

PAJUKKO NIELEE

Hiilen ja pääravinteiden kierrätys biomassapajuilla



Veli Pohjonen

2016

SISÄLLYSLUETTELO	sivu
1 Johdanto	3
2 Lähteet ja nielut	6
3 Kasvien pääalkuaineet	7
31 Hiili	7
311 Hiilen eloperäiselle nielulle tarve	7
312 Biomassapaju hiilen nieluna	9
3121 Maanpäällinen biomassa	9
3122 Hiiltä maaperään juurina	13
313 Hienojuurten merkitys	15
32 Happi ja vety	18
33 Tuhkaa ja typpeä	19
331 Tuhkassa tasapainoiset alkuaineet	19
332 Typen tärkeä vuotuinen tarve	22
4 Viljelypajun lannoitussuosituksiset	23
41 Lannoitus kolmen vuoden jaksoissa	23
42 Tuhkalannoitus	25
421 Fosfori	25
422 Kalium	25
423 Kalkki	26
424 Muiden ravinteiden seuraaminen	26
425 Tuhkalannoituksen kehittäminen	27
43 Luontaisen typpilannoituksen mahdollisuuksia	27
431 Typpeä lietelannasta	28
432 Typpeä jäteveden puhdistamon mädätysjäännöksestä	28
433 Typpeä biokaasutuksen jätelietteestä	29
434 Nestemäisten sivutuotelannoitteiden levityksen enimmäismäärät	29
44 Lannoitusmenetelmien kehittäminen	30
5 Yhteenvedo	32
6 Kirjallisuus	34

1 Johdanto

Alkuaineet hiili, typpi ja fosfori ja niiden käyttö ovat esimerkkejä 2010-luvun ekologisesta kiertotaloudesta. Kolmikosta kaikki ovat ihmiselle joko hyvin tarpeellisia tai jossain muodossa ja pitoisuudessa hyvin haitallisia.

Koko maapallon tason ongelma on alkuaine hiili, esiintymismuodossa hiilidioksidi. Nyt hiilidioksidi ei kierrä esiteollisen kauden tapaan vaan kertyy kiihtyvässä määrin ilmakehään. Seurauksena on ilmaston muutos. Se alkoi jo 1800-luvulla.

Kansallisia ongelmia ovat typpi ja fosfori. Vaikka ne ovat biotalouden alkutuotannolle arvokkaimpia kasvien ravinteita, kalliita ostaa lannoitteina, ne eivät riittävästi kierrä peltojen, metsien ja yhdyskuntien välillä. Esimerkiksi suomalaista typpeä ja fosforia huuhtoutuu jatkuvasti jokiin, järviin ja lopulta Itämereen.

Ekologinen kiertotalous etsii viljelyskasveja ja –menetelmiä, joilla nyt haittaavasti keräytyvät tai hukkaan huuhtoutuvat alkuaineet saadaan kestävästi kiertämään luonnossa, tai luonnon ja yhdyskuntien välillä.

Biomassapaju on Keski- ja Pohjois-Euroopan kasvuoloissa eräs lupaavimpia kiertotalouden kasveja. Paju on alueen nopeakasvuisin ja satoisin lyhytkiertoviljelyn puulaji. Pajua voi nopeasti viljellä joutomaan pelloilla ja suopohjilla, kun yhdistää peltokasvien ja metsäpuiden kehittyneimmät viljelymenetelmät. Monivuotisena, vesovana, maaperän tiheästi peittävänä pensasmaisena puuna paju ehkäisee paljaan maan ravinnehuuhtoumia. Samalla paju kerryttää maaperän humusta.

Nopeasti kasvava paju yhteyttää nopeasti ilmakehän hiilidioksidia. Paju kerää maasta – nielee – kaikista Euroopan puulajeista eniten useimpia kasvinravinteita, kasvanutta kuiva-ainekiloa kohti.

Biomassapajun viljelyä on kehitetty 1970-luvulta alkaen. Viljelyn ensimmäinen tavoite oli bioenergia. Pajun viljelyä kehitettiin aluksi tehomaaatalouden menetelmin, kaupallisiin lannoitteisiin perustuen. Jo varhain mukaan bioenergian oheen tuli ravinteiden kiertotalous.

