeus ja partikkelin terminaalinopeus ovat yhtä suuret, partikkelit eivät nouse kaasuvirran mukana pois palotilasta. (Raiko ym. 2002, 491.) Kiertoleijupetikattilassa virtaavan kaasun nopeus ylittää terminaalinopeuden, jolloin hiukkaset kohoavat leijutilassa ylöspäin ja poistuvat lopulta kattilan palotilasta.

Kuplivassa leijukerroksessa kaasun nopeuden kasvaessa alkaa leijutilaan muodostua kaasukuplia, jotka nousevat ylöspäin. Kuplivassa leijukerroksessa on havaittava leijukerroksen pinta. Kaasunopeuden noustessa yli terminaalinopeuden kuplat katoavat ja leijutila muuttuu turbulenttiseksi. Turbulenttisella leijutilalla on suuri hiukkashävikki, joten tällainen kattila tarvitsee palotilan jälkeen kiintoaine-erottimen. Erottimella saadaan kierrätettyä hiukkaset takaisin palotilaan. Kaasun virtausnopeus vaikuttaa leijukerroskattilan alueiden kiintoainetiheyteen. Mitä suurempi kaasun virtaus, sitä pienempi leijupedin alaosan kiintoainetiheys. Palotilan yläosan kiintoainetiheys myös kasvaa kaasun nopeuden kasvaessa. Todella suurilla kaasunopeuksilla palotilan kiintoainetiheys voi olla lähes vakio koko matkalta. (Raiko ym. 2002, 491–492.)

Leijukerroskattilassa arina jakaa kattilaan tulevan kaasun koko leijupedin alalle tai halutulla tavalla tarpeiden mukaan. Arina pitää petihiekan palotilassa ja estää sitä valumasta arinan alapuolelle. Arina tulee mitoittaa niin, että se ei pääse tukkeutumaan. (Raiko ym. 2002, 498.) Leijupetikattiloissa paloilma syötetään joko kahdessa tai kolmessa vaiheessa (Jalovaara 2003, 31). Primääri-ilman syöttö tapahtuu arinan alta, sekundääri ilma syötetään palamisvyöhykkeeseen ja mahdollinen tertiääri-ilma syötetään palotilan yläosaan.

### **7.3 Kiinteän polttoaineen ominaisuudet**

Kiinteitä polttoaineita on sekä uusiutuvia että fossiilisia. Uusiutuvia kiinteitä polttoaineita ovat mm. puu ja peltobiomassat. Fossiilisiin kiinteisiin polttoaineisiin lukeutuvat eri kivihiilet sekä turve. (Raiko ym. 2002, 118.) Kaikkien kiinteiden polttoaineiden polton seurauksena syntyy hiilidioksidipäästöjä, mutta uusiutuvilla polttoaineilla hiilidioksidin oletetaan sitoutuvan takaisin biomassaan tulevaisuudessa. Uusiutuvien polttoaineiden hiili on niin sanotussa lyhyessä kierrossa. Myös fossiilisten polttoaineiden hiili on peräisin eloperäisistä aineista, mutta sen takaisin sitoutuminen kestää huomattavasti kauemmin kuin uusiutuvilla polttoaineilla. Fossiilisten polttoaineiden hiilen kiertoa kutsutaan pitkäksi kierroksi. Fossiiliset polttoaineet aiheuttavat huomattavasti enemmän kasvihuonevaikutusta kuin uusiutuvat polttoaineet.

Kiinteiden polttoaineiden käyttäytymiseen polton aikana vaikuttavat mm. kosteus, tuhkapitoisuus, lämpöarvo, haihtuvien aineiden pitoisuus ja kiinteän hiilen pitoisuus. Kattilan kestävyys kannalta tärkeitä ominaisuuksia ovat tuhkan sulamis- ja laavaantumislämpötilat sekä kattilaa likaavat tai korrosoivat ominaisuudet. (Raiko ym. 2002, 121.)

Tuhka on kiinteitä polttoaineita poltettaessa jäljelle jäävä epäorgaaninen aines (Raiko ym. 2002, 122). Osa tuhkasta poistuu palotilasta savukaasujen mukana. Tätä tuhkan osaa sanotaan lentotuhkaksi. Lentotuhka kerätään talteen savukaasuista erilaisin suodatusmenetelmin. Tulipesään jäävää tuhkaa kutsutaan pohjatuhkaksi. Pohjatuhka poistuu kattilasta erillisellä tuhkanpoistojärjestelmällä. Poistojärjestelmän rakenne vaihtelee kattilan tyypin mukaan.

Polttoaineen merkittävin polttotekninen ominaisuus on sen lämpöarvo. Lämpöarvo ilmaisee polttoaineesta täydellisessä palamisessa vapautuvan energiamäärän. Lämpöarvo ilmoitetaan kiinteillä polttoaineilla tavallisesti yksikössä MJ/kg. Lämpöarvoja on kahta tyyppiä, ylempi (kalorimetrinen) ja alempi (tehollinen) lämpöarvo. Alemmassa lämpöarvossa polttoaineen sisältämän veden, sekä poltossa syntyvän veden oletetaan jäävän nesteeksi, jolloin veden höyrystymisenergia jää laskennasta pois. Ylemmässä lämpöarvossa laskentaan otetaan mukaan veden haihduttamiseen tarvittava energia. (Raiko ym. 2002, 122–123.) Polttoaineille ilmoitetaan usein tehollinen lämpöarvo saapumistilassa. Suure kuvaa polttoaineen poltossa vapautuvaa todellista lämpöenergiaa, johon vaikuttaa myös polttoaineen kosteus saapumistilassa.

Kiinteät polttoaineet sisältävät polttotekniikan kannalta kolmea eri koostumusryhmää, jotka ovat palavat aineet, tuhkaa muodostavat epäorgaaniset aineet sekä vesi. Suuri tuhkan ja veden määrä huonontavat polttoaineen laatua. Palavat aineet ovat polttoaineen koostumuksen tärkein osa. Polttoaineen palavista alkuaineista merkittävimmät ovat hiili, vety, typpi, rikki ja happi. Polttoteknisesti hiili ja vety ovat tärkeimmät polttoaineen alkuaineet. Vedyllä on hyvä lämpöarvo, mutta vedyn palaessa muodostuu vettä, jonka höyrystämiseen vaaditaan energiaa. Veden höyrystäminen laskee osaltaan alemmaa lämpöarvoa. Polttoaineen sisältämä happi ei ole kiinteitä polttoaineita poltettaessa merkityksellinen, koska palotapahtumaan tuodaan niin paljon happea ulkopuolelta. Happea voidaan verrata polttoaineessa tuhkaa muodostaviin aineisiin. Typen ja rikin palaessa savukaasuihin muodostuu haitallisia happamia yhdisteitä, jotka aiheuttavat laitteistossa korroosiota. (Raiko ym. 2002, 124.)

#### **7.4 Kosteuden merkitys polttoaineen ominaisuuksiin**

Puu on hydroskooppinen aine, ja se pystyy imemään itseensä jopa enemmän vettä, kuin puun oma kuivamassa on (Härkönen 2012, 9). Kosteus vaikuttaa polttoaineen lämpöarvoon merkittävästi. Mitä kosteampaa polttoaine on, sitä vähemmän siitä saadaan energiaa poltettaessa. (Raiko ym. 2002, 121.)

Puun sisältämän veden määrän laskemiseen on kaksi tapaa. Yksi tapa on kosteussuhteen laskeminen, jossa verrataan puun vesimäärää puun kuiva-ainemäärään (kaava 1). Toi-

nen tapa on laskea veden määrä ja verrata sitä puun koko massaan, jossa myös vesi on mukana (kaava 2). Veden määrän laskennalla saadaan kosteusprosentti, joka kertoo, paljonko puun massasta on vettä. Kosteussuhde ei ole arkielämässä kovin kuvaava suure, mutta joissakin tapauksissa sitä tarvitaan laskennassa. Polttoaineesta poistuvan veden määrän laskenta onnistuu kaavalla 3. (Härkönen 2012, 9.)

$$U = \frac{m_{vesi}}{m_{ka}} \quad \text{Kaava 1.}$$

$U$  = kosteussuhde

$m_{vesi}$  = veden massa

$m_{ka}$  = puun kuiva-aineen määrä. (Härkönen 2012, 9.)

$$X = \frac{m_{vesi}}{m_{kok}} \quad \text{Kaava 2.}$$

$X$  = kosteus

$m_{vesi}$  = veden massa

$m_{kok}$  = puun kuiva-aineen ja veden yhteen laskettu määrä. (Härkönen 2012, 9.)

$$\Delta m_{vesi} = m_1 \left[ X_1 - X_2 \frac{(1-X_1)}{(1-X_2)} \right] \quad \text{Kaava 3.}$$

$\Delta m_{vesi}$  = veden massan määrän muutos

$m_1$  = kostean puun alkumassa

$X_1$  = alkukosteus

$X_2$  = tavoiteltu loppukosteus. (Härkönen 2012, 9.)



Puussa vettä on sidottuna vetenä, ja mahdollisesti myös vapaana vetenä. Sidottu vesi sijaitsee puun soluonteloiden välisissä seinämissä, josta se on vaikeasti irrotettavissa. Vapaa vesi on soluonteloiden sisällä, josta se on helpommin haihdutettavissa. Suomalaisilla puulajeilla syiden kyllästyspisteenä (sidotun veden enimmäismäärä) käytetään  $U \approx 30$ , joka vastaa n. 23 % kosteutta (lämpötila välillä 0–60 °C). Kyllästyspiste on riippuvainen lämpötilasta, ja korkeammassa lämpötilassa kyllästyspiste on alhaisempi. (Härkönen 2012, 10.)

Sidotun ja vapaan veden erona on, että sidotun veden poistaminen on vaikeampaa ja se vaatii enemmän energiaa haihtuakseen. Sidotun veden haihtuminen vaatii sitä enemmän energiaa mitä kuivemmaksi puu tulee. Vapaan veden höyrystämiseen vaadittava energia vastaa normaalin veden höyrystämiseen vaadittavaa energiaa. (Härkönen 2012, 10–11.)

Puun tasapainokosteudeksi kutsutaan kosteutta, johon puun kosteus asettuu tietyssä lämpötilassa ja ilmankosteudessa. Tasapainokosteus on riippuvainen ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Puun kosteuden tasoittuminen on erittäin hidaskäyttöprosessi, joten yleensä puu sisältää enemmän vettä kuin se sisältäisi tasapainokosteudessa. Puun kuivuminen tapahtuu sieltä missä se on ilman kanssa kosketuksissa, eli puupartikkelin reunoilta. Reunojen kuivuessa diffuusio siirtää kosteutta keskeltä reunoille. Puun kuivumisen nopeuteen ja tasapainokosteuden saavuttamiseen vaikuttaa siis puun partikkelikoko. Hake kuivuu tukkipuuta huomattavasti nopeammin. (Härkönen 2012, 11.)

Puun kuiva-aineen palaessa vapautuu lämpöä, jonka vaikutuksesta puun sisältämä vesi poistuu puusta ja tämän jälkeen höyrystyy. Vapaan veden poistoon vaadittava energia on 2,443 MJ/kg vettä (25 °C vertailulämpötilassa). Veden höyrystämiseen kuluva energia ei ole vapaan veden höyrystämässä riippuvainen kosteudesta. Kosteuspitoisuuden laskiessa puun syiden kyllästyspisteeseen, veden haihduttamiseen kuluu sitä enemmän energiaa, mitä kuivemmaksi puu menee. Höyrystämiseen tarvittavan energian määrä on tällöin riippuvainen kosteuden määrästä. (Härkönen 2012, 13–14.)

