

Pro gradu -tutkielma

**Energiapajun viljely ja käyttö vesien puhdistuksessa -
tekniis-taloudellinen tarkastelu**

Antti Niemi



Jyväskylän yliopisto

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede ja -teknologia

1.9.2014

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta
Bio- ja ympäristötieteiden laitos
Ympäristötiede ja -teknologia

Niemi Antti: Energiapajun viljely ja käyttö vesien puhdistuksessa - teknis-
taloudellinen tarkastelu
Pro gradu -tutkielma: 64 s.
Työn ohjaajat: Tohtori Arvo Leinonen ja professori Tuula Tuhkanen
Tarkastajat: Professori Tuula Tuhkanen ja Tohtori Aki Villa
Syyskuu 2014

Hakusanat: paju, pajupuhdistamo, bioenergia, jätevedenpuhdistus, valumavesi

TIIVISTELMÄ

Tämän työ on osa VTT:n koordinoimaa Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektia, jossa tutkitaan pajun eri tuotanto- ja käyttö käyttömahdollisuuksia Suomessa. Ilmastonmuutoksen ja fossiilisten polttoaineiden rajallisuuden takia on syntynyt kasvava paine siirtyä käyttämään laajemmin uusiutuvaa energiaa. Energiapaju on osoittautunut lupaavaksi vaihtoehtoksi energiakasvien joukossa. Viimeaikoina on herännyt mielenkiinto parantaa energiapajun tuotannon kannattavuutta hyödyntämällä pajua erilaisten ravinteita sisältävien vesien puhdistuksessa. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on kuvata energiapajun vaihtoehtoisia tuotantoketjuja ja laskea niiden kustannukset. Tarkastelu pohjautuu pääasiassa Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektissa tehtyihin tutkimuksiin. Lisäksi hyödynnettiin muuta alan kirjallisuutta.

Pajuhakkeen tuotantokustannukset laskettiin sekä suo- että peltopohjalle perustettavalle viljelmälle. Lisäksi tarkasteltiin kombinaatiota, jossa pajuviljelmää käytetään jätevedenpuhdistamon prosessiveden jatkokäsittelyssä ja turvetuotantoalueiden valumavesien puhdistuksessa energiahakkeen tuotannon ohella. Pajuhakkeen tuotantokustannuksiksi peltomaalla saatiin 15,9 – 19,5 €/MWh ja suopohjalla 19,5 – 21,3 €/MWh käyttöpaikalle toimitettuna. Kun energiapajuviljelmää käytetään myös jätevedenpuhdistamon prosessiveden käsittelyssä, pajuhakkeen tuotantokustannukset alenivat suuremman sadon ja poistuneiden lannoituskulujen ansiosta 13,8 euroon/MWh. Kirjallisuuden pohjalta esitettiin myös arvio skenaariosta, jossa pajupuhdistamoa käytetään korvaamaan typen ja fosforin käsittely jätevedenpuhdistamolla. Tällöin jätevedenpuhdistuksessa syntynyt säästö voi olla jopa suurempi kuin pajuhakkeen tuotantokustannukset. Turvetuotantoalueiden valumavesien puhdistuksessa pumppaamalla varustetun energiapajuviljelmän kustannuksiksi tuotettua turpeen MWh:a kohti saatiin 0,45 €/MWh.

Maataloustuet mukaan lukien viljelijän vuosittaiset tulot eri skenaarioissa ovat 228 – 634 €/ha vuodessa. Tulokset osoittavat, että energiapajun viljely voi olla Suomessa taloudellisesti kannattavaa ja, että viljelmän hyödyntämisellä prosessivesien puhdistuksessa voidaan tehostaa ravinteiden poistoa vesistä ja lisätä pajuhakkeen tuotannon kannattavuutta.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Science
Department of Biological and Environmental Science
Environmental Science and Technology

Niemi Antti: Technological and financial analysis of willow cultivation for energy and vegetation filter
Master thesis: 64 p.
Supervisors: Dr. Arvo Leinonen and Professor Tuula Tuhkanen
Inspectors: Professor Tuula Tuhkanen and Dr. Aki Villa
September 2014

Key words: willow, bioenergy, phytoremediation, vegetation filter, wastewater

ABSTRACT

This study is a part of a project called Energy willow`s sustainable production and use coordinated by VTT. Because of the climate change and lack of greenhouse gas free energy, there has been an increasing pressure to produce more renewable energy. Willow has proven to be a promising alternative among energy crops. Recently, there has been growing interest in improving the profitability of willow cultivation by using it for phytoremediation. The goal of this paper is to describe the alternative production chains of willow production and to calculate their costs. Also the economical potential of using willow as vegetation filter for wastewater and drainage waters coming from peat production are estimated. The values for the calculations come mainly from the studies carried out in the Energy willow`s sustainable production and use –project.

Production costs were calculated for cultivation in field land and former peat production area. Willow chip production cost on fields was calculated to be 15.9 – 19.5 €/MWh and 19.4 – 21.3 €/MWh on peat land. When treating pre-treated wastewater with willow the production cost of willow is 13.8 €/MWh due to higher yield and savings in fertilization. Also a scenario where willow is used to replace chemical precipitation of phosphorus and nitrogen denitrification-nitrification process in the wastewater treatment plant was evaluated based on literature. In this options the savings in wastewater treatment can be even higher than the production cost of willow chips. When using willow to filter drainage water from peat production, the production cost was calculated to be 0.45 €/MWh for produced MWh from peat.

When agricultural subsidies are included the income for the farmer was calculated to be 228 – 634 €/ha a. The results show that willow cultivation can be economically viable in large scale and that using willow as vegetation filter can increase viability.

ALKUSANAT

Tämän työ on osa Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektia, jossa tutkitaan pajun erilaisia käyttömahdollisuuksia Suomessa. Tutkimusosapuolet projektissa ovat Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Itä-Suomen yliopisto, Suomen ympäristökeskus SYKE ja Pohjoisen Keski-Suomen oppimiskeskus (POKE). Yrityskumppaneina ovat Vapo Oy, Fortum Power and Heat Oy ja Biowatti Oy.

Gradun ohjaajina ovat toimineet Tohtori Arvo Leinonen VTT:ltä, Professori Tuula Tuhkanen Jyväskylän yliopistolta ja Tohtori Aki Villa Itä-Suomen yliopistolta. Työ koostuu kirjallisuuskatsauksesta ja laskennallisesta osuudesta. Kirjallisuuskatsauksessa esitellään energiapajuhakkeen tuotantoa, ja laskuosiossa esitetään gradussa lasketut pajuhakkeen erilaisten tuotantoketjujen kustannukset. Pääasiallisina lähteinä kirjallisuuskatsauksessa ja laskuosiossa ovat kyseessä olevassa energiapajuprojektissa tehdyt tutkimusraportit.

Haluan kiittää Arvo Leinosta ja Aki Villaa ohjauksesta ja mahdollisuudesta päästä mukaan mielenkiintoiseen projektiin. Kiitän myös Tuula Tuhkasta ja Timo Ålanderia kirjoituksen ohjauksesta ja avusta aiheenvalinnassa.

Jyväskylä 1.9.2014

Antti Niemi

Sisällysluettelo

1 JOHDANTO	10
2 PAJUN TUOTANTO JA KÄYTTÖKETJUT - KIRJALLISUUSKATSAUS	3
2.1 Pajuviljelmän perustaminen ja hoito.....	4
2.1.1 Yleistä perustamisesta.....	4
2.1.2 Viljelyalueen valinta	5
2.1.3 Viljelymaan ennakkovalmistelut ja istutus	6
2.1.4 Viljelmän hoito.....	8
2.2 Pajun korjuu ja varastointi.....	11
2.2.1 Yleistä korjuusta.....	11
2.2.2 Pajun korjuu hakkeena.....	12
2.2.3 Pajun korjuu kokopuuna	14
2.2.4 Pajun korjuu paaleina.....	15
2.2.5 Pajun korjuu energiapuuharvennusten kalustolla.....	15
2.2.6 Varastointi ja kuljetus käyttöpaikalle	16
2.3 Pajun polttokäyttö	17
2.3.1 Pajun ominaisuudet polttoaineena	17
2.3.2 Polttotekniikka.....	19
2.3.3 Pedin käyttäytyminen ja agglomeraatio.....	20
2.3.4 Likaantuminen ja korroosio	20
2.3.5 Pajun seospoltto.....	21
2.3.6 Pajun tuhkat.....	21
2.4 Paju pyrolyysiöljyn raaka-aineena.....	23
2.4.1 Yleistä	23

2.4.2 Pyrolyysireaktori ja -prosessi	24
2.4.3 Pajun ominaisuudet pyrolyysin raaka-aineena	25
2.5 Pajun käyttö vesien puhdistuksessa	27
2.5.1 Pajun soveltuvuus vesien puhdistukseen	27
2.5.1 Prosessiveden käsittely pajupuhdistamolla	27
2.5.2 Kaatopaikkojen suotovesien puhdistus	30
2.5.3 Turvetuotantoalueen valumavesien puhdistus	31
3 AINEISTOT JA MENETELMÄT	32
4 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	33
4.1 Pajuviljelmän perustamiskustannukset	33
4.1.1 Perustamis- ja ylläpitokustannukset suopohjalla	33
4.1.2 Perustamis- ja ylläpitokustannukset peltomaalla	36
4.2 Korjuun kustannukset	40
4.3 Jätevedenpuhdistamon prosessiveden puhdistuksen talous	42
4.3.1 Lähtökohdat	42
4.3.2 Pajupuhdistamo perinteisen jätevedenpuhdistusprosessin lisänä	43
4.3.3 Pajupuhdistamo perinteisten jätevedenpuhdistusprosessien korvaajana	47
4.4 Turvetuotantoalueiden valumavesien puhdistuksen talous	48
4.4.1 Pajupuhdistamon kustannukset	48
4.4.2 Pajupuhdistamon kustannukset muihin valumavesien puhdistustekniikoihin verrattuna	50
4.5 Tuotantoketjujen kannattavuus ja herkkyysanalyysi	52
4.5.1 Tuotantoketjujen kannattavuus	52
4.5.2 Herkkyysanalyysi	54
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	57
LÄHDELUETTELO	59

LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO

VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
SYKE	Suomen ympäristökeskus
POKE	Pohjoisen Keski-Suomen oppimiskeskus
MWh	Megawattitunti
m-%	Massaprosentti
m-% _{ka}	Massaprosenttia kuiva-aineessa
t _{ka}	Tonnia kuiva-ainetta
kg/i-m ³	Kilogrammaa per irtokuutio
cSt	Senttistoki
<i>C</i>	Vuosittainen poisto- ja korkokustannus
<i>n</i>	Investoinnin elinikä vuosissa
<i>r</i>	Korkoprosentti
<i>t</i>	Vuosi jolloin kustannus/tulo syntyy
<i>T</i>	Ajanjakso jossa kustannukset/tulot syntyvät
<i>A_t</i>	Kustannuksen/tulon suuruus
<i>Q_{net,ar}</i>	Polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa
<i>Q_{net,d}</i>	Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo
<i>M_{ar}</i>	Polttoaineen kokonaiskosteus saapumistilassa
<i>E</i>	Energiasisältö
<i>K</i>	Kustannus MWh:ia kohti

I Investoinnin suuruus

Y Ylläpitokustannus

P Pinta-ala

1 JOHDANTO

Kasvavan energiantarpeen ja ilmastonmuutosta vastaan käytävän kamppailun seurauksena paine uusiutuvien energianlähteiden laajamittaisempaa käyttöä kohtaan on kasvanut. Bioenergia on yksi lupaavimmista vaihtoehtoisista fossiilisille polttoaineille, joiden käyttöä pyritään vähentämään kasvihuonekaasupäästöjen takia. Esimerkiksi energiakasvien viljely on yleistynyt, mutta niiden asemaan on heikentänyt keskustelu eettisistä ongelmista ja kilpailusta ruoantuotannon kanssa. Pajua voidaan kasvattaa muuhun viljelyyn huonosti sopivalla maalla, kuten suopohjalla, joten se ei kilpaile ruoantuotannon kanssa niin voimakkaasti kuin useat peltoenergiakasvit.

Ruotsi on pajun viljelyn johtavia maita, siellä energiapajua on kasvatettu jo 20 vuoden ajan. Nykyinen pinta-alan pajun viljelyksessä on noin 16 000 hehtaaria (Biomob 2011). Muita Euroopan maita, joissa pajun viljely on saanut jalansijaa ovat Puola (1000 – 2000 ha) ja Iso-Britannia (Ericsson ym. 2006). Suomessa energiapajuviljelmiä on vain muutamia kymmeniä hehtaareja. Ruotsissa on onnistuttu kehittämään lajikkeita, jotka sopivat hyvin pohjoisiin oloihin. Näitä ovat esimerkiksi Karin ja Klara -pajulajikkeet (Suomen energiapaju Oy 2009). Myös Itä-Suomen yliopistossa on tutkittu hyvällä menestyksellä Salix Schwerinii -pajulajin kloonina, jolla on todettu olevan hyvä saanto ja hyvä talven kestävyys kenttäkokeissa. (Paappanen ym. 2012.) Energiapajuksi sopivat parhaiten nopeakasvuiset jalostetut lajikkeet, jotka sopivat viljelyominaisuuksiltaan nykyaikaista peltoviljelyä muistuttavaan kasvatukseen. Nykyisin käytetään useimmiten eri lajeista risteytettyjä hybridilajeja.

Paju on nopeakasvuinen puu, joten se soveltuu hyvin lyhytkiertoviljelyyn. Se kasvaa nopeammin kuin talousmetsä ja voi parhaimmillaan tuottaa Suomen oloissa noin 8 kuivatonna hehtaarilta vuodessa, mikä vastaa 4-5 tonnia polttoöljyä. Pajusta voidaan tehdä haketta tai bioöljyä energiantuotannon tarpeisiin. Se soveltuu myös erilaisten jätevesien ja lietteiden puhdistukseen, koska se sitoo kasvaessaan tehokkaasti typpeä, fosforia ja kiintoaineita. Pajua voidaan käyttää myös maaperän puhdistamiseen raskasmetalleista. (Suomen energiapaju Oy 2009).

Pajun viljelyn taloudellinen kannattavuus on luonnollisesti tärkeässä osassa sen laajamittaisempaa käyttöä ajatellen. Viljelyn tulisi olla etenkin viljelijän kannalta houkuttelevaa. Pajun monikäyttöä ajatellen tärkeää on selvittää myös prosessiveden ja turvetuotantoalueiden kuivatusvesien puhdistuksen vaikutukset pajun tuotantokustannuksiin.

Tässä työssä on tarkoituksena tarkastella energiapajun erilaisia käyttöketjuja ja niiden taloudellisuutta. Pajun viljelyä energiakäyttöön tarkastellaan tavallisissa pelto-olosuhteissa ja turvetuotannosta poistuneella suopohjalla. Lisäksi tarkastellaan yhdistelmäkäyttöä energiakäytössä ja erilaisten vesien puhdistuksessa. Lopuksi lasketaan eri ketjujen kokonaiskustannukset ja arvioidaan pajun viljelyn kannattavuutta.

Työn pääasiallisia lähteitä ovat Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektissa tehdyt tutkimusraportit pajuviljelmän perustamisesta, korjuusta ja loppukäytöstä (Paappanen ym. 2012, Leinonen ym. 2013, Sihvonen ym. 2013 & Hurskainen ym. 2013). Kyseisen projektin tavoitteena on edistää energiapajun viljelyä ja tuotantoa Keski-Suomessa ja Pohjois-Karjalassa, kehittää korjuu-, käsittely- ja toimitusketjua suomalaisista lähtökohdista käsin. Lisäksi pyritään selvittämään pajun soveltuvuutta laitospolttoaineena ja raaka-aineena hajautetun biodieselin valmistuksessa, pajuviljelmän hyötykäyttöä biosuodattimena haja-asutusalueiden valumavesien käsittelyssä ja selvittämään kilpailukykyä sekä viljelypotentiaalia maakunnissa. Hankkeen osatehtäviä ovat:

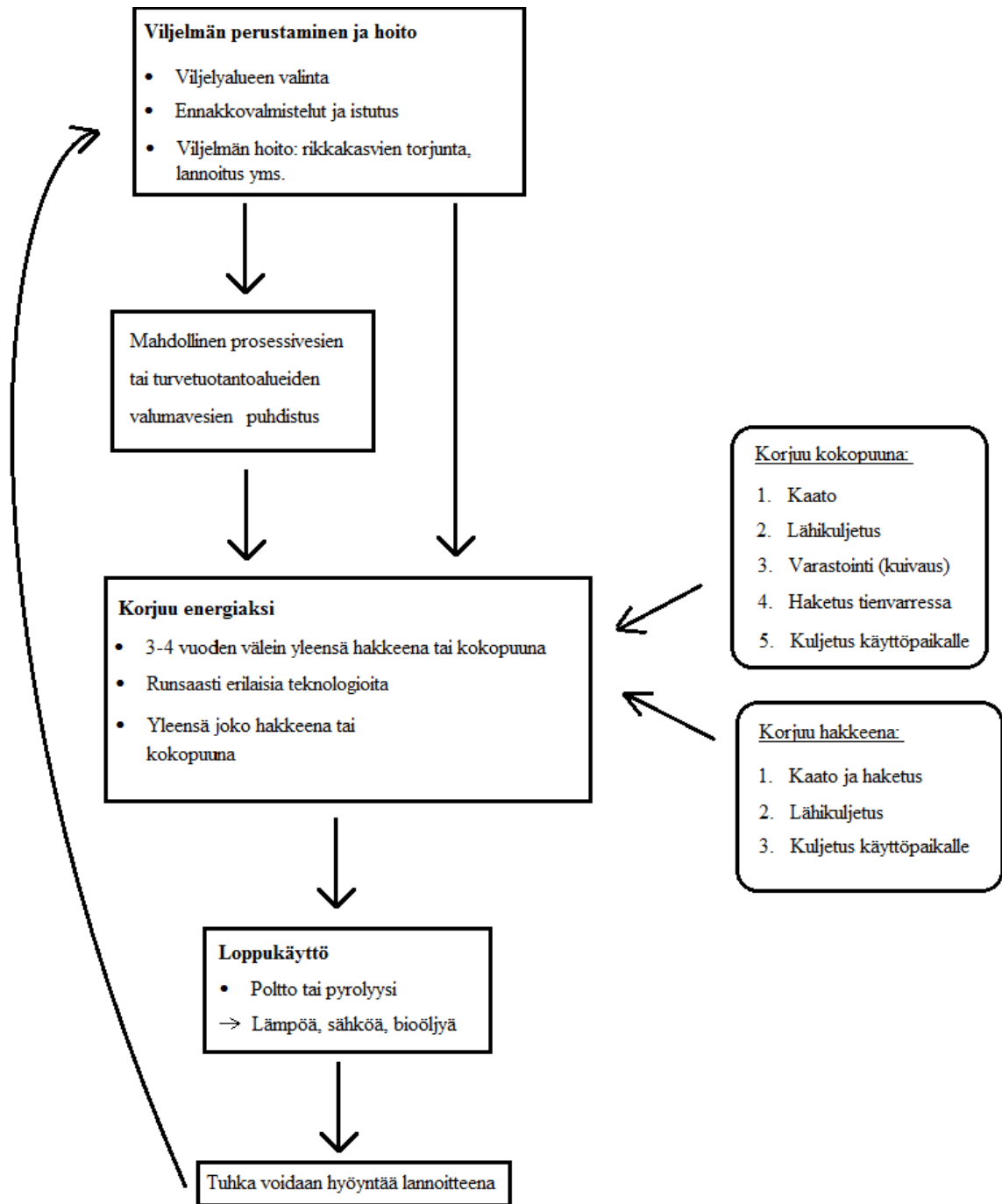
1. Energiapajuviljelmän perustaminen ja kasvatusta
2. Puhdistamovesien jälkipuhdistus pajuviljelmällä
3. Turvetuotannon vesien suodatus pajuviljelmällä
4. Maatalouden valumavesien suodatus pajuviljelmällä
5. Korjuuteknologian kehittäminen
6. Käyttö polttolaitoksissa
7. Hajautettu biodieseltuotanto
8. Liiketoimintakonseptit
9. Viljelypotentiaali

Projektissa on vuosina 2011 – 2013 perustettu yhteensä viisi pajuviljelmää Keski-Suomeen ja Pohjois-Karjalaan, joiden kokonaispinta-ala on 7,0 ha. Viljelmillä on tutkittu muun muassa viljelmän perustamista ja perustamiskustannuksia, pajun soveltuvuutta turvesuon jälkikäyttöön, erityyppisen lannoituksen ja pajulajien vaikutusta kasvuun ja soveltuvuutta ravin-

teita sisältävien jätevesipuhdistamon prosessivesien jälkipuhdistuksessa sekä turvetuotantoalueen valumavesien puhdistuksessa. Lisäksi on tutkittu pajun korjuuta, pajun poltto-ominaisuuksia ja polttoa sekä pyrolysointia bioöljyksi.

2 PAJUN TUOTANTO JA KÄYTTÖKETJUT - KIRJALLISUUSKATSAUS

Pajua tuotanto voidaan nähdä eri vaihtoehtoja sisältävinä käyttöketjuina (kuva 1). Eri ketjujen tuotantokustannukset riippuvat pitkälti käytetyistä menetelmistä ja paikallisista olosuhteista, joten tuotannon huolellinen suunnittelu on tärkeää. Pajuviljelmän elinikä on noin 25 vuotta, jonka aikana sato voidaan korjata 3 – 8 kertaa, riippuen kierron pituudesta. Pajun elinkaari voidaan jakaa eri vaiheisiin, ja kullekin vaiheelle voidaan laskea kustannukset erikseen. Työvaiheita ovat pajuviljelmän perustaminen ja hoito, korjuu, energiakäyttö ja mahdollinen käyttö vesien puhdistuksessa. Tässä kappaleessa käydään läpi ketjun eri vaiheet ja esitetään kuvaukset yleisimmin käytetystä teknologiasta.



Kuva 1. Energiapajun tuotantoketju

2.1 Pajuviljelmän perustaminen ja hoito

2.1.1 Yleistä perustamisesta

Pajuviljelmät perustetaan keväällä tai alkukesästä ja korjuu tapahtuu myöhään syksyllä tai talvella, kun kasvusto on talveentunut ja pudottanut lehtensä. Pajuviljelmän perustaminen on tehtävä huolellisesti mahdollisimman suuren sadon ja siten myös kannattavuuden maksimoimiseksi. Parilla ensimmäisellä vuodella on ratkaiseva merkitys koko viljelmän 25 vuoden elinkaaren tuotannon kannalta. Erityisen tärkeää peltomaalla on rikkakasvien torjunta jo

ennen pajun istuttamista ja riittävä lannoitus seuraavina vuosina. Pajun viljelytiheys on suurempi kuin tavallisessa metsänviljelyssä. Tämä yhdessä nopeakasvuisuuden kanssa mahdollistaa lyhyen kiertoajan, 3 – 8 vuotta. Istutusvuoden syksyllä tai talvella kasvusto leikataan kantaan ja uusi kasvusto versoaa keväällä kannoista. (Suomen energiapaju Oy 2009).

2.1.2 Viljelyalueen valinta

Energiapajun viljelyalue on valittava niin, että etäisyys loppukäyttöpaikkaan, kuten esimerkiksi polttolaitokseen, on mahdollisimman lyhyt. Myös viljelyalueen pinta-alalla on suuri merkitys viljelyn kannattavuuteen. Suositeltu vähimmäispinta-ala pajuvielmälle on noin 5 hehtaaria. Lyhyet kuljetusetäisyydet ja riittävän suuri pinta-ala ovat tärkeimpiä edellytyksiä pajun viljelyn kannattavuudelle. Paju kasvatuksessa maan pH:n tulisi olla yli 5,5 ja pohjaveden riittävän lähellä pintaa. Parhaiten viljelyyn soveltuvia maalajeja ovat multavat maat, kevyet savimaat ja jäykät savet. Pieniä lohkoja lähellä metsiä tulisi välttää hirvien ja muiden eläinten tekemien tuhojen välttämiseksi. Myös jyrkät rinteet soveltuvat huonosti pajun viljelyyn, koska koneellinen korjuu voi olla tällaisissa tapauksissa vaikeaa. Vielmälle tulisi johtaa myös riittävän kestävä tie, jotta koneet ja kuljetusajoneuvot pääsevät kulkemaan esteettömästi. Pellon salaojitusta kannattaa tehdä pajuvielmän uusimisen yhteydessä, koska pajun juuret voivat tukkia vastikään tehdyn ojituksen. (Suomen energiapaju Oy 2009).

Paras kasvupaikka pajulle on ravinteikas ja kalkittu kivennäismaapello, mutta pajua voidaan kasvattaa myös esimerkiksi turpeen tuotannosta vapautuneilla suopohjilla. Tällöin biomassan sato-odotukset ovat tosin pienemmät (Heino & Hytönen 2005). Aukeilla turvemaidella hallanvaara on suuri, joten pajulajiketta valitessa hallankestävyys on tärkeä kriteeri. Suonpohjan käyttöönottoa suunniteltaessa on otettava huomioon myös suon vesitalous, sillä sen järjestely peruskuivatukseen ja pintavesien poisjohtamisen avulla on ehdoton vaatimus metsänkasvatukselle. (Paappanen ym. 2012.) Vesitalouden kannalta puuntuotantoon soveltuvat parhaiten suonpohja-altaan yläpuoliset alueet ja reuna-alueet. Altaan keskialueet, samoin kuin liian tiiviit pohjamaalajit, kuten savi ja hiesu ovat pulmallisia liiallisen märkyiden vuoksi. Karkeajakoisilla pohjamaalajeilla on varottava maan liiallista kuivumista, etenkin jos turvekerros on liian ohut, alle 10 cm. Ojituksessa noudatetaan 40 metrin tai savipohjilla 30 metrin sarkaleveyttä. (Issakainen & Huotari 2007). Kosteilla alueilla tulee huomioda että eivät painavat koneet välttämättä pääse kaikkina vuodenaikoina liikkumaan ongelmattomasti viljelyksellä. Esimerkiksi istutus kannattaa tehdä mahdollisimman kuivaan aikaan. (Paappanen ym. 2012.)