Ruotsissa energiapajun perustutkimus havaitsi 1980-luvulla, että pajun kasvatus voi hyödyntää tehokkaasti paitsi lämpövoimaloiden tuhkaa myös viereisen jätevesilaitoksen vesiä ja lietteitä ja niihin kertyneitä ravinteita (Salix ... 2004). Ensimmäisiä pajun kiertotalouden esimerkkejä oli typen huuhtoumiin löytynyt ratkaisu. Pajukko keräsi jätevesistä lähes kaiken typen mikä muuten olisi päätynyt Itämereen. Typpi on kaupallisesti arvokkain pääravinne. Merkittävimmän käytännön sovelluksen sille kehitti Enköpingskaupunki (Ecoregion 2016).



Kuva 1. Jätevesien ravinteita, etenkin typpeä ja myös fosforia nielevä biomassan pajuviiljelelmä Enköpingin kaupungin lämpövoimalan naapurialueella Ruotsissa (Ecoregion 2016).

Typen ohella pajun kiertotalouden tutkimus alkoi selvittää mitä muita alkuaineita pajukolla voisi kierrättää tai varastoida. Tätä tutkimusta on tehty laajasti sekä Euroopassa että Pohjois-Amerikassa noin 30 vuoden ajan.

Pajun biomassan sisältämät alkuaineet lasketaan miljoonasosina (*ppm, parts per million*) kuivapainosta (Taulukko 1). Alkuaineet jakaantuvat kahteen ryhmään. Eniten pajuissa on kaikille kasveille välttämättömiä ravinteita (Taulukossa 1 vihreällä), joita ilman ne eivät voi kasvaa. Välttämättömien ravinteiden lukumäärä on kuusitoista.

Ravinteiden lisäksi pajusta on löytynyt melkoinen joukko muitakin alkuaineita (Taulukossa 1 keltaisella). Muiden kasvien tavoin pajun aineenvaihdunta imee ylimääräisiä alkuaineita maasta, vaikka paju ei niitä kasvuunsa tarvitsekaan.

Useimpien alkuaineiden pitoisuuksien vaihteluväli pajun rungoissa on melkoinen, riippuen kasvupaikalla jo olevista aineksista ja lannoituksesta. Pajun lajikkeiden kyvyssä niellä eri alkuaineita, on myös eroja.

Esimerkiksi typpeä viljellyn pajun rungoissa voi olla vähimmillään noin 2000 miljoonasosaa (Viherä-Aarnio & Saarsalmi 1994) ja enimmillään noin 13 000 ppm (Gregersen & Brix 2001). Pajun lehdissä vaihteluväli on vielä suurempi.

Taulukon 1 runkojen typen pitoisuus 5000 miljoonasosaa (kuten muidenkin ravinteiden pitoisuus) on lukuisista kirjallisuuslähteistä koottu viitearvo. Sitä voi käyttää lannoitus- ja nielulaskennan esimerkeissä.

Taulukossa 1 on esitetty vastaavat viitearvot kaikille muille alkuaineille paitsi hapelle (O). Hapen pitoisuutta ei tavallisesti määritetä ravinne- tai alkuaineanalyysissä. Hapen pitoisuus lasketaan jäännösmenetelmällä määrittämällä ensin kaikkien muiden alkuaineiden pitoisuus (miljoonasosina). Hapen määräksi arvioidaan normaalisti määrittämätön jäännös, mikä jää muiden alkuaineiden määrittämisen jälkeen.

Taulukko 1. Biomassapajun runkojen tyypillinen koostumus alkuaineittain. ppm = miljoonasosaa kuiva-aineen painosta. Vihreä: pajun tarvitsemat välttämättömät ravinteet (16 kpl), keltainen: yleisimmät pajun maaperästä keräämät muut alkuaineet. Arvot kirjallisuudesta keskiarvoiksi koottuja laskennan viitearvoja.