Sitoutuneen veden haihduttamiseen vaadittavan energian määrän laskemiseen on olemassa eksponentiaalinen kaava. Laskentatyötä helpottamaan on tehty lineaarinen kaava, jonka laskentatulokset eivät juuri poikkea eksponentiaalisen kaavan laskentatuloksista. Linearisella kuvaajalla laskettaessa höyrystymislämpö on kosteudessa 0 % kolminker-

tainen vapaanveden höyrystämiseen verrattuna. Kosteussuhteen ja lämpöenergian funktio voidaan laskea kaavalla 4. Lisäenergia kuluu veden irrottamiseen soluonteloiden seinämistä, minkä jälkeen vesi höyrystyy normaalilla energiamäärällä. (Härkönen 2012, 13, 18.)

$$q_{des} = 2,036 - 4,524 \times U \quad \text{Kaava 4.}$$

$q_{des}$  = lämpöenergian kulutus vesi kiloa kohden kWh/kg (vertailulämpötilassa 25 °C)  
 $U$  = kosteussuhde. (Härkönen 2012, 13, 18.)

Edellä mainituissa laskennoissa oletuksena on että puun sisältämä vesi on 25 °C:n alkulämpötilassa. Todellisuudessa polttoaineen lämpötila on Suomen olosuhteissa suurimman osan ajasta huomattavasti tämän alapuolella. Tällaisissa tapauksissa todellista lämpöarvoa laskettaessa on otettava huomioon veden ja polttoaineen lämmittämiseen 25 °C:seen kuluva energia, jonka jälkeen edellä mainitut kaavat antavat todellisuutta vastaavia lämpöarvoja. Lämpöarvon laskennassa käytetään standardoitua laskentakaavaa (kaava 5).

$$q_{STD} = q_{alempi} \times (1 - X) - 0,68 \times X \quad \text{Kaava 5.}$$

$q_{STD}$  = energian määrä

$q_{alempi}$  = puun alempi lämpöarvo yksikössä kWh/kg ka.

$X$  = kosteus. (Härkönen 2012, 19.)

Kaavan tarkkuus on riittävä puun energiasisällön laskemiseen, ja yleensä sen mukaan lasketaan hakkeen toimittajalle korvaus hakkeesta. Kaava ei kuitenkaan ota huomioon hakkeen tulolämpötilaa, eikä veden erilaista sitoutumista puuhun. (Härkönen 2012, 19.)

## 7.5 Tuhkan sulaminen ja kattilan likaantuminen

Polttotekniikoissa, joissa tuhka poistetaan sulana tai tuhka voi estää ensiöilman kulkeutumista, on tuhkan sulamiskäyttäytymisen tunteminen tärkeää. Tuhkan sulamisen käyttäytymistä ja sulamislämpötilaa on vaikea arvioida polttoaineen kemiallisen koostumuksen perusteella, koska tuhkan sulamiskäyttäytymiseen vaikuttaa niin moni asia. Standardoidut tuhkan sulamista määrittävät menetelmät perustuvat empiirisiin havaintoihin, eikä niiden avulla voida luotettavasti ennustaa tuhkan kuonaamisominaisuuksia (Raiko ym. 2002, 125.) Polttoaineen tuhkan sulamislämpötilan ollessa yli 1350 °C poltossa ei yleensä tule ongelmia tuhkan sintraantumisen johdosta. (Örberg, Larsson & Hedman, 21.)

Tuhkan sulamislämpötilaa laskevat kemialliset tekijät ovat monimutkaisia, mutta kaliumin, kalsiumin ja piin suhteet toisiinsa ovat tärkeässä asemassa. Korkea kaliumpitoisuus suhteessa piin ja kalsiumin pitoisuuksiin yleensä laskee tuhkan sulamislämpötilaa, aiheuttaen tuhkan sintraantumista ja kattilan likaantumista. Korkea kalsiumpitoisuus toisaalta nostaa tuhkan sulamislämpötilaa, joka voi ehkäistä ongelmia. (Örberg ym., 21.) Myös polttoaineen natrium-, kloori- ja rikkipitoisuuksilla on vaikutusta tuhkan likaa- mis- ja kuonaamiskäyttäytymiseen. Biopolttoaineet sisältävät näitä aineita vaihtelevissa määrin. Tuhkan sulamis- ja kuonaamiskäyttäytymiseen vaikuttavat myös polttotekniset ratkaisut, joten tuhkan haitalliset vaikutukset on arvioitava jokaiselle laitteelle erikseen (Raiko ym. 2002, 126, 128).

## 7.6 Korroosio

Kloorilla on suuri vaikutus kattilan korroosioon. Joissakin kivihiililaaduissa klooripitoisuus voi olla jopa 1,0 %, joka on korroosion syntymisen kannalta haitallinen määrä. Myös yhdyskunta- ja teollisuusjätteet voivat sisältää korroosion kannalta haitallisia määriä klooria. Kattilassa korroosion aiheuttajana voi olla hiilimonoksidi, hiili- ja rikkipitoinen pöly, suolahappo, rikkivety, vetymolekyylit ja useat hiilivedyt. Kloori voi aiheuttaa myös korkealämpötilakloorikorroosiota (450–500 °C) ja välillisesti kuumakorroosiota (n. 650 °C). Kuumakorroosiossa rikki, kalium ja natrium ovat varsinaiset korroosiota aiheuttavat aineet. (Raiko ym. 2002, 373.) Kloori voi muodostaa polton yhtey-

dessä kloorihappoa, joka aiheuttaa kattilan korroosiota. Kloori on avainasemassa poltossa syntyvien dioksiinipäästöjen muodostumiseen. (Örberg, Larsson & Hedman, 21.)

## 7.7 Palamisen päästöt

Kiinteiden polttoaineiden poltossa syntyy suuri joukko eri päästökomponeentteja. Tavallisimpia näistä ovat hiilidioksidi, hiilimonoksidi sekä typen ja rikin oksidit. Tavanomaisten päästöjen lisäksi poltossa muodostuu vaihtelevia määriä lukuisia eri suoraketjuisia hiilivetyjä ja rengasmaisia aromaattisia hiilivetyjä. Aromaattisista hiilivedyistä voi muodostua PAH -yhdisteitä (polysykliset aromaattiset hiilivedyt). Hiilivety-yhdisteistä voi kloorin läsnä ollessa muodostua välivaiheiden kautta myrkyllisiä polykloorattuja dibentso(p)dioksiineja ja -furaaneja (PCDD ja PCDF). (Raiko ym. 2002, 371.)

Poltossa syntyvistä typpiyhdisteistä tärkeimmät ovat typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO<sub>2</sub>), joita kutsutaan yleisnimellä typenoksidit NO<sub>x</sub>. Typpioksidin muodostus on huomattavasti suurempaa kuin typpidioksidin, mutta typpioksidi hapettuu ilmakehässä typpidioksidiksi, joten molempien ympäristövaikutus on sama. Typenoksidi päästöt aiheuttavat hapanta laskeumaa, saastesumua sekä se edistää alailmakehän otsonin muodostusta. Energiantuotannon polttoprosessit aiheuttavat runsaat 30 % kaikista Suomen typenoksidipäästöistä. (Raiko ym. 2002, 300.)

Kolmas merkittävä typenoksidityyppi on dityppioksidi, joka aiheuttaa yläilmakehän otsonituhhoa. Dityppioksidi on myös voimakas kasvihuonekaasu, jonka vaikutus ilmastoon lämpenemiseen on merkittävä. Dityppioksidi on erittäin pysyvä yhdiste ja sen elinajaksi ilmakehässä on arvioitu noin 150 vuotta. Normaalessa polttoprosesseissa dityppioksidin muodostus on lukuun ottamatta leijupetipolttoa vähäistä. Energiantuotanto aiheuttaa maailmanlaajuisesti arviolta noin 10 % kaikista dityppioksidipäästöistä. (Raiko ym. 2002, 301.)

Polttoprosessissa typenoksidit muodostuvat kahdesta eri lähteestä, joko syötetyn ilman tpeestä tai polttoaineen sisältämästä orgaanisesta tpeestä. Typenoksidien muodostus ilman tpeestä vaatii paljon energiaa, koska typen molekyylin N<sub>2</sub> sidosenergia on suuri (n. 950 kJ/mol). Polttoprosessiin tulevasta kokonaistpeestä suurin osa on ilman sisältä-

mää tyypeä. Polttoaineen orgaaninen typpi on huomattavasti reaktiivisempaa, koska sen sidosenergia on alhaisempi (n. 150-750 kJ/mol). Tästä johtuen typtöttömien polttoaineiden polton typpioksidipäästöt ovat selvästi pienempiä, kuin paljon tyypeä sisältävien polttoaineiden polton aiheuttamat päästöt. Hyvänä esimerkkinä hiilen pölypoltossa noin 80 % typpioksidipäästöistä on peräisin polttoaineen sisältämästä typestä. Hiili sisältää tosin verrattain paljon tyypeä. (Raiko ym. 2002, 304, 308.)

Typenoksidien muodostumista voidaan vähentää polttoteknisin keinoin, toisin kuin esimerkiksi rikinoksidien. Typenoksidipäästöt ovat vaikuttaneet paljon polttolaitteiden tekniikan kehitykseen. Tulipesän olosuhteet ovat muuttuneet paljon ja typenoksidien muodostuksen määrä on vähentynyt huomattavasti. Typenoksidien synnyn vähentäminen on ollut osaltaan syy leijupetiteknikoiden kehittämiseen. Typenoksidien vähentäminen on huomattavasti helpompaa ja halvempaa hallitsemalla polttoprosessia (primäärimenetelmät) kuin typenoksidien poisto myöhemmin savukaasuista (sekundäärimenetelmät). (Raiko ym. 2002, 303.)

Rikkidioksidi ( $\text{SO}_2$ ) ja rikkitrioksidi ( $\text{SO}_3$ ) ovat haitallisia ihmisen terveydelle ja ympäristölle. Rikinoksidit aiheuttavat yhdessä typenoksidien kanssa happamia sateita, jotka vahingoittavat elollista luontoa. Happamat sateet aiheuttavat myös vaurioita materiaaleille (esim. korroosio ja rapautuminen). Suurin osa poltossa vapautuvista rikinoksideista on rikkidioksidia. Rikkidioksidi kuitenkin hapettuu ilmakehässä rikkitrioksidiksi, joten molemmat ovat ympäristöhaitoiltaan samanlaisia. Rikkitrioksidi aiheuttaa polttolaitteessa korroosiota matalissa lämpötiloissa, joten sen syntyä halutaan ehkäistä. (Raiko ym. 2002, 344, 347.)

Poltossa kaikki rikinoksidit muodostuvat polttoaineen sisältämästä rikistä, joten rikinoksidien päästöihin vaikuttaa polttoaineen sisältämän rikin määrä. Pääsääntöisesti polttoaineet sisältävät rikkiä alle 5 %, ja se voi olla polttoaineessa joko orgaanisena tai epäorgaanisen yhdisteenä. Polttoprosessissa suurin osa rikistä poistuu savukaasujen mukana, ja vain pieni osa sitoutuu tuhkan alkali- ja maa-alkalimetalleihin. Rikin oksidien muodostumiseen ei voida vaikuttaa polttoteknisin keinoin. Päästöjen vähennykseen on kuitenkin kehitetty menetelmiä. Tietyissä tapauksissa itse polttoaineen rikkipitoisuutta voidaan vähentää. Rikin poistoon tulipesästä tai tulipesän jälkeen savukaasuista on kehitetty erilaisia menetelmiä. (Raiko ym. 2002, 344, 345, 348–349.)

Polttoaine sisältää erilaisia mineraaleja, joista osa on polton päästöjen kannalta haitallisia. Haitallisimpia näistä mineraaleista ovat elohopea, kadmium, lyijy, kupari, arseeni, kromi, nikkeli ja sinkki. Fluori, kloori, bromi ja jodi voivat muodostaa polton yhteydessä epäedullisissa olosuhteissa myrkyllisiä yhdisteitä. Polttoaineiden tietyt ominaisuudet voivat aiheuttaa ympäristön saastumista. Alkuaineista rikki, typpi, kloori ja hivenalkuainepitoisuudet ovat merkittävimmät ympäristön saastumisen kannalta. Hivenalkuaineita esiintyy polttoaineissa pieniä määriä. Hivenalkuaineisiin kuuluvat raskasmetallit. (Raiko ym. 2002, 128, 371.)