2.1.3 Viljelymaan ennakkovalmistelut ja istutus

Maan muokkaus

Kun pajuviljelmää ollaan perustamassa entiselle turvetuotantoalueelle, on mahdolliset puut, kannot ja kivet ensin poistettava alueelta esimerkiksi kaivinkoneella. Lisäksi kannattaa huomioida, että useimmat istutuskoneet soveltuvat paremmin kuivalle ja kovalle mineraalimaalle. Myös turvekerroksen muokkauksen aikana syntyvät turvepaakut voivat vaikeuttaa istutusta. (Paappanen ym. 2012.)

Rikkakasvien torjunta

Peltomaalla tärkein viljelymaan ennakkovalmisteluista on juolavehnan torjunta, mikä onnistuu parhaiten kesannoimalla pelto yhden kasvukauden ajan ja käsittelemällä siinä yhteydessä rikkakasvintorjunta-aineella kuten glyfosaattivalmisteella. Pelkkä mekaaninen muokkaus ei ole riittävän tehokas juolavehnan torjuntaan. Syksyllä tuleva viljelyalue kynnetään ja jos juolavehnan esiintyy, ruiskutetaan vielä kertaalleen. Ennen istutusta pelto muokataan samalle tasolle äestämällä. Äestämisen muokkaussyvyyden tulisi olla 6 – 8 cm:ä, jotta istutus ja taimien kasvunlähtö sujuisi ongelmitta. (Suomen energiapaju Oy 2009).

Kun pajuviljelämä perustetaan turvetuotannosta poistuneelle alueelle, tarve rikkakasvien torjunnalle voi olla vähäisempää. Jos alue on ehtinyt olla pois käytöstä vain hetken aikaa, ei torjuntaa tarvitse tehdä ollenkaan. (Paappanen ym. 2012.)

Istutus

Pajun istuttamiseen käytetään pistokkaita, jotka on voitu leikata jo edellisenä talvena tavallisesti vuoden ikäisistä pajuista. Pistokkaita säilytetään talven ja kevään yli kylmävarastossa, jonka lämpötilan tulisi olla alle -4 celsiusastetta. Säilytyksen aikana on huolehdittava etteivät pistokkaat lähde kasvamaan ennen istutusta. Veteen kastaminen juuri ennen istutusta edesauttaa vesomisen alkua. (Suomen energiapaju Oy 2009). Energiapajuprojektin istutuskoikeista kävi ilmi, että kasvuun lähtöä voidaan parantaa myös käyttämällä tarpeeksi paksuja, yli 10 mm:siä pistokkaita (Hokkanen & Minkkinen 2013).

Istutettavat lohkot on hyvä suunnitella etukäteen huolellisesti istuttamisen ja korjuun sujuvuuden takaamiseksi. Erityisesti on huolehdittava, että viljelyksillä käytettäville koneille on tarpeeksi liikkumatilaa. Paju kannattaa istuttaa mahdollisimman aikaisin keväällä, jotta se ehtii lähteä kasvuun ennen rikkaruohoja ja kasvattaa vahvan juurakon jo ensimmäisenä ke-

sänä. Energiapaju kylvetään yleensä paririveihin siten, että korjuukone voi puida kaksi lähempänä olevaa riviä kerralla. Rivien etäisyydet ovat vuorotellen 75 ja 150 cm:ä ja kasvien välit riveissä 60 – 65 cm:ä. (Suomen energiapaju Oy 2009.)

Istutus sujuu parhaiten istutuskoneella, joka on suunniteltu nimenomaan pajun viljelyä ajatellen. Uusimmissa koneissa (kuva 2) käytetään noin 2 metriä pitkiä vesoja, jotka kone leikkaa noin 18 cm:ä pitkiksi pistokkaiksi ja painaa maahan niin, että pistokkaasta jää noin 2 cm:ä maanpinnan yläpuolelle. Tällaiset koneet voivat istuttaa kahta tai neljää riviä keralla. Vanhemmissa koneissa käytetään valmiiksi leikattuja pistokkaita, jotka kone painaa maahan. Istutuskoneet vaativat melko suuren investoinnin, joten pienemmät alueet istutetaan yleensä käsin tai pienemmillä koneilla, jotka käyttävät valmiita pistokkaita. (Suomen energiapaju Oy 2009.)



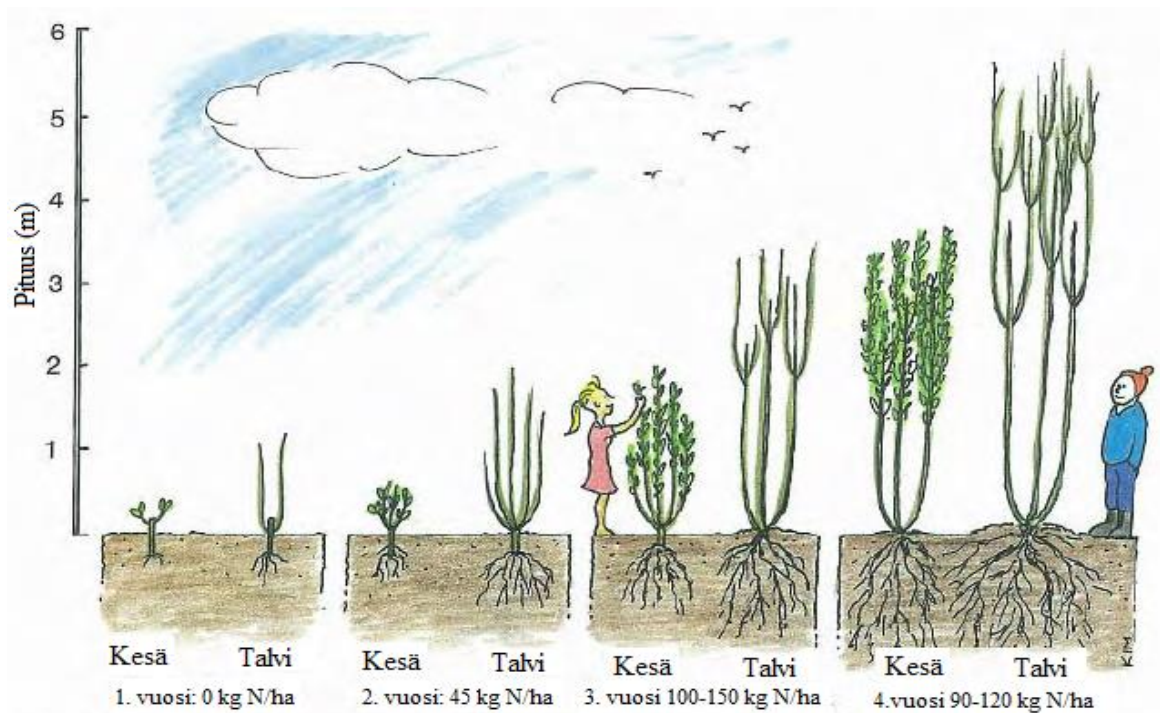
Kuva 2. Pajun istutuskone (Danfors ym. 1997)

Pistokkaita istutetaan hehtaarille noin 13 000 kappaletta. On tärkeää, että käytössä oleva pinta-ala käytetään siten, että mahdollisimman suuri osa siitä on kasvuston peitossa. Rivien tulisi olla mahdollisimman pitkiä ja niiden tulisi päättyä ainakin toisesta päästä viljelytielle. (Suomen energiapaju Oy 2009). Pajua voidaan energiapajuprojektin istutuskokeen perusteella istuttaa myös muovitetuihin penkkeihin, mutta tällöin pistokkaan kärjen pitää olla normaalia pidempi, ettei se jää muovin alle piiloon (Hokkanen & Minkkinen 2013).

2.1.4 Viljelmän hoito

Peltomaan lannoitus

Ruotsissa suositellaan peltomaalle perustetun pajuviiljelmän peruslannoitukseen 30 kg fosforia ja 80 kg kaliumia hehtaarille. Lannoitus tehdään ennen istuttamista ja jokaisen sadonkorjuun jälkeen. Tämä pätee maan fosforin (4,1 – 8,0 mg/100 g maata) ja kaliumin (8,1 – 16,0 mg/100 g maata) keskimääräiselle pitoisuudelle. Typpilannoitusta tarvitaan 45 - 120 kg/ha riippuen kasvuston iästä. Typen tarve vuosittain on esitetty kuvassa 3. (Danfors ym. 1997.) Kasvun kahtena viimeisenä vuotena ennen sadonkorjuuta lannoitusta ei kuitenkaan voi yleensä tehdä, koska kasvustoon ei enää voi ajaa tavallisilla traktorikoneilla. Tällöin lannoitus tehdään ensimmäisenä (45 kg N/ha) ja toisena (100 – 150 kg N/ha) varsinaisena kasvuvuotena. (Suomen energiapaju Oy 2009.) Istutusvuonna lannoitusta ei yleensä tarvita. Ruotsissa on käytössä myös lannoitukseen suunniteltuja erikoiskoneita, joilla päästään kasvustoon myös kasvun viimeisinä vuosina. Korkeiden investointikustannusten takia tällaisia laitteita kannattaa hankkia vain suurille viljelmille. (Danfors ym. 1997.)



Kuva 3. Pajun kasvu ja vuosittainen typentarve (Danfors ym. 1997).

Lannoitteena voidaan käyttää teollisten lannoitteiden lisäksi esimerkiksi pajun poltossa syntyvää tuhkaa, jätevedenpuhdistamoiden lietettä tai biokaasureaktoreiden mädätysjäännöstä (Suomen energiapaju Oy 2009). Eri ravinteiden tarve voidaan määrittää viljavuusanalyysin

perusteella ennen viljelmän perustamista. Siinä selvitetään maalaji, maan happamuus (pH) sekä typen, fosforin, kalsiumin, kaliumin ja magnesiumin määrät. Perustamisvuonna hyvillä pelloille perustetuilla viljelmillä ei yleensä tarvita peruslannoitusta, koska kasvit eivät pysty vielä hyödyntämään suuria ravinnemääriä. Periaatteena lannoituksessa on, että viljavilla kasvupaikoilla vain korjuussa poistuvat ravinteet korvataan lannoitteilla. (Tahvanainen 1995).

Suomalaiset pellot ovat melko happamia alhaisesta kalkkikivipitoisuudesta johtuen, tilastojen mukaan keskimääräinen pH on 5,9 (Farmit.net), joten pH:ta voidaan joutua nostamaan kalkitsemalla. Pajun viljelyssä pellon pH:n tulisi olla yli 5,5 (Suomen energiapaju Oy 2009), joten keskimääräisen happamalla pellolla kalkitusta ei tarvita.

Suopohjan lannoitus

Jos pajuviljelämä perustetaan suopohjalle, voi lannoitustarve olla suurempi kuin pellolla, koska suopohja turvemaan ja kivennäismaan osalta sisältää luonnollisesti huomattavasti vähemmän ravinteita kuin kivennäispellot. Turvemaalle perustettavalle pajuviljelmälle ei ole esitetty virallisia lannoitus suosituksia, mutta suopohjan metsitystä varten niitä on saatavilla. (Paappanen ym. 2012.) Metsityksen annostuksena suositellaan 50 kg fosforia, 150 kg kaliumia ja 1,5 kg booria hehtaarille. Kierrätyslannoitteiden käyttäminen on suositeltavaa. (Issakainen & Huotari 2006). Näitä suosituksia voidaan hyödyntää myös pajua viljeltäessä. Turvekerros voi toimia hyvänä typpivarastona, mutta suopohjan paksuus ja pohjamaan laatu voivat vaihdella paljonkin. Riittävänä typpivarastona pidetään 15 – 30 cm:n turvekerrosta. (Paappanen ym. 2012.)

Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektissa perustettiin pajuviljelämä turvetuotantoalueen yhteyteen Savonnevalle. Tavoitteena oli tutkia pajun viljelyä turvesuon jälkikäytössä. Tämän vuoksi viljelämä perustettiin alueelle, jolta turve oli jo tuotettu. Viljavuusanalyysin perusteella turvemaata vastasi pääravinteiden osalta keksimääräisen suopohjan ravinteisuutta. Typpeä jouduttiin lisäämään lannoitteen muodossa, koska maaperässä sitä ei ollut tarpeeksi. Turpeessa ei usein ole tarpeeksi muitakaan ravinteita kuten fosforia, kaliumia ja booria. Kivennäisravinnetaloutta voidaan parantaa sekoittamalla kivennäismaa ja turvekerrokset keskenään. (Leinonen ym. 2012.) Pohjamaan ravinteisuus riippuu maalajista, hienojakoiset maalajit kuten savi, hiesu ja hieta ovat parhaita (Issakainen & Huotari 2007). Muokkaamiseen voidaan käyttää perinteistä kyntöauraa ja äestä, mutta turvekerroksen tasaukseen

sopii todennäköisesti parhaiten turpeentuotannossa käytettävä tasausruuvi. Muokkaus kannattaa tehdä vasta lannoituksen jälkeen, jotta lannoite sekoittuu muun maa-aineksen kanssa, eikä huuhtoudu niin helposti sateiden mukana ojiin. (Paappanen ym. 2012.)

Erityisesti entisille turvetuotantoalueille perustettavia viljelyaluetta voidaan joutua myös kalkitsemaan, jotta pH saadaan nostettua tavoitetasolle (5,5). Jos lannoitteena käytetään tuhkaa, ei erillistä kalkitusta tuhkan sisältämän kalsiumin ansiosta tarvita. Tuhkan ja lietelannan yhdistelmä osoittautui Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektin tutkimuksessa mukana olevien lannoitteiden joukosta lannoitusvaikutuksen perusteella parhaaksi lannoitekombinaatioksi. (Paappanen ym. 2012.)

Lannoitteiden levityksessä voidaan lannoitteesta riippuen käyttää erilaisia maatalouskoneita. Kiinteitä lannoitteita levitettäessä voidaan käyttää esimerkiksi kalkinlevitintä, joka syöttää lannoitetta kuormatilasta matalan raon kautta pyöriville lautasille, jotka heittävät lannoitteen peltoon. Keinolannoitteiden levitykseen voidaan käyttää maataloudessa käytettäviä normaaleja koneita, jotka on suunniteltu pienien annosten levittämiseen. (Paappanen ym. 2012.) Lietemäinen lannoite voidaan levittää esimerkiksi traktorin ja lietevaunun avulla. Istutuksen jälkeisinä vuosina voidaan tarvittaessa traktorin eteen ja sivuille asentaa kasvuston tallautumista ehkäiseviä suojia ja käyttää erikoisrakenteisia, lannoitteen yläkautta puhaltavia levitimiä. (Suomen energiapaju Oy 2009.) Suopohjan lannoitukseen tulisi käyttää mahdollisimman kevyttä koneyhdistelmää ja mahdollisesti varustaa traktori levikepyörillä, koska raskas kalusto uppoaa helposti suon pehmeisiin kohtiin (Paappanen ym. 2012).

Rikkakasvien torjunta

Rikkakasvien torjunta on tärkeää myös istutuksen jälkeen, sillä jos kasvuston valtaa sankka rikkakasvusto, jäävät pajut hennoiksi ja niiden talvenkestävyys heikkenee. Heti istutuksen jälkeen, ennen kuin pistokkaiden silmut alkavat paisua, viljelyalue kannattaa käsitellä maa-vaikutteisella herbisidillä ja myöhemmin kasvukauden aikana voidaan jatkaa mekaanista torjuntaa esimerkiksi haraamalla. Mekaaninen torjunta tulee tehdä riittävän usein, rikkakasvien määrää tarkkailemalla. Pyörivä kultivaattori on haraan verrattuna tehokkaampi, kolme ajokertaa riittää ensimmäisen kasvukauden aikana. Rikkakasviharaa voidaan tarvita 6 – 8 kertaa. (Suomen energiapaju Oy 2009.)

Mikäli rikkaruohojen torjunta ei ole täysin onnistunut perustamisvuonna, on sitä jatkettava vielä seuraavana keväänä. Pajukasvien vahvojen juurten ja varjostuksen ansiosta rikkaruohon torjuntaa ei yleensä enää tämän jälkeen tarvita ennen seuraavaa kiertoa. Rikkakasvien mekaaniseen torjuntaan on kuitenkin varauduttava taas korjuun jälkeisenä kesänä, sillä pajukon alla on aina joukko rikkakasveja sekä siemeniä alistetussa valmiustilassa. (Suomen energiapaju Oy 2009).

Riistaeläintuhot

Pajua viljeltäessä on varauduttava myös riistaeläinten, kuten hirvien ja jäniksien kiinnostukseen pajuviljelmää kohtaan. Perustamisvaiheessa, kun kasvusto on haavoittuvaisimmillaan, voidaan tuhoja torjua esimerkiksi levittämällä kasvustoon makuun perustuvaa hirvikarkotetta, joka toimii myös jänisten kohdalla. Suurin riski hirvituhoille on pienillä metsän keskellä sijaitsevilla lohkoilla. Täysikasvuudessa pajukasvustossa hirvituhoja voi esiintyä lähinnä kasvuston reuna-alueilla. Tuhohyönteiset eivät ole suuri uhka pajukasvustolle, joten niiden torjuntaa ei tarvita. (Suomen energiapaju Oy 2009).

2.2 Pajun korjuu ja varastointi

2.2.1 Yleistä korjuusta

Paju on korjuukypsää, kun kasvuston puubiomassa ylittää 25 kuivatonna hehtaarilla. Sen vuosittainen kasvu hyvin hoidetulla viljelmällä Suomen oloissa on noin 6 – 8 tonnia kuiva-ainetta/hehtaari (Hytönen 1996), joten paju voidaan useimmiten korjata 3 – 5 vuoden välein. (Suomen energiapaju Oy 2009.) Korjuu tehdään myöhään syksyllä tai talvella, kun lehdet ovat pudonneet. Näin kasvukautta ei keskeytetä ja lehtien ravinteet jäävät viljelmälle. Lisäksi routainen maa helpottaa raskaiden työkonoiden liikkumista viljelyksellä ja niiden aiheuttamat vauriot juuristolle ja maaperälle jäävät vähäisiksi. Korjattaessa biomassan saanto on Suomen oloissa yleensä 25 – 50 tonnia kuiva-ainetta hehtaarilla, riippuen kiertoajasta, lajista, kasvupaikasta ja hoitotoimenpiteistä. Korjattaessa pajun rungonpaksuus on leikkukorkeudella lajista riippuen noin 5 – 7 cm ja varren pituus 5 – 10 metriä. (Sihvonen ym. 2013.)

Suurilla pinta-aloilla pajun korjuu on kannattavinta erityisesti pajua varten suunnitelluilla ajosilppureilla, jotka korjaavat pajun suoraan hakkeeksi. Tällöin syntyy märkää, yli 50 % vettä sisältävää haketta, joka vaatii säilyäkseen koneellisen kuivauksen. Kuivaus vaatii runsaasti energiaa, joten useimmiten märkä hake käytetään heti haketuksen jälkeen. Pajun korjuuseen voidaan käyttää myös harvesteria, joka korjaa pajun kokopuuna. (Sihvonen ym.

2013.) Ruotsissa suorahaketus harvesterilla on yleisempi, sillä sen tuottavuus on parempi (Picchi ym. 2006).

Kokonaiset puut voidaan kuivattaa luonnollisesti, jolloin saadaan kuivempaa haketta kuin suorahaketuksella. Pajun korjuukoneet vaativat suuren investoinnin, joten pinta-alan tulisi erikoiskoneita käytettäessä olla 50 hehtaaria vuodessa, jotta niiden käyttö olisi kannattavaa. Suomessa viljelyalat ovat niin pieniä, ettei pajun korjuuseen ole hankittu erikoiskoneita, vaan se on tehty miestyövoimalla tai metsäkoneilla. (Sihvonen ym. 2013.)

2.2.2 Pajun korjuu hakkeena

Yleistä

Pajun suoraan hakkeena korjaavia hakeharvestereita on kehitetty paljon, yleensä ne pohjautuvat johonkin toiseen maatalouskoneeseen. Näin konetta voidaan käyttää myös muuhun tarkoitukseen. Yleisin kone on säilörehun valmistuksessa käytettävä ajosilppuri, jonka rehunkorjuupöytä on vaihdettu pajun korjuuta varten suunniteltuun energiapuupöytään. Alun perin rehun silppuamiseen suunnitellut hakeharvesterit eivät kuitenkaan pysty hakettamaan paksuimpia puita. Vanhemmilla lyhytkiertopöydillä maksimiläpimitta on 5 cm:ä, mutta useimmat pystyvät käsittelemään jopa 15 cm:siä puita. Maksimiläpimittaan vaikuttaa myös puiden etäisyys toisistaan ja koneen teho. Tehokkaammilla koneilla voidaan hakettaa paksuimpia puita. Toinen yleisesti käytetty laite on sokeriruo`on korjuukoneen pohjalle rakennettu haketus kone, jolla voidaan korjata pajua hakkeen sijaan myös 10 – 15 cm:n pätkinä. Myös maataloustraktorisoitteisia suorahaketus koneita on kehitetty, niiden tuottavuus ja hankintahinta on alhaisempi. (Sihvonen ym. 2013.)

Ajosilppuriin tai sokeriruo`on korjuukoneeseen pohjautuvat laitteet

Yksi yleisimmistä korjuukoneista on ajosilppuri, joka sekä leikkaa, että hakettaa vesat. Valmis hake puhalletaan joko perävaunuun tai rinnalla kulkevan traktorin kääryyn. (Suomen energiapaju Oy 2009). Ajosilppurit toimivat omalla koneella ja ovat usein alun perin suunniteltu rehun korjuuseen. Pienillä muutoksilla ne kuitenkin soveltuvat myös lyhytkierteisen energiapajun korjuuseen. Tällainen laite on esitetty kuvassa 4. Ajosilppuria voidaan käyttää pajun ja säilörehun korjuukauden ulkopuolella myös kokopuuhakkurina. (Kjeldsen 2011). Ajosilppurien tuottavat haketta noin 15 – 35 tonnia työmatunnissa. Sokeriruo`on korjuuseen käytettävät koneet sopivat puolestaan melkein sellaisenaan rivissä kasvavan energiapajun korjuuseen. (Danfors & Nordén 1995, Technical development...1996).



Kuva 4. Claas Jaguar pajunkorjuukone (Danfors ym. 1997).

Hakkeena korjaavat maataloustraktorisoitteiset korjuukoneet

Myös pajun korjuuseen suunniteltuja traktorin perässä vedettäviä laitteita on markkinoilla. Laitteiden ei nähdä kilpailevan ajosilppureihin pohjautuvien koneiden kanssa, vaan ne ovat sopivampia pienemmille pelloille, joilla ajosilppurin käyttö ei ole kannattavaa (Hartsough & Spinelli 2003). Alhaisempien investointikustannusten ansiosta korjuu voi olla kannattavaa vielä 50 – 100 hehtaarin pinta-aloilla. Hakkeen laatu on vaihtelevaa, mutta uusimmassa kehitysmallissa sitä on pyritty parantamaan. (Abrahamson ym. 2010).

Laitteita on kehitetty muun muassa Tanskassa ja Australiassa (Sihvonen ym. 2013). Italiassa on kehitetty kaksivaiheinen korjuumenetelmä poppelin korjuuseen, jossa puut kaadetaan ensin karholla ja haketetaan suoraan ilman lähikuljetusta. Kaatolaitetta voidaan vetää tavallisella maataloustraktorilla. Vaikka poppeli onkin nopeampikasvuinen kuin paju, ovat korjuumenetelmät käytännössä samat. Menetelmällä kaadetaan vain yksi puurivi kerrallaan. (Pari & Civitarese 2009 & Sihvonen ym. 2013.) Lumisiin olosuhteisiin kaksivaiheinen korjuu ei sovellu, sillä lumi herkästi peittää puut karholla, jolloin hakkeen joukkoon päätyy liiaksi kosteutta. Haketus ei saa myöskään haitata keväällä uusien vesojen kasvua, joten haketusta ei ehdi suorittaa suurella alalla lumien sulamisen ja kasvun alun välillä. (Sihvonen ym. 2013.)

Lähikuljetus hakkeena korjatessa

Useimmiten haketuslaitteissa ei ole varastointitilaa hakkeelle, joten hake usein puhalletaan suoraan haketuskoneen vieressä kulkevan traktorin peräkärriin (kuva 4). Myös korjuukoneen perässä voidaan vetää vaunua johon hake puhalletaan, mutta tämä ei ole järkevää etenkin ajosilppureihin pohjautuvissa ratkaisuissa. (Sihvonen ym. 2013.) Lähikuljetuksessa traktoreiden määrä riippuu muun muassa lähikuljetusmatkasta, tyhjennysmenetelmästä sekä kuormatilan koosta (Handler & Blumauer 2010). Ajosilppurin tulisi olla jatkuvasti toiminnassa eli traktoreita pitää olla vähintään kaksi, usein kuitenkin kolme (Gigler ym. 1999). Mikäli kaukokuljetusmatka varastopaikalle on alle 13 km, kannattaa kuljetus hoitaa vain traktoreilla (Handler & Blumauer 2010). Kun kuljetusmatka on pidempi, on järkevämpää käyttää lähi- ja kaukokuljetuksessa korkealaitaisia vaihtolavoja, jotka voi siirtää helposti kuorma-autoyhdistelmän kyytiin (Handler & Blumauer 2010).