RUNGOT		ppm
Hiili	C	500 000
Happi	O	422 406
Vety	H	61 000
Typpi	N	5 000
Kalkki	Ca	4 700
Kalium	K	3 500
Fosfori	P	900
Magnesium	Mg	680
Pii	Si	650
Rikki	S	350
Sinkki	Zn	240
Kloori	Cl	150
Alumiini	Al	130
Rauta	Fe	80
Mangaani	Mn	65
Natrium	Na	55
Nikkeli	Ni	20
Barium	Ba	19
Lyijy	Pb	15
Kupari	Cu	10
Kadmium	Cd	9,2
Boori	B	8,1
Strontium	Sr	6,7
Rubidium	Rb	1,8
Kromi	Cr	1,6
Molybdeeni	Mo	1,0
Elohopea	Hg	1,0
Arseeni	As	0,4

Viljelty biomassapaju voi toimia kaikkien Taulukon 1 alkuaineiden keruubarastona eli nieluna. Kiertotaloudessa alkuaineet, esimerkiksi hiili ja typpi, kiertävät ilmakehän, maaperän ja biomassan välillä. Esimerkiksi ravinteet fosfori ja kalium tai raskasmetallit lyijy ja kadmium kiertävät maaperän, biomassan ja sen poltosta syntyvän, lannoitteena käytettävän tuhkan välillä.

2 Lähteet ja nielut

Oppi kiertotalouden lähteistä ja nieluista juontaa 1950-luvun Yhdysvaltoihin, Massachusetts Institute of Technology (MIT) yliopistoon. Tietojenkäsittelyn opin varhainen yliopistotutkija Jay Wright Forrester kehitti aiheeseen liittyvän systeemidynamiikan teorian (Forrester 1961, 1969). Maailman tason sovelluksensa Forresterin teoria sai 1970-luvulla, Rooman Klubin ”Kasvun rajat” hankkeessa. Rooman klubi pohti ensimmäisenä maapallon tasolla yhtäältä miten ihmiskunnalle riittävät uusiutumattomien ja uusiutuvien raaka-aineiden **lähteet**, sekä toisaalta riittääkö maapallolla **nieluja** varastoimaan ihmiskunnan yhä enemmän tuottamia jätteitä (Origin ... 2006).

Ilmakehää lämmittävä hiili (hiilidioksidina) on 2010-luvun tutuin esimerkki systeemidynamiikan lähteistä ja nieluista. Hiilen alkuperäinen lähde (*source*) on pääasiaksi fossiilisissa polttoaineissa kivihiilessä, öljyssä ja maakaasussa. Myös hitaasti, noin 1000 vuoden kierrolla uusiutuva turve luokitellaan ilmastotaloudessa hiilen lähteeksi. Pääosaksi fossiilisista polttoaineista on lähtöisin hiilen lähdevirta (*source flux*), jonka suunta on maaperästä ilmakehään.

Kiertotalouden tavoite on luoda hiilelle nielu (*sink*), joka vähentää ilmakehään kertyvää liiallista hiilidioksidia. Tavoiteltavia nieluja ovat esimerkiksi kasvuisat metsät, joiden keskimääräinen puusto lisääntyy vuodessa hakkuita enemmän. Onnistunut metsänviljely luo hiilen nieluvirran (*sink flux*). Sen suunta on ilmakehästä puustoon.

Hiilen (ja muidenkin alkuaineen) lähteet ja nielut ovat systeemidynamiikassa matemaattisia integraaleja. Lähdevirta (esimerkiksi hiilen päästövirta) ja nieluvirta ovat vastaavasti matemaattisia derivaattoja.

Hiilen lähde ja nielu mitataan joko hehtaaria kohti yksikössä tonnia hiiltä hehtaarilla ($\text{tn C/ha} = \text{Mg C/ha}$, megagrammaa – ykkösen perässä kuusi nollaa), tai koko maapalloa kohti yksikössä petagrammaa hiiltä (Pg C , petagrammaa – ykkösen perässä 15 nollaa). Hiilen lähdevirta ja nieluvirta mitataan aikajaksoa, normaalisti vuotta kohti joko yksikössä tonnia hiiltä hehtaarille vuodessa ($\text{tn C/ha/v} = \text{Mg C/ha/v}$), tai yksikössä petagrammaa maapallolle vuodessa (Pg C/v).

Kiertotaloudelle tyypillistä on, että alkuaineen varastoa kutsutaan lähteeksi silloin kun sen sisältämän alkuaineen määrä vähenee. Varastoa kutsutaan vastaavasti nieluksi silloin, kun sen sisältämän alkuaineen määrä lisääntyy. Kiertotalous tavoittelee ihannetilaa missä laajan mittakaavan kierto on täydellinen: keskimäärin lähteet eivät vähene eivätkä nielut lisäänty.