## **8 Tutkimusmenetelmät ja tutkimusaineisto**

Tutkimuksessa tutkittiin järven pohjasedimentin koostumusta alkuaineanalyysien avulla ja sedimentistä määritettiin kosteuspitoisuus. Tutkimuksessa suoritettiin polttokokeita, joissa pyrittiin selvittämään sedimentin soveltuvuutta polttoon. Polttokokeiden pohjatuhkasta tehtiin myös alkuaineanalyysit.

### **8.1 Sedimenttinäytteet**

Kahdesta Pohjois-Karjalan järvestä nostettiin sedimenttiä, joka lähetettiin ICP-analyysiin (alkuaineanalyysi) Itä-Suomen yliopistolle. Järvet valittiin limnologi Tarmo Tossavaisen avustuksella mahdollisimman edustaviksi järvimalmin määrän kannalta. Tarmo Tossavainen oli avustamassa myös itse nostoa suoritettaessa. Sedimentti nostettiin sedimenttikairalla. Loitimossa sedimentin nosto onnistui jään päältä, mutta Jukajärvellä nosto jouduttiin suorittamaan veneestä käsin.

Loitimon järvimalmitilanteesta oli tietoa vain vanhan valtauksen perusteella (Vartiainen 1992, 22). Loitimosta kuitenkin löytyi järvimalmihauleja useasta kohdasta. Tarmo Tossavainen on tutkinut Jukajärven sedimentin koostumusta ennenkin, jonka perusteella tiedettiin valmiiksi, että Jukajärvessä on järvimalmia. Nostopaikka valittiin Tossavaisen aikaisempien tutkimusten perusteella.

Taulukossa 2 on sedimentin nostopisteet vanhalla KKJ27 -koordinaatistolla, sekä KKJ27 korvanneen ETRS89-koordinaatiston mukaiset pisteet. Koordinaatit otettiin maasto GPS -paikantimella. Karttapisteiden koordinaatistomuutokset suoritettiin Kansalaisen karttapaiikka –internetsivuston avulla.

Taulukko 2. Sedimentinäytteiden nostopaikat, nostojankohdat ja näytteiden tarkoituserä

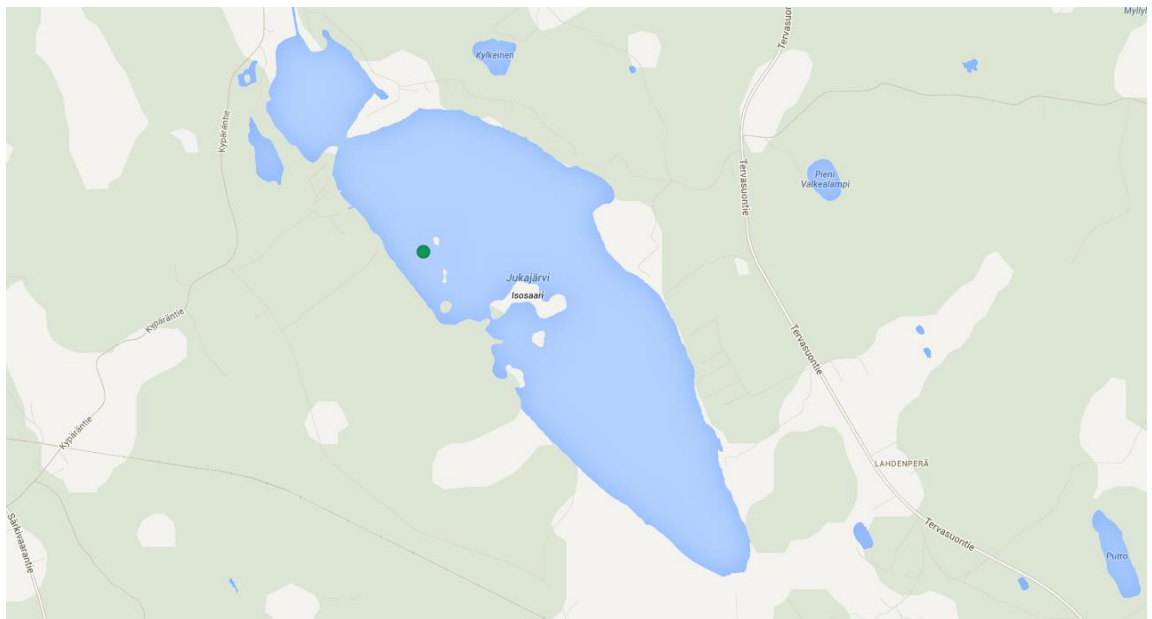
Päivämäärä	Paikka	Näytteiden lkm	Sijainti (KKJ27)	Sijainti (ETRS89)	Tarkoitus
17.4.2013	Loitimo	2	N 6934296 E 3681953	N 62.46903404 E 30.52477887	ICP ja Polttokoe
17.4.2013	Loitimo	2	N 6934301 E 3681957	N 62.46907686 E 30.52486154	ICP ja Polttokoe
17.4.2013	Loitimo	2	N 6934307 E 3681960	N 62.46912913 E 30.52492592	ICP ja Polttokoe
17.4.2013	Loitimo	2	N 6934311 E 3681962	N 62.46916397 E 30.52496884	ICP ja Polttokoe
17.4.2013	Loitimo	2	N 6934316 E 3681965	N 62.46920728 E 30.52503216	ICP ja Polttokoe
17.4.2013	Loitimo	2	N 6934259 E 3682047	N 62.46865671 E 30.52655832	ICP ja Polttokoe
17.4.2013	Loitimo	2	N 6934252 E 3682042	N 62.46859647 E 30.52645419	Polttokoe
6.5.2013	Jukajärvi	6	N 6945517 E 3656671	N 62.58107882 E 30.04569981	ICP ja polttokoe

Kuvissa 8 ja 9 näkyy sedimentinäytteiden nostopaikat kartoilla. Loitimosta (kuva 8) nostimme punaisella merkitystä pisteestä yhteensä 10 näytettä. Keltaisella merkatusta pisteestä nostimme 4 näytettä. Näytteenottopisteet ovat niin lähellä toisiaan, ettei niitä kaikkia kannata merkitä kartalle erikseen.



Kuva 8. Loitimon sedimentinäytteiden nostopaikat (Google maps 2013)

Kuvassa 8 näkyy Jukajärven sedimenttinäytteen nostopaikka. Jukajärveltä sedimentti nostettiin yhdestä paikasta, mutta näytteitä otettiin kuudesta eri syvyydestä sedimenttipatjasta. Etukäteen tiesimme, että Jukajärvessä sedimenttiä on paksu kerros, joten päädyimme tällaiseen näytteenottomenetelmään. Tällaisessa näytteenotossa saa kuvan myös sedimentin koostumuksen vaihtelusta eri sedimenttikerroksissa.



Kuva 9. Jukajärven sedimenttinäytteiden nostopaikka (Google maps 2013)

Kuvissa 10–12 näkyy Loitimolla suoritetun sedimenttinäytteiden noston vaiheita. Aluksi tehtiin jääkairalla reikä, josta sedimenttikaira mahtuu läpi. Sedimenttikaira painetaan sedimenttiin niin, että sedimentin pintataso saadaan mukaan kairan näytteeseen. Tällöin tulee tietää veden syvyys. Kun sedimenttikaira on painettu oikeaan syvyyteen (kuva 10), sitä käännetään, kunnes kairan kääntyvä luukku on sulkeutunut ja lukinnut sedimenttinäytteen sisäänsä. Tämän jälkeen kaira nostetaan pois vedestä (kuva 11) ja luukku avataan (kuva 12).





Kuva 10. Loitimon sedimentin nosto ja siinä käytetyt varusteet (Kuva: Tarmo Tossavainen)



Kuva 11. Sedimentinäytteen nosto sedimenttikairalla (Kuva: Tarmo Tossavainen)



Kuva 12. Näytteet kerättiin pakasterasioihin sedimenttikairasta (Kuva: Tarmo Tossavainen)

Kuvassa 13 otamme sedimenttinäytteen suljettavaan pussiin. Kyseinen sedimenttinäyte nostettiin polttokoetta varten.



Kuva 13. Polttokokeeseen menevä osuus sedimentistä kerättiin pussiin, koska sedimentin määrä oli suurempi kuin ICP-analyysiin tarvittava määrä (Kuva: Tarmo Tossavainen)

Kuvassa 14 sedimentin nosto tapahtuu veneestä käsin Jukajärveltä. Sedimentin noston vaiheet ovat samat kuin jään päältä nostettaessa, paitsi kairausta ei tarvitse suorittaa. Useita näytteitä otettaessa tulee myös varmistaa, että vene pysyy paikoillaan.



Kuva 14. Myös Jukajärven sedimentin nosto suoritettiin sedimenttikairalla. Nosto suoritettiin veneestä käsin (Kuva: Tarmo Tossavainen)

Nostetuista sedimenttinäytteistä määritettiin kosteus kuivaamalla näytteet ja punnitsemalla ne ennen ja jälkeen kuivauksen. Sedimenttinäytteet olivat niin suuria, että alkukuivaus suoritettiin huoneenlämmössä (noin 3 viikon ajan). Tämän jälkeen sedimentit asetettiin kuivausuuniin (105 °C) vuorokauden ajaksi. Taulukossa 3 näkyy sedimenttinäytteiden painot märkänä ja kuivana, sekä sedimentin sisältämän kosteuden määrä.

Taulukko 3. Sedimenttinäytteiden kosteuden määrittäminen. Loitimo 2–6 näytteiden kosteus on määritetty kokoomanäytteestä.

Näytepiste	Märkäpaino, g	Kuivapaino, g	Kosteus, %
Loitimo 1	2023,5	421,5	79,2
Loitimo 2 - 6	273,4	86,4	68,4
Jukajärvi	1024,9	299,4	70,8

## 8.2 Polttokokeet

Sedimenteille suoritettiin polttokokeita 14.5.2013 Joensuun Ahvenisella. Koepoltot tehtiin vanhassa saunan kiukaassa (kuva 15), joka oli muokattu tutkimusta varten/tarkoitukseen sopivaksi. Ilmansyöttöä oli muutettu ja ilmansyöttöaukkoon oli myös mahdollista asentaa kuumailmapuhallin. Kuuman ilman puhalluksella pyrittiin lisäämään palotapahtumaan happea ja lämpöä, jolloin palolämpötila kasvaa. Korkeampi palolämpötila tuottaa täydellisemmän palamisen, joka pienentää päästöjä ja parantaa hyötysuhdetta. Veden lisäys sedimentin mukana oletetusti alentaa palolämpötilaa, jota kuuman ilman puhaltamisella pyrittiin kompensoimaan. Kiukaan hormi oli vain noin 1,5 m pitkä, joten savukaasut poistuivat polttolaitteesta todella kuumina. Hormiin oli asennettu magneetti, jonka tarkoituksena oli kerätä savukaasujen rautahiukkaset.