2.2.3 Pajun korjuu kokopuuna

Laitteet

Kokopuuta korjaavia koneita on nykyisin vain muutamalla valmistajalla, jotka ovat yleensä pieniä ja valmistavat myös muita koneita. Laitteet ovat traktorilla vedettäviä tai itsenäisiä ja niitä valmistetaan vain tilauksesta, koska kysyntä on pientä. (Sihvonen ym. 2013.) Scholtzin (2007) mukaan yleisimpiä laitteita ovat Nordic Biomass:n Stemster- sekä Fröbbesta-korjuukone. Niiden tuottavuus on korjuukokeissa ollut 0,39 – 0,90 ha/tehotunti (Schweier & Becker 2012). Myös muita koneita on käytössä, mutta niitä ei enää valmisteta. (Sihvonen ym. 2013.) Kuvassa 5 on esitetty yhä käytössä oleva Empire 200 korjuukone.



Kuva 5. Empire 200 korjuukone (Danfors ym. 1997).

Pajun lähikuljetus kokopuukorjuussa

Pajun lähikuljetus toteutetaan pääsääntöisesti maataloustraktoreilla tai kuormatraktoreilla. Jotkut laitteet tyhjentävät kuorman suoraan traktorin lavalle ja joissain tapauksissa kuormaus tapahtuu kurottajalla tai pyöräkuormaajalla. Korjuulaitteiden kuormat puretaan yleensä rivien päähän, jotta lastaus on sujuvaa. Tavallisin lähikuljetusmenetelmä on kaatokoneesta riippuen maataloustraktori metsäperävaunulla ja puomilla, jossa on koura tai metsätaloudessa käytetty kuormatraktori. (Danfors & Nordén 1995, Scholz 2007.) Kasaamalla puut poikittain kuormaan voidaan tehdä isompia kuormia, mikä parantaa lähikuljetuksen tuottavuutta. Kuljetusmenetelmä kannattaa valita kaatomenetelmän perusteella ja siten koko ketjua tulee tarkkailla yhtenäisenä. (Van der Meijden & Gigler 1995.)

2.2.4 Pajun korjuu paaleina

Kokopuuna korjattua pajua ei saada pakattua kovin tiiviisti, mutta paalaamalla tai niputtamalla voidaan pienentää tilavuutta. Paalaamisen hyöty on suurimmillaan, jos haketus tapahtuu käyttöpaikalla ja kokopuun kuljetusmatka on siten pidempi. (Sihvonen ym. 2013.) Paaleja voidaan varastoida kuten tavallisia pyöröpaaleja ja ne myös kuivuvat kohtuullisen hyvin, yhden kesän kuivauksella voidaan saavuttaa jopa 31 % kosteus (Henriksson Salix AB 2010). Tällä hetkellä paalaavia korjuukoneita valmistaa ainakin kaksi yritystä: pyöröpaaleja tekevä Anderson BioBaler sekä Bundler, joka tekee kokopuusta määrämittäisiä paaleja. (Sihvonen ym. 2013.)

BioBaler on kehitetty tavallisesta pyöröpaalaimesta ja sillä voidaan lyhytkiertoisien energiapuun lisäksi korjata myös luonnollisesti kasvavaa vesakkoa (Picchi ym. 2006). Korjuun nopeus on noin 5 km/h, mutta paalin pudotuksen ajaksi koneen pitää pysähtyä. Laitteen heikkouksia ovat puiden alhainen maksimiläpimitta (40 – 50 mm) ja rispaava leikkuujälki, mikä saattaa lisätä uusien vesojen kuolleisuutta (Henriksson Salix AB 2010). Bundler paalaimessa leikkuumenetelmä on pingotettu moottorisahaketju. Paalain pudottaa valmiit paalit vauhdista maahan laitteen vierelle, joten sen ei tarvitse pysähtyä ja paalaus toimii jatkuvatoimisesti (Salixphere 2012).

2.2.5 Pajun korjuu energiapuuharvennusten kalustolla

Pajun korjuuseen voivat sopia myös esimerkiksi harvennushakkuissa käytettävät metsäkoneet. Tämä on varteenotettava vaihtoehto etenkin maissa, joissa pajuviiljelmiä on vähän ja metsäkoneita paljon. Ruotsissa on tutkittu pajun korjuuta kuormatraktoriin pohjautuvalla koneella ja harvesterilla. Jälkimmäinen toteutettiin kahden koneen ketjuna, jossa lähikuljetus

tehtiin kuormatraktorilla. Käytössä oli keräilevä energiapuukoura, joka pystyi kaatamaan puita kouran liikkeessa. Tehokkaimmaksi hakkuumenetelmäksi osoittautui viiden paririvin hakkuu siten, että koneen vasemmalla puolella oli yksi paririvi, renkaiden välissä yksi paririvi ja oikealla kolme. Tällöin tuottavuus oli 2,7 tonnia kuiva-ainetta per tehotunti ($t_{ka}/tehotunti$) kun viljelmällä oli biomassaa 36 t_{ka}/ha .

Suomessakin on tutkittu pajun korjuuta energiakouralla (Sihvonen ym. 2013). Ylimäen ym. (2009) tutkimuksessa käytettiin kouraa, jossa ei kuitenkaan ollut keräilypihtejä. Kaadon tuottavuudeksi saatiin 0,558 $t_{ka}/tehotunti$. Myös Energiapaju-projektin yhteydessä tehtiin korjuukoe, joka suoritettiin maataloustraktoriin kiinnitetyllä energiapuukouralla. Hakkuun tuottavuus oli parhaalla työmenetelmällä 1,56 $t_{ka}/tehotunti$ viljelmällä, jonka biomassaa oli 33,75 t_{ka}/ha . Koura ei ollut jatkuvatoiminen, mikä heikentää tuottavuutta. Kuten edellä nähtiin, Ruotsissa saatiin jatkuvatoimisella kouralla parempia tuloksia. (Sihvonen ym. 2013.)

Korjuu voi olla esimerkiksi Suomessa, jossa erikoiskalustoa ei ole käytettävissä, järkevää myös moottorisahalla metsurityönä. Tuottavuudesta ei kuitenkaan ole tehty luotettavaa tutkimusta. Kaikilla edellä esitellyillä korjuumenetelmillä on hyvät ja huonot puolensa. Kokopuun korjauksen hyviin puoliin kuuluu se, että kokopuuna paju voidaan kuivattaa luonnollisesti ja siitä saadaan siten hyvälaatuista haketta. Korjuu hakkeena on edullisempaa, mutta tuotettu hake kosteaa. (Sihvonen ym. 2013.)

2.2.6 Varastointi ja kuljetus käyttöpaikalle

Pajun kosteus korjattaessa on noin 50 %:in luokkaa, mutta tutkimusten mukaan varastoinnin aikana se voi Suomen oloissa laskea noin 25 %:iin (Nurmi 1995 & Sihvonen ym. 2013). Varastoinnin aikana kuiva-aineen määrä saattaa kuitenkin laskea esimerkiksi sienitautien ja hajottavien bakteerien takia. Erkkilän ym. (2011) tutkimuksen mukaan hävikki on kokopuulla 2 – 4 %:a kokonaismassasta. Energiasisältö putosi tutkimuksessa kuitenkin kosteuspitoisuuden pienenemisen ansiosta vain 0,5 %:a lämpöarvon kasvaessa 16 MJ/kg:sta 17,9 MJ/kg:aan (Nurmi 1995).

Korjuun yhteydessä hakettua haketta ei voida varastoida korkean kosteuspitoisuuden takia. Kokopuuna korjattu paju säilyy paremmin ja kuivumista voidaan edistää varastoimalla. Tällöin saadaan parempilaatuista polttoainetta ilman koneellista kuivausta. Varastokasat kannattaa sijoittaa siten, että ne on mahdollista hakettaa ja kuljettaa käyttöpaikalle myös sulan maan aikana. Sijoituspaikalla on suuri merkitys myös kuivumiseen: Avarammilla paikoilla

kasat kuivuvat paremmin. (Erkkilä ym. 2011, Sihvonen ym 2013.) Myös kasojen peittäminen edistää kuivumista, Erkkilän ym. (2011) tutkimuksen mukaan peitettyt kasat kuivuvat 3 – 6 prosenttia paremmin. Peittäminen kannattaa tehdä vasta syksyllä ennen sateita, koska kesällä aurinko pääsee paremmin kuivattamaan peittämättömiä kasoja. Peittämisen kustannukset voivat kuitenkin joissakin tapauksissa olla suurempia kuin siitä saatava hyöty. Tuplapeitettä käytettäessä kuivumisen tulisi parantua 6 – 8 prosentilla ja yksinkertaista peitettä käytettäessä 3 – 4 prosentilla, jotta se olisi kannattavaa (Hillebrand & Nurmi 2004).

Kokopuuna korjattu paju haketetaan yleensä tienvarsihaketuksella ennen käyttöpaikalle kuljettamista kuljetuksen kannattavuuden parantamiseksi. Haketus tehdään tällöin siirrettävällä kalustolla, esimerkiksi autoalustaisilla rumpuhakkureilla ja vasara-murskaimilla. Hake voidaan puhalttaa suoraan kuorma-autoon, joka kuljettaa sen käyttöpaikalle (Savon voima OYJ:n bioenergiaohjelma 2011). Metsähakkeen tilavuuspaino on noin 320 kilogrammaa per irtokuutio (kg/m^3) 50 %:n kosteudessa (Sihvonen ym 2013.), joten esimerkiksi 145 m^3 :n kuormatilavuuden hakeautoon mahtuu noin 46 tonnia haketta kerrallaan. Kuljetusetäisyyden tulisi olla mahdollisimman lyhyt kannattavuuden parantamiseksi.

2.3 Pajun polttokäyttö

2.3.1 Pajun ominaisuudet polttoaineena

Pajua pidetään yleisesti perinteisiä puubiomassoja haastavampana polttoaineena. Elementaarianalyysien mukaan paju ei kuitenkaan huomattavasti poikkea koostumukseltaan muista puubiomassoista. Taulukossa 1 on esitetty Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektissa tehdyn pajun polttoaineanalyysin tulokset. Lähinnä kaliumin osuus on pajussa usein korkeampi kuin mihin on totuttu puubiomassaa poltettaessa. Kalium voi leijupetipoltossa aiheuttaa pedin sintrautumista ja lämmönsiirtopintojen likaantumista. Pajun tuhka puolestaan sisältää huomattavan määrän fosforia, jonka käyttäytyminen poltossa ei ole aivan yksiselitteistä. Se voi polttoaineen muista ominaisuuksista riippuen joko nostaa tai laskea sintrautumislämpötilaa. (Hurskainen ym. 2013.)

Taulukko 1. Pajun koostumus (Hurskainen ym. 2013). ($m\%_{\text{ka}}$ = massaprosenttia kuiva-aineesta.)

Analyysi	Tulos	Yksikkö
Kosteus	44,8	m-%
Tuhkapitoisuus 815 °C	1,5	m-% _{ka}
Tuhkapitoisuus 550 °C	1,5	m-% _{ka}
Haihtuvat aineet	83,1	m-% _{ka}
Tehollinen lämpöarvo	18,58	MJ/kg _{ka}
C	49,9	m-% _{ka}
H	6,1	m-% _{ka}
N	<0,3	m-% _{ka}
S	0,03	
Cl	0,003	
Na	76	
K	1700	
Ca	3000	
Mg	350	
P	620	
Al	230	mg/kg _{ka}
Si	1100	
Fe	120	
Cr	1,9	
Cu	2,8	
Mn	37	
Ni	0,8	
Zn	90	

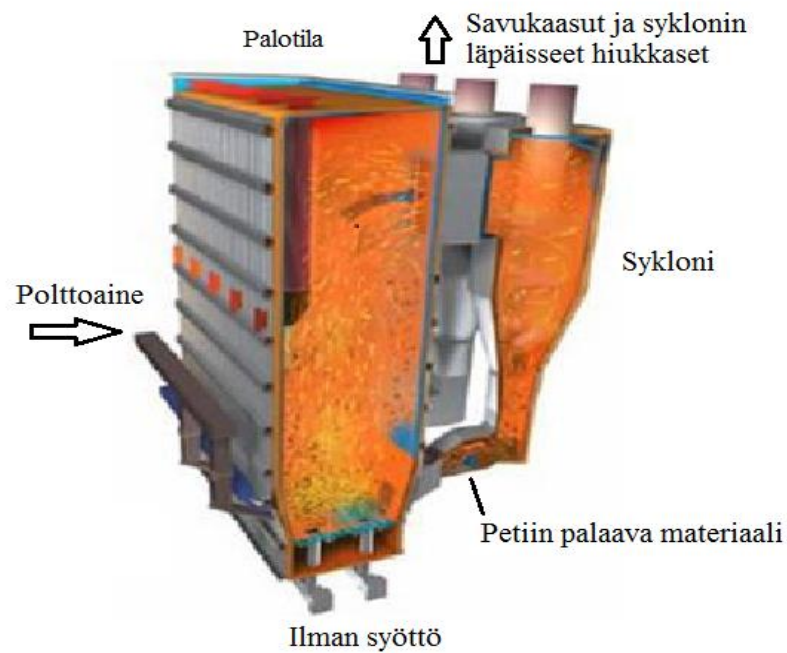
Pajun tuhkapitoisuus (noin 2 %) on tyypillisesti samaa luokkaa kuin metsähakkeella, mutta korkeampi kuin kokopuulla (Alakangas 2000). Pajun klooripitoisuus on suomalaisten tutkimuksen mukaan samaa luokkaa (noin 0,003 %) kuin runkopuulla, joten pajun ei pitäisi seospoltossa nostaa kuumakorroosion riskiä korvattaessa osa hakkeesta/kuoresta pajulla. Kloori voi aiheuttaa korroosiota tulipesän tulistinpinnoilla yli 450 °C:ssa, joten sen pitoisuus on tärkeä parametri polton kannalta. Peltobiomassojen tuhka- ja klooripitoisuudet ovat korkeampia, mikä tekee pajusta niitä houkuttelevamman polttoaineen. Pajun tuhkan sulamisläm-

pötila on kirjallisuudesta löytyvien analyysien perusteella korkea, mutta määritettyjen arvojen on vaihteluväli suuri (1080 – 1570 °C) (Hammarschmid, Alakangas 2000). Tavallisen metsähakkeen tuhkan sulamislämpötila on 1150 – 1250 °C ja oljen tuhka voi sulaa jo 750 °C:ssa. Tuhkan sulamislämpötila vaikuttaa erityisesti arinapolttoon, mutta sillä voi olla vaikutusta myös leijupedin sintrautumiseen ja kattilan likautumiseen. Pajun voidaan sanoa olevan ominaisuuksiltaan jossain perinteisten puupolttoaineiden ja peltobiomassojen välissä, kuitenkin lähempänä puuta. (Hurskainen ym. 2013.)

2.3.2 Polttotekniikka

Korjuun ja hakettamisen jälkeen paju voidaan polttaa perinteisissä polttolaitoksissa kuten leijupeti- tai arinakattiloissa. Onnistuneesti viljeltynä pajun energiatehokkuus on korkea muihin energiakasveihin verrattuna, sen energiasuhde (tuotteen energiasisältö jaettuna tuotantoon kuluneella energialla) voi lämpövoimalaitostasolla olla jopa 20 (Suomen energiapaju Oy 2009). Hurskaisen ym. (2013) mukaan pajun poltosta ei ole tehty kovin runsaasti raportoituja tutkimuksia. Ruotsissa pajun polton kokemuksia on kuitenkin raportoitu 90-luvulla. Hjalmarsonin ja Ingmanin (1998) raportissa on mukana kolme kierto-leiju-, kaksi kerrosleiju ja kuusi arinakattilaa.

Leijupetikattilat sopivat parhaiten biopolttoaineiden polttamiseen ja ovat Suomessa yleisiä. Leijupetikattilassa palaminen tapahtuu hiekasta, tuhkasta ja mahdollisista lisäaineista koostuvassa pedissä, jota leijutetaan kattilan pohjasta puhallettavan ilmavirran avulla. Leijupetikattilat ovat joustavia polttoaineiden suhteen, niissä voidaan polttaa eri laatuja polttoaineita sekaisin ja myös kosteita polttoaineita tehokkaasti. (Teknologiateollisuus ry 2014) Leijupetikattiloita on kahdenlaisia: kerrosleijukattiloita ja kierto-leijukattiloita. Kerrosleijukattilan ilman syötön nopeus on säädetty sellaiseksi, ettei se riitä puhaltamaan petimateriaalia pois kattilasta savukaasujen mukana. Kierto-leijukattilassa ilmaa puhalletaan suuremmalla nopeudella, mikä saa petimateriaalia nousemaan yhdessä palavan aineen kanssa ulos kattilan yläosasta. Kiinteä petimateriaali erotetaan savukaasuista syklonilla ja palautetaan kattilan alaosaan. Kiertopetikattilassa sekoittuminen ja polttoaineen jauhautuminen on voimakkaampaa ja palamisaika pidempi, mikä tehostaa palamista. Ulkoinen kierto myös tehostaa tulipesän lämmönsiirtoa ja tasaa kattilan lämpötilaeroja. (Hämäläinen & Makkonen 2003.) Kuvassa 6 on esitetty kierto-leijukattila.



Kuva 6. Kiertoleijukattila (BE-Sustainable 2013, muokattu)

2.3.3 Pedin käyttäytyminen ja agglomeraatio

Polttoaineen vaikutus leijupetikattilan pedin agglomeraatioon on yksi tärkeimmistä tutkimuskysymyksistä pajun polttoa tutkittaessa (Hurskainen ym. 2013). Hjalmarsonin & Ingmanin (1998) raportissa kerrotaan, että pedin agglomeroitumista ilmeni 800 – 900 °C:ssa leijupetikattiloissa, joissa käytettiin pelkästään pajua. Havaittiin myös, että pajuhakkeen keveyden ja suuren palakoon takia osa partikkeleista ei ehtinyt täysin palaa pedissä, mikä sai ne kulkeutumaan välillä pedin pintaan. (Hjalmarsonin & Ingmanin 1998.) Hakkeen kokoon on siis hyvä kiinnittää huomiota pajua poltettaessa.

Pajua on poltettu koemielessä myös pilot- ja laboratoriokokoluokassa (Hurskainen ym. 2013). Niissä leijupetikattiloiden pedin on havaittu sintraantuvan 900 °C:n tuntumassa, mutta tulokset eivät välttämättä ole suoraan johdettavissa täyden kokoluokan kattiloihin (Grimm ym. 2011; van der Drift & Olsen 1999). Tulokset ovat kuitenkin suuntaa antavia. Voimalaitoskattiloiden petilämpötila on tavallisesti 800 - 900 °C:n luokkaa, on pedin käyttäytymiseen syytä kiinnittää huomiota.

2.3.4 Likaantuminen ja korroosio

Ruotsalaisten kokemuksen (Hjalmarsonin & Ingman 1998) mukaan paju aiheutti joissakin arinakattiloissa lämmönsiirtopintojen likaantumista ja mahdollisesti korroosiota tulistinpin-

noilla. Syynä saattoivat kuitenkin olla myös samanaikaisesti poltetut muut polttoaineet. Raportissa esitetyt tulokset ovatkin kautta linjan epävarmoja, koska testeissä ei pystytty sulkemaan pois muiden polttoaineiden vaikutuksia syntyneisiin ongelmiin.

Ala Khodier (2011) tutki pajun vaikutusta tulistinpintojen likaantumiseen ja korroosioon ja havaitsi pajun tuhkan kerrostumisnopeuden olevan alhainen. Paju ei siis todennäköisesti aiheuta merkittäviä likaantumisongelmia. Myös Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektiin liittyvässä polttokokeessa (Hurskainen ym. 2013) mitattiin pajun aiheuttavan likaantumisen olevan samaa luokkaa kuin tavallisella metsähakkeella

Hurskaisen ym. (2011) tutkimuksessa tulistinpintojen kerrostumista ei löytynyt klooria juuri ollenkaan, sen sijaan fosforia niistä löytyi runsaasti. On mahdollista, että fosfori on vähentänyt alkalikloridien muodostumista ja siten kloorin määrää kerrostumissa. Ala Khodierin tutkimuksessa tulistinpintaa simuloivalle putkelle kerääntynyt kerrostuma kuitenkin sisälsi huomattavan määrän (10 mooliprosenttia) klooria, käytetyn pajun pienestä klooripitoisuudesta huolimatta. Tämä aiheuttaa huomattavan korroosioriskin ja osoittaa, ettei polttoaineen pieni klooripitoisuus yksinään riitä ehkäisemään kloorikertymien aiheuttamaa kuumakorroosiota.

2.3.5 Pajun seospoltto

Hurskainen ym. (2013) toteaa useisiin lähteisiin viitaten, että pajusta, kuten muistakin puupolttoaineista puuttuu tärkeitä korroosion suoja-aineita kuten rikkiä ja alumiinisilikaatteja, joita kuitenkin esimerkiksi turve ja fossiiliset polttoaineet sisältävät. Jo pieni määrä näitä polttoaineita riittää eliminoimaan pajun aiheuttaman korroosioriskin. Seospolttoa käytetään yleisesti myös muiden puupolttoaineiden kohdalla, joten uusia järjestelyjä ei tarvita. Pajua voidaan siis polttaa Suomessa turvallisesti samaan tapaan kuin muitakin puupolttoaineita. (Hurskainen ym. 2013.)

2.3.6 Pajun tuhkat

Pajun tuhka koostuu muiden puupolttoaineiden tapaan pääasiassa alkali- ja maa-alkalimetalleista, erona kuitenkin pajun korkeampi kaliumin osuus. Kaliumin tiedetään voivan aiheuttaa leijupetikattilassa pedin sintraantumista ja lämmönsiirtopintojen likaantumista, joten tältä osin pajun käyttö voi aiheuttaa ongelmia. Tilanne voidaan korjata polttamalla pajun

kanssa esimerkiksi turvetta, jonka sisältämät suoja-aineet ehkäisevät edellä mainitut ongelmat. (Hurskainen ym. 2013.) Taulukossa 2 on esitetty Hurskaisen ym. (2013) tutkimuksessa mitatun pajutuhkan koostumus oksideina.

Taulukko 2. Polttoaineesta määritetyn pajutuhkan koostumus massaprosentteina (Hurskaisen ym. (2013)).

Oksidi	Pitoisuus (m-%)
SiO ₂	15,7
Al ₂ O ₃	2,9
Fe ₂ O ₃	1,1
K ₂ O	13,7
Na ₂ O	0,7
CaO	28,0
MgO	3,9
Mn ₃ O ₄	0,3
P ₂ O ₅	9,5
SO ₃	5,0
ZnO	0,7

Energiantuotannossa syntyvät tuhkat luokitellaan jätteiksi (Jätelaki 646/2011). Jätelainsäädännön (646/2011) mukaan ne pitäisi ensisijaisesti hyödyntää kierrättämällä. Yksi luonnollisimmista käyttövoioista on lannoitekäyttö, mutta tällöin tuhkan tulee täyttää lainsäädännölliset ravinnepitoisuuksien minivaatimukset ja raskasmetallien maksimipitoisuudet. Metsätalouden käytössä tuhkalannoitteen tulee sisältää vähintään 2 %:ia fosforia ja 6 %:ia kalsiumia. Koska paju imee ravinteiden lisäksi maasta tehokkaasti myös raskasmetalleja, voi lannoitekäyttö vaikeutua. Pajutuhkan hyödyntämisen kannalta yleensä ongelmallisin on kadmium, jonka maksimipitoisuus lannoitteessa on 25 milligrammaa kuiva-ainekilogrammassa (mg/kg_{ka}). Pajun raskasmetallipitoisuudet voivat kuitenkin vaihdella paljon eri kasvupaikoilla. Tuhkan kemiallisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin vaikuttaa käytetyn polttoaineen lisäksi myös polttotekniikka ja polton parametrit. (Hurskainen ym. 2013.)

Arinakattiloissa suurin osa tuhkasta poistuu pohjatuhkana, joka usein täyttää puupolttoaineita käytettäessä tuhkalannoitteelle säädetyt kriteerit. Suurin osa raskasmetalleista höyrystyy ja konsentroituu lentotuhkaan, mikä tekee lentouhkasta vaikeammin hyödynnettävää.

Leijupetipoltossa tuhkan koostumukseen vaikuttaa myös petimateriaali, jota päätyy tuhkan sekaan. Petimateriaali laimentaa tuhkan ravinne- ja raskasmetallipitoisuuksia. (Hurskainen ym. 2013.)