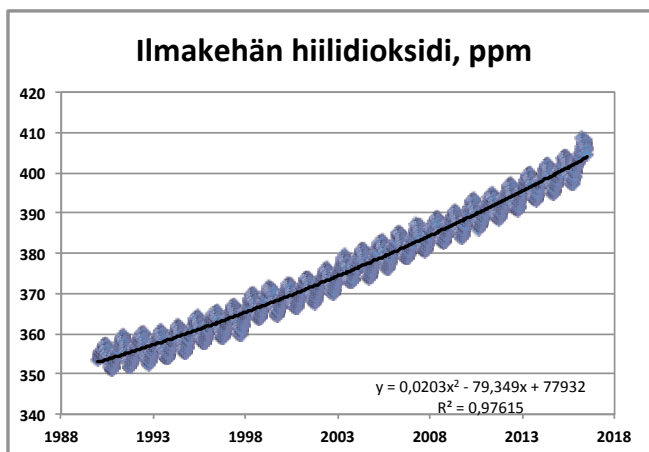
3 Kasvien pääalkuaineet

31 Hiili

311 Hiilen eloperäiselle nielulle tarve

Kiertotalouden merkittävin, maapallon laajuinen haaste on alkuaine hiili (C). Ihmiskunta on aiheuttanut hiilelle häiriintyneen kiertokulun. Se on johtanut hiilidioksidin lisääntymiseen ilmakehässä (Kuva 2), ilmaston vähittäiseen lämpenemiseen ja ilmaston muutokseen. 1900-luvulla kiihtyneen ilmiön hyväksytyin pääselitys on fossiilisten polttoaineiden alati lisääntyvä käyttö.

Ihmiskuntana tarvitsemme fossiilisia polttoaineita energiaksemme. Emme halunneet niistä luopua 1900-luvulla, emmekä ilmeisesti halua luopua vielä lähivuosikymmeninäkään. Esimerkiksi Kioton kansainvälinen ilmastopöytäkirja (Kyoto protocol ... 1997) tavoitteli jo hiilidioksidin nousun hillintää ilmakehässä, paaluvuoteen 1990 verrattuna. Ilmakehän hiilidioksidin pitoisuus on kuitenkin koko ajan noussut, ja vielä hivenen kiihtyen.



Kuva 2. Ilmakehän hiilidioksidin (CO₂) pitoisuus Kioton ilmastopöytäkirjan paaluvuodesta 1990 lähtien. (Use of ... 2016).

Runsaasta käytöstä huolimatta fossiilisia polttoaineita on maa- ja kallioperässä edelleen. Koko maapallolla on fossiilisen hiilen varastoa, hiilen pääomaa, yhteensä 4000 petagrammaa (4000 Pg C) (Kuva 3). Fossiilisten polttoaineiden vuotuinen käyttö aikaansaa fossiilisen hiilen lähdevirran maaperästä ilmakehään, jonka suuruus on kuusi petagrammaa vuodessa (Pg C/v). Jos tämän suuruinen käyttö pysyy vakiona vuodesta toiseen, fossiilisten polttoaineiden lähde ehtyy laskennallisesti (karkeasti arvioiden) 670 vuodessa.



Kuva 3. Hiilen lähteet ja nielut (sinisellä, petagrammaa, Pg C) sekä lähde- ja nieluvirrat (punaisella, petagrammaa vuodessa, Pg C/v) koko maapallolla (Globe ... 2016).

Fossiilinen hiili päätyy ilmakehään. Nykyinen ilmakehän hiilen varasto on 750 petagrammaa. Lähdevirran vuoksi lukema nousee vuosittain. Se näkyy myös ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousuna (Kuva 2).

Toinen ilmakehää lämmittävän hiilen lähdevirta (0,9 petagrammaa vuodessa) tulee maankäytön muutoksista, etenkin peltoviljelyyn tarpeesta. Samalla maapallon metsät (560 petagrammaa hiiltä) vähenevät. Jos niistä aiheutuva lähdevirta pysyy vakiona vuodesta toiseen, maapallon metsien raivuu voi laskennallisesti jatkua 620 vuotta.