Kuva 15. Polttokokeissa käytetty polttolaite (Kuva: Markus Hirvonen)

Polttokokeet aloitettiin polttamalla 2,00 kg havupuuta polttolaitteessa (Taulukko 4, K0). Polton tuhka kerättiin talteen. Tämän ensimmäisen polton tuhka toimi vertailukohtana muiden polttokokeiden tuhkille. Ensimmäisen polttokokeen aikana yritimme tehdä polttolaitteesta savukaasumittauksia. Mittari asennettiin hormin yläosaan. Ensimmäisen polton aikana palotapahtuma oli ali-ilmainen lambda-arvon ollessa noin 1,5. Savukaa-

sumittari mittasi myös erittäin korkeita hiilimonoksidipitoisuuksia. Pitoisuudet nousivat palotapahtuman voimistuessa niin suuriksi, että mittari sammutti itsensä, estäen mittarin kennon vaurioitumisen. Mittarin uudelleenkäynnistys tuotti saman lopputuloksen, joten savukaasumittaukset jäivät valitettavasti tekemättä näistä polttokokeista. Savukaasujen lämpötila olisi voinut myös olla liian korkea mittaukselle. Mittari voi pahimmassa tapauksessa vaurioitua tällaisissa olosuhteissa, joten riskiä ei lähdetty ottamaan.

Ensimmäisen polton jälkeen suoritimme yhteensä kuusi polttokoetta, joissa poltettiin yhtä paljon puuta kuin ensimmäisessä polttokokeessa. Näistä kokeista kolmeen ensimmäiseen (Taulukko 4, K1–K3) lisättiin järvivalmiamia ja sedimenttiä Loitimolta. Kolmessa viimeisessä kokeessa (Taulukko 4, K4–K6) järvivalmipitoinen sedimentti oli peräisin Jukajärveltä.

Taulukko 4. Sedimentin polttokokeet 14.5.2013, Joensuu Ahveninen

Kokeen numero	Puun määrä (kg)	Sedimentin 1 määrä (g)	Sedimentin 2 määrä (g)	Koe alkoi (klo)	Koe loppui (klo)	Kokeeseen kulunut aika (min)
K0	2,00			11.04	11.37	33
K1	2,07	91,5	89,4	11.58	13.03	65
K2	2,07	92,0	91,5	13.09	13.57	48
K3	2,01	92,8	91,4	14.08	14.55	47
K4	2,00	195,5		15.08	16.03	55
K5	1,92	192,7		16.12	17.00	48
K6	2,13	198,9		17.14	18.02	48

Polttokokeet aloitettiin jokaisessa kokeessa samalla tavalla. Aluksi poltettiin pieni puumäärä polttolaitteessa. Tämän tarkoituksena oli nostaa hieman palotilan lämpötilaa ja lisätä palotilaan palavaa massaa ennen vesipitoisen sedimentin lisäystä. Jokaisessa kokeessa sedimentin lisäys tapahtui noin samaan aikaan ja samalla tavalla. Sedimentti levitettiin neljälle arkille sanomalehteä, johon osa sedimentin vedestä imeytyi (kuva 16). Tämän tarkoituksena oli estää veden tai sedimentin valuminen tuhkaneräysastiaan, jolloin kokeen tarkkuus kärsisi, koska osa vedestä tai sedimentistä ei osallistuisi palotapahtumaan. Sanomalehden päälle levitetyt sedimentit ladottiin kattilaan niin, että jokaisen sanomalehtiarkin väliin tuli puuta (kuva 17). Tähän toimintatapaan päädyttiin, koska ennen vanhaan järvivalmami pasutettiin latomalla puita ja järvivalmiamia vuorotelle kasaan, joka poltettiin. Kaikissa kokeissa käytimme polttoaineena havupuuta.





Kuva 16. Sedimentinäytteiden esivalmistelu (Kuva: Markus Hirvonen)



Kuva 17. Sedimentin lisäys polttolaitteeseen (Kuva: Markus Hirvonen)

Kummankin järven sedimenteille suoritettiin kolme polttokoetta, joista molempien järvien ensimmäisissä polttokokeissa (K1 ja K4) palotilaan ei puhallettu ilmaa. Sedimenttien toisissa polttokokeissa (K2 ja K5) ilmaa puhallettiin 220 l/min lämpötilassa 300 °C. Viimeisissä kokeissa (K3 ja K6) puhallusilman määrä oli 420 l/min lämpötilassa 500

°C. Ilman puhallus nopeutti palotapahtumaa, mutta 220 l/min puhalluksen ja 420 l/min puhalluksen välillä ei ollut havaittavissa eroa.

Polttokokeen K1 aika ei ole vertailukelpoinen, koska palotilan lämpötila oli liian alhainen kunnolliseen palamiseen. Koe aloitettiin lähes ympäristön lämpöisellä polttolaitteella. Lisäksi liekki lähes tukehtui sedimenttien lisäyksen yhteydessä. Palo oli voimakkaampaa palotilan takaosassa, josta se levisi ajan myötä palotilan etuosaan. Polttokokeessa K2 käytimme puhallinta 220 l/min ilmavirtauksella (300 °C). Palotapahtuma voimistui ja oli nopeampi. Polttokokeessa K3 ilmavirtauksen määrä kasvatettiin 420 l/min (500 °C), joka ei kuitenkaan vaikuttanut palotapahtuman nopeuteen verrattuna pienempään ilman puhallukseen. Polttokoe K4 suoritettiin samoilla menetelmillä kuin K1. Vastaavasti myös kokeet K5 ja K2, sekä K6 ja K3.

Tuhkankeräysastia tyhjennettiin jokaisen polttokokeen välissä. Tyhjennetyn tuhkan annettiin jäähtyä, jonka jälkeen se kerättiin astiaan. Jokaisen polttokokeen tuhkat otettiin eri astiaan analyysijä varten. Palotila ja tuhkankeräysastia puhdistettiin paineilmalla jokaisen polttokokeen jälkeen, jottei edellisen kokeen tuhkaa sekoittuisi seuraavaan koeerän tuhkaan.

Sedimenttiä lisättiin noin 10 % polttoaineen painosta, joka on todella suuri määrä. Polttoaine oli kuitenkin kohtuullisen kuivaa, joten arvioitiin, että palolämpötila ei laske liikaa. Lämpölaitosten polttoaineena käyttämän hakkeen kosteus on huomattavasti suurempi kuin kokeessa käytetyn polttoaineen, joten hakkeen sekaan voi lisätä sedimenttiä vähemmän. Hakekattila sallii kosteamman polttoaineen käytön, koska se on suurempi kuin kokeessa käytetty polttolaite.

## 9 Tulokset

### 9.1 Sedimenttinäytteet

Loitimon ensimmäisen sedimenttinäytteen (taulukko 5) alkuainekoostumus osoittaa, että sedimentti sisältää vain vähän polton kannalta haitallisia aineita. Puupolttoaineisiin tai peltobiomassoihin verrattuna haitallisten aineiden pitoisuudet ovat vastaavat tai pienemmät.

Taulukko 5. Loitimon kokoomanäytteen sedimentin kemiallinen koostumus (ICP-analyysi). Taulukon arvot on ilmoitettu kuiva-ainetta kohti

Sedimenttinäytteet	Al (%)	As (ppm)	Ca (%)	Cd (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Fe (%)	K (%)	Li (ppm)	Mg (%)
Loitimo 1 (1/2)	1,14	4,94	0,18	0,47	12,9	19,7	11,2	3,68	0,05	2,6	0,14
Loitimo 1 (2/2)	1,50	12,02	0,23	0,70	34,4	28,6	35,0	8,33	0,09	4,1	0,19
Keskiarvo	1,32	8,48	0,21	0,58	23,68	24,17	23,06	6,00	0,07	3,32	0,17

Sedimenttinäytteet	Mn (%)	Mo (ppm)	Na (%)	Ni (ppm)	P (ppm)	Pb (ppm)	S (ppm)	Si (ppm)	Ti (ppm)	W (ppm)	Zn (ppm)
Loitimo 1 (1/2)	0,11	1,6	0,01	6,7	1333	14,5	751	493	353	43,1	78,8
Loitimo 1 (2/2)	0,20	3,6	0,01	22,9	1542	15,1	1221	296	389	96,5	168,1
Keskiarvo	0,15	2,6	0,01	14,8	1438	14,82	986	394	371	69,8	123,4

Taulukossa 6 näkyy Loitimolta otettujen sedimenttinäytteiden alkuainekoostumus. Polton kannalta Loitimon sedimenttinäytteet eivät sisällä liian suuria pitoisuuksia haitallisia alkuaineita. Loitimon sedimentissä näyttäisi olevan polton kannalta vähemmän haitallisia aineita kuin Suomen järvien sedimentissä keskimäärin (vertaa taulukko 1). Polton kannalta haitallisten aineiden pitoisuudet eivät ylitä myöskään polttoaineena käytettävien (esim. ruokohelpi) vastaavien haitallisten aineiden pitoisuuksia.

Taulukko 6. Loitimon näytesteiden sedimentin kemiallinen koostumus (ICP-analyysi). Taulukon arvot on ilmoitettu kuiva-ainetta kohti

Sedimenttinäytteet	Al (%)	As (ppm)	Ca (%)	Cd (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Fe (%)	K (%)	Li (ppm)	Mg (%)
Loitimo 2	0,80	5,44	0,12	0,39	9,7	14,1	6,4	3,24	0,05	2,7	0,12
Loitimo 3	0,74	3,40	0,08	0,26	7,8	12,7	5,2	2,91	0,03	1,9	0,08
Loitimo 4	0,64	3,01	0,08	0,24	7,1	11,3	4,9	2,81	0,03	1,9	0,08
Loitimo 5	0,87	7,81	0,09	0,49	13,6	13,9	6,5	4,56	0,04	2,3	0,11
Loitimo 6	0,67	2,66	0,13	0,20	8,0	16,0	7,5	2,63	0,10	3,9	0,19
Keskiarvo	0,74	4,47	0,10	0,31	9,23	13,60	6,12	3,23	0,05	2,53	0,12

Sedimenttinäytteet	Mn (%)	Mo (ppm)	Na (%)	Ni (ppm)	P (ppm)	Pb (ppm)	S (ppm)	Si (ppm)	Ti (ppm)	W (ppm)	Zn (ppm)
Loitimo 2	0,08	1,6	0,01	4,4	1026	13,9	392	392	305	38,9	83,8
Loitimo 3	0,06	1,5	0,01	3,9	916	8,2	271	436	219	34,9	80,9
Loitimo 4	0,05	1,4	0,01	3,6	763	8,2	226	378	224	33,0	73,5
Loitimo 5	0,09	2,7	0,01	4,6	1207	18,0	394	311	266	54,8	116,1
Loitimo 6	0,04	1,1	0,01	7,3	702	7,8	178	211	385	30,0	63,4
Keskiarvo	0,06	1,7	0,01	4,8	923	11	292	346	280	38,3	83,5

Taulukossa 7 Jukajärven sedimenttinäytteiden alkuainekoostumus. Jukajärven sedimenttinäyte sisälsi Suomen keskimääräistä järveä huomattavasti enemmän rikkiä. Rikkipitoisuus on sedimentissä noin 1 %, mikä saattaa aiheuttaa lisääntyneitä rikkipäästöjä. Lisäksi rikki voi aiheuttaa tietyissä olosuhteissa myös kattilan korroosiota.