Pajun viljelyn ravinnetalouden kannalta olisi järkevää, että sadonkorjuun yhteydessä biomassan mukana poistuvat ravinteet saataisiin kierrätettyä mahdollisimman hyvin. Poltetun biomassan kierrätys lannoitteena voi kuitenkin vaikeutua, koska pajulla on taipumusta imeä maasta tehokkaasti raskasmetalleja, jotka myöhemmin konsentroituvat helposti tuhkaan. Myös pajun alhainen tuhkapitoisuus lisää raskasmetallien konsentraatiota tuhkassa. Pajun raskasmetallipitoisuudet riippuvat voimakkaasti kasvupaikasta ja niiden jakautuminen eri tuhkafraktioihin vaihtelee polttotekniikasta ja -parametreista riippuen. Näistä syistä tuhkan ominaisuudet on selvitettävä kokeellisesti tapauskohtaisesti. (Hurskainen ym. 2013.) Kyseisessä tutkimuksessa mitattiin myös 30 MW:n kerrosleijukattilan lentotuhkan koostumus pajua ja vertailupolttoainetta (metsähaketta + puuteollisuuden sivutuotteita) poltettaessa. Pajua poltettaessa kaliumin pitoisuus lentotuhkassa oli yllättävän korkea, yli 4 %. Vertailupolttoaineen aikana pitoisuus oli noin 3 %. Myös kalsium-, magnesium- ja fosforipitoisuudet olivat korkeita ja paljon suurempia kuin vertailunäytteissä. Ravinteiden perusteella pajun lentotuhka siis näyttää tuloksen perusteella kelpaavan lannoitteeksi. Raskasmetallipitoisuudet olivat pajun kohdalla korkeampia kuin vertailupolttoaineella, mutta kadmiumia lukuun ottamatta sallituissa rajoissa. Pelkkää pajua poltettaessa tuhkanäytteen kadmiumpitoisuus oli 31 mg/kg_{ka}, joka ylittää metsälannoitekäytön raja-arvon. (Hurskainen ym. 2013.)

2.4 Paju pyrolyysiöljyn raaka-aineena

2.4.1 Yleistä

Pyrolyysi tarkoittaa lämmityksellä aikaan saatavaa kiinteän aineen muuttumista kaasuihin ja nestemäiseen tilaan hapettomissa olosuhteissa. Se on myös palamisen ja kaasutuksen ensimmäinen vaihe. Pyrolyysin lopputuotteet voivat olla kiinteitä, nestemäisiä tai kaasuja, tuotteiden suhde riippuu prosessin parametreista. Pyrolyysin verrattain matalan lämpötilan ansiosta raaka-aineeseen sitoutuneet raskasmetallit eivät höyrysty kaasun mukana, vaan jäävät hiiltojäännökseen (Cornelisson 2005). Esimerkiksi poltossa lämpötila on korkeampi ja raskasmetallit päätyvät helposti savukaasujen mukana ilmakehään (Theweys & Kuppens 2008).

Pyrolyysin avulla pajusta voidaan tuottaa pyrolyysiöljyä, joka yleisemmin tunnetaan nimellä bioöljy. Se on öljyistä polttoainetta, joka koostuu vedestä ja monimutkaisista hapettu-

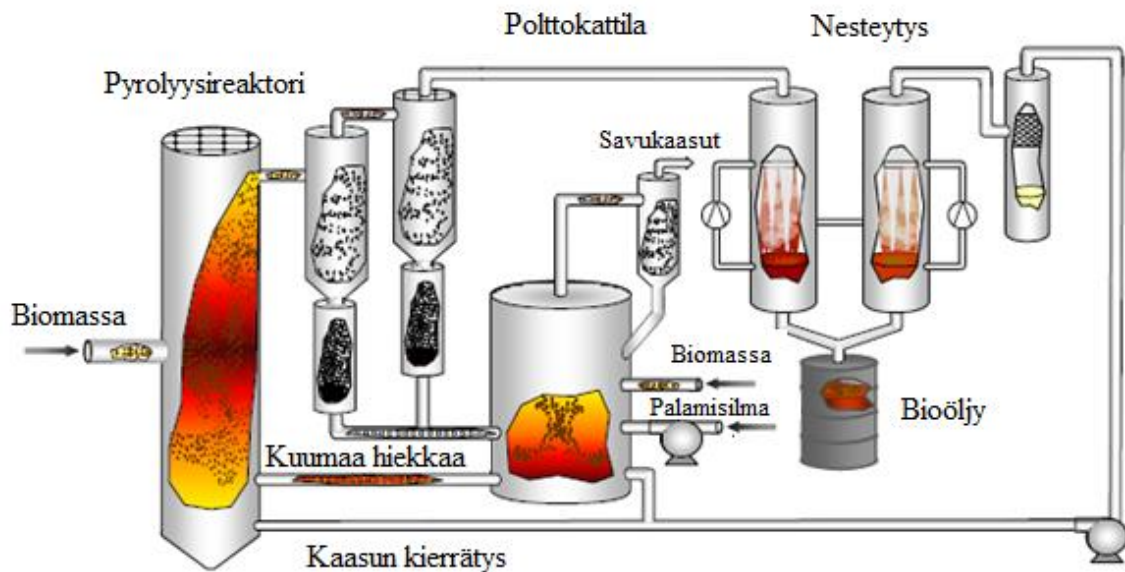
neista hiilivedyistä (Bridgewater 2003). Bioöljyllä voidaan korvata fossiilista polttoöljyä esimerkiksi teollisuuden lämpökattiloissa. Siitä voidaan jatkojalostaa myös erilaisia kemikaleja tai liikennepolttoaineeksi sopivaa biodieseliä. Bioöljyä voidaan säilyttää ja kuljettaa samoin kuin perinteisiä nestemäisiä polttoaineita, mikä parantaa sen käytettävyyttä. (Oasmaa ym. 2010). Varastoinnissa on kuitenkin otettava huomioon, että sen aikana bioöljyn ominaisuuksista voivat muuttua (Bridgewater 2003).

Niin sanotussa nopeassa pyrolyysissä, jossa höyryn viipymäaika on lyhyt (< 2 s) ja lämpötila $400 - 500$ °C, nestemäinen lopputuote on hallitseva. Nopea pyrolyysi on perinteistä, hiiltä tuottavaa pyrolyysiä edistyneempi prosessi ja sen onnistuminen vaatii tarkasti kontrolloituja parametreja. Lämmönsiirron on tapahduttava hyvin nopeasti polttoainepartikkelien pinnalla, mikä onnistuu parhaiten kun polttoaine on hienojakoista. Polttoaineen partikkelikoon tulisi olla enintään noin 2 mm:ä ja kosteusprosentin alle 10, jotta lopputuote sisältäisi mahdollisimman vähän vettä. Optimaalinen lämpötila pyrolyysireaktioissa on 500 °C ja syntyneen höyryn tulisi olla $400 - 450$ °C:ssa. Jos lämpötila on matalampi, muodostuu kiinteää puuhiiltä. Riittävän korkea ja tasainen lämpötila voidaan saavuttaa käyttämällä esimerkiksi leijupetiprosessia. Kun prosessissa syntynyt höyry jäähdytetään nopeasti, se tiivistyy bioöljyksi. (Bridgewater 2003.) Nopean pyrolyysin tuotteita ovat bioöljyn ja jäännöskaasun lisäksi hiiltojäännös ja vesi. Bioöljyn saanto on tavallisesti noin 60 – 80 massaprosenttia (Scott ym. 2000) ja sen lämpöarvo $16 - 19$ MJ/kg (Bridgewater 2003).

2.4.2 Pyrolyysireaktori ja -prosessi

Bioöljyä voidaan tuottaa erilaisilla reaktoreilla, joista kenties eniten tutkituin on leijupetityyppinen reaktori. Kuten poltossa, reaktori voi olla kerros- tai kiertoleijupetiperiaatteella toimiva. Ennen leijupetiprosessia biomassa on jauhettava noin 2 – 3 mm:n palakokoon lämmönsiirron optimoimiseksi. Petimateriaaliksi sopii myös leijupetipoltossa käytettävä kvartsihiekkä. Polttoaine syötetään reaktoriin sen alaosaan esimerkiksi ruuvikuljettimen avulla. Reaktorin pohjasta puhallettava leijutusilma, joka on yleensä tyyppiä, voidaan esilämmittää esimerkiksi jäännöshiiltä polttamalla. Hiili toimii myös höyryn krakkauksen katalyyttinä, joten se erotetaan höyrystä ja kaasusta syklonilla heti pyrolyysin jälkeen. Syklonin läpäisseet höyryt tiivistetään nesteeksi jäähdyttimessä. Aerosolit erotetaan kaasuvirrasta sähkösuodatimella ja huuhdotaan samaan säiliöön jäähdyttimestä tulevien nesteiden kanssa. Systemin läpi kulkenut kaasu voidaan kierrättää takaisin reaktoriin tai leijutuskaasun lämmittimeen.

(Greenhalf ym. 2012.) Kuvassa 7. on esitetty kiertoleijjureaktorin ja polttokattilan yhdistetty systeemi.



Kuva 7. Pyrolyysireaktorin ja polttokattilan integroitu systeemi (Paasikallio 2013, muokattu).

Leijupetireaktorin etuja ovat muassa yksinkertainen rakenne ja toiminta, tarkka lämmönsäätely ja tehokas lämmönsiirto polttoainepartikkeleihin. Reaktoreilla on myös tasainen ja korkea bioöljyn tuottavuus, sekä tehokas jäännöshiilen ja höyryn erottelukyky. Leijutuskaasun nopeutta säätämällä voidaan mukauttaa erikseen kaasujen ja kiinteiden aineiden viipymäaika reaktorissa, mikä tehostaa prosessia. Suurin osa sivutuotteena syntyneestä hiilestä ja kaasusta voidaan käyttää prosessissa, joten jätteeksi päätyy vain tuhkaa ja savukaasuja. (Bridgewater 2003.)

2.4.3 Pajun ominaisuudet pyrolyysin raaka-aineena

Matalan tuhkapitoisuuden ja haihtuvien aineiden korkean määrän ansiosta paju sopii hyvin pyrolyysin polttoaineeksi (Paasikallio 2013). Bioöljyn vesipitoisuudella on Oasmaan & Peacocken (2001) mukaan merkittävä vaikutus öljyn ominaisuuksiin, kuten tiheyteen, viskositeettiin ja lämpöarvoon. Matala tuhkapitoisuus ja korkea haihtuvien yhdisteiden määrä ovat puolestaan suoraan verrannollisia bioöljyn saantoon (Oasmaa ym. 2010). Taulukossa 3 on esitetty pajun kemiallinen koostumus ja energiasisältö.

Taulukko 3. Pajun kemiallinen koostumus ja lämpöarvot (Paasikallio 2013, muokattu).

Ominaisuus	Yksikkö	Lukema
Kosteuspitoisuus	(m - %)	6,6
Hiilipitoisuus (C)	(m - %)	47,0
Vetyttöisyys (H)	(m - %)	6,1
Typpipitoisuus (N)	(m - %)	0,2
Rikkiäisyys (S)	(m - %)	0,025
Haihtuvat aineet kuiva- aineessa	(m - %)	82,3
Tuhkapitoisuus kuiva- aineessa	(m - %)	1,1
Kalorimetrinen lämpö- arvo kuiva-aineessa (MJ/kg)	(MJ/kg)	18,74
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa (MJ/kg)	(MJ/kg)	17,41

m-%_{ka} = massaprosenttia kuiva-aineessa,

Paasikallion (2013) mukaan pajusta tuotetun bioöljyn ominaisuudet eivät juuri poikkea metsätähteestä tuotetusta öljystä. Pajusta tuotetun bioöljyn ominaisuuksia on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Pajusta tuotetun bioöljyn ominaisuuksia (Paasikallio 2013).

Ominaisuus	Yksikkö	Lukema
Vesipitoisuus	m - %	19,4
Kiintoainespitoisuus	m - %	0,22
Hiilipitoisuus (C) saapumistilassa	m - %	43,8
Vetyttöisyys (H) saapumistilassa	m - %	7,4
Typpipitoisuus (N) saapumistilassa	m - %	0,3
Happipitoisuus (O) saapumistilassa	m - %	48,5
pH	kg/dm ³	2,9
Tiheys, 15 °C		1,227
Viskositeetti, 40 °C	cSt	39,6
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	MJ/kg	16,07

2.5 Pajun käyttö vesien puhdistuksessa

2.5.1 Pajun soveltuvuus vesien puhdistukseen

Paju sopii paljon vettä kuluttavana ja ravinteita tehokkaasti käyttävänä kasvina hyvin erilais-
ten vesien puhdistukseen: se kuluttaa Saarsalmen tutkimuksen (1984) mukaan 350 l:aa vettä
tuotettua biomassakiloa kohti, typpeä 136 kg/ha ja fosforia 20,9 kg/ha, kun pajun vuosittai-
nen kasvu on 11 000 kg_{ka}/ha. Paju puhdistaa maata ja vettä myös raskasmetalleista, jotka
voidaan rikastaa tuhkaan polttamalla biomassaa. Kastelemalla pajuviljelmää esimerkiksi jä-
tevedenpuhdistamolla käsitellyllä prosessivedellä, saadaan veden sisältämät ravinteet hyö-
tykäyttöön sen sijaan, että ne päätyisivät vesistöihin.

Pajukentän käytöstä on hyötyä erityisesti alueilla, joilla vesien rehevöityminen aiheuttaa on-
gelmia. Pajua voidaan kasvattaa esimerkiksi peltojen suojavyöhykkeillä, jolloin ravinteiden
vesistökuormitus vähenee (Börjesson & Berndes 2006). Ruotsissa pajuviljelmää on onnistu-
neesti käytetty esikäsiteltyjen yhdyskuntajätevesien ja kaatopaikkojen suotovesien puhdis-
tukseen. Yhdyskuntajätevedet sisältävät yleensä ravinteita sopivassa suhteessa pajun tarpei-
siin, joten niiden käyttö kastelussa nostaa pajuviljelmien satoja. (Börjesson & Berndes
2006.) Suomessa pajupuhdistamon käyttöä on tutkittu myös maitotilan jätevesien käsitte-
lyssä, jossa päästiin hyvään puhdistustarkkuuteen (Tuhkanen ym. 2005).

2.5.1 Prosessiveden käsittely pajupuhdistamolla

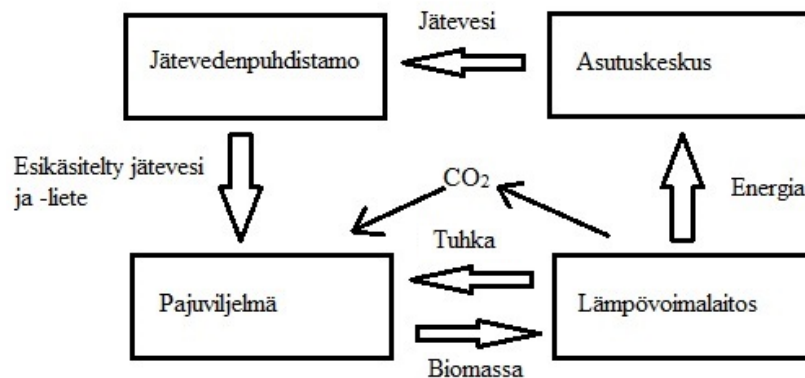
Kokemuksia Ruotsista

Pajupuhdistamo voi tarjota kustannustehokkaan lisän tai vaihtoehdon jätevesien perinteiseen
puhdistukseen. Jos pajukentän omistaa erillinen maanviljelijä, voi hän jätevedenkäsittelystä
saatavan mahdollisen korvauksen lisäksi säästää myös lannoitekuluissa ja hyötyä mahdolli-
sesta kastelun aiheuttamasta sadon kasvusta. Ruotsissa noin 10 jätevedenpuhdistamolla käy-
tetään pajua korvaamaan joitakin perinteisiä puhdistusprosesseja jätevedenpuhdistamolla
(Hasselgren 2007). Rosenqvist ym. (1997) mukaan erilaisia perinteisten jätevedenpuhdistus-
menetelmien ja pajukentän käytön yhdistettyjä konsepteja voivat olla:

1. Pajukentän käyttö kesäisin kasvukaudella ja perinteinen fosforin saostus talvisin.
2. Pajukentän käyttö kasvukaudella ja perinteinen typen ja fosforin poisto talvisin.
3. Pajukentän käyttö kesällä ja jäteveden varastointi talvisin.

Konseptin valinnassa tulee ottaa huomioon ainakin puhdistettavan jäteveden ominaisuudet,
olemassa oleva teknologia jätevedenpuhdistamolla ja tavoiteltava puhdistustehokkuus.

Esimerkiksi 20 000 asukkaan Enköpingsissä perustettiin vuonna 2000 80 hehtaarin pajuviiljelmä peltomaalle jätevedenpuhdistamon lähetyville. Pajua kastellaan jätevedenpuhdistamolla käsitellyllä prosessivedellä ja jätevesilietteen rejektivedellä, joka aikaisemmin käsiteltiin puhdistamolla. Rejektivesi sisältää typpeä 800 mg N/l ja vastaa noin 25 %:a puhdistamolla puhdistetusta tyypestä. Talvisin kasteluvesi varastoidaan varastoaltaisiin ja johdetaan pajukentälle kesällä. Pajukentälle pumpataan vuodessa 200 000 m³ vettä, joka sisältää yhteensä 11 tonnia typpeä ja 0,2 tonnia fosforia. Korjuun jälkeen paju haketetaan ja poltetaan läheisessä lämpövoimalaitoksessa. (Dimitriou & Aronsson 2005.) Edellä kuvatun kaltainen pajun monikäytön konsepti on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Pajun monikäytön konsepti (Berndes & Börjesson 2007, muokattu).

Pajun kaltaisen monikäyttöisen biomassan kasvatuksella voi olla positiivisia vaikutuksia moniin erilaisiin nykyajan ongelmiin ja tavoitteisiin. Tällaisia ovat esimerkiksi pyrkimykset lisätä uusiutuvaa energiaa ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, maaseutujen työttömyys ja huono vedenlaatu. (Berndes & Börjesson 2007.)

Puhdistuksen tehokkuus ja kastelujärjestelmä

Tutkimusten mukaan pajukosteikko voi puhdistaa esikäsiteltyjä jätevesiä yhtä tehokkaasti tai jopa tehokkaammin kuin perinteinen jätevedenpuhdistamo. Puhdistuksen tehokkuus riippuu maaperästä ja sen muodoista, ilmastosta ja siitä kuinka paljon jätevesi sisältää puhdistettavia aineita. (Dimitriou & Rosenqvist 2011.)

Suomessa on vastikään tutkittu pajun soveltuvuutta prosessiveden puhdistukseen. Energia-pajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektiin liittyen perustettiin kesällä 2012 Outokummun jätevedenpuhdistamon yhteyteen pajuviiljelmä, jonne pumpattiin puhdistettua prosessivettä

puhdistamolta. Ravinteiden ja kiintoaineen pidättymistä viljelmään mitattiin kesinä 2012 ja 2013 ja todettiin, että pajuviljelämä soveltuu hyvin jätevedenpuhdistamon prosessivesien käsittelyyn. Kesän 2013 reduktiotarkastelun mukaan kokonaistypestä pajukenttään pidättyi 97 – 99 %:a, fosforista 96 – 99 %:a ja kiintoaineesta 97 %:a. Kastelulla oli positiivinen vaikutus myös biomassassa kasvuun: Toisena kasvuvuonna biomassan lisäys oli Outokummussa 8,8 t/ha, kun se läheisellä Itä-Suomen yliopiston pajuviljelmällä Siikasalmella, jossa minkäänlaista keinokastelua ei ollut, oli vain 1,66 t/ha. (Joensuu 2014.)

Myös Ruotsissa on tutkittu pajuviljelmien potentiaalia jätevesienpuhdistuksessa. Dimitriou ja Aronssonin tutkimuksessa (2005) paju absorboi 90 – 96 % typestä ja 94 % fosforista, kun sitä kasteltiin käsittelemättömällä jätevedellä (4 mg P/l). Börjessonin (1999) tutkimuksessa puolestaan puhdistuksen teho oli 75 – 95 %:a tavanomaisen yhdyskuntajäteveden typestä ja fosforista. Enköpingissä käytössä olevalla pajukentällä kyetään poistamaan 68 %:ia typestä, mikä tarkoittaa 147 kg:aa typeä hehtaaria kohti vuodessa (Dimitriou & Aronsson 2000). Tulokset eivät ole huonoja, sillä esimerkiksi Suomen jätevedenpuhdistamoiden keskimääräinen typen poiston tehokkuus on 56 %:a ja fosforin 96 %:a (Vesilaitosyhdistys 2013).

Kun pajukosteikkoa halutaan käyttää jätevedenpuhdistamolalta tulevan veden puhdistamiseen, tulee niiden välisen etäisyyden olla mahdollisimman lyhyt. Vesi kannattaa pumpata puhdistamolalta putkia pitkin viljelmälle, jossa se jaetaan tasaisesti kentälle ohuempien haaroitusputkien avulla. Itse kastelu voidaan toteuttaa esimerkiksi rei'itettyjen putkien avulla. Pajukentän kaltevuuden tulisi olla sellainen, että vesi valuu mahdollisimman pitkän matkan kasvustossa. Kentän ympärille voidaan tarvittaessa kaivaa oja kentän läpi kulkeneen veden keräämistä varten. (Joensuu 2014.) Paju pidättää ravinteita vain kasvukauden aikana, joten kasvustoon ei voida johtaa vettä ympäri vuoden. Talvisaikaa syntynyt jätevesi voidaan kuitenkin varastoida altaisiin ja johtaa pajukentälle kasvukauden taas alettua. (Dimitriou & Aronsson 2005.)

Jätevesilietteen lannoitekäyttö

Myös jätevedenpuhdistuksessa syntyvää lietettä voidaan käyttää pajun lannoitteena, kunhan mahdolliset riskit huomioidaan. Lietteen lannoitekäytölle on useimmissa Euroopan maissa olemassa valmiit standardit, jotka ovat varsin tiukat etenkin ruokakasvien kohdalla (Lannoitevalmistelaki 539/2006). Energiakasvina paju soveltuu paremmin lannoitettavaksi lietteellä. Esimerkiksi Ruotsissa noin 10 % syntyvästä jätevesilietteestä käytetään pajun lannoitukseen. Liete sisältää lähinnä fosforia, joten se ei ole ravinteiden puolesta tasapainoinen

lannoite. Sitä kannattaakin käyttää yhdessä esimerkiksi lietalannan tai prosessiveden kanssa. Ruotsalaisten kokemuksen mukaan lietteen käyttö ei merkittävästi lisää raskasmetallien määrää maaperässä. (Berndes & Börjesson 2007.)

Riskit

Larsson ym. (2003) ovat tutkineet pajun soveltuvuutta jätevesien puhdistukseen useissa Euroopan maissa, erilaisissa ilmasto-olosuhteissa ja erilaisilla jäteveden ravinnepitoisuuksilla. Tutkimukset osoittavat, että raskasmetallit ja ravinteet eivät aiheuttaneet suurta riskiä pohjaveden ja maaperän saastumiselle, vaikka ravinteiden määrä ylitti joissakin tapauksessa pajun ravinnetarpeen. Pitkällä aikavälillä pajukentälle johdettujen ravinteiden ja raskasmetallien määrän tulisi olla yhtä suuri kuin sieltä sadonkorjuussa biomassan mukana poistuvien aineiden määrä.

Jäteveden ja lietteiden lannoitekäytön kenties suurin riski on patogeenien leviäminen. Jäteveden tapauksessa potentiaalisia patogeenien kulkeutumisreittejä ovat kastelun yhteydessä aerosolien mukana kulkeutuminen tai kulkeutuminen pinta- ja pohjavesien mukana (Larsson ym. 2003). Patogeenien leviämisestä jätevedellä kastelun seurauksena ei ole selkeää näyttöä, mutta lisää tutkimusta tarvitaan. Joitakin suosituksia voidaan esittää Ruotsissa tehtyjen tutkimusten perusteella (Carlander ym. 2000 & 2001, Aronsson ym. 2000). Jätevedellä kastelua tulisi välttää savimailla ja pohjavesialueilla, joilla vesi on ihmisten käytössä. Lisäksi jäteveden esikäsittely (laskeutus ja biologinen prosessi) vähentää patogeenien määrää ja siten leviämiskäyttöä huomattavasti. Carlander ym. (2002) tutkivat patogeenien leviämistä kolmella prosessivedellä kastellulla viljelmällä ja tulivat tulokseen, että biologisen käsittelyn läpikäynnillä jätevedettä voidaan turvallisesti käyttää pajun kasteluun. Myös jätevedenpuhdistamolla käsitelty jätevesi voi sisältää taudinaiheuttajia, joten jätevedellä kastelun riskit tulisi suhteuttaa tapauskohtaisesti vaihtoehtoisen käsittelyn riskeihin (Börjesson & Berndes 2005).

2.5.2 Kaatopaikkojen suotovesien puhdistus

Pajun voidaan hyödyntää myös esimerkiksi vesistöjen suojavyöhykkeillä kaatopaikkojen suotovesien puhdistuksessa. Yleensä suotovedet kuljetetaan jätevedenpuhdistamoille, mikä on kallista ja epäenergeettistä. Pajuviljelmän perustaminen on verrattain halpaa ja sillä voidaan saavuttaa riittävä puhdistustarkkuus. Nestefaasista voidaan päästä kokonaan eron kiertämällä vettä viljelmän läpi niin, että se haihdunnan kautta päätyy ilmakehään. Haitalliset yhdisteet pidättyvät kasvustoon tai maaperään. Ruotsissa on 20 kohdetta, joissa kaatopaikan

suotovettä käytetään pajuviilijelmän kasteluun. (Dimitriou & Aronsson 2005.) Suomessa Biodiili Oy on kehittänyt konseptin, jossa energiapajua kasvatetaan käytöstä poistetulla jätteen loppusijoituspaikalla käyttäen kierrätysaineksista valmistettua kasvualustaa ja suotovesikastelua. Konsepti on jo käytössä Jyväskylän Mustankorkean kaatopaikalla ja on osoittautunut toimivaksi. (Biodiili Oy 2014.)