Ruoan tuotannolle välttämätön metsien nopeutunut raivuu käynnisti ilmaston muutoksen jo 1800-luvulla, siis ennen fossiilipolttoaineiden tuloa. Maapallon metsiä on siitä lähtien määrätietoisesti raivattu pelloiksi. Raivuu jatkuu 2000-luvulla edelleen, sillä väkiluvultaan kasvava ihmiskuntamme ei voine metsän raivauksesta ainakaan tropiikissa vielä lähivuosisikymmeninä luopua. Uuden pellon raivausta vaatii myös joidenkin alueiden vanhojen peltöjen vähenemä, kun ilmaston muutos kuivattaa ne viljelykelvottomiksi.

Raivausvaiheen jälkeen orgaanisen hiilen lähdevirta taivaalle jatkuu, kun peltoa viljellään jatkuvasti yksivuotiselle viljalle. Maaperän humus (1500 petagrammaa) hupenee. Maaperän hiili vähenee arviolta 0,8 petagrammaa vuodessa. Jos tämä ilmiö jatkuu vakiona vuodesta toiseen maaperän orgaaninen hiili häviää laskennallisesti 1900 vuodessa.

Maapallon metsät ja pellot (hiiltä yhteensä 560 petagrammaa) sekä maaperä (1500 petagrammaa) ovat kokonaisuudessaan ilmakehään päätyvän eloperäisen hiilen lähde. Niistä aiheutuvan hiilen lähdevirran osuus (0,9 Pg/v) koko ilmaston muutoksesta on 13 prosenttia; fossiilisen hiilen lähdevirran (6 Pg/v) osuus on vastaavasti 87 prosenttia.

Koko maapallon tasolla kiertotalous haluaisi kääntää tilanteen niin, että hiilen lisääntymä ilmakehässä ensin vaimenisi. Mahdollisimman nopeasti ilmakehän hiilen määrän (750

petagrammaa) tulisi kääntyä laskuun, jotta paluu kasvihuoneilmiötä edeltävään tasapainon tilaan olisi tällä vuosisadalla mahdollinen.

Yhdistämällä biotalous ja kiertotalous ihmiskunta voi hallita eloperäisen hiilen varastoja kasveissa (560 petagrammaa) ja maaperässä (1500 petagrammaa). Niitä molempia on mahdollinen lisätä, ne molemmat voi muuttaa hiilen nieluiksi.

Jo Kioton ilmastokokous 1997 hyväksyi periaatteen (Kyoto protocol ... 1997), missä metsien ja maaperän hiilen nielut ovat ilmaston muutoksen kannalta tasavertaisia fossiilisten polttoaineiden lähteiden kanssa. Kioton periaatteessa tasavertaisuus on vastakkaismerkkinen: lähdevirta lämmittää ilmastoa, nieluvirta jäähdyttää sitä. Kun kasvatamme lisää maanpäällisiä metsiä ja hoidamme maaperän humusta niin että se lisääntyy, ilmakehä muuttuu nykytilastaan hiilen lähteeksi. Kasvihuoneilmiö vaimenee ja lopulta poistuu.

312 Biomassapaju hiilen nieluna

3121 Maanpäällinen biomassa

Muutamana vuoden kiertoaikana kasvatettavasta pajubiomassasta (runko ja oksat, kuivana) noin puolet on alkuaine hiiltä. Vaihteluväli on verraten vähäinen, 490 000 – 520 000 ppm (esim. Hurskainen ym. 2013, Krzyzaniak et al. 2014). Pajun juurten biomassan hiilipitoisuus on hivenen alhaisempi kuin pajun runkojen biomassan (Stolarski 2008). Laskennan keskimääräisenä viitearvona voi molemmille käyttää lukemaa 500 000 ppm.

Kasvava pajuviljelmä peittää maanpinnan kiertoaikansa keston ajan. Samoin kuin pitkän kiertoaajan havupuun metsissä, lyhyen kiertoaajan lehtipuun metsissä on hiilen maanpäällinen varasto eli nielu aina siihen saakka kunnes kyseinen metsikkö avohakataan.

Laaja, useiden hehtaarien, kymmenien tai satojen hehtaarien pajutila viljelee kasvustonsa normaalisti lohkoittain (Kuva 4) peräkkäisten vuosien aikana. Joka vuosi pajulle voi viljellä vakiomäärän hehtaareita. Kullakin lohkolle voi noudattaa säännöllistä kiertoaikaa. Esimerkiksi voimaperäinen, kolmen vuoden kiertoaika käy huippulajikkeelle joka viljellään hyväkuntoiselle, vaikkapa jätelietteellä lannoitettavalle pellolle. Turvesuon pohjan voi taas viljellä kestäväällä maatiaislajikkeella ja käyttää sille laajaperäistä 10 vuoden kiertoaikaa.