Taulukko 7. Jukajärven sedimentin kemiallinen koostumus eri syvyyksistä (ICP-analyysi). Mitat on otettu sedimentin pinnasta alaspäin. Taulukon arvot on ilmoitettu kuiva-ainetta kohti

Sedimenttinäytteet	Al (%)	As (ppm)	Ca (%)	Cd (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Fe (%)	K (%)	Li (ppm)	Mg (%)
Jukajärvi 0-20 cm	0,98	6,49	0,30	1,49	124,48	20,81	42,89	10,48	0,12	5,3	0,27
Jukajärvi 20-40 cm	0,70	5,75	0,35	1,16	89,4	14,5	29,4	5,71	0,06	2,5	0,15
Jukajärvi 40-70 cm	0,65	4,46	0,36	1,00	77,6	14,0	22,5	7,48	0,05	1,8	0,12
Jukajärvi 164-184 cm	0,70	6,60	0,30	1,18	77,2	18,6	16,8	9,12	0,07	2,2	0,16
Jukajärvi 230-260 cm	0,58	5,05	0,29	0,68	81,8	16,0	15,1	10,81	0,10	3,3	0,22
Keskisarvo	0,72	5,67	0,32	1,10	90,07	16,77	25,33	8,72	0,08	3,02	0,19

Sedimenttinäytteet	Mn (%)	Mo (ppm)	Na (%)	Ni (ppm)	P (ppm)	Pb (ppm)	S (ppm)	Si (ppm)	Ti (ppm)	W (ppm)	Zn (ppm)
Jukajärvi 0-20 cm	0,44	0,8	0,01	261,3	847,0	27,5	8056,9	270,8	335,1	119,9	262,6
Jukajärvi 20-40 cm	0,28	1,4	0,01	221,6	602	20,7	9163	154	177	65,5	230,7
Jukajärvi 40-70 cm	0,23	1,4	0,01	181,0	669	16,8	8873	281	153	83,1	212,2
Jukajärvi 164-184 cm	0,24	0,8	0,01	264,3	515	12,3	10785	195	222	135,1	288,7
Jukajärvi 230-260 cm	0,44	-	0,01	426,3	1541	13,0	10162	235	258	171,5	276,1
Keskisarvo	0,33	1,12	0,01	270,88	834,58	18,06	9407,92	227,24	228,83	115,02	254,03

Taulukossa 8 on vertailun vuoksi esitetty lämmön tuotannossa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Taulukosta löytyy alkuaineet, jotka ovat polttotekniikan kannalta merkittävimmät. Taulukosta voi havaita että kevät- ja syyskorjatun ruokohelpin tuhkan sulamispisteissä on eroa, joka johtuu erilaisesta alkuainekoostumuksesta. Syyskorjatussa ruokohelpissä on klooria yli viisinkertainen määrä kevätkorjattuun verrattuna. Rikin ja kaliumin määrissä on myös eroa.

Taulukko 8. Biopolttoaineiden ominaisuuksia (Alakangas 2000, 105)

	Lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg	Kosteus %	Haihtuvat aineet %	Tuhkapi- toisuus %	C %	H %	N %	S %	Cl %	K %
Ruokohelpi (kevätkorjattu)	14,6	14	74	5,5	46	5,5	0,9	0,1	0,09	0,2
Ruokohelpi (syyskorjattu)	14,8	15	72	6,5	46	5,7	1,3	0,17	0,5	0,8
Puupolttoaineet	8,5	50	80	1,5	50	6	0,3	0,05	0,02	0,2

	Ca %	Mg %	Na %	Si %	Tuhkan sulamispiste °C	As mg/kg	Hg mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg
Ruokohelpi (kevätkorjattu)	0,2	0,05	0,01	1,8	1404	0,2	0,03	0,06	2
Ruokohelpi (syyskorjattu)	0,4	0,2	0,01	1,2	1075	0,1	0,03	0,04	1
Puupolttoaineet	0,3	0,05	0,01	0,4	1150	0,1	0,02	0,1	4

## 9.2 Polttokokeet

Taulukossa 9 on ICP-analyysin tulokset pohjatuhkista. Pohjatuhkat hienonnettiin Itä-Suomen yliopistolla ennen analyysiä, jotta tuhkanäyte olisi mahdollisimman homogeeninen. Polttokokeen 0 tuhkanäyte oli näytteistä kevein, joka on yhdenmukainen tulos, sillä tähän polttokokeeseen ei lisätty sedimenttiä. Polttokokeiden 1–6 tuhkassa oli silmämääräisesti havaittavaa ruskeaa hiekkamaista ainesta, joka oli oletettavasti peräisin sedimentin sisältämästä mineraaliaineesta. Taulukosta 9 käy ilmi myös kokeiden palotapahtumiin kuluvat ajat.

Taulukko 9. Polttokokeiden pohjatuhkien alkuaineanalyysin tulokset. Taulukon arvot on ilmoitettu kuiva-ainetta kohti

Pohjatuhkanäytteet	Al (%)	As (ppm)	B (ppm)	Ca (%)	Cd (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Fe (%)	K (%)	Li (ppm)	Mg (%)
Polttokoe, K0	0,02	1,75	33,01	2,58	0,28	0,95	10,56	31,56	0,28	1,41	3,4	0,76
Polttokoe, K1	0,68	2,71	13,85	1,32	0,45	7,2	29,3	23,3	2,11	0,57	1,6	0,39
Polttokoe, K2	0,72	3,57	10,45	1,16	0,24	7,5	25,4	20,7	2,58	0,40	1,9	0,28
Polttokoe, K3	0,94	4,23	11,98	1,31	0,30	10,6	31,6	24,4	3,50	0,48	2,5	0,34
Polttokoe, K4	0,73	3,45	18,54	1,91	0,42	29,0	18,2	55,6	3,41	0,67	3,7	0,45
Polttokoe, K5	0,66	1,98	17,43	1,92	0,31	24,0	18,9	37,6	4,43	0,72	3,3	0,46
Polttokoe, K6	0,66	3,34	16,16	1,95	0,34	27,0	19,5	33,3	4,35	0,69	3,6	0,42
Keskiarvo K1-K6	0,73	3,21	14,74	1,59	0,34	17,55	23,81	32,49	3,40	0,59	2,78	0,39

Pohjatuhkanäytteet	Mn (%)	Mo (ppm)	Na (%)	Ni (ppm)	P (ppm)	Pb (ppm)	S (ppm)	Se (ppm)	Si (ppm)	Ti (ppm)	W (ppm)	Zn (ppm)	Paino (g)
Polttokoe, K0	0,29	-	0,01	2,3	1731,9	1,8	807,2	1,2	133,3	70,0	1,2	161,6	38,4
Polttokoe, K1	0,14	0,9	0,03	5,1	1326	7,9	594	-	55	200	22,2	139,0	91,8
Polttokoe, K2	0,13	1,1	0,02	5,0	1005	7,3	411	-	51	157	27,7	119,7	115,7
Polttokoe, K3	0,14	1,6	0,03	8,0	1426	10,0	455	-	52	204	39,0	144,6	87,7
Polttokoe, K4	0,29	0,2	0,03	146,5	808	8,4	3030	-	81	158	39,0	238,9	75,0
Polttokoe, K5	0,26	-	0,03	105,4	1111	8,3	2481	-	73	131	49,2	214,5	72,2
Polttokoe, K6	0,34	-	0,03	139,7	970	8,6	2629	-	69	163	46,5	219,9	78,5
Keskiarvo K1-K6	0,22	0,95	0,03	68,28	1107,62	8,41	1599,90	-	63,58	168,98	37,27	179,44	86,8

Polttokokeisiin K1 lisättiin Loitimolta nostetun sedimenttinäytteen mukana rautaa yhteensä  $(91,5 \text{ g} \times (1 - 0,792) \times 0,06) + (89,4 \text{ g} \times (1 - 0,684) \times 0,0323) = 2,05 \text{ g}$ . Polttokokeessa K4 raudan lisäyksen määrä oli Jukajärven sedimenttinäytteen tuoma  $195,5 \text{ g} \times (1 - 0,708) \times 0,0872 = 4,98 \text{ g}$ .

Pohjatuhka sisälsi polttokokeessa K1 (taulukko 9) rautaa  $91,8 \text{ g} \times 0,0211 = 1,94 \text{ g}$ , joka on hyvin lähelle sama määrä kuin sedimentin lisäämisen tuoma raudan määrä. Polttokokeen K4 tuhka sisälsi rautaa  $75,0 \text{ g} \times 0,0341 = 2,56 \text{ g}$ , joka on noin puolet siitä määrästä, mitä sedimentin lisääminen toi polttokokeeseen rautaa. Ero johtuu todennäköisesti epähomogeenisesta malmista, eli tähän polttokokeeseen on sattunut sellainen kohta sedimentistä, missä ei ole ollut niin suurta rautapitoisuutta kuin Jukajärven sedimentissä

keskimäärin. Polttokokeista K5 ja K6 tullessa pohjatuhkassa raudan määrä on hieman suurempi kuin K4 polttokokeen pohjatuhkassa.

Taulukossa 9 näkyy myös tuhkan määrän kasvu, kun polttoon lisätään sedimenttiä. Tuhkan määrä lisääntyi keskimäärin noin 50 g kokeissa, jossa sedimenttiä lisättiin. Sedimentin lisääminen toi polttokokeeseen noin 50 g lisää kuiva-ainetta. Sedimentti on lisännyt omalla massallaan noin 40 g tuhkaa, koska sedimentin hehkutushäviö on 20 %. Loput 10 g lisääntyneestä tuhkasta on tullut todennäköisesti puusta huonontuneen palamisen seurauksena. Veden lisääminen laski oletetusti palolämpötilaa, joka aiheutti epätäydellisemmän palamisen. Sedimentin lisääminen on voinut tapahtua myös epätasaisesti, jolloin osa puusta on voinut kastua ja jäädä palamatta täydellisesti.

Työssä vertaan sedimenttiä ruokohelpeen, joka on polttoteknisesti käyttökelpoinen polttoaine, mutta jokseenkin haastava. Ruokohelven ja järvisedimentin kalium-, natrium- ja rikkipitoisuudet eivät eroa toisistaan paljoa, joten voisi olettaa että tuhkan sulaminen ei aiheuta suuria ongelmia sedimentin poltossa. Sedimentin kuiva-aineen syöttömäärä jää kuitenkin kohtalaisen pieneksi suuresta vesipitoisuudesta johtuen.

Sedimentin sisältämän rikin ei pitäisi tulla ongelmaksi poltossa. Sedimentti sisältää keskimäärin noin 0,2 % rikkiä, mikä on esimerkiksi kivihiilen noin 1 % huomattavasti alhaisempi.

## **10 Järvimalmin jalostuksen kannattavuuden case laskenta**

### **10.1 Perustietoa laskennasta**

Kannattavuuslaskennassa esimerkkilaitoksena toimii lämpövoimala, jossa on 2 MW biokattila. Vuotuinen lämmöntuotantomäärä laitoksella on 6 800 MWh. Biokattilan hyötysuhde on laskennassa 0,75. Hakkeen hinta on 20,47 €/MWh (Energian hinnat 2013). Tukipolttoaineeksi tarvitaan tässä esimerkissä 11 m<sup>3</sup> kevyttä polttoöljyä. Öljykattilan hyötysuhde on 0,85.

Malmin jalostuksen kustannukset muodostuvat lähinnä sedimentin kuljetuksen pidentyneestä kaukokuljetuksesta ja veden haihduttamisesta aiheutuvista kustannuksista. Veden lisääminen kattilaan voi huonontaa kattilan hyötysuhdetta ja lisätä häiriötilanteita, joiden kustannuksia on vaikea arvioida tässä laskennassa. Veden haihduttaminen kuluttaa myös kohtuullisen paljon energiaa. Sedimentin läjityksen kustannukset kuitenkin säästyyvät. Läjityksen ja kaukokuljetuksen kustannuksista oli todella vaikea saada luotettavaa tietoa. Kannattavuuslaskennasta jää laskennan ulkopuolelle ruoppauksen kaivu- tai pumppaustyön kustannukset, koska oletetaan, että sedimentti otetaan sellaisista järvistä, joissa järveä tulee muutenkin kunnostaa. Laskennassa jää huomiotta myös sedimentin sekoituksesta polttoaineeseen aiheutuvat kustannukset.

Rautamalmita maksetaan alle 100 €/t. Vuorirautamalmin ja järvimalmin rautapitoisuus on molemmissa sama noin 60 % (Laitakari 1940, 2). Järvimalmi sisältää fosforia, mikä tekee raudasta kylmäaurasta. Fosfori saadaan poistettua raudasta mellottamalla (putlaus), mutta se lisää tuotannon kustannuksia ja huonontaa jalostuksen kannattavuutta.