2.5.3 Turvetuotantoalueen valumavesien puhdistus

Turvetuotantoalueiden valumavedet sisältävät muun muassa ravinteita ja kiintoainesta, jotka puhdistamattomana aiheuttavat vesistökuormitusta ympäröivään vesistöön. Kuormitusta on saatu viime vuosina vähennettyä erilaisten puhdistustekniikkojen ansiosta. Eri puhdistusmenetelmien puhdistustehokkuudet on esitetty taulukossa 5. Yksi yleisimmistä ja parhaista käyttökelpoisista tekniikoista on pintavalutuskenttä, jossa puhdistettavaa vettä johdetaan koskemattoman suoalueen yli, jolloin kasvillisuuteen ja maaperään pidättyy osa ravinteista ja kiintoaineesta. Jos ojittamatonta suota ei ole saatavilla, voidaan valumavesi pumpata alueen läheisyyteen perustetulle kasvillisuuskentälle, jossa puhdistus tapahtuu maa-ainekseen sitoutumalla, juurakkotilan mikrobitoiminnan vuoksi sekä kasvien käyttäessä vettä ja ravinteita. (Turveteollisuusliitto 2009.)

Taulukko 5. Turvetuotantoalueiden valumavesien eri puhdistusmenetelmien puhdistusteho (Turveteollisuusliitto 2009 & Joensuu 2014). Luvut ovat pajukenttää lukuun ottamatta turveteollisuusliiton raportista (2009).

Menetelmä	Reduktio		
	Kiintoaine (%)	Kokonaistyyppi (%)	Kokonaisfosfori (%)
Laskeutusallas	30 – 40		
Virtaamansäätö	90	13 – 22	20 – 50
Pintavalutuskenttä	55 – 92	49	46
Massansiirtoallas	30 – 50	30 – 50	30 – 50
Maaperäimeytys	87	76	73
Kemiallinen puhdistus	30 – 90	30 – 60	75 – 95
Pajukenttä	22 – 38	90 – 99	99 – 100

Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektiin liittyen Raatteikonsuon turvetuotantoalueen yhteyteen perustettiin keväällä 2012 pajuviiljelelmä tavoitteena tutkia pajun soveltuvuutta turvetuotantoalueen valumavesien puhdistukseen (Leinonen ym. 2013). Valumavesi pumpattiin tuotantoalueen kokoojaojaan kaivetusta pumppausaltaasta reiätettyä putkea pitkin viljelmälle. Kesän 2013 reduktiotarkastelun mukaan pajukenttä pidatti toisena kasvuvuonna kokonaistyyppä kasvukaudella 90 – 99 % ja kokonaisfosforia 99 – 100 %. Kiintoainetta pajukasvusto pidatti huonommin: Kasvukaudella reduktio oli 22 – 38 %. Pajukasvuston pidätyskyky oli kahtena ensimmäisenä kasvukautena huonompi kuin Keski-Suomen ELY-keskuksen alueen muilla kosteikoilla, mutta se todennäköisesti paranee kasvillisuuden kehittyessä. Luotettavampien tulosten saamiseksi pajun soveltuvuutta valumavesien puhdistuksessa tulee tarkkailla pidemmällä aikavälillä. (Joensuu 2014.)

3 AINEISTOT JA MENETELMÄT

Tämän kustannustarkastelun tarkoituksena on arvioida energiapajuhakkeen tuotantoketjujen kustannuksia käyttöpaikalle kuljetettuna. Polton ja pyrolysoinnin kustannuksia ei lasketa, koska niiden voidaan olettaa olevan yhtä suuria kuin vastaavat kustannukset esimerkiksi metsähakkeen kohdalla. Kustannusten pääasiallisia lähteitä ovat Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektissa tehdyt tutkimukset. Laskuissa ja niiden luotettavuuden tarkastelussa hyödynnetään myös muuta aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. Pajun käytöstä jätevesien puhdistuksessa saatavaa taloudellista hyötyä arvioidaan ja lasketaan osaksi kokonaiskustannuksia. Tarkastelu tehdään ensisijaisesti Suomessa vallitsevien olosuhteiden perusteella.

Investointien elinkaaren ajalle jaettavat vuosittaiset poisto- ja korkokustannukset lasketaan Rosenqvistin (1997) kehittämää mallia hyväksi käyttäen, jossa yhdistyvät annuiteetti- ja nykyarvo -menetelmät. Annuiteettimenetelmässä oletetaan, että investoinnin vuotuinen tuotto ja käyttö ovat vakioita. Tällöin myös vuotuinen korko- ja poistokustannus ovat vakioita ja niiden yhteenlaskettua summaa kutsutaan annuiteetiksi. Annuiteetti lasketaan annuiteettiker-toimen avulla investointikohteen hankintamenosta ja jäännösarvosta. Jos jäännösarvo on nolla, sitä ei tarvitse huomioida. Nykyarvomenetelmällä vuotuiset kassavirrat muutetaan diskonttaamalla nykyarvoiksi. Rosenqvistin (1997) mallin mukaan vuosittainen poisto- ja korkokustannus lasketaan kaavalla 1:

$$C = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} \sum_{t=0}^n (1 + r)^{-t} \times A_t \quad (1)$$

missä n = viljelmän elinikä vuosissa, r = diskonttokorko (6 %), t = vuosi, jolloin kustannus/tulo syntyy, ja A_t = kustannuksen/tulon suuruus. Termi $\frac{r}{1-(1+r)^{-n}}$ on annuiteettikerroin, jonka avulla lasketaan investointikohteen vuotuinen poisto- ja korkokustannus yhtenä eränä. $\sum_{t=0}^n (1+r)^{-t}$ on niin sanottu diskonttaustekijä, jonka avulla tulevaisuuden kassavirrat muutetaan tähän hetkeen eli diskontataan. (Kasmioiui & Ceulemans 2012.) Yhdistyneiden kuningaskuntien talousministeriön suositusten mukaan investointien diskonttokorkoa määritettäessä tulisi ottaa huomioon muun muassa väestön kulutuksen muutokset tulevaisuudessa ja investointiin liittyvät riskitekijät. (HM Treasury 2003.) Tässä tutkimuksessa diskonttokorona arvioidaan olevan 6 %.

Pajun lämpöarvo käyttökosteudessa lasketaan käyttäen kaavaa 2:

$$Q_{net,ar} = Q_{net,d} \times \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0,02441 \times M_{ar}, \quad (2)$$

missä $Q_{net,ar}$ = saapumistilaisen polttoaineen tehollinen lämpöarvo, $Q_{net,d}$ = kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, M_{ar} = polttoaineen kosteuspitoisuus saapumistilassa (%) painotettuna kostean polttoaineen massalla ja 0,02441 = veden höyrystymiseen kuluva lämpömäärä.

4 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Pajuviljelmän perustamiskustannukset

4.1.1 Perustamis- ja ylläpitokustannukset suopohjalla

Pajuviljelmän perustamisessa kustannuksia syntyy muun muassa koneiden ja työvoiman käytössä, lannoituksessa, pajupistokkaiden hankinnassa ja erilaisissa kuljetuksissa. Useissa työvaiheissa tarvitaan sekä työvoimaa, että koneistoa.

Toteutuneet kustannukset Savonnevalla

Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektissa perustettiin pajuviljelmiä Savonnevan turvetuotantoalueen yhteyteen suopohjalle. Suurin kustannuserä syntyi pajupistokkaiden hankinnassa, pistokkaiden osuus oli 51 – 54 % perustamiskustannuksista. Istutuskoneen verottomaksi hinnaksi arvioitiin 47 445 € ja korko- ja poistokustannuksena käytettiin 3700 €. Perustamiskustannuksiksi saatiin eri lannoitevaihtoehdoissa 4 390 – 4 581 €/ha. (Paappanen ym. 2012.) Edullisemmat kustannukset saavutettiin käyttämällä lietelantaa ja voimalaitostuhkaa lannoitteena ja kalliimmat keinolannoitteilla (YaraMila Pellon Y6 ja Yara kalkki).

Suopohjan matalasta pH:sta johtuen maaperää jouduttiin myös kalkitsemaan. Kierrätyslannoitteita käytettäessä tuhka sopi hyvin nostamaan maan pH:ta. Lannoituksen osuus eri lannoitteilla oli 15 – 19 % kokonaiskustannuksista. (Paappanen ym. 2012.)

Tehokkaan viljelyn kustannukset

Tutkimuksessa käytetyt teknologiat ja toimintaperiaatteet eivät olleet perinteisen maatalouden tapaan optimoituja, joten Paappasen ym. (2012) mukaan kustannuksia voitaisiin vähentää toimintaa tehostamalla 44 – 50 %:a. Näin lasketut kustannukset vastaavat paremmin todellisia perustamiskustannuksia. Kustannuksien tarkempi erittely on esitetty taulukossa 6. Huomioitavaa on myös se, että lannoitteiden ravintosisältö ei täyttänyt metsäviljelyn suosituksia, mikä voi vaikuttaa sadon suuruuteen. Paappasen ym. (2012) mukaan eniten voidaan säästää pistokkaiden hankinnassa, maan muokkauksessa ja istutustyössä. Tehostetun toiminnan tarkastelussa lannoitteen valinnalla on suurempi merkitys kokonaiskustannuksissa. Sivutuotteita käyttämällä voidaan vähentää 14 % kokonaiskustannuksista keinolannoitteiden käyttöön verrattuna. Tehokkaasti toimiessa perustamiskustannukset hehtaaria kohti ovat 2193 - 2546 €.

Taulukko 6. Pajuviljelmän perustamiskustannukset käytöstä poistuneelle turvetuotantoalueelle (Paappanen ym, 2012). Hinnat ovat verottomia.

	Kustannuslaji	Kustannus (€/ha)	
		Kierrätyslannoitteet*	Keinolannoitteet*
	Kenttien tasoitus	112,5	112,5
	Lietelanta	0	-
Lannoite	Tuhka	350 (50 €/m ³)	-
	Pellon Y6	-	256,7 (733,33 €/t)
	Kalkki	-	513,5 (64,20€/t)
	Lannoitteen levitys	128,8	62,1
	Kyntö	61,7	61,7
	Äestys	57,0	57,0
	Pistokkaat	1172,9	1172,9
Istutus	Traktorikustannus	80,0	80,0
	Työ	68,0	68,0
	Istutuskoneen poistokustannus	11,8	11,8
	Yleiskulut	150,0	150,0
	Yhteensä	2192,6	2546,1

*Lannoitevaihtoehdot: Kierrätyslannoitteet: lietelanta ja tuhka, Keinolannoitteet: Pellon Y6 ja kalkki

Vuotuiset pajuviiljelmän perustamis- ja hoitokustannukset kierrätyslannoitteella

Oletetaan, että pajuviiljelmän ikä on 25 vuotta ja biomassan tuotto 6 t_{ka}/ha. Perustamiskustannuksiksi saatiin kierrätyslannoitteita käytettäessä 2192,6 €/ha. Perustamislannoituskustannukset ovat 478,8 €/ha, täydennyslannoitus maksaa saman verran ja se tehdään 5 vuoden välein. Perustamiskustannukset ilman lannoitusta ovat siis 1713,8 €/ha. Vuotuiset perustamis- ja hoitokustannukset kierrätyslannoitteella ratkaistaan kaavan 1 avulla:

$$C = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} \sum_{t=0}^n (1 + r)^{-t} \times A_t$$

$$= \frac{0,06}{1 - (1 + 0,06)^{-25}} \times \left((1 + 0,06)^{-0} \times 1713,8 \text{ €/ha} + \sum_{t=i \times 5}^{20} (1 + 0,06)^{-t} \times 478,8 \text{ €/ha} \right) \quad (3)$$

$$\approx \mathbf{247,73 \text{ €/ha}},$$

missä $i = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$

Vuotuiset pajuviiljelmän perustamis- ja hoitokustannukset keinolannoitteilla

Keinolannoitteita käytettäessä perustamiskustannuksiksi saatiin 2546,1 €. Lannoituskustannusten osuus on 832,3 €. Vuotuinen kustannus hehtaaria kohden lasketaan tässäkin tapauksessa kaavan 1 avulla:

$$C = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} \sum_{t=0}^n (1 + r)^{-t} \times A_t$$

$$= \frac{0,06}{1 - (1 + 0,06)^{-25}} \times \left((1 + 0,06)^{-0} \times 1713,8 \text{ €/ha} + \sum_{t=i \times 5}^{20} (1 + 0,06)^{-t} \times 832,3 \text{ €/ha} \right) \quad (4)$$

$$\approx \mathbf{304,00 \text{ €/ha}}$$

Perustamis- ja hoitokustannukset MWh:ia kohti

Pajun tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa voi olla suurimmillaan noin 19 MJ/kg (Veijonen 2003). Lasketaan pajun massa ja lämpöarvo 30 %:n kosteudessa. Massa ratkaistaan seuraavasti:

$$m_{30} = \frac{m_{ka}}{0,7} = \frac{6 \text{ t}}{0,7} \approx 8,571 \text{ t}, \quad (5)$$

missä m_{30} = pajun massa, 30 %:n kosteudessa ja m_{ka} = kuiva-aineen massa. Saapumistilassa olevan polttoaineen lämpöarvo ratkaistaan kaavan 2 avulla:

$$Q_{net,ar} = Q_{net,d} \times \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0,02441 \times M_{ar} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 &= 19 \frac{MJ}{kg} \times \frac{100 - 30}{100} - 0,02441 \frac{MJ}{kg} \times 30 \\
 &\approx 12,5671 MJ/kg.
 \end{aligned}$$

Megajoulet voidaan muuttaa megawattitunneiksi, jolloin energiasisällöksi tulee:

$$\begin{aligned}
 12,5671 MJ/kg &= (12,5671 \times 0,000277778) MWh/kg \\
 &\approx 0,003491 MWh/kg
 \end{aligned} \tag{7}$$

Nyt voidaan laskea vuotuisen hehtaarikohtaisen pajusadon energiasisältö megawattitunneissa:

$$E = 8571 kg/ha \times 0,003491 MWh/kg \approx 29,9 MWh/ha \tag{8}$$

Kun hehtaarin vuotuiset perustamis- ja hoitokustannukset ja sadon energiasisältö tiedetään, voidaan laskea kustannukset energiayksikköä kohti. Kierrätyslannoitteella pajuviiljelmän perustamis- ja hoitokustannukseksi tulee:

$$K = \frac{247,73 \text{ € } ha^{-1}v^{-1}}{29,9 \text{ €/MWh}} \approx \mathbf{8,3 \text{ €/MWh}}. \tag{9}$$

Keinolannoitteita käytettäessä vastaavat kustannukset ovat puolestaan:

$$K = \frac{304,00 \text{ € } ha^{-1}v^{-1}}{29,9 \text{ €/MWh}} = \mathbf{10,2 \text{ €/MWh}}. \tag{10}$$

Yhteenveto

Viljelmän elinkaarelle jaettuna perustamis- ja ylläpitokustannukset eri lannoitteilla ovat siis noin 248 – 304 €/ha/a. Energiayksikköä kohti kustannukset ovat koko viljelmän elinkaaren aikana 8,3 – 10,2 €/MWh, kun täydennyslannoitus tehdään joka viides vuosi korjuun jälkeen ja sato on 6 t_{ka}/ha.

4.1.2 Perustamis- ja ylläpitokustannukset peltomaalla

Kun pajuviiljelämä perustetaan peltomaalle, ovat perustamiskustannukset alhaisemmat kuin suopohjalla. Suopohjaan verrattuna maaperä on ravinteikkaampaa ja lannoitustarve usein pienempi. Myös viljelmän valmistelu on edullisempaa, koska viljelymaan tasoitukselle ei todennäköisesti ole tarvetta. Jos pelto on happamuudeltaan keskimääräistä luokkaa Suomen oloissa, ei kalkitustakaan tarvita. Tällöin lannoitteeksi riittää esimerkiksi edellä mainittu Pelton Y6 keinolannoite tai lietelanta. Perustamiskustannukset määritetään Paappasen ym. (2012) tutkimuksen pohjalta.

Lannoitus

Lannoitus tehdään Danforsin ym. (1997) suosituksia (30 kg P/ha kierron aikana, 80 kg K/ha kierron aikana ja 45 – 120 kg N/ha vuodessa) mukaillen, jolloin Pellon Y6 lannoitetta tarvitaan 967 kg kg/ha ja lietalantaa 53,7 m³/ha viiden vuoden kierron aikana. Ravinteiden lisäykset eri lannoitteilla laskettiin ravinnepitoisuuksien perusteella ja ne on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Ravinteiden lisäykset ensimmäisen kierron aikana.

Ravinteen lisäys kg/ha			
Ravinne	Y6	Lanta	Suositus
P	68	39	30
N	145	145	235-315
K	126	119	80

Paappasen ym. (2012) mukaan Pellon Y6 maksaa 733,33 €/t, joten Y6 -lannoitteen hinnaksi tulee: 0,967 t/ha × 733,33€/t ≈ 709,1€/ha. Lannoitteen levitys maksaa 14,9 €/ha, joten kokonaislannoituskuluiksi tulee noin 724 €/ha. Edelleen Paappasen ym. (2012) mukaan lietalanta on ilmaista, mutta sen levitys maksaa 2,5 €/m³, jolloin lietalannoituksen hinnaksi tulee: 2,5 €/m³ × 53,7m³/ha ≈ 134 €/ha.

Rikkakasvien torjunta

Peltomaalla viljeltäessä tarvitaan myös kemiallista ja koneellista rikkaruohontorjuntaa. Ennen istutusta pelto käsitellään glyfosaattivalmisteella, esimerkiksi Roundupilla ja heti istutuksen jälkeen maavaikutteisella herbisidillä kuten Butisanilla. (Paappanen ym. 2012.) Oletetaan, että mekaaninen torjunta tehdään pyörivällä kultivaattorilla ensimmäisenä kasvukautena 3 kertaa ja kerran jokaisen korjuun jälkeisenä keväänä, eli yhteensä 7 kertaa. Rikkakasvien torjunnan kustannukset ensimmäisen viljelykierron aikana on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Rikkakasvien torjunnan kustannukset viljelmän ensimmäisen kierron aikana (Agrimarket.fi, Ericsson ym. 2009 & Paappanen ym. 2012).

Yksikkö	Torjunta-aine		Mekaaninen torjunta*	Kokonaiskustannus
	Roundup Bio*	Butisan S*		
Hinta €/l	5,5	48,8		
Tarve l/ha	4,0	1,5		
Hinta €/ha	22,0	73,2		
Levitys €/ha	14,3	14,3		
Yhteensä €/ha	36,3	87,5	171	294,8

*Torjunta-aineiden hinnat ovat Agrimarketin internet-sivuilta. Mekaanisen torjunnan on oletettu maksavan yhtä paljon kuin äestys Paappasen ym. tutkimuksessa 2012. Torjunta-aineiden levityksen kustannukset ovat Ericssonilta ym. (2009).

Kokonaiskustannukset

Peltomaalle perustettavan pajuviiljelmän perustamiskustannukset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Pajuviiljelmän perustamiskustannukset peltomaalla (Agrimarket.fi, Ericsson ym. 2009 & Paappanen ym. 2012). Hinnat ovat verottomia.

	Kustannuslaji	Kustannus €/ha	
		Kierrätyslannoitteet*	Keinolannoitteet*
Lannoite	Lietelanta	0	-
	Pellon Y6	-	723,8 (733,33 €/t)
Lannoitteen levitys		134,3	14,9
	Kyntö	61,7	61,7
	Äestys	57,0	57,0
	Pistokkaat	1172,9	1172,9
	Traktori	80,0	80,0
Istutus	Työ	68,0	68,0
	Istutuskoneen poistokustannus	11,8	11,8
Yleiskulut		150,0	150,0
Rikkakasvien torjunta**		294,8	294,8
Yhteensä		2012,8	2617,2

*Lannoitevaihtoehdot: Kierrätyslannoitteet: Lietelanta, Keinolannoitteet: YaraMila Pellon Y6. ** Kaikki luvut ovat rikkakasvien torjuntaa lukuun ottamatta Paappasen ym. 2012 tutkimuksesta tai ko. tutkimuksen tulosten perusteella laskettuja. Rikkakasvien torjunnan kustannuksien lähteet on esitetty taulukossa 6.

Vuotuiset pajuviiljelmän perustamis- ja hoitokustannukset kierrätyslannoitteella

Oletetaan, että biomassasaanto on 8 t_{ka}/ha vuodessa, täydennyslannoitus tehdään viiden vuoden välein ja viljelmän ikä on 25 vuotta. Lannoituskustannukset lietalannalla ovat 134,3 €/ha yhden kierron aikana. Perustamis- ja täydennyslannoitus maksavat yhtä paljon. Rikkakasvien torjunnan kustannukset ensimmäisen kierron aikana ovat 294,8 €/ha ja seuraavien kiertojen aikana 57 €/ha. Perustamiskustannukset ilman rikkakasvien torjuntaa ja lannoitusta ovat 1601,3 €/ha. Vuotuinen perustamis- ja hoitokustannus kierrätyslannoitteella lasketaan kaavan 1 avulla:

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} \sum_{t=0}^n (1 + r)^{-t} \times A_t \\
 &= \frac{0,06}{1 - (1 + 0,06)^{-25}} \\
 &\quad \times \left((1 + 0,06)^{-0} \times 1601,3 \text{ €/ha} + \sum_{t=i \times 5}^{20} (1 + 0,06 \times 134,3 \text{ €/ha} + (1 + 0,06)^{-0} \times 294,8 \text{ €/ha}) \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{t=i \times 5}^{20} (1 + 0,06) \times 57 \text{ €/ha} \right) \tag{11} \\
 &\approx \mathbf{191,51 \text{ €/ha}}, \\
 &\text{missä } i = \{0, 1, 2, 3, \dots\}
 \end{aligned}$$

Vuotuiset pajuviiljelmän perustamis- ja hoitokustannukset keinolannoitteella

Lannoituskustannukset keinolannoitteella ovat yhden kierron aikana 738,7 €/ha. Perustamiskustannus keinolannoitteella lasketaan samaan tapaan kuin kierrätyslannoitteella:

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} \sum_{t=0}^n (1 + r)^{-t} \times A_t \\
 &= \frac{0,06}{1 - (1 + 0,06)^{-25}} \\
 &\quad \times \left((1 + 0,06)^{-0} \times 1601,3 \text{ €/ha} + \sum_{t=i \times 5}^{20} (1 + 0,06 \times 134,3 \text{ €/ha} + (1 + 0,06)^{-0} \times 738,7 \text{ €/ha}) \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{t=i \times 5}^{20} (1 + 0,06) \times 57 \text{ €/ha} \right) \tag{12} \\
 &\approx \mathbf{335,00 \text{ €/ha}},
 \end{aligned}$$

Perustamis- ja hoitokustannukset MWh:ia kohti

Koska sato (10 t_{ka}/ha) on suurempi kuin suopohjalla, on sen energiasisältö laskettava uudelleen. Energiasisältö ratkaistaan samaan tapaan kuin edellä 6 tonnin kuiva-aine -sadolla 30

-%:n kosteudessa ja tulokseksi saadaan 39,9 MWh/ha. Kun vuosittaiset perustamiskustannukset ja sadon energiasisältö tunnetaan, voidaan siirtyä laskemaan kustannuksia. Täydennyslannoituksesta ja rikkakasvien torjunnasta aiheutuvat kulut mukaan lukien perustamiskustannuksiksi saadaan lietalantaa lannoitteena käyttämällä:

$$K = \frac{191,51 \text{ € ha}^{-1} \text{ v}^{-1}}{39,9 \text{ MWh/ha}} \approx 4,8 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \quad (13)$$

Keinolannoitetta käytettäessä kustannukset lasketaan samaan tapaan:

$$K = \frac{335,00 \text{ € ha}^{-1} \text{ v}^{-1}}{39,9 \text{ MWh/ha}} \approx 8,4 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \quad (14)$$

Yhteenveto

Perustamis- ja hoitokustannuksiksi saatiin siis 4,8 – 8,4 €/MWh. Hehtaaria kohden kustannukset ovat 192 - 335 €/ha. Ruotsalaisessa tutkimuksessa (Ericsson ym. 2009) päädyttiin samansuuntaiseen tulokseen – perustamiskustannuksiksi saatiin nykyisten käytäntöjen mukaan toimittaessa noin 5,4 €/MWh.

4.2 Korjuun kustannukset

Pajun korjuukustannukset vaihtelevat huomattavasti korjuutavasta ja käytetyistä koneista riippuen. Taulukossa 8 on esitetty eri korjuukoneilla suoritettujen korjuun kustannuksia. Suomessa pajun viljelypinta-ala on vielä niin pieni, ettei erikoiskoneiden hankinta ole kannattavaa. Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektissa tutkittiin pajun korjuun tuottavuutta ja kustannuksia, kun korjuu suoritettiin energiapuukouralla varustetulla traktorilla. Tutkimuksessa huomattiin odotetusti, että hakkuun tuottavuudella ja hakattujen puiden koolla on selkeä korrelaatio. Erilaisista korjuun työtavoista tehokkaimmaksi osoittautui kaksivaiheinen korjuu, jossa pajut kaadetaan ensin maahan karholle ja kerätään sitten kuormatraktorin kyytiin. (Sihvonen ym. 2013.)