## 10.2 Polttoaineen hinnan muodostuminen

Öljyn lämpöarvo on  $11,806 \text{ MWh/t} \times 0,845 \text{ t/m}^3 = 9,98 \text{ MWh/m}^3$  (Alakangas 2000, 9). Kevyen polttoöljyn hinta on  $1\,110 \text{ €/m}^3$  (Öljyalan keskusliitto 2013). Öljyllä tuotetun lämmön osuus on tällöin  $11 \text{ m}^3 \times 9,98 \text{ MWh/m}^3 \times 0,85 = 93 \text{ MWh}^1$ . Öljyn hankintaan kuluu rahaa  $11 \text{ m}^3 \times 1\,110 \text{ €/m}^3 = 12\,210 \text{ €}$ . Öljyn MWh hinnaksi tulee  $1\,110 \text{ €/m}^3 : 9,98 \text{ MWh/m}^3 = 111 \text{ €/MWh}$ . Hakkeella tuotetaan kokonaisenergiasta se osa, jota ei tuoteta kevyellä polttoöljyllä. Tällöin hakkeella tuotetun energian määrä on  $6\,800 \text{ MWh} - 93 \text{ MWh} = 6\,707 \text{ MWh}$ .

Puun sisältämä energia voidaan laskea vähentämällä polttoaineen sisältämän veden haihduttamiseen kuluva energia puun kuiva-aineen poltosta syntyvästä energiasta. Puun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on  $19,3 \text{ MJ/kg}$  (Motiva 2013). Kuiva-aineen tehollis-

---

<sup>1</sup> 0,85 öljykattilan hyötysuhde



sesta lämpöarvosta tulee vähentää sekä vapaan, että sidotun veden haihdutukseen kuluva energia.

Puun (1 kg, kosteus 45 %) vapaan veden osuus massasta on:  $45\% - 23\% = 22\%$ , jolloin  $1\text{ kg} \times 0,22 = 0,22\text{ kg}$ , jolloin vapaata vettä on  $0,22\text{ kg}^2$ . Vapaan veden haihdutukseen kuluu energiaa  $0,22\text{ kg} \times 2,443\text{ MJ/kg} = 0,537\text{ MJ}$ .

Sidotun veden osuus on (1 kg puuta, kosteus 45 %):  $1\text{ kg} \times 0,23 = 0,23\text{ kg}$ , jolloin kosteus suhde on  $0,23\text{ kg} : 0,77\text{ kg} = 0,30$  (kaava 1)<sup>3</sup>. Sitoutuneen veden haihdutus lasketaan kaavalla 4, jolloin energiaa kuluu  $(2,036 - 4,524 \times (0,30 : 2)) \times 0,23\text{ kg} = 0,312\text{ kWh}$ , joka on  $0,312\text{ kWh} \times 3,6\text{ MJ/kWh}^4 = 1,124\text{ MJ}$ .

Hakkeen (kosteus 45 %) teholliseksi lämpöarvoksi saadaan tällöin  $19,3\text{ MJ/kg} \times (1 - 0,45) - 0,537\text{ MJ} - 1,124\text{ MJ} = 8,954\text{ MJ/kg} \approx 9,0\text{ MJ/kg}$ . Energian määrä tulee vielä muuttaa muotoon MWh, jolloin  $9,0\text{ MJ/kg} : 3\,600\text{ MJ/MWh}^5 = 0,0025\text{ MWh/kg}$ .

Polttoainetta tarvitaan tällöin  $6\,707\text{ MWh/v} : 0,0025\text{ MWh/kg} : 0,75 = 3\,577\,070\text{ kg/v} \approx 3\,577\text{ t/v}^6$ . Hakkeen tiheys on  $0,300\text{ t/i-m}^3$  (Alakangas 2000, 9), jolloin  $3\,577\text{ t/v} : 0,300\text{ t/i-m}^3 = 11\,920\text{ i-m}^3/\text{v}$ .

Hakkeen hankinnan hinnaksi muodostuu:  $6\,707\text{ MWh/v} : 0,75 \times 20,47\text{ €/MWh} = 182\,600\text{ €/v}^6$ . Taulukossa 10 on lämpölaitoksen käyttämien polttoaineiden hinnat, polttoaineilla tuotetut energiamäärä sekä laskettu painotettu keskiarvo lämpölaitoksen käyttämän polttoaineen hinnasta.

Polttoainekustannukset voidaan laskea laitokselle painotetulla keskiarvolla, jolloin saadaan öljyn korkeamman hinnan vaikutus mukaan koko polttoaineen MWh hintaan. Tällöin polttoaineen hinta on  $(20,47\text{ €/MWh} \times 6\,707\text{ MWh} + 111\text{ €/MWh} \times 93\text{ MWh}) / (6\,707 + 93) = 21,70\text{ €/MWh}$ .

---

<sup>2</sup> 23 % sidotun veden osuus

<sup>3</sup>  $0,77\text{ kg} =$  puun kuiva-aineen ja vapaan veden massa

<sup>4</sup> Muuntokerroin

<sup>5</sup> Muuntokerroin

<sup>6</sup>  $0,75$  hakekattilan hyötysuhde

Taulukko 10. Lämpölaitoksen polttoaineiden hinnat ja tuotetut energiamäärät

	Hinta	Tuotettu energia
Öljy	111,00 €/MWh	93 MWh
Hakke	21,47 €/MWh	6707 MWh
Painotettu keskiarvo	21,70 €/MWh	

### 10.3 Lämpölaitoksen muut käyttökustannukset

Lämpölaitoksen lainan poistot voidaan laskea annuiteetteina kaavalla 6, jolloin lyhenykset voidaan sisällyttää tuotetun lämmön hintaan.

$$A = \frac{\left(1 + \frac{p}{100}\right)^n \times \frac{p}{100}}{\left[\left(1 + \frac{p}{100}\right)^n - 1\right]} \times N$$

Kaava 6.

$A$  = vuotuinen tasaerän määrä €

$p$  = vuosikorko, %

$n$  = takaisinmaksuaika, v

$N$  = lainan määrä, €. (Häkkinen 2002.)

Hakelaitoksen investointikustannukset ovat esimerkiksi 635 000 €, ja lainan takaisinmaksuaika on 10 vuotta. Yrityslainan keskikoroksi on noin 2 %. Annuiteettilyhennys on tällöin  $(1,02^{10} \times 0,02) : (1,02^{10} - 1) \times 635\,000 \text{ €} = 70\,700 \text{ €/v}$ . Lainan takaisinmaksu tulee jakaa laitoksen tekniselle käyttöiälle:  $70\,700 \text{ €} \times 10 \text{ v} = 707\,000 \text{ €}$ . Lainan maksut tulee jakaa vielä laitoksen tekniselle käyttöiälle, jolloin  $707\,000 \text{ €} : 20 \text{ v} = 35\,350 \text{ €/v}$ . Tällöin tuotetun energian hintaan saadaan koko laitoksen teknisen käyttöiän ajan poistoja, eivätkä poistot painotu vain kymmenelle ensimmäiselle vuodelle.

Vuotuinen energiantuotannon määrä on 6 800 MWh, jolloin  $35\,350 \text{ €/v} : 6\,800 \text{ MWh/v} = 5,20 \text{ €/MWh}$ . Lämpölaitoksen lainan poistot aiheuttavat tällöin 5,20 €:n kustannukset tuotettua 1 MWh lämpöä kohden.

Laitoksen korjauskulut ovat esimerkiksi 5,5 €/MWh, laitosvalvonta 3,5 €/MWh ja hallinnolliset kulut 5 €/MWh. Laitos kuluttaa sähköä 1 €/MWh tuotettua energiaa. Edellä mainituissa hinnoissa on paljon oletuksia, joten tulokset tulee tarkastaa tapauskohtaisesti. (Hassinen 2013.) Lämmön tuotanto kustannuksista on yhteenveteo taulukossa 11. Taulukosta näkyy, että suurin osa lämmöntuotannon kustannuksista syntyy polttoainekuluista.

Taulukko 11. Esimerkin lämpölaitoksen energiantuotantokulut

Polttoainekustannukset	21,70 €/MWh
Lainan poistot	5,20 €/MWh
Korjauskulut	5,50 €/MWh
Laitosvalvonnan kustannukset	3,50 €/MWh
Hallinnolliset kulut	5,00 €/MWh
Sähkön kulutuksen kustannukset	1,50 €/MWh
Yhteensä	42,40 €/MWh

Puupolttoaineita käyttävän lämpölaitoksen polttoaineen kuiva-aineesta syntyy tuhkaa noin 0,5 m-%, jolloin 1 000 kg:sta puuta poltettaessa tuhkaa syntyy  $1\ 000\ \text{kg} \times 0,005 = 5\ \text{kg}$ . Mikäli lannoitteen raaka-aine saa poiketa 3 % mainituista raaka-aineista saa sedimentin tuhkan osuus tällöin olla  $5\ \text{kg} \times 0,03 = 0,15\ \text{kg}$ . Sedimentti sisältää noin 80 % tuhkaa muodostavia aineita, jolloin sedimentin kuiva-aineen lisäyksen määrä saa olla  $0,15\ \text{kg} : 0,80 = 0,1875\ \text{kg}$ . Sedimentin kuiva-ainepitoisuus on noin 25 %, jolloin määrää sedimenttiä voidaan lisätä  $0,1875\ \text{kg} : 0,25 = 0,75\ \text{kg}$ . Puupolttoaineen kosteuspitoisuuden ollessa 45 %, puu sisältää kuiva-ainetta 55 %. Tällöin puupolttoaineen määräksi tulee  $1\ 000\ \text{kg} : 0,55 = 1\ 818\ \text{kg}$ . Sedimentin lisäyksen määrä voi olla enintään  $0,75\ \text{kg} : (1\ 818\ \text{kg} + 0,75\ \text{kg}) = 0,000412$ , joka on prosentteina 0,04 %.

Voidaan todeta, että sedimenttiä lisättäessä kattilaan, tuhka muuttuu väistämättä jätteeksi, jolloin se joudutaan sijoittamaan kaatopaikalle. Kaatopaikkasijoituksesta syntyy lisäkustannuksia lämpöyrittäjälle, joka huonontaa järvimalmin jalostuksen kannattavuutta.

## 10.4 Järvimalmin jalostuksen kustannukset

Järvimalmin jalostuksessa energiaa kuluu suuri määrä veden haihduttamiseen. Sedimentin sisältämä vesi on todennäköisesti vapaana vetenä, jolloin sen haihduttaminen kuluttaa energiaa 2,443 MJ/kg vettä. Sedimentin syöttömäärä voisi olla arviolta 5 m-% syötetyn hakkeen määrästä. Tällöin polttoaineen mukana syötetyn veden määrä ei kasva niin suureksi, että se haittaisi kattilan toimintaa. Polttoaineen kosteus lisääntyy 5 m-% sedimentin lisäyksellä  $0,05 \times 0,75 = 0,0375$ , eli noin 4 %<sup>7</sup>.

Lämpölaitoksen polttoaineen tarve on vuodessa  $2\,676\text{ t} : 0,75 = 3\,568\text{ t}$ , jolloin sedimentin syöttömäärä on  $3\,568\text{ t/v} \times 0,05 = 178\text{ t/v}$ <sup>8</sup>. Ruopatudun sedimentin kuiva-ainepitoisuus on 25 %, jolloin sedimentin kuiva-ainetta menee kattilaan  $178\,000\text{ kg/v} \times 0,25 = 44\,500\text{ kg/v}$ . Vettä menee sedimentin mukana  $178\,000\text{ kg/v} - 44\,500\text{ kg/v} = 133\,500\text{ kg/v}$ . Veden haihduttamiseen kuluu energiaa  $133\,500\text{ kg/v} \times 2,443\text{ MJ/kg} = 326\,141\text{ MJ/v}$ , joka on  $326\,141\text{ MJ/v} : 3\,600\text{ MJ/MWh}^9 = 91\text{ MWh/v}$  lämpöenergiaa.