Kun arvioidaan korjuun kustannuksia käyttöpaikalla, otetaan huomioon myös lähikuljetuksesta, mahdollisesta varastoinnista, haketukselta ja kaukokuljetuksesta aiheutuvat kustannukset. Edellisessä kappaleessa kuvatussa Sihvosen ym. (2013) tutkimuksessa kustannukset tienvarressa olivat alimmillaan 14,0 €/MWh, kun sato oli 33,75 t_{ka}/ha. Laitilan ym. (2010) mukaan haketus- ja kaukokuljetuskustannukset ovat noin 4,5 €/m³ ja 5,0 €/m³ 45 km kilometrin etäisyydellä. Kun muutetaan kuutiot megawateiksi, saadaan haketus- ja kaukokuljetuskustannuksiksi yhteensä 4,75 €/MWh. Kokonaiskustannukset käyttöpaikalla ovat siis 18,75 €/MWh (taulukko 10).

Taulukosta 10 nähdään, että erikoiskoneita käytettäessä realistinen korjuukustannus on 7,3 – 11,7 €/MWh käyttöpaikalla. Halvempi kustannus saavutetaan hakeharvesterilla (sato 56 t_{ka}/ha) ja kalliimpi kokopuukorjuukoneella (sato 18,3 t_{ka}/ha). Hakkeena korjatessa mahdollinen biomassan kuivaus on kuitenkin tehtävä koneellisesti, mikä nostaa kustannuksia. Lisäksi erikoiskoneiden käyttö vaatii suuren pinta-alan ollakseen kannattavaa. (Sihvonen ym. 2013.)

Taulukko 10. Pajun korjuumenetelmien tuottavuuksia ja kustannuksia (Sihvonen ym 2013, muokattu).

Kone tyyppi	Kustannus laitoksella hakkeena (€/MWh)	Edut	Haitat	Lähde
Hakeharvesteri	7,3	Suurilla aloilla edullinen	Vaatii suuret alat suurten investointikustannusten takia, korjuu hakkeena	Bergström ym. 2011
Tarkkuussilppuri (JF Maquinas Agricolas LTD)	15,2	Halpa investointi	Työteho vaatimaton, korjuu hakkeena	Sihvonen ym 2013
Pajun kokopuuna korjaava kone (Stemster)	11,7	Kokopuuna, helppo tuotantoketju	Investointi, erikoiskone jolla ei muuta käyttöä	Schweier & Becker 2012
Pyöröpaalit (BioBaler)	14,5	Monikäyttöinen (esim. tienvarsien raivaus)	Korjuu paaleina, eli pakko murskata ennen käyttöä	Henriksson Salix AB 2010
Energiapuuharvennuksen maatilakokoluokan korjuukalusto	18,75	Olemassa oleva konekanta, muuta käyttöä	Hidas ja kallis	Sihvonen ym. 2013
Miestyönä	15,95	Ei kiinteitä kuluja, helppo tuotantoketju	Hidasta, työvoiman saatavuus, kallista	Suomen energiapaju Oy 2012

4.3 Jätevedenpuhdistamon prosessiveden puhdistuksen talous

4.3.1 Lähtökohdat

Pajun kasvatuksen taloudellista kannattavuutta voidaan lisätä hyödyntämällä sitä jätevesien puhdistuksessa. Esimerkiksi käyttämällä jätevedenpuhdistamoiden prosessivettä pajuviiljelmän kasteluun voidaan mahdollisesti korvata osa perinteisistä kalliimmista puhdistusmenetelmistä, säästää lannoitekuluissa ja kasvattaa satoja. Pajun kasvatuksella voi olla myös ympäristöhyötyjä, joista itse viljelijä ei suoraan hyödy taloudellisesti. Tällaisia voivat olla esimerkiksi vesistöjen rehevöitymisen väheneminen ja viljelymaan puhdistuminen raskasmetalleista. (Börjesson & Berndes 2007.)

Keskimääräinen yhdyskuntajätevesi sisältää ravinteita pajulle juuri sopivassa suhteessa, joten sillä on mahdollista korvata perinteinen lannoitus kokonaan (Perttu 1999). Myös riittävä vedensaanti on tärkeää pajun kasvulle. Vesi onkin usein tärkein kasvua rajoittava tekijä suhteellisen sateisillakin alueilla (Lindroth & Båth 1999). Kastelusta aiheutuva biomassan kasvunlisäys riippuu paljon paikallisista ilmasto-oloista ja sateisuudesta. Börjesson & Berndes (2007) arvioivat, että Ruotsin oloissa biomassan lisäys on 4 – 8 t_{ka}/ha. Myös Outokummun jätevedenpuhdistamon yhteyteen perustetulla pajukentällä havaittiin huomattavasti nopeampaa kasvua sateen varassa olevaan pajuviiljelmään verrattuna (Joensuu 2014). Seuraavissa laskuissa oletetaan, että sato kasvaa peltomaalla 8 tonnista kuiva-ainetta/hehtaari 12 tonniin kuiva-ainetta/hehtaari prosessivesikastelun seurauksena.

Rosenqvistin ym. (1997) mukaan pajuviiljelmällä voidaan osittain tai kokonaan korvata jätevedenpuhdistamolla tapahtuva typen- ja fosforin käsittely. Pajupuhdistamolla korvattavia jätevedenpuhdistamon prosesseja voivat olla esimerkiksi typen denitrifikaatio-nitrifikaatio -prosessi (DN-prosessi) ja fosforin kemiallinen saostus. (Rosenqvist & Dawson 2005.) Pajukenttää voidaan käyttää myös perinteisen puhdistamon lisänä tehostamaan ravinteiden poistoa vedestä, joka muuten päätyisi ympäristöön (Joensuu 2014). Tällöin taloudellisen hyödyn suuruutta on kuitenkin vaikeampi arvioida, koska tällaiselle ”ylimääräiselle” ympäristöpalvelulle voi olla vaikea määritellä hintaa.

Paju käyttää ravinteita vain kasvukauden aikana, joten talvisin pajupuhdistus ei toimi. Tällöin prosessivesi voidaan johtaa ympäristöön sellaisenaan tai se voidaan varastoida altaisiin ja pumpata pajukentälle seuraavana kesänä. Seuraavassa kappaleessa tarkastellaan jätevedenpuhdistamon yhteyteen rakennetun pajukentän kastelujärjestelmän kustannuksia ja ta-

loudellista hyötyä, joka koituu pajukentän käytöstä ravinteiden poistossa. Tarkasteluun otetaan tapaukset, jossa toisessa pajukenttä toimii perinteisen jätevedenpuhdistuksen lisänä ja toinen, jossa pajukenttä korvaa puhdistusprosesseja jätevedenpuhdistamolla.

4.3.2 Pajupuhdistamo perinteisen jätevedenpuhdistusprosessin lisänä

Kun pajukenttä ei korvaa jätevedenpuhdistusprosesseja jätevedenpuhdistamolla vaan toimii jätevesipuhdistuksen lisänä, viljelijä hyötyy lähinnä lannoitekulujen pienenemisestä ja sadon kasvusta. Järjestelyn kannattavuus maanviljelijän kannalta riippuu pitkälti siitä, kuka kustantaa kastelujärjestelmän ja sen ylläpidon. Tässä on oletettu, että pajuviiljelmän omistaa yksityinen maanviljelijä, mutta myös jätevedenpuhdistamo voi tietysti toimia viljelmän omistajana. Tiukentuvien puhdistusvaatimusten seurauksena puhdistamot voivat olla valmiita investoimaan pajupuhdistamoon ja/tai maksamaan korvausta viljelijälle veden vastaanottamisesta. Näin on tehty esimerkiksi Ruotsin Enköpingissä, jossa jätevedenpuhdistamoita vaadittiin puolittamaan typpipäästönsä vesistöjen rehevöitymisongelmien takia. (Börjesson & Berndes 2006.)

Pajupuhdistamon kustannukset prosessiveden käsittelyssä

Pajupuhdistamon perustamis- ja käyttökustannukset riippuvat pajukentän pinta-alasta, veden varastointitarpeesta ja puhdistettavan veden määrästä. Taulukossa 11 on esitetty Rosenqvistin ym. (1997) esittämien arvojen pohjalta lasketut pajupuhdistamon kustannukset 10 ja 50 hehtaarin pajuviiljelmillä. Lähtöarvot on muutettu ensin kruunuista markkoiksi vuoden 1997 kurssin (1 mk = 0,6735 kr) (Suomen pankki 2008) mukaan ja nykyarvoistettu tilastokeskuksen rahanarvokertoimen avulla: Tilastokeskuksen (2014) mukaan vuoden 1997 markka voidaan muuntaa nykypäivän euroiksi kertoimella 0,2246. Kustannukset on siis muutettu nykypäivän euroiksi seuraavalla kaavalla:

$$C_n = C_{kr} \times k \times n, \quad (15)$$

missä C_{kr} on alkuperäinen kustannus kruunuina, k on vuoden 1997 kruunun ja markan välinen kurssi, n on kerroin, jolla vuoden 1997 markka muutetaan nykypäivän euroksi.

Esimerkiksi putkien investointikustannus on Rosenqvistin ym. (1997) lähteessä 10 hehtaarilla 90 000 kr, kun prosessivettä käsitellään vain kesäisin. Nykypäivän euroissa kustannus on:

$$C_n = C_{kr} \times k \times n = 90000 \text{ kr} \times 0,6735 \text{ mk/kr} \times 0,2246 \text{ €/mk} \\ \approx \mathbf{13614 \text{ €}}. \quad (16)$$

Muut kustannukset on muutettu kruunuista euroiksi samaan tapaan. Hehtaarikohtaiset vuosittaiset kustannukset on laskettu näiden arvojen pohjalta. Investointikustannukset sisältävät myös työvoimakustannukset. Rosenqvistin ym. (1997) oletetaan, että kastelu toteutetaan pumppaamalla vesi putkia pitkin suoraan kasvustolle, jossa se jaetaan tasaisesti haaroituksputkien avulla. Etäisyydet jätevedenpuhdistamolta ja varastoaltaalta pajukentälle ovat molemmat 1 km. Puhdistamon ja varastoaltaan etäisyyden oletetaan olevan 2 km:ä.

Taulukko 11. Pajupuhdistamon investointi- ja ylläpitokustannukset (Rosenqvistin ym. 1997, muokattu). Kruunut on muutettu alkuperäisestä lähteestä euroiksi edellä kuvatulla tavalla.

	Veden käsittely kesäisin		Ympärivuotinen käsittely	
	10 ha	50 ha	10 ha	50 ha
Pumppaus jätevedenpuhdistamolta				
Investointi (€)	4538	9832	4538	9832
Ylläpito (€/a)	1513	2269	1513	2269
Käyttöikä (a)	12	12	12	12
Putket				
Investointi (€)	13614	166395	40842	202699
Ylläpito (€/a)	136	1664	408	2027
Käyttöikä (a)	24	24	24	24
Varastoaltaat				
Investointi (€)	-	-	45380	226902
Ylläpito (€/a)			454	2269
Käyttöikä (a)			24	24
Pumppaus varastoaltailta				
Investointi (€)	-	-	9832	17396
Ylläpito (€/a)	-	-	1482	2269
Käyttöikä (a)	-	-	12	12
Kastelujärjestelmä				
Investointi (€)	16639	68071	16639	68071
Ylläpito (€/a)	166	681	166	681
Käyttöikä (a)	12	12	12	12

Pajupuhdistamon vuosittaiset ja megawattituntikohtaiset kustannukset

Pajupuhdistamon investointien poisto- ja korkokustannukset lasketaan annuiteettiperiaatteen mukaisesti. Investoinnit tehdään perustamisvuonna, joten niiden netto nykyarvoa ei tarvitse laskea. Ylläpitokustannukset lasketaan kaavalla 1. Korkokantana käytetään 6 %:a ja jäännösarvon oletetaan olevan nolla. Investointien ja ylläpitokustannusten vuosikustannus ratkaistaan siis seuraavasti:

$$C = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} \times \left(I + \sum_{t=0}^n (1 + r)^{-t} \times A_t \right), \quad (17)$$

missä r = korkoprosentti, n = investoinnin käyttöikä, I = investoinnin suuruus ja A_t = ylläpitokustannus ja t = vuosi, jona kustannus syntyy. Tässä esimerkkisijoitus 10 hehtaarin pajupuhdistamon skenaariosta, jossa talvisin syntynyttä prosessivettä ei varastoida. Putkien investointikustannus on 13614 €, ylläpitokustannus 136 € ja käyttöikä 24 vuotta. Tällöin putkien yhteenlaskettu vuotuinen korko-, poisto- ja ylläpitokustannus on muotoa:

$$\begin{aligned} C &= \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} \times \left(I + \sum_{t=0}^n (1 + r)^{-t} \times A_t \right) \\ &= \frac{0,06}{1 - (1 + 0,06)^{-24}} \times \left(13614 \text{ €} + \sum_{t=1}^{24} (1 + 0,06)^{-t} \times 136 \text{ €} \right) \\ &\approx \mathbf{1085 \text{ €}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Kunkin skenaarion vuosittaiset kustannukset hehtaaria kohden lasketaan summaamalla eri investointien vuosikustannukset yhteen ja jakamalla summa viljelypinta-alalla. Kokonaiskustannukset on esitetty taulukossa 12.

Pajupuhdistamon kustannukset pajun energiasisältöä kohti lasketaan samaan tapaan kuin viljelyn perustamiskustannukset MWh:a kohti. Nyt sato on 12 tka/ha/a, eli noin 17,1 t/ha 30 %:n kosteudessa. Tällöin sadon energiasisältö on 59,8 MWh/ha.

Esimerkiksi edellä määritellyn esimerkin putkien kustannus MWh:a kohti saadaan seuraavasti:

$$K = \frac{C}{P \times E} = \frac{1085 \text{ €}}{10 \text{ ha} \times 59,8 \text{ MWh/ha}} \approx \mathbf{1,8 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}}, \quad (19)$$

missä P = viljelypinta-ala ja E = hehtaarikohtainen pajun vuotuisen kasvun energiasisältö, kun sato on 12 t_{ka}/ha a. Kokonaiskustannukset lasketaan jälleen summaamalla eri investointien megawattituntikohtaiset kustannukset yhteen. Kokonaiskustannukset on esitetty taulukossa 12.

Yhteenveto pajupuhdistamon kustannuksista

Taulukossa 12 on esitetty yhteenvetomaisesti taulukon 11 pohjalta lasketut pajupuhdistamon investointi- ja ylläpitokustannukset hehtaaria ja MWh:ia kohti.

Taulukko 12. Lasketut vuotuiset pajupuhdistamon investointi- ja ylläpitokustannukset hehtaaria ja MWh:ia kohti.

	Veden käsittely kesäisin		Ympärivuotinen käsittely	
	10 ha	50 ha	10 ha	50 ha
Kokonaiskustannukset hehtaaria kohti (€ ha ⁻¹ a ⁻¹)	638	550	1491	1117
Kokonaiskustannukset MWh:ia kohti	10,7	9,2	24,9	18,7

Pajupuhdistamon kustannuksiksi saatiin siis 10 hehtaarin pinta-alalla 638 – 1491 € ha⁻¹ a⁻¹ ja 50 hehtaarin pinta-alalla 550 – 1117 € ha⁻¹ a⁻¹. 12 t_{ka}/ha pajusadolla kustannus MWh:a kohti on 10 hehtaarilla 10,7 – 24,9 €/MWh ja 50 hehtaarilla 9,2 – 18,7 € ha⁻¹ v⁻¹.

Pajupuhdistamon eri kustannuslajien osuudet on esitetty taulukossa 13. Kuten taulukosta nähdään, suurimmat kastelun kustannukset aiheutuvat pumpuista, putkista ja altaista – eli investoinneista. Investointikustannuksia voidaan minimoida korkealla kastelumäärällä, mahdollisimman lyhyillä välimatkoilla, suurella pajukentän pinta-alalla ja vähäisellä jäteveden varastoinnilla. Myös investointien eliniällä ja korkokannan suuruudella on merkittävä vaikutus kokonaiskustannuksiin. (Rosenqvist & Dawson 2005.)

Taulukko 13. Pajupuhdistamon kustannusjakauma (Rosenqvist & Dawson 2005).

Kustannuslaji	Osuus (%)
Työvoima	3
Pääoma	71
Energia	6
Ylläpito	20
Yhteensä	100

Prosessivesikastelusta aiheutuvat säästöt energiapajun tuotannossa

Börjessonin & Berndesin (2006) arvion mukaan jätevedellä kastelu kasvattaa Keski-Ruotsin oloissa satoa 4 t_{ka}/ha. Voidaan olettaa, että biomassan lisäys on Suomen oloissa samaa luokkaa, jolloin sato kasvaisi esimerkiksi 8 t_{ka}:sta/ha 12 t_{ka}:iin/ha. 30 %:n kosteudessa lisäys on:

4 t/0,7 ≈ 5,7 t/ha. Pajun energiasisältö 30 %:n kosteudessa on 3,49 kWh/kg, joten 5,7 t:n energiasisältö on: 5700 kg × 3,49 × 10⁻³ MWh/kg ≈ 19,9 MWh. Kun sato on 8 t_{ka}/ha, laskettiin sen energiasisällöksi edellä 30 %:n kosteudessa 39,9 MWh/ha. 10 t_{ka}/ha sadolla on energiasisältö siis 39,9 MWh/ha + 19,9 MWh/ha = 59,8 MWh/ha.

Pajuviljelmän perustamis- ja ylläpitokustannuksiksi ilman lannoitusta peltomaalla saatiin 159,6 €/ha a. Kun myös sadon energiasisältö tunnetaan, voidaan laskea kustannukset MWh:a kohti kun sato on 12 t_{ka}/ha:

$$K = \frac{C}{E} = \frac{159,6 \text{ €/ha a}}{59,8 \text{ MWh/ha a}} \approx 2,7 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}, \quad (20)$$

Perustamiskustannuksiksi tavallisessa peltoviljelyssä laskettiin 4,8 – 8,4 €/MWh, kun sato on 8 t_{ka}/ha, joten kastelusta koitua säästö on noin 2,1 – 5,7 €/MWh. Korjuukustannusten ei oleteta muuttuvan merkittävästi sadon kasvaessa ja kastelun oletetaan korvaavan muun lannoituksen kokonaan.

Yhteenveto pajupuhdistamon kustannuksista ja prosessivesikastelun säästöistä

Kastelu lisää pajusaantoa 4 t_{ka}/ha/a. Prosessivesikastelusta seuraava kokonaissäästö lannoituskulujen pienemisestä ja sadon kasvusta (4t_{ka}/ha) on 2,1 – 5,7 €/MWh. Puhdistamon investointi- ja käyttökustannukset ovat 10,7 – 24,9 €/MWh, joten pajupuhdistamon kannattavuus erillisen viljelijän näkökulmasta riippuu pitkälti siitä kuka maksaa kastelujärjestelmän rakentamisen ja ylläpidon. Esimerkiksi Ruotsin Enköpingsissä jätevedenpuhdistamo maksoi kastelujärjestelmän ja maanviljelijä paju kentän perustamiskustannukset (Börjesson & Berndes 2006). Tällöin viljelijälle koitua hyöty on yhtä suuri kuin kastelusta koitua kokonais-säästö. Jos viljelijä joutuu itse maksamaan kastelujärjestelmän, ei kastelu todennäköisesti ole kannattavaa.

4.4.3 Pajupuhdistamo perinteisten jätevedenpuhdistusprosessien korvaajana

Jos energiapajuviljelmällä voidaan korvata joitakin jätevedenpuhdistuksen prosesseja, ovat taloudelliset hyödyt tutkimusten mukaan merkittävästi suurempia, kuin satojen kasvusta ja lannoituskulujen pienemisestä saatava hyöty (Rosenqvistin ym. 1997, Rosenqvist & Dawson 2005, Börjesson & Berndes 2006). Börjessonin ym. (2002) mukaan jätevedenpuhdistuksessa saavutetut säästöt voivat olla jopa suurempia kuin pajun tuotantokustannukset. Tämä edellyttää sitä, että jätevedenpuhdistamo maksaa viljelijälle perinteisen puhdistuksen hintaa vastaavan korvauksen veden käsittelystä. Viljelijälle maksettava hinta prosessiveden

vastaanottamisesta ei todennäköisesti kuitenkaan ole aivan yhtä suuri kuin sen vaihtoehtoinen käsittelykustannus jätevedenpuhdistamolla.

Esimerkiksi Börjessonin & Berndesin (2006) tutkimuksessa oletetaan, että prosessivesi johdetaan pajukentälle biologisen käsittelyn jälkeen, ennen typen DN -prosessia ja fosforin kemiallista saostamista. Tutkimuksessa lasketut pajun hyödyntämisestä aiheutuvat muutokset perustamis- ja jätevedenpuhdistuskustannuksissa on esitetty taulukossa 14. Fosforin saostaminen ja typen DN -prosessi ovat suhteellisen kalliita prosesseja, joten niiden korvaaminen halvemmalla tekniikalla on taloudellisesti houkuttelevaa (Rosenqvist & Dawson 2005). Pajukentän hyödyntäminen ravinteiden käsittelyssä vähentää myös lietteen syntyä, jonka käsittely on kallista (Börjesson & Berndes 2006).

Taulukko 14. Pajukentän jätevesikastelusta aiheutuvat säästöt pajun tuotannossa ja jätevedenpuhdistuskustannuksissa, kun pajupuhdistamolla korvataan fosforin kemiallinen saostus ja DN -prosessi (Börjesson & Berndes 2006, muokattu).

Muuttuja	Muutos kustannuksissa (€/MWh)	
	Veden käsittely kesäisin	Ympärivuotinen käsittely
Jätevedenpuhdistus	-12,2	-7,2
Pajun tuotanto*	-4,0	-4,0
Yhteensä	-16,2	-11,2

*Kastelun oletetaan lisäävän satoa 4 t_{ka}/ha ja kokonaispinta-ala on 10 ha.

4.4 Turvetuotantoalueiden valumavesien puhdistuksen talous

4.4.1 Pajupuhdistamon kustannukset

Perustamiskustannukset

Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektin osana perustettiin Raatteikonsuon turvetuotantoalueen yhteyteen 1,3 hehtaarin pajuviilelmä ja sen yhteyteen valumavesien pumpausjärjestelmä keväällä 2012. Pajukentän perustamiskustannuksina voidaan käyttää edellä laskettuja kustannuksia suopohjalle perustettavalle pajuviilelmälle. Lisäkustannuksia syntyy valumavesien puhdistukseen liittyvistä investoinneista ja toimista. Raatteikonsuolla pumpaus- ja mittausjärjestelmän laitteiden investointikustannus oli 57 500 € ja työkuukausi 6000 €. Pumpaamon käyttöikäksi arvioitiin 20 – 30 vuotta. (Leinonen 2013.) Investointien tarkempi erittely on esitetty taulukossa 15. Korke- ja poistokustannukset on laskettu 6 % korkokannalla ja laitteiston iän on oletettu olevan 25 vuotta.

Taulukko 15. Turpeen tuotantoalueen valumavesien pajukenttäpuhdistuksen investointikustannukset (Leinonen ym. 2013). Poisto- ja korkokustannukset on laskettu Leinosen ym. (2013) esittämien lukujen pohjalta. Hinnat ovat verottomia.

Muuttuja	Investointi €/1,3 ha	Poisto- ja korkokustannus €/a
Pumppaamo ja 200 m:n siirtoputki	55000	4302
Mittakaivo	2500	196
Työ	6000	469
Yhteensä	63500	4967

Savonnevalle perustetun pajuviiljelmän perusteella lasketuiksi perustamiskustannuksiksi saatiin lannoitteista riippuen 2 193 – 2 546 €/ha. Kun pajukentän pinta-ala on 1,3 hehtaaria, ovat perustamiskustannukset siis 2 850 – 3310 €. Perustamiskustannuksiin on sisällytetty myös perustamislannoituskulut, koska Raateikonsuolla tehdyn tutkimuksen (Joensuu 2014) perusteella turvesuon valumavesien sisältämät ravinteet eivät kata pajuviiljelmän ravinnetarvetta. Oletetaan kuitenkin, ettei täydennyslannoitusta tarvita. Leinosen ym. (2013) tutkimuksessa 1,3 hehtaarin pajukentällä käsiteltiin 25 hehtaarin valuma-alueen valumavedet (koskeikon pinta-ala on 5,2 % valuma-alueesta.).

Lasketaan seuraavaksi pajupuhdistamon perustamiskustannukset kierrätyslannoitteita käytettäessä turpeen tuotantohehtaaria kohden:

$$I_{tot} = \frac{(I_{kenttä} + I_{laitteisto})}{P_{turve}} = \frac{(2850 \text{ €} + 63500 \text{ €})}{25 \text{ ha}} \quad (21)$$

$$\approx 2 \text{ 654 €}/\text{ha},$$

missä $I_{kenttä}$ = 1,3 hehtaarin kokoisen pajukentän perustamiskustannus, $I_{laitteisto}$ = pumppaamon ja muun laitteiston investointikustannus 1,3 hehtaarin kokoisella pajukentälle ja P_{turve} = turvetuotantoalueen pinta-ala, joka toimii pajukentän valuma-alueena. Vastaavasti keinolannoitteita käytettäessä kustannuksiksi tulee 2 672 €/ha.

Pajupuhdistamon yhteenlasketut perustamiskustannukset turpeen tuotantohehtaaria kohden ovat siis yhteensä 2 654 – 2 672 €. Energiapajua tuottaessa pajuviiljelmästä saadaan myös tuloja, kun paju myydään polttoaineeksi polttolaitokselle. Pajuhakkeen myyntihinnaksi arvioidaan 19,85 €/MWh, mikä on sama kuin metsähakkeella. (FOEX Indexes Ltd 2014). Paju vastaa poltto-ominaisuuksiltaan melko hyvin metsähaketta, joten siitä maksettavan hinnan voidaan olettaa olevan samaa luokkaa. Myynti edellyttää tietysti ensin sadonkorjuun. Oletetaan, että pajusato korjataan kokopuuna korjaavalla koneella, jolloin korjuun ja haketuksen

kustannukset käyttöpaikalla ovat 11,1 €/MWh (Schweier & Becker 2012). Kun myyntihin-
nasta vähennetään kustannukset, tulot ovat 8,75 €/MWh. Hehtaarilta saadaan 29,9 MWh:a,
kun sato on 6 t_{ka}/ha, joten pajuhehtaarilta saatava tulo on noin 242 €/ha. Turpeen tuotanto-
hehtaaria kohden tulo on 20,5 € kun oletetaan, että pajukentän pinta-ala on 5,2 % 25 hehtaa-
rin valuma-alueesta. Kun tämä vähennetään kasvustokentän perustamiskustannuksista, saa-
daan pumppaamalla varustetun kentän kustannuksiksi noin 2 633 - 2651 €/turpeen tuotanto-
hehtaari.

Vuotuiset pajupuhdistamon kustannukset

Turveteollisuusliiton (2009) mukaan pumppaamalla varustetun pintavalutuskentän käyttö-
kustannukset ovat keskimäärin 25 – 35 €/tuotantohehtaari vuodessa. Voidaan olettaa, että
kasvillisuuskentän käyttökustannukset ovat samaa luokkaa eli noin 35 €/tuotantohehtaari
vuodessa.

Vuotuiset investointi- ja käyttökustannukset kierrätyslannoitteita käytettäessä lasketaan jäl-
leen annuiteettimenetelmää hyväksi käyttäen:

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} \times \left(I + \sum_{t=0}^n (1 + r)^{-t} \times Y \right) \\
 &= \frac{0,06}{1 - (1 + 0,06)^{-25}} \times \left(2633 \text{ €/ha} + \sum_{t=0}^{25} (1 + 0,06)^{-t} \times 35 \text{ €/ha} \right) \quad (22) \\
 &\approx \mathbf{221,2 \text{ €/turpeen tuotantohehtaari.}}
 \end{aligned}$$

Keinolannoitteita käytettäessä tulokseksi saadaan noin 222,6 €/tuotantohehtaari. Pajupuh-
distamon kokonaiskustannukset ovat siis vuodessa noin 223 €/turpeen tuotantohehtaari. Yh-
deltä turvetuotantoalueen hehtaarilta voidaan tuottaa noin 500 MWh:a vuoden aikana (Lei-
nonen ym. 2013), joten pajukentän kustannuksiksi tuotettua turpeen MWh:a kohti tulee:

$$\frac{223 \text{ €/ha}}{500 \text{ MWh/ha}} \approx \mathbf{0,45 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}}$$

4.4.2 Pajupuhdistamon kustannukset muihin valumavesien puhdistustekniikoihin verrattuna
Kasvillisuuskenttä on vain yksi turvetuotannon valumavesien puhdistuskeino. Muita yleisiä
menetelmiä ovat pintavalutuskenttä, virtaaman säätö ja kemiallinen puhdistus. Taulukossa
16 on esitetty eri menetelmien kustannuksia. Pumppaamalla varustetun kasvillisuuskentän
kustannuksia lukuun ottamatta kustannukset ovat turvetuotantoteollisuuden arvioiden (Tur-
veteollisuusliitto 2009) perusteella laskettuja keskimääräisiä kuluja.

Taulukko 16. Turvetuotannon valumavesien puhdistustekniikoiden kustannuksia (Turvetuotantoliitto 2009, muokattu)

Menetelmä	Investointikustannus (€/turpeen tuotantohehtaari)	Käyttökustannus (€/ha a)
Pumppaamalla varustettu pinta-valutuskenttä	1050	35
Painovoimaan perustuva pinta-valutuskenttä	150	25
Pumppaamalla varustettu pajukenttä (keskiarvo)	2642	35
Painovoimaan perustuva kasvillisuuskenttä	500	28
Maaperäimeytys	420	65
Kemiallinen puhdistus*	3167	150
Virtaaman säätö (pato)	49	80 (€/pato)

Kemiallisessa puhdistuksessa turpeen tuotantopinta-alan on oletettu olevan 150 ha, koska pienemmällä pinta-alalla kemiallinen puhdistus ei ole kannattavaa (Vapo 2012)

Pumppaamalla varustetun pajukentän kustannukset ovat melko suuret muihin tekniikoihin verrattuna kemiallista puhdistusta lukuun ottamatta. Tämä selittyy pitkälle pumppaamon suurilla investointikustannuksilla, joita vähentämällä pajupuhdistamon kilpailukykyä voitaisiin huomattavasti parantaa. Pumppaamon hehtaariohaiset kustannukset tosin laskettiin ainoastaan 1,3 hehtaarin kokoisen koepuhdistamon investointikustannusten perusteella. Hehtaariohaiset kustannukset ovat todennäköisesti pienempiä suuremmalla pinta-alalla. Jos mahdollista, kasvillisuuskenttä kannattaa rakentaa painovoimaan perustuen.

Vapo Oy:n (2012) mukaan turvetuotannon vesiensuojelussa parasta käyttökelpoista tekniikka edustavat pintavalutuskenttä ja kemiallinen puhdistus. Kemiallinen puhdistus tulee yleensä kyseeseen vain erikoistapauksissa, kuten poikkeuksellisen laajoilla tuotantoalueilla suojelevesistöjen läheisyydessä. Pintavalutuskentän käyttöön ei taas aina ole tarjolla ojittamatonta suota. Tällaisissa tapauksissa vesienkäsittelyä voi olla kannattavaa tehostaa esimerkiksi pajukentällä. (Vapo Oy 2012.)

Jos pajukentän vaihtoehtoisen kustannuksena pidetään kasvillisuuskenttää, jolla ei kasvateta energiakasveja, on pajun käytöstä saatava taloudellisen hyöty yhtä suuri kuin pajuhakkeen myynnistä saatava tulo (393 €/pajuhehtaari). Tämä edellyttää tietysti, että kasvillisuuskentän perustamiskustannukset ovat yhtä suuret kasvusta riippumatta. Myös kemiallisen puhdistuk-

sen kustannuksia voidaan joissakin tapauksissa pitää pajupuhdistuksen vaihtoehtoisina kustannuksina. Pajupuhdistamon investointikustannukset ovat 525 €/turpeen tuotantohehtaari pienemmät kuin kemiallisen puhdistuksen, mikä tarkoittaa pajuhehtaaria kohti noin 10 000 €:n säästöä.

4.5 Tuotantoketjujen kannattavuus ja herkkyysanalyysi

4.5.1 Tuotantoketjujen kannattavuus

Nyt, kun pajun tuotannon eri vaiheiden kustannukset tiedetään, voidaan laskea kokonaisten tuotantoketjujen kustannukset. Turvetuotantoalueiden valumavesien puhdistuksen ja energiapajun viljelyn yhdistettyjä kustannuksia ei esitetä tässä kappaleessa, koska ne esitettiin jo edellisessä kappaleessa yhdessä muiden vesienpuhdistustekniikoiden kanssa. Kyseinen kombinaatio tarkastellaan ensisijaisesti vesienpuhdistustekniikkana eikä energiapajuviljelmänä, koska suopohjalla sato ja siten tuotetun hakkeen määrä jää melko pieneksi. Lisäksi valumavesien pumppausjärjestelmän investointikustannukset nostavat pajuviljelmän perustamiskustannukset eri tasolle tavalliseen viljelyyn verrattuna.

Tuotannon kustannukset ja tulot pellolla on esitetty taulukossa 17 ja suolla taulukossa 18. Hehtaarikohtaisissa tuloissa on huomioitu maataloustuet, jotka pajun viljelyssä ovat Tuomo Hämäläisen mukaan noin 270 €/ha a (Hämäläinen 2014). Tuella voi olla merkittävä vaikutus viljelyn kannattavuuteen etenkin, jos erikoiskoneita ei ole käytössä. Oletetaan tässäkin, että pajuhakkeen myyntihinta on 19,85 €/MWh (FOEX Indexes Ltd 2014). Viljelijän saama voitto hakkeen myynnistä on laskettu vähentämällä hakkeen myynnistä saaduista tuloista tuotantokustannukset. Esimerkiksi peltomaalla kierrätyslannoitteita käytettäessä viljelijän saama hehtaarikohtainen voitto laskettiin seuraavasti:

$$V = T - K = (19,85 \text{ €/MWh} - (4,8 + 11,1) \text{ €/MWh}) \times 39,9 \text{ MWh/ha} \quad (23)$$

$$\approx 158 \text{ €/ha.}$$

Jätevedenpuhdistamon on oletettu kustantavan kastelujärjestelmän, skenaariossa joissa prosessivettä johdetaan pajukentälle. Pajuviljelmän oletetaan olevan erillisen viljelijän omistuksessa.

Taulukko 17. Pajun viljelyn kustannukset ja tulot peltomaalla.

Kustannus/tulo	Tavallinen peltoviljely eri lannoitteilla		Pajupuhdistamo + energiakäyttö
	Kierrätys- lannoitus	Keinolan- noitus	Jätevedenpuhdistamon prosessi- veden jälkikäsittely
Perustaminen ja hoito (€/MWh)	4,8	8,4	2,7
Korjuu ja kuljetus (€/MWh)	11,7	11,7	11,7
Säästö jätevedenpuhdistamolla (€/MWh)	-	-	-
Kustannukset käyttöpaikalla (€/MWh)	16,5	20,1	14,4
Kustannukset käyttöpaikalla (€/ha×a)	658	802	860
Sato (t_{ka}/ha)	8	8	12
Voitto hakkeen myynnistä (€/ha×a)	134	-10	328
Maataloustuki (€/ha×a)	270	270	270
Viljelijän saama kokonais- voitto (€/ha×a)	404	260	598

Taulukko 18. Pajun viljelyn kustannukset ja tulot suopohjalla.

Kustannus/tulo	Kierrätyslannoitus	Keinolannoitus
Perustaminen ja hoito (€/MWh)	8,3	10,2
Korjuu ja kuljetus (€/MWh)	11,7	11,7
Kustannukset käyttöpaikalla (€/MWh)	20,0	21,9
Kustannukset käyttöpaikalla (€/ha×a)	598	654
Sato (t_{ka}/ha)		
Voitto hakkeen myynnistä (€/ha×a)	-3,9	-60,1
Maataloustuki (€/ha×a)	270	270
Viljelijän saama kokonaisvoitto (€/ha×a)	266	210

Viljelijän saama kokonaisvoitto on siis pellolla 260 – 598 €/ha ja suopohjalla 210 – 266 €/ha. Tulot ovat samaa luokkaa ruokohelpin viljelyyn kanssa, josta saatava taksa on peltomaalla Paappasen ym. (2008) mukaan 389 €/ha, kun pellon vuokraa ei lasketa kuluihin. Pajua voi-

daan tuottaa ilman maataloustukiakin jopa ”nollakustannuksilla”, jos pajua käytetään korvaamaan perinteisiä jätevedenpuhdistusprosesseja erillisen viljelijän omistamalla pajuken-
tällä (Börjesson & Berndes 2006). Tämä edellyttää sitä, että jätevedenpuhdistamo maksaa viljelijälle perinteisen puhdistuksen hintaa vastaavan korvauksen veden käsittelystä. Viljeli-
jälle maksettava hinta prosessiveden vastaanottamisesta ei todennäköisesti kuitenkaan ole
aivan yhtä suuri kuin sen vaihtoehtoinen kustannus jätevedenpuhdistamolla.

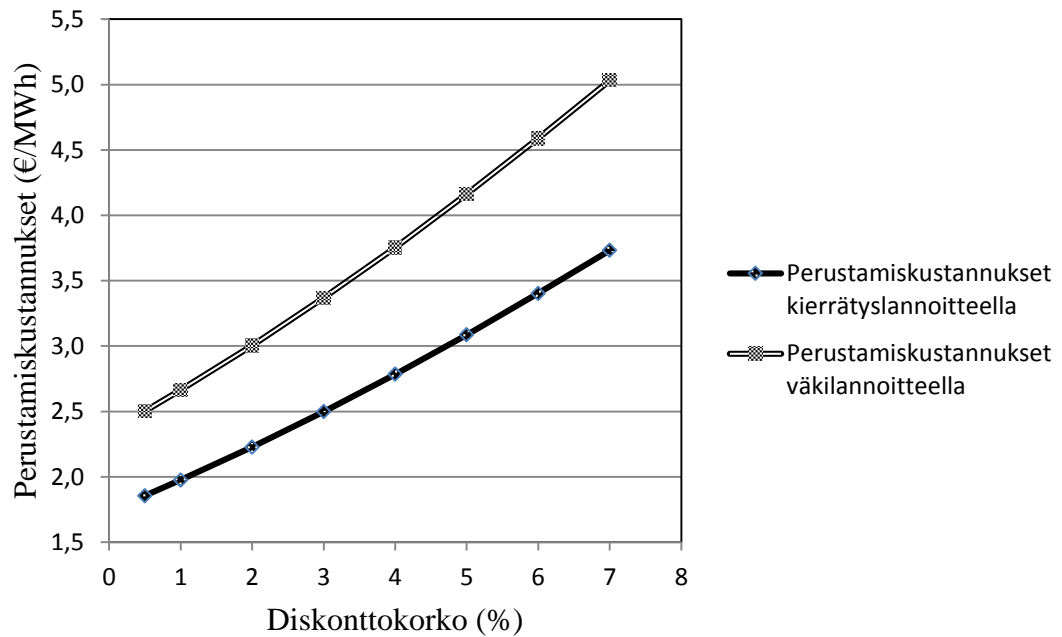
4.5.2 Herkkyysanalyysi

Tuotantoketjujen kustannuksia tarkasteltaessa tulee huomioida, että laskuissa käytetyt lan-
noitusmäärät suopohjalla eivät riitä vastaamaan Issakaisen ja Huotarin (2006) esittämiä suo-
situksia turvemaan metsityksessä. Lannoitus on tehtävä varovasti, koska runsaan lannoituk-
sen seurauksena ravinteita voi päästä huuhtoutumaan viljelmän ulkopuolelle. Vajetta kom-
pensoi ainakin osittain mahdollinen turvetuotantoalueiden valumavesien käsittely pajuken-
tällä, mutta suopohjalle perustettavan pajuviljelmän sato-odotukset ovat silti matalammat
kuin peltomaalla. Korjuussa puolestaan on oletettu olevan käytössä kokopuuna korjaava eri-
koiskone, jonka käyttö ei Suomessa nykyisillä viljelypinta-aloilla ole kannattavaa. Siksi
tässä tutkimuksessa laskettuihin voittoihin pääseminen edellyttää viljelypinta-alojen kasvua
Suomessa. Jos korjuu tehdään esimerkiksi miestyönä tai energiapuuharvennukseen tarkoite-
tulla kalustolla kasvavat kustannukset 4,9 – 7,7 €/MWh.

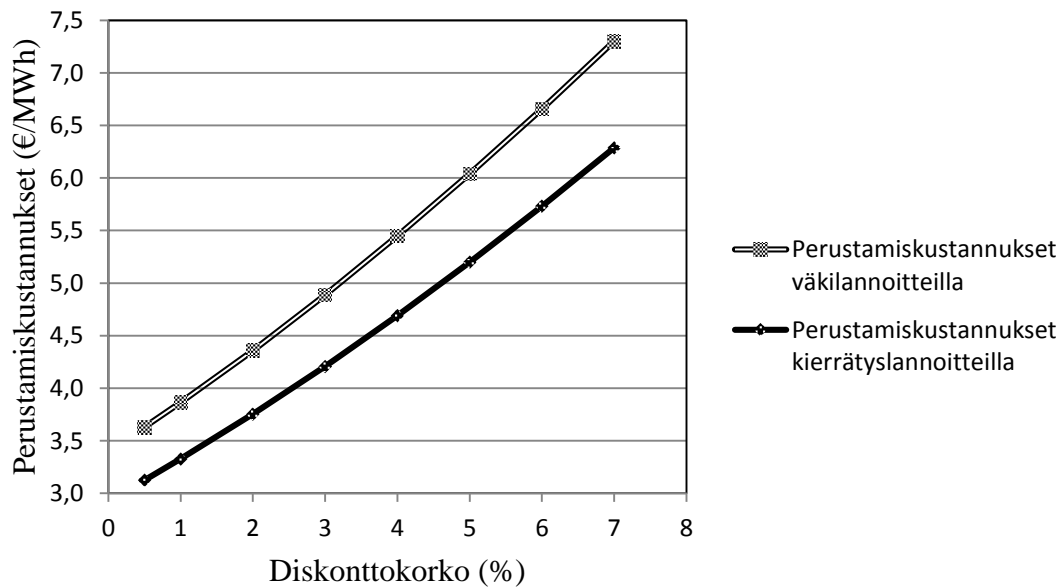
Laskuissa käytetyt pajuviljelmän perustamiskustannukset perustuvat Paappasen ym. (2012)
esittämään optimoidun viljelyn kustannusarvioon, joita ei ole vahvistettu kokeellisella tutki-
muksella. Arvioidut perustamiskustannukset olivat kuitenkin samaa luokkaa Ericssonin ym.
(2009) esittämien perustamiskustannusten kanssa, joten niitä voidaan pitää luotettavina.
Myös tässä tutkimuksessa lasketut pajuhakkeen koko elinkaaren tuotantokustannukset pel-
tomaalla (16,5 – 20,1 €/MWh) vastaavat melko hyvin Ericssonin ym. (2009) esittämiä vas-
taavia kustannuksia (14,4 €/MWh).

Tutkimuksessa lasketut tulokset riippuvat paljon laskuissa käytetyistä paranetreistä. Esi-
merkiksi diskonttokoron muuttaminen muuttaa tuloksia merkittävästi. Kuvissa 9 ja 10 on
esitetty laskuissa käytettävän diskonttokoron vaikutus paju-
viljelmän perustamiskustannuk-
siin. Myös paju-
satomäärää koskevilla oletuksilla on suuri vaikutus tulosten luotettavuuteen. Tarkastelussa käytetyt satomäärät eri kasvualustoilla on arvioitu melko optimistisesti
Suomen oloihin tämän hetken viljelytekniikoita ja pajulajikkeita käytettäessä. Kasvatuksen
kehittämisellä ja jalostustyöllä paju-
viljelmän satomäärien odotetaan kuitenkin kasvavan ja

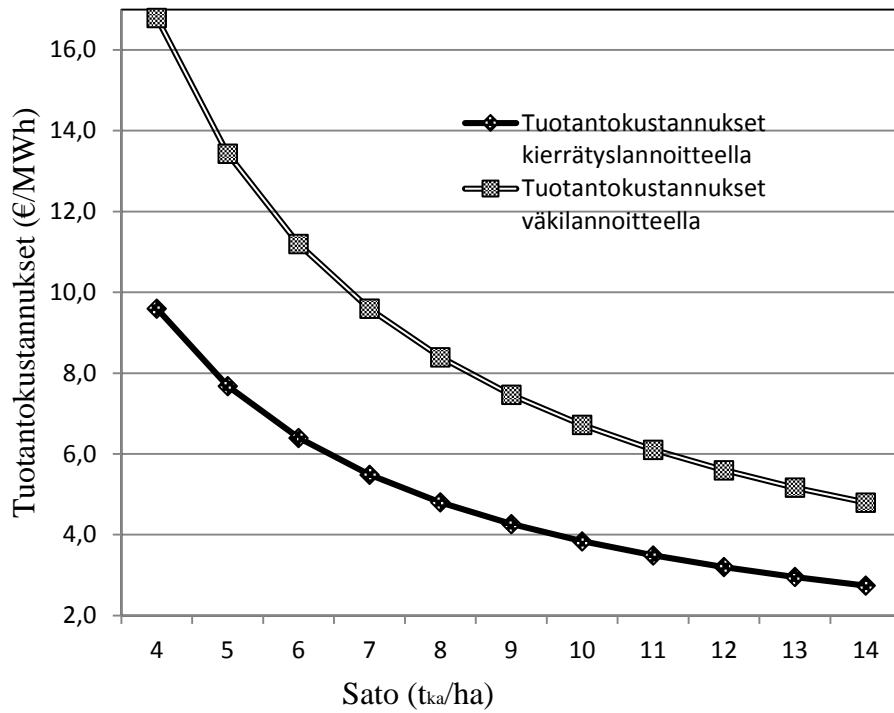
kannattavuuden sitä kautta parantuvan. Kuvissa 11 ja 12 on esitetty pajuviiljelmän perustamiskustannukset eri sadoilla peltomaalla ja suopohjalla.



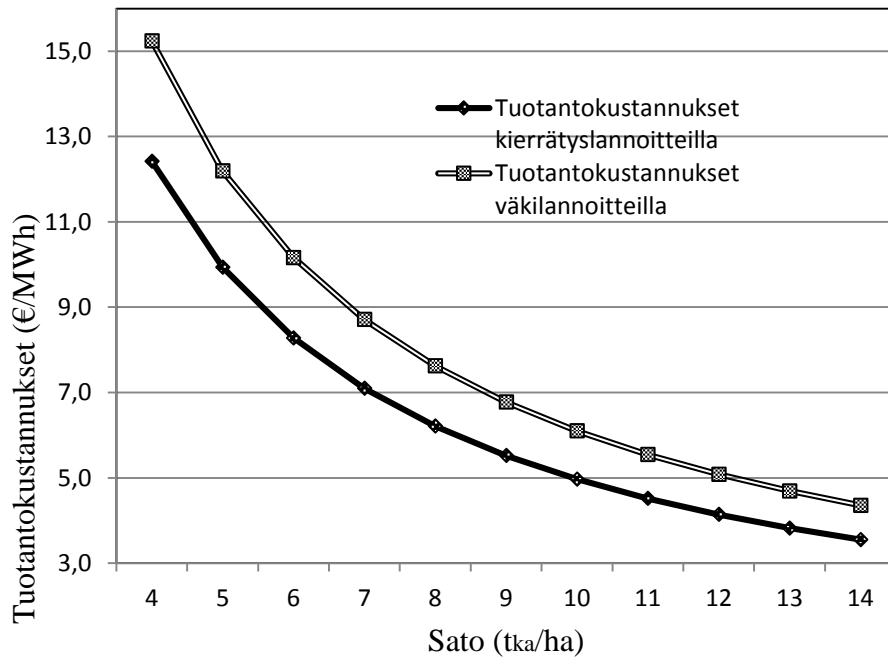
Kuva 9. Pajuviiljelmän perustamiskustannukset eri diskonttokoroilla peltomaalla (sisältää viljelmän hoitokustannukset).



Kuva 10. Pajuviiljelmän perustamiskustannukset eri diskonttokoroilla suopohjalla (sisältää viljelmän hoitokustannukset).



Kuva 11. Pajun satomäärän vaikutus viljelmän perustamiskustannuksiin peltomaalla (sisältää viljelmän hoitokustannukset).



Kuva 12. Pajun satomäärän vaikutus viljelmän perustamiskustannuksiin suopohjalla (sisältää viljelmän hoitokustannukset).

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Edellä esitetyt tulokset osoittavat, että energiapajun viljely voi olla taloudellisesti kannattavaa Suomen oloissa. Kannattavuus riippuu kuitenkin tavanomaisessa viljelyssä ja nykyisillä satomäärillä etenkin suopohjalla pitkälti maataloustukien suuruudesta. Lasketut viljelykustannukset ovat samansuuntaisia Ruotsissa saatuihin tuloksiin verrattuna. Ruotsin hieman eteläisemmän sijainnin ja suurempien satomäärien ansiosta kustannukset jäävät siellä hieman alhaisimmiksi.

Tulosten perusteella jätevedenpuhdistamon prosessiveden jälkikäsitteily pajuviiljelmällä parantaa viljelyn kannattavuutta. Samankaltaisiin tuloksiin on päästy muun muassa Ruotsissa tehdyissä tutkimuksissa. Pajupuhdistamon hyödyntäminen prosessiveden käsittelyssä on kannattavinta kohteissa, joissa perinteinen jätevedenkäsittely on kallista, mutta pajuviiljelmän perustaminen onnistuu suhteellisen pienin kustannuksin. Pajun käyttö perinteisen jätevedenpuhdistuksen lisänä voi ensisijaisesti tulla kyseeseen alueilla, joilla on ongelmia rehevöitymisen kanssa. Jos pajupuhdistamo on mahdollista käyttää jonkin perinteisen puhdistusprosessin korvaajana, voi taloudellinen säästö olla kirjallisuuden perusteella vielä huomattavasti suurempi. Taloudellisten seikkojen lisäksi pajupuhdistamon etuna perinteisiin jätevedenpuhdistusmenetelmiin verrattuna on se, että pajua hyödyntämällä ravinteet eivät mene hukkaan, vaan tulevat hyödynnetyksi uusiutuvan energian tuotannossa. Pajun viljelyyn sopivan peltomaan ja pajuhaketta vastaanottavan lämpövoima- tai pyrolyysilaitoksen läheisyys on myös tärkeää, kun suunnitellaan energiapajuviiljelmän perustamista jätevedenpuhdistamon yhteyteen.