Pohjasedimentti sisältää rautaa keskimäärin 5,9 % sedimentin kuiva-aineesta, jolloin vuotuinen raudan tuotantomäärä olisi  $44\,500\text{ kg} \times 0,059 = 2\,626\text{ kg}$  rautaa.

Rautamalmin (60 % rautaa) hinta on n. 120 USD/t (Index Mundi 2012). Dollarin kurssi on 0,79 €/USD (Forex Bank 13.9.2013), jolloin malmin hinta on euroina  $120\text{ USD/t} \times 0,79\text{ €/USD} = 94,8\text{ €/t}$ . Malmin sisältämän raudan kilohinnaksi tulisi tällöin  $94,8\text{ €} : (1\,000\text{ kg} \times 0,60) = 0,158\text{ €/kg}$ .

Järvisedimentin kuiva-aine sisältää orgaanista ainetta keskimäärin 20 %. Orgaanisen aineen palaessa syntyy lämpöä. Laskennan mukaan kuiva-ainetta menee kattilaan  $44\,500\text{ kg/v}$ , josta 20 % on orgaanista, jolloin  $44\,500\text{ kg/v} \times 0,2 = 8\,900\text{ kg/v}$ . Jos orgaanisen aineen lämpöarvoksi oletetaan sama kuin puun kuiva-aineen (19,3 MJ/kg), niin orgaaninen aines synnyttää lämpöä palaessaan  $8\,900\text{ kg/v} \times 19,3\text{ MJ/kg} = 171\,770\text{ MJ/v}$ ,

---

<sup>7</sup> 0,75 sedimentin vesipitoisuus (75 %)

<sup>8</sup> 0,75 hakekattilan hyötysuhde

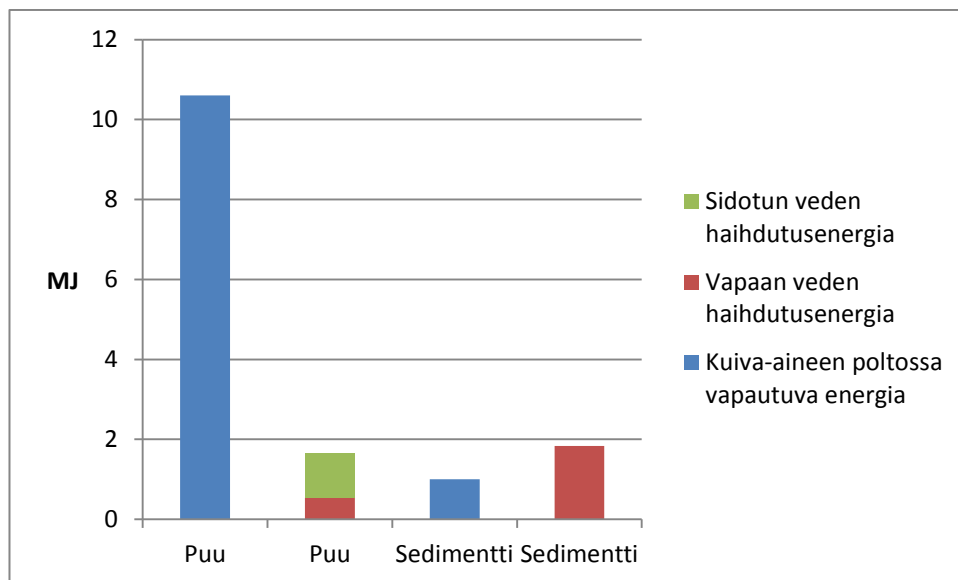
<sup>9</sup> Muuntokerroin

mikä on  $171\,770 \text{ MJ/v} : 3\,600 \text{ MJ/MWh}^{10} = 48 \text{ MWh/v}$ . Sedimentin jalostuksen energian kulutukseksi tulee  $91 \text{ MWh/v} - 48 \text{ MWh/v} = 43 \text{ MWh/v}$ .

Taulukossa 12 on esitetty puun ja sedimentin kuiva-aine, sidotun ja vapaan veden määrät, sekä kuiva-aineen poltossa vapautuvat energiamäärät. Taulukossa näkyy myös eri tavoin sitoutuneen veden haihdutukseen kuluva energiamäärä. Taulukon arvot ovat las- kuesimerkistä. Kuvio 1 havainnollistaa puun ja sedimentin kuiva-aineen poltossa vapau- tuva energia suhdetta niiden sisältämän veden haihdutukseen kuluvaan energiaan. Puul- la poltossa syntyy enemmän energiaa kuin veden haihdutukseen kuluu. Sedimentillä tilanne on päin vastainen.

Taulukko 12. Puun ja sedimentin ominaisuuksien vertailua

	Kuiva-aineen määrä	Kuiva-aineen poltossa vapautuva energia	Veden sitoutumine		Haihduttamiseen kuluva energia
			Vapaa vesi	Veden määrä	
Puu (1 kg, kosteus 45 %)	0,55 kg	10,6 MJ	Vapaa vesi	0,22 kg	0,537 MJ
			Sidottu vesi	0,23 kg	1,124 MJ
Sedimentti (1 kg, kosteus 75 %)	0,25 kg, josta palavaa 0,05 kg	1,0 MJ	Vapaa vesi	0,75 kg	1,832 MJ
			Sidottu vesi	0,0 kg	0 MJ



Kuvio 2. Puun ja sedimentin poltossa vapautuvan energian taseet

<sup>10</sup> Muuntokerroin

Vuodessa järvimalmista saatava lisätulo olisi  $2\,626\text{ kg/v} \times 0,158\text{ €/kg} = 414,91\text{ €/v}$ . Lämpöä kuluu malmin jalostukseen  $43\text{ MWh/v}$ , jolloin rahaa kuluu jalostukseen  $43\text{ MWh/v} \times 42,40\text{ €/MWh} = 1\,823,20\text{ €/v}$ .

Sedimentin läjitys rantavyöhykkeelle läjitysaltaaseen maksaa keskimäärin noin  $10\text{ €/m}^3$  (Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto 2012, 40). Sedimentin tiheys on  $1,17\text{ t/m}^3 - 1,18\text{ t/m}^3$  (Liikennevirasto 2010, 2), jolloin kustannukset ovat  $10\text{ €/m}^3 : 1,17\text{ t/m}^3 = 8,55\text{ €/t}$ . Sedimenttiä poltettaessa sedimentin läjityksestä syntyy säästöjä  $178\text{ t/v} \times 8,55\text{ €/t} = 1\,521,9\text{ €/v}$ .

Sedimentti muodostaa tuhkaa esimerkissä niin paljon, että lämpölaitoksen tuhkaa ei voida hyödyntää lannoitteen raaka-aineena, joten se on sijoitettava kaatopaikalle. Tuhkaa muodostuu puuta poltettaessa  $3\,568\,000\text{ kg/v} \times 0,55 \times 0,005 = 9\,812\text{ kg/v}^{11}$ . Puutuhkan lisäksi syntyy tuhkaa, joka on peräisin sedimentistä. Laskussa sedimentin kuiva-aineen määrä on 80 %, josta tulee vähentää raudan määrä, joka on keskimäärin 5,9 %. Sedimentin tuhkan määrä on  $44\,500\text{ kg/v} \times 0,80 \times (1 - 0,059) = 33\,500\text{ kg/v}$ . Tuhkaa syntyy tällöin yhteensä  $32\,975\text{ kg/v} + 9\,812\text{ kg/v} = 43\,311\text{ kg/v} \approx 43\text{ t/v}$ .

Tuhkan loppusijoitus maksaa  $120\text{ €/t}$  (Puhas Oy 2013), jolloin tuhkan loppusijoituksesta syntyy kuluja  $120\text{ €/t} \times 43\text{ t/v} = 5\,160\text{ €/v}$ .

Sedimentin kuljetuskustannukset ovat  $35\text{ km}$  oletetulle keskimääräiselle matkalle  $5\text{ €/t}$ , kun ajot tapahtuvat täysillä  $40\text{ t}$  rekka-autoilla (Väänänen 2013). Rekan lastauksen kustannukset voi jättää laskennasta pois, sillä ruoppausmassa lastattaisiin joka tapauksessa maansiirtoautoon läjityspaikalle kuljetusta varten. Sedimentin kuljetuskustannuksiksi tulee vuodessa  $178\text{ t/v} \times 5\text{ €/t} = 890\text{ €/v}$  keskimääräisen matkan ollessa  $35\text{ km}$ .

Taulukosta 13 näkyy järvimalmin jalostuksesta syntyvät tuotot ja kustannukset vuositasolla. Taulukon luvut on koottu laskuesimerkistä.

---

<sup>11</sup> 0,55 puun kuiva-aineisuus ja 0,05 puun tuhkapitoisuus

Taulukko 13. Järvimalmin jalostuksesta syntyvät tuotot ja kustannukset yhteenlaskettuna

Järvimalmista saatava myyntitulo	414,91 €/v
Jalostukseen kuluvan energian hinta	-1 823,20 €/v
Läjäytysten säästöt	1521,90 €/v
Tuhkan loppusijoituksen kustannukset	-5280,00 €/v
Sedimentin kuljetuskustannukset	-890,00 €/v
<b>Yhteensä</b>	<b>-6056,39 €/v</b>

## 11 Päätäntä

### 11.1 Uusia tutkimusaiheita

Järvimalmin klooripitoisuus tulisi selvittää tulevissa tutkimuksissa. Kloori on merkittävässä asemassa polttoaineen käyttökelpoisuutta ajateltaessa. Opinnäytetyössä esitetty toimintamalli on uusi. Mikäli tällainen toimintamalli saataisiin jalostettua taloudellisesti kannattavaksi, voisi Suomen vesistöjen tila kohentua huomattavasti. Jatkotutkimuksissa tulisi selvittää uuden jalostusketjun ympäristövaikutukset pitkällä aikavälillä.

Tutkimuksissa tulisi selvittää myös, kuinka sedimentin sisältämä mineraaliaines käyttäytyy suuremman kokoluokan polttolaitteessa. Arinapinnalle voi muodostua kuumia pisteitä, jotka lyhentävät arinan käyttöikä. Opinnäytetyötä tehtäessä heräsi ajatus, että lämpölaitosten pohjatuhkasta voitaisiin erottaa magneettisesti rauta, vaikkei järvimalmia jalostettaisikaan. Puupolttoaineet sisältävät pieniä määriä rautaa. Puupolttoaineita poltetaan niin paljon, että raudan määrä voisi muodostua vuositasolla merkittäväksi.

### 11.2 Virhearviointi

Työssäni virheitä on voinut syntyä lähteitä valitessa. Valitsin lähteet oman tietotaitoni pohjalta mahdollisimman luotettavista materiaaleista. Lähteissä on kuitenkin voinut olla virheellistä tietoa, joka on tätä kautta päätynyt myös työhöni.

Järvimalmia koskevat tutkimukset ovat pääasiassa hyvin vanhoja teoksia, koska järvimalmin tutkimiseen ei ole ollut intressejä korkeiden kustannusten vuoksi. Vanhat tutkimusmenetelmät eivät välttämättä ole olleet yhtä tarkkoja kuin nykyaikaiset, joka voi lisätä lähteiden epäluotettavuutta.

Sedimentin nostossa virhettä voi aiheuttaa satunnainen näytteenottoaika ja nostotapa, joka poikkeaa kaikista ruoppausmenetelmistä. Näytteen nostopaikkoja lisäämällä olisi voitu vähentää virheen riskiä. Useammalle näytteelle olisivat voineet tehdä myös tilastollisia testejä, jotka olisi lisännyt luotettavuutta. Näin pienellä otannalla tilastollisesta testaamisesta ei ole hyötyä. Kustannukset olisivat nousseet oleellisesti, mikäli näytteiden nosto olisi suorittaneet ruoppauskalustolla.