Turvetuotantoalueiden valumavesien käsittelyssä pajupuhdistamon investointikustannukset ovat melko suuria, mutta jos pajupuhdistamolla on mahdollista korvata kemiallinen puhdistus, voivat säästöt kuitenkin olla merkittäviä. Pajuviiljelmän etuna on myös, että sen avulla voidaan vähentää alapuoliseen vesistöön turvetuotantoalueelta valuvan veden määrää. Lisäksi halvempia pumppausjärjestelmiä tai painovoimaan perustuvaa pajupuhdistamo hyödyntämällä voitaisiin parantaa pajupuhdistamon kilpailukykyä. Alustavien tutkimuksien perusteella pajupuhdistamon puhdistusteho vaikuttaisi lupaavalta.

Tärkeimpiä viljelytekniisiä tekijöitä energiapajun viljelyn kannattavuuden parantamisessa pidemmällä tähtäimellä ovat halvempien korjuutekniikoiden kehittäminen, perustamiskustan-

nuksien alentaminen ja satojen kasvattaminen. Myös maataloustuilla ja biomassasta maksettavan hinnan takaamisella voidaan tehdä pajun viljelystä houkuttelevampaa. Tärkeää olisi myös taata jatkuva kysyntä pajulle, mitä voitaisiin lisätä myös uudenlaisten käyttökohteiden löytämisellä. Esimerkiksi pajun käyttö nanoselluloosan tai erilaisten kuitutuotteiden raaka-aineena voi tulevaisuudessa tarjota mielenkiintoisen vaihtoehdon pajun hyödyntämiselle.

Tulosten perusteella pajun laajamittaisella viljelyllä voidaan siis tehokkaasti sekä lisätä bioenergian tuotantoa että ehkäistä rehevöitymiseen liittyviä ympäristöongelmia. Koska uusiutuvan energian tuottaminen on usein kallista suhteessa fossiilisilla polttoaineilla tuotettuun energiaan, on tärkeää hyödyntää kaikki mahdolliset edut joita uusiutuvalla energialla voi olla. Pajun kaltaisen monikäyttöinen energiakasvin tapauksessa voidaan tuottaa uusiutuvan puhtaamman energian lisäksi muitakin ympäristöpalveluja, jotka lisäävät tuotannon arvoa. Toisaalta fossiilisten polttoaineiden negatiiviset ympäristövaikutukset tulisi myös sisällyttää niiden hintaan, jotta kilpailutilanne olisi realistisempi.

Paju joutuu tietysti kilpailemaan energiamarkkinoilla myös muiden uusiutuvien energianlähteiden kanssa, mutta sen etu esimerkiksi tuuli- ja aurinkoenergiaan verrattuna on varastointimahdollisuus. Kilpailu voidaan kuitenkin nähdä positiivisena asiana, koska kestävään energiatalouteen pääseminen edellyttää useiden uusiutuvien energianlähteiden nykyistä laajamittaisempaa hyödyntämistä ja tapauskohtaisia arvioita kullekin sijainnille kannattavimmasta energiantuotantomuodosta.

LÄHDELUETTELO

- Agrimarket: Butisan S, 5 l. Saatavilla www:stä osoitteesta: https://www.agrimarket.fi/Maatalous_ja_Elaimet/Maatalouskemikaalit/rikkakasvien-torjunta-aineet/Butisan_S/ [viitattu 6.3.2014]
- Agrimarket: Roundup Bio, 20 l. Saatavilla www:stä osoitteesta: http://www.agrimarket.fi/Maatalous_ja_Elaimet/Maatalouskemikaalit/rikkakasvien-torjunta-aineet/roundup-bio-20-l/ [viitattu 6.3.2014]
- Alakangas, E. (2000). Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. 172 s. –VTT Tiedotteita 2045, VTT, Espoo, 2000,
- Ala Khodier, H. M. 2011: Co-firing fossil fuels and biomass: combustion, deposition and modelling. 303 s. –Väitöskirja, School of Applied Sciences, Cranfield University, UK,
- Aronsson, P. 2000: Nitrogen retention in vegetation filters of short-rotation willow coppice. –Väitöskirja, Department of short rotation forestry, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden,
- Bergström, D., Di Fulvio, F., Kons, K. & Nordfjell, T. 2011: Skörd av övergrov Salix med skogsbrukets maskiner. –SLU Arbetsrapport 334.
- Berndes, G. & Börjesson P. 2007: Multifunctional bioenergy systems. –AGS Pathways report.
- Be-Sustainable 2013: Foster Wheeler wins contract for a 105 MW circulating fluidized bed biomass plant in South Korea. Saatavilla www:stä osoitteesta: <http://www.besustainablemagazine.com/cms2/foster-wheeler-wins-contract-for-a-105mwe-circulating-fluidized-bed-biomass-plant-in-south-korea/>
- Biodiili Oy 2014: Uusi kierrätyskonsepti – Nopeakiertoisen energiapajun kasvattaminen käytöstä poistetulla loppusijoitusalueella käyttäen kierrätysaineksista valmistettua kasvualustaa ja suotovesikastelua. Saatavilla www:stä osoitteesta: <http://bio-diili.fi/ajankohtaista/> [viitattu 14.4.2014]
- Biomob 2011: Willow growing as an energy crop in Sweden. Case report.
- Biosystems Engineering 2012: Short rotation woody crop harvester. Saatavissa: <http://www.biosystems-eng.com/current-projects/> [Viitattu 9.1.2014]
- Börjesson P, Berndes G, Fredriksson F, Kåberger T. Multifunktionella bioenergiödlingar (Multifunctional bioenergy plantations). –Report 37, Environmental and Energy Systems Studies, Department of Technology and Society, Lund University, Lund, Sweden.
- Börjesson P. 1999: Environmental effects of energy crop cultivation in Sweden: identification and quantification. –Biomass & Bioenergy 16:137 – 54.
- Börjesson, P. & Berndes, G. 2006: The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden. –Biomass and Bioenergy 30: 428 – 438
- Bridgewater, A. V. 2003: Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. –Chemical Engineering Journal 91: 87 – 102
- Carlander A., Aronsson P., Allestam G, Stenström T. A., Perttu K. 2000: Transport and retention of bacteriophages in two types of willow cropped lysimeters. Journal of Environmental Science and Health 35:1477 – 92.

- Carlander, A. & Stenström, T.A. 2001: Irrigation with pretreated wastewater on short rotation willow coppice – a sanitary study in Sweden. –International Ecological Engineering Conference, Christchurch, New Zealand, 25 – 29 November 2001.
- Carlander, A., Stenström, T.A., Albihn, A. & Hasselgren, K., 2002: Hygienic aspects of wastewater-irrigated Salix plantations – Investigations at three fullscale facilities. – Swedish Water and Wastewater Works Association.
- Cornelissen, T. 2005. Thermische behandeling van biomassa—Analysestrategie voor de karakterisatie en valorisatie van bio-oliën, Diepenbeek, , Belgium: Hasselt University/Centre for Environmental Sciences. Predoctoral thesis
- Danfors, B. & Nordén, B. 1992. Teknikutvärdering av energiskogsskördare. JTI-rapport 150.
- Danfors, B., Ledin, S. & Rosenqvist, H. 1997: Energiskogsodling, Handledning för odlare. –Swedish Institute of Agricultural Engineering
- Dimitriou, I & Aronsson, P. 2000: Swedish experiences from wastewater irrigation on largescale Short-Rotation. –Swedish University of Agricultural Sciences, Ullsväg 16, Box 7043, 75007, Uppsala, Sweden.
- Dimitriou, I., Aronsson, P. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva* 2005;221(56):46e50.
- Dimitriou, I. & Aronsson, P. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva* 2005;221(56):46e50
- Dimitriou, I. & Rosenqvist, H. 2011: Sewage sludge and wastewater fertilisation of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production – Biological and economic potential. –*Biomass and bioenergy* 35: 835 – 842.
- Ericsson, K., Rosenqvist, H. & Nilsson, L. 2009: Energy crop production costs in the EU. – *Biomass and bioenergy* 33: 1577 – 1586
- Ericsson, K., Rosenqvist, H., Ganko, E., Pisarek, M. & Nilsson, L. 2006: An agro-economic analysis of willow cultivation in Poland. –*Biomass and Bioenergy* 30: 16 – 27.
- Erkkilä, A., Hillebrand, K., Raitila, J., Virkkunen, M., Heikkinen, A., Tiihonen, I. & Kaipainen, H. 2011: Kokopuun ja mäntykantojen korjuuketjun sekä varastoinnin kehittäminen. –VTT:n tutkimusraportti VTT-R-10151-10.
- Farmit.net: Kalkitus. Saatavilla [www:stä osoitteesta: http://www.farmit.net/kasvinviljely/kalkitus](http://www.farmit.net/kasvinviljely/kalkitus) [Viitattu 3.3.2014]
- FOEX Indexes Ltd. 2014: Latest PIX index values with comments. Saatavilla [www:stä osoitteesta: http://www.foex.fi](http://www.foex.fi) [viitattu 20.3.2014]
- Gigler, J.K., Meerdink, G. & Hendrix, E. 1999: Willow supply strategies to energy plants. – *Biomass and Bioenergy* 17: 185 – 198.
- Gigler, J.K., van Loon, W.K.P., van den Berg, J.V., Sonneveld, C. & Meerdink, G. 2000: Natural wind drying of willow stems. –*Biomass and Bioenergy* 19: 153–163.
- Greenhalf, C.E., Nowakowski, D.J., Harms, A.B., Titiloye, J.O., & Bridgwater, A.V. 2012: Sequential pyrolysis of willow SRC at low and high heating rates – Implications for selective pyrolysis. –*Fuel* 93: 692 – 702

- Greenhalf, C.E., Nowakowski, D.J., Harms, A.B., Titiloye, J.O. & Bridgwater, A.V. 2013: A comparative study of straw, perennial grasses and hardwoods in terms of fast pyrolysis product. –Fuel 108: 216 – 230
- Grimm, A., Skoglund, N., Boström, D. & Öhman, M. 2011: Bed Agglomeration Characteristics in Fluidized Quartz Bed Combustion of Phosphorus-Rich Biomass Fuels. –Energy Fuels 25: 937 – 947.
- Hammerschmid, A: CHP Plant based on a Hybrid Biomass and Solar System of the Next Generation, EU project No. ENER/FP7/249800/"SUNSTORE 4".
- Handler, F. & Blumauer, E. 2010: Logistics for harvesting short rotation forestry with a special equipped forage harvester. FORMEC 2010-konferenssin esitys. Saatavissa [www:stä osoitteesta](http://www.sta-osoitteesta.com): <http://www.tesaf.unipd.it/formec2010/Proceedings/Ab/ab052.pdf> [Viitattu 9.1.2014]
- Hartsough, B. & Spinelli, R. 2003: Recent reports on SRC Harvesters in Europe. –Final Report to Oak Ridge National Laboratory. Saatavissa [www:stä osoitteesta](http://www.sta-osoitteesta.com): <http://www.treepower.org/harvesting/ORNL.pdf> [Viitattu 9.1.2014]
- Hartsough, B. & Yomogida, D. 1996: Compilation of State-of-the-Art Mechanization Technologies for Short-Rotation Woody Crop Production. 66 p. –University of California, Biological and Agriculture Engineering Department. Saatavissa: [www:stä osoitteesta](http://www.sta-osoitteesta.com): <http://www.woodycrops.org/Publications/>
- Hasselgren, K. 2007: Sustainable recycling of waste products in biofuel plantations. –ISWA Conference Proceedings. Saatavilla [www:stä osoitteesta](http://www.sta-osoitteesta.com): http://www.iswa.org/uploads/tx_iswaknowledgebase/594885_Paper.pdf
- Heino, E. & Hytönen, J. 2005: Lyhytkiertoviljely. –Metsäntutkimuslaitos Saatavilla [www:stä osoitteesta](http://www.sta-osoitteesta.com): <http://files.kotisivukone.com/vipustin.kotisivukone.com/Metsaenergia/lyhytkiertoviljely.pdf>
- Henriksson Salix AB. 2010: Pilotstudie av buntskördaren biobaler. –Slutrapport Saatavilla: [www:stä osoitteesta](http://www.sta-osoitteesta.com) <http://www.bioenergiportalen.se/attachments/42/487.pdf> [Viitattu 12.1.2014]
- Hillebrand, K. & Nurmi, J. 2004: Energiapuun kuivatus ja varastointi –osaprojekti. Julkaisussa: Alakangas, E. & Holviala, N. (toim.). –Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003. VTT Symposium 231.
- Hjalmarsson, A.-K. & Ingman, R. 1998: Erfarenheter från förbränning av salix (Experiences from combustion of willow). 31 s. –Värmeforsk rapport Nro 631, Värmeforsk Service AB, Tukholma, Ruotsi, 1998,
- Hokkanen, P. & Minkkinen, I. 2013: Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö. –Pohjoisen Keski-Suomen oppimiskeskus. Työraportti Energiapajun kestävä tuotanto – ja käyttö –projektissa.
- Hurskainen, M., Kärki, J., Korpijärvi, K., Leinonen, A. & Impola, R., 2013: Pajun käyttö polttoaineena kerrosleijukattiloissa. –Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projekti. Tutkimusraportti
- Hytönen, J. 1996: Biomass production and nutrition of short rotation plantations. 61 s. + 9 osajulkaisua. –Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja (väitöskirja). ISBN 951-40-1494-4

- Hämäläinen, T. 2014: Suullinen tiedonanto. –Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -hankkeen ohjausryhmän kokous 14.4.2014
- Hämäläinen & Makkonen 2003: Leijupolttoteknologia: vihreää energiaa –VTT saatavilla [www:stä osoitteesta: http://koti.mbnet.fi/ppom/PDF/R.Y.pdf](http://koti.mbnet.fi/ppom/PDF/R.Y.pdf)
- Issakainen, J. & Huotari N. 2007: Suonpohjan metsittäminen. 11 s. –Metla/Vapo.
- Joensuu, I. 2014: Raatteikonsuo (julkaisematon tutkimusraportti) –Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö –projekti
Jätelaki 17.6.2011/646
- Kasmioui, O. & Ceulemans, R. 2012: Financial analysis of the cultivation of poplar and willow for bioenergy. –Biomass and bioenergy 43: 53 – 64
- Keoleian, G. A. ja Volk, T. A. 2005: Renewable Energy from Willow Biomass Crops: Life Cycle Energy, Environmental and Economic Performance –Critical Reviews in Plant Sciences; 24, 5/6;
- Kjeldsen, J.B. 2011: Sustainable production of SRC – an example of best practice in Denmark. –Nordic Biomass A/S. The NB Stemster III.
- Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M. & Asikainen, A. 2010: Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. 143 s. Espoo 2010. VTT Tiedotteita – Research notes 2564.
- Lannoitevalmistelaki 29.6.2006
- Larsson ym. 2003: Short-rotation Willow Biomass Plantations Irrigated and Fertilised with Wastewaters. –Sustainable urban renewal and wastewater treatment No. 37. Danish environmental protection agency.
- Lechasseur, G. & Savoie, P. 2005: Cutting, Bundling and Chipping Short-rotation Willow. The Canadian society for engineering in agricultural food, and biology systems. 2005 Meeting Winnipeg, Manitoba June 26 – 29, 2005.
- Leinonen, A., Sihvonen, J., Kaipiainen, E., Villa, A., Korpijärvi, K., Joensuu, I. & Reinikainen, O. 2012: Pajukasvuston perustaminen Raatteikonsuolle keväällä 2012. Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projekti. Tutkimusraportti
- Lewis, D. 2010: New Holland's Single-Pass Cut and Chip Coppice Harvester. –Penn State Short Course. Saatavissa [www:stä osoitteesta: http://www.bioenergy.psu.edu/short-courses/2010_nov_SupplyChain/06_harvesting.pdf](http://www.bioenergy.psu.edu/short-courses/2010_nov_SupplyChain/06_harvesting.pdf) [Viitattu 9.1.2014]
- Lindroth, A. & Båth, A. 1999: Assessment of regional willow coppice yield in Sweden on basis of water availability. –Forest Ecology and Management 121: 57 – 65.
- Magnusson, L. 2011. Skörd av Salix. –Slutrapport från arbete i ”beställargrupp” samt översikt över resultat från Energimyndighetens satsning på utveckling av skördeteknik för Salix under 2010 – 2011.
- Nurmi, J. 1995: The effect of whole-tree storage on the fuelwood properties of short-rotation Salix crops. –Biomass and Bioenergy 8: 245 – 249
- Oasmaa ym. 2010: Fast Pyrolysis Bio-Oils from Wood and Agricultural Residues. –Energy & Fuels 24: 1380 – 1388
- Oasmaa, A. & Peacocke, C. A. 2001: Guide to Physical Property Characterisation of Biomass-Derived Fast Pyrolysis liquids –VTT Publication 450.

- Paappanen, T., Leinonen, A., Villa, A., Kaipainen, E. & Reinikainen, O. 2012: Pajuviljelmän perustaminen. –Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projekti. Tutkimusraportti
- Paasikallio, V. 2013: Pajun pyrolyysi. –Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projekti. Tutkimusraportti
- Perttu, K. L. 1999. Environmental and hygienic aspects of willow coppice in Sweden. – Biomass and Bioenergy 16: 291 – 297.
- Picchi, G., Gordon, A. & Thevathasan, N. 2006: Feedstock to Furnace: Bioenergy Systems for the Ontario Greenhouse Industry. Potential in Ontario for the Implementation of Willow Short Rotation Coppice Cultivation for Greenhouse Heating. –Shortrotationcrops.fi. Country reports. Saatavissa: [www:stä osoitteesta:http://www.shortrotationcrops.org/PDFs/FeedstocktoFurnaceCanada.pdf](http://www.shortrotationcrops.org/PDFs/FeedstocktoFurnaceCanada.pdf) [Viitattu 9.1.2014]
- Pöyry Environment Oy 2007. Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky –selvitys. –Sitran ja maa- ja metsätalousministeriön teettämä selvitys lietteenkäsittelyn nykytilasta Suomessa ja erityyppisten käsittelymenetelmien kilpailuvyystä vuonna 2007. Saatavilla [www:stä osoitteesta: http://www.sitra.fi/NR/rdonlyres/BFCEC181-4AD7-4B1A-B7B6-27045F8280FC/0/Lietteenk%C3%A4sittely.pdf](http://www.sitra.fi/NR/rdonlyres/BFCEC181-4AD7-4B1A-B7B6-27045F8280FC/0/Lietteenk%C3%A4sittely.pdf)
- Rosenqvist H. 1997: Willow cultivation –Methods of calculation and profitability [dissertation]. –Uppsala: Swedish university of agricultural sciences.
- Rosenqvist, H. & Dawson, M. 2005: Economics of using wastewater irrigation of willow in Northern Ireland. Biomass and Bioenergy 29: 83 – 92.
- Rosenqvist, H., Aronsson, P., Hasselgren, K. & Perttu, K. 1997: Economics of using municipal wastewater irrigation of willow coppice crops. –Biomass and Bioenergy 12: 1 – 8.
- Savon voima OYJ:n bioenergiaohjelma 2011: Bioenergia. Saatavilla [www:stä osoitteesta: http://www.savonvoima.fi/SiteCollectionDocuments/yksityisasiakkaat/SVLampo-Bioenergiaohjelma.pdf](http://www.savonvoima.fi/SiteCollectionDocuments/yksityisasiakkaat/SVLampo-Bioenergiaohjelma.pdf) (viitattu 23.1.2014)
- Scholz, V. 2007. Mechanisierungslösungen für die Ernte von schnellwachsenden. Energiepflanzen : das Fachmagazin für nachwachsende Rohstoffe & erneuerbare Energien. - Scheeßel-Hetzwege : Forstfachverl.
- Schweier, J. & Becker, G. 2012: Harvesting of Short Rotation Coppice – Harvesting Trials with a Cut and Storage System in Germany. –Silva Fennica 46
- Scott, D.S., Paterson, L., Piskorz, J. and Radlein, D. 2000: Pretreatment of poplar wood for fast pyrolysis: Rate of cation removal. –Journal of Analytical Applied Pyrolysis. 57: 169 – 176.
- Sihvonen, J., Leinonen, A. & Villa, A. 2013: Pajun korjuu, varastointi ja toimitus laitokselle – Tehtäväraportti. –Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projekti. Tutkimusraportti
- Spinelli, R. 2003a: Report on SRC machinery operated by Gunnar Henriksson: Austoft 7700/240 Salix harvester, Claas harvesters with HS2 and HS1 headers, and Austoft planter. Saatavissa: <http://www.treepower.org/harvesting/austoft.pdf> [Viitattu 9.1.2014]
- Spinelli, R. 2003b: Report on the CRL Mk II SRC harvester. Saatavissa: <http://www.treepower.org/harvesting/austoft.pdf> [Viitattu 9.1.2014]

- Suomen energiapaju Oy. 2012: Ensimmäinen kokemus pajun korjuusta ja poltosta. Saatavissa: <http://www.suomenenergiapaju.fi/> [viitattu 1.4.2014]
- Suomen Pankki 2008: Vanhoja Suomen markan kursseja 1990 – 98. Saatavilla [www:stä osoitteesta: http://www.suomenpankki.fi/fi/tilastot/valuuttakurssit/pages/taulukot.aspx](http://www.suomenpankki.fi/fi/tilastot/valuuttakurssit/pages/taulukot.aspx) [viitattu 12.6.2014]
- Tahvanainen, L. 1995: Pajun viljelyn perusteet. 86 s. –Joensuun Yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta. Silva carelica.
- Technical development Branch, Forestry Commission. 1996: Harvesting and communiton of short rotation coppice. Teoksessa: Energy from Biomass, Summaries of the Biomass Projects carried out as part of the Department of Trade and Industry's New and Renewable Energy Programme. Volume 2: Wood fuel supplies and supply chains.
- Teknologia teollisuus: Poltto- ja kattilateknologia. Saatavilla [www:stä osoitteesta: http://www.teknologiateollisuus.fi/fi/palvelut/poltto--ja-kattilateknologia.html](http://www.teknologiateollisuus.fi/fi/palvelut/poltto--ja-kattilateknologia.html)
- Tetra Tech 2013. Cost estimate of phosphorous removal at wastewater treatment plants. A Technical support document prepared for Ohio Environmental protection agency. Saatavilla [www:stä osoitteesta: http://epa.ohio.gov/Portals/35/wqs/nutrient_tag/OhioTSDNutrientRemovalCostEstimate_05_06_13.pdf](http://epa.ohio.gov/Portals/35/wqs/nutrient_tag/OhioTSDNutrientRemovalCostEstimate_05_06_13.pdf)
- Thewys, T. & Kuppens, T. 2008: Economics of Willow Pyrolysis After Phytoextraction. – International Journal of Phytoremediation 10: 561 – 583
- Tilastokeskus 2014: Rahanarvonkerroin 1860 – 2013. Saatavilla [www:stä osoitteesta: http://www.stat.fi/til/khi/2013/khi_2013_2014-01-15_tau_001.html](http://www.stat.fi/til/khi/2013/khi_2013_2014-01-15_tau_001.html) [viitattu 12.6.2014]
- Tuhkanen, T., Aho, J. & Merta, E. 2005: Haja-asutuksen ravinnekuormituksen vähentäminen - Ravinnesampo. Osa 2 : Maitohuonejätevesien käsittely. –Suomen ympäristö 763
- Turveteollisuusliitto 2009: Turvetuotannon vesienpuhdistusmenetelmät. Saatavilla [www:stä osoitteesta: http://www.turveteollisuusliitto.fi/user_files2/Turvetuotannon%20vesienkasittelymenetelmat,%20paivitettava%20versio%202012_2.pdf](http://www.turveteollisuusliitto.fi/user_files2/Turvetuotannon%20vesienkasittelymenetelmat,%20paivitettava%20versio%202012_2.pdf) [viitattu 20.3.2014]
- Van der Drift, A. & Olsen, A. 1999: Conversion of biomass, prediction and solution methods for ash agglomeration and related problems. 62 s. –ECN Fuels Conversion & Environment. Final Report.
- Van der Meijden, G., Gigler, J. 1995: Harvesting techniques and logistics of short rotation energy forestry. A Descriptive study on harvest and transport systems in Salix production currently used in Sweden. –Jordbrukstekniska institutet- rapport 200.
- Vapo Oy 2012: Turvetuotannon vesiensuojelurakenteet. Saatavilla [www:stä osoitteesta: http://www.vapo.fi/turvetuotantoavastuullisesti/ymparistonsuojelu/vesiensuojelurakenteet](http://www.vapo.fi/turvetuotantoavastuullisesti/ymparistonsuojelu/vesiensuojelurakenteet) [viitattu 20.3.2014]
- Veijonen, K., Vainikka, P., Järvinen T. & Alakangas, E. 2003: Biomass co-firing – an efficient way to reduce greenhouse gas emission. –European Bioenergy Networks
- Vesilaitosyhdistys 2013: Jätevesien käsittely. Saatavilla [www:stä osoitteesta: http://www.vvy.fi/vesihuolto_linkit_lainsaadanto/jatevedet](http://www.vvy.fi/vesihuolto_linkit_lainsaadanto/jatevedet)
- Ylimäki, R. 2009. Maataloustraktoripohjainen energiapajukon korjuu giljotiiniterällä. –Itä-Suomen Yliopisto. Proseminarityö.