ICP-analyysissä luotettavuutta testataan ottamalla samasta näytteestä toinen alkuaine-analyysi. Näytteideni osalta rinnakkaiskokeet samoista näytteistä osoittautuivat yhtä poikkeusta lukuun ottamatta erittäin luotettaviksi. Mainittu poikkeama saattoi johtua epähomogeenisesta näytteestä.

Emme saaneet määritettyä järvisedimentistä klooripitoisuutta, joka on ratkaisevassa roolissa kattilan korroosiossa, sekä furaanien ja dioksiinien muodostumisessa. Sedimentin suuri klooripitoisuus voi estää järvimalmin jalostuksen puupolttoainetta käyttävässä kattilassa.

Sedimentin orgaanisen aineen lämpöarvo voi poiketa paljonkin puun lämpöarvosta. Eri orgaanisilla yhdisteillä on eri lämpöarvot ja luotettavan tuloksen sedimentin kuiva-aineen lämpöarvosta saa vain pommikalorimetrillä mittaamalla.

Sedimentin kosteuden määrittämisessä ei voitu käyttää standardin mukaista menetelmää, koska näytteet olivat suuria ja sisälsivät paljon vettä. Näytteet eivät olisi ehtineet täysin kuivumaan vuorokaudessa. Kosteuden määrittämisessä 3 viikon huoneenlämpökuivatuksen aikana astioihin on voinut joutua partikkeleita (esim. pölyä, jne.), jotka voivat vääristää tulosta.



### 11.3 Toimenpidesuositukset

Järvimalmin jalostus ei näytä olevan kannattavaa, ainakaan jos ei oteta huomioon muita järvimalmin sisältämiä taloudellisesti arvokkaita komponentteja. Kannattavuuslaskennassa selvisi, että suurimmat säästöt syntyvät itse sedimentin läjityksen kustannuksien häviämisestä. Toisaalta suurimmat kustannukset syntyvät, kun tuhka joudutaan sijoittamaan kaatopaikalle.

Järvimalmin jalostuksesta ei synny suuria tuloja lämmöntuottajalle, koska jalostetun raudan määrät jäävät väistämättä pieniksi. Jos järvimalmi saataisiin erotettua tehokkaasti ruopatusta sedimentistä, voitaisiin päästä parempaan kannattavuuteen. Itse järvimalmi ei sisällä niin paljoa vettä suhteessa raudan määrään kuin sedimentti.

Kannattavuus paranisi huomattavasti, jos poltosta syntyvä tuhka voitaisiin käyttää jotenkin hyödyksi. Sedimentin lisäyksestä puupolttoaineeseen voi syntyä myös yllättäviä kustannuksia esimerkiksi lisääntyneiden lämpövoimalan häiriöiden muodossa. Sedimentti voi sisältää myös klooria, joka voi aiheuttaa ongelmia poltossa.

Sedimentin poltto huippulämmöntarpeen aikana ei ole järkevää, koska tällöin tarvitaan lämpölaitoksesta ulos suurin mahdollinen määrä lämpöä. Tuhkan sulamisen kannalta tärkeitä alkuaineita ovat alkalimetallit sekä kloori. Kaliumin, kalsiumin ja piin suhteet toisiinsa vaikuttavat myös tuhkan sulamiseen. Kattilan korroosion kannalta kloori, rikki, natrium ja kalium ovat tärkeitä alkuaineita. Päästöjen kannalta olennaisessa asemassa on kloori ja rikkipitoisuus.

Taulukoista 1, 5, 6 ja 7 käy ilmi, että sedimenttien koostumuksessa on vaihtelua. Suurin osa Suomen järvisedimenteistä soveltuu polttoon, mutta poikkeuksia voi myös olla. Jokaisen sedimentin soveltuvuus polttoon on arvioitava tapauskohtaisesti eri haitta-aineiden osalta.

## Lähteet

- Alakangas E. 2000. Suomessa käytettävien biopolttoaineiden ominaisuuksia. VTT.  
[www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf). 3.6.2013.
- Bioenergiatieto. 2012. Kaasumaisen biopolttoaineen palaminen.  
[http://www.bioenergiatieto.fi/default/www/etusivu/energian\\_tuotanto/energiatuotannon\\_tekniikka/polttotekniikka\\_kaasumaisille\\_polttoaineille/kaasumaisen\\_biopolttoaineen\\_palaminen/](http://www.bioenergiatieto.fi/default/www/etusivu/energian_tuotanto/energiatuotannon_tekniikka/polttotekniikka_kaasumaisille_polttoaineille/kaasumaisen_biopolttoaineen_palaminen/). 8.1.2014.
- Energian hinnat. 2013. Liitetaulukko 2. Energian hintoja lämmöntuotannossa maaliskuussa 2013. [http://www.stat.fi/til/ehi/2013/01/ehi\\_2013\\_01\\_2013-06-20\\_tau\\_002\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2013/01/ehi_2013_01_2013-06-20_tau_002_fi.html). 12.9.2013.
- Forex Bank. 2013. Valuuttalaskin. <http://www.forex.fi/kurssit/valuuttalaskin/>. 13.9.2013
- Geologian tutkimuskeskus GTK. 2012. Metallit.  
<http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/metallit/>. 20.2.2013.
- Google Maps 2013. <https://maps.google.fi/>
- Hassinen, U. 2013. Opinnäytetyöhön liittyen. Email Tomi.Onttonen@edu.pkamk.fi. 2.5.2013.
- Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto. 2012. KRAPUOJAN SUISTOALUEEN HAITTA-AINE- JA KAIVUMAIDEN SIIJOITUSPAIKKASELVITYS.  
[http://www.hel.fi/hel2/ksv/ostersundom/krapuoja\\_sijoituspaikkaselvitys\\_270912.pdf](http://www.hel.fi/hel2/ksv/ostersundom/krapuoja_sijoituspaikkaselvitys_270912.pdf). 28.5.2013.
- Hietala, S., Tervo, T. & Nenonen, J. POHJOIS-KARJALAN KALLIOPERÄ JA MALMIESIINTYMÄT.
- Häkkinen, K. 2002. Matematiikan peruskurssi, talousmatematiikan osio.  
<http://www.math.jyu.fi/matyl/peruskurssi/talousmatematiikkaa/index.html>. 25.5.2013.
- Härkönen, M. 2012. Puun polttoainekäyttö pienissä aluelämpölaitoksissa.  
[www.forestpower.net/data/liitteet/103854=hakelamporaportti.pdf](http://www.forestpower.net/data/liitteet/103854=hakelamporaportti.pdf). 1.6.2013.
- Härö, E. 2005. Suomen vuoritoimi ja metalliruukit. <http://www.antskog.fi/ruukit.pdf>
- Index Mundi. 2012. <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=iron-ore>. 4.4.2013.
- Jalovaara, J., Aho, J., Hietämäki, E. & Hyytiä, H. 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5–50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. Vammala: Vammalan Kirjapaino Oy.
- Jätelaki 646/2011.
- Kauppila, P., Räisänen, M. L. & Myllyoja, S. 2011. Metallimalmikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt.  
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=134447&lan=fi>. 6.2.2013.
- Kontkanen, V. 2006. Rikastustekniikan historiaa Outokummun kaivoksella.  
[http://www.kaivosmuseo.net/content/artikkelit\\_tutkimukset/artikkelit/files/rikastustekniikan\\_historiaa\\_outokummun\\_kaivoksella.pdf](http://www.kaivosmuseo.net/content/artikkelit_tutkimukset/artikkelit/files/rikastustekniikan_historiaa_outokummun_kaivoksella.pdf). 2.2.2013.
- Laitakari, A. 1940. Promemoria Järvimalmeista.
- Liikennevirasto. 2010. POHJANKURUN VÄYLÄN LÄJITYSALUEET.  
<http://portal.liikennevirasto.fi/portal/page/portal/f/hankkeet/suunnitteilla/pohjankuru/yva/P10347%20Tutkimusraportti%20A0.pdf>. 17.3.2013.
- Metallinjalostajat ry. 2009. Teräskirja, Teräs – silta tulevaisuuteen. 8. p. Tampere: Esa Print Oy.
- MMMa 24/11.

- Motiva. 2013. Biopolttoaineiden lämpöarvoja.  
[http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/bioenergia/biopolttoaineiden\\_lampoarvoja](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/biopolttoaineiden_lampoarvoja). 16.4.2013.
- Mäkinen, J. & Pajunen, H. 2005. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, Vol. 5. Correlation of carbon with acid-soluble elements in Finnish lake sediments: two opposite composition trends. s. 169–181.
- Pajunen, H. 2004. Järvisedimentit kuiva-aineen ja hiilen varastona.  
<http://arkisto.gtk.fi/tr/tr160.pdf>. 30.4.2013
- Puhas Oy. 2013. Jätekeskuksen vastaanottohinnat 1.1.2013 alkaen.  
<http://www.puhas.fi/p/fi/hinnat/hinnastot/jatekeskus/#pientuojat>. 29.5.2013
- Puustinen, K. 2003. Suomen kaivosteollisuus ja mineraalisten raaka-aineiden tuotanto vuosina 1530–2001, historiallinen katsaus erityisesti tuotantolukujen valossa. Geologian tutkimuskeskus.
- Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, L. 2002. Poltto ja palaminen. 2. p. Helsinki: Gummerus.
- Schultz, E., Vuori, K. & Wallin, J. 2011. Länsirannikon jokisuistojen sedimenttien metallipitoisuudet ja myrkyllisyys valobakteeritestin avulla arvioituna.
- Tahvanainen, I. 2013. Lehtori. Karelia-ammattikorkeakoulu. Haastattelu huhtikuu 2013.
- Tuisku, P. & Piispanen, R. 2005. Mineralogian Perusteet Verkkokirja. 5.3.5 Limoniitti.  
<http://cc.oulu.fi/~petuisku/Mineralogia/MinPer2.htm>. 8.4.2013.
- Valtion ympäristöhallinto. 2011. Pilaantuneet sedimentit ja ruoppausjätteiden käsittely.  
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=11431&lan=fi>. 26.5.2013.
- Vartiainen, U. 1992. Möhkön rautaruukki 1848–1908. Museovirasto Rakennushistorian osasto.
- Vesivälskäri - vesistöjen omaehtoisen kunnostamisen hankeasiakirjat. 2001.  
<http://www.ymparistokeskus.fi/download.asp?contentid=37408&lan=fi>. 2.5.2013
- Viinikkala, J., Mykkänen, E. & Ulvi, T. 2005. Ruoppaus. Teoksessa Ulvi, T. & Lakso, E. (toim.) Järvien kunnostus. Helsinki: Edita, 211–240.
- Väisänen, P. 2007. Teräs, Perustietoa arkkitehtipiskelijälle. Vammala: Vammalan kirjapaino Oy.  
[http://arkkitehtuuri.tkk.fi/oppituolit/ro/julkaisut/Teras\\_web.pdf](http://arkkitehtuuri.tkk.fi/oppituolit/ro/julkaisut/Teras_web.pdf). 9.4.2013.
- Väänänen, V. 2013. Maanrakennus ja Kuljetus Väänänen Oy 2013. Puhelinhaastattelu 15.5.2013.
- Ympäristöministeriö. 2004. Sedimenttien ruoppaus- ja läjitysohje.  
<http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B7DCA31D2-28A0-4459-B217-D898DDBFA60A%7D/31650>. 8.1.2014.
- Öljyalan keskusliitto. 2013. Öljytuotteiden kuluttajahintaseuranta.  
<http://www.oil.fi/fi/tilastot-1-hinnat-ja-verot/11-oljytuotteiden-kuluttajahintaseuranta>. 19.9.2013.
- Örberg, H., Larsson S. & Hedman B. Pellettime: Final report WP 4 Pelletizing and Combustion. Swedish university of agricultural sciences, unit of biomass technology and chemistry.