Pajutila korjaa vastaavasti kasvustoaan vuosittain, lohkoittain. Kun pajun yksi lohko korjataan, hiilen maanpäällinen varasto poistuu siltä lohkolta hetkeksi (vesottamisen vuodeksi). Viljatilasta poiketen pajutila ei kuitenkaan korjaa kaikkea kasvustoa yhdellä kertaa. Pajutilalla on siksi jatkuvasti useita pajua jo kasvavia lohkoja. Keskimäärin pajutilasta on aina kasvuston peitossa vähintään puolet pinta-alaa. Pajutila on vuodesta toiseen hiilen varasto eli nielu.



Kuva 4. Lohkoittain viljelty biomassapaju hiilen nieluna. Kuva Ruotsista vuonna 1994, pajulaji koripaju (*Salix viminalis*).

Seuraavassa hiilen maanpäällisten nielujen laskennallisessa esimerkissä (Pohjonen 1998) on kaksi pajutilaa, jotka kasvattavat pajujaan 50 vuoden ajan. Niistä ”eteläinen pajutila” viljelee jalostettua pajulajiketta hyväkuntoiselle pellolle, määräalan (lohkon) vuosittain (vaikkapa 1 tai 10 ha/v). Kutakin lohkoa kasvatetaan voimallisesti, kolmen vuoden kierrolla. Kasvusto lannoitetaan typpipitoisella jätelietteellä.

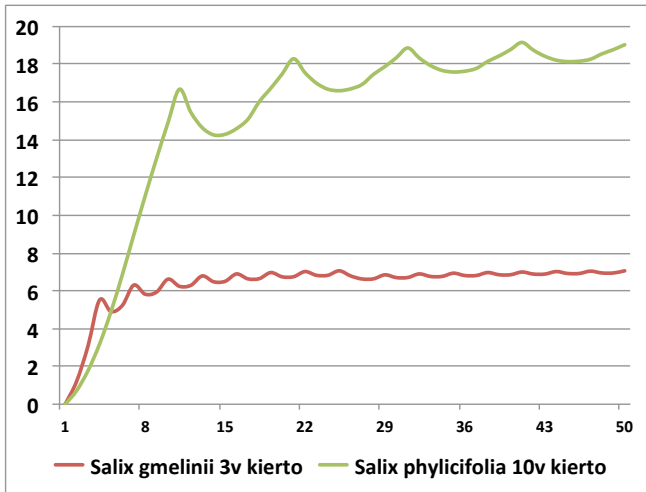
Pajukko vesotetaan ensimmäisen kasvukauden jälkeen. Kasvuston ensimmäinen varsinainen sadonkorjuu on vesojen kolmen vuoden ja kantojen neljän vuoden iässä. Kasvusto uusitaan (kyntö, muokkaus, viljely uusin pistokkain) 25 vuoden kuluttua. Esimerkin kasvu- ja nielulaskenta perustuu Jyrki Hytösen tutkimukseen (1995b), missä lannoitteena käytettiin Nurmijärven Rajamäen alkoholitehtaan käymislietettä. Istutustiheys oli 36 000 kpl/ha. Pajulajike kuului vesipajuihin, lajiin *Salix gmelinii*. Sen keskikasvu kolmen vuoden kierrolla (Mean Annual Increment, MAI, runkojen kuiva-ainetta, ka) on laskennassa 8,7 tn ka/ha/v.

”Pohjoinen pajutila” viljelee vastaavasti talvenkestävää kotimaista pajulajiketta turvesuon pohjalla ja kasvattaa lohkoja laajaperäisesti kymmenen vuoden kierrolla (ensimmäinen kierto 1+10 vuotta, korjuu kantojen iässä 11 vuotta). Kasvustoa ei uusita vielä ensimmäisen 50 vuoden aikana; kasvuston elinvoimaan riittää vesottaminen kymmenen vuoden välein. Kasvu- ja nielulaskenta perustuu Hytösen tutkimukseen Haapaveden Piipsannevalla (Hytönen ym. 1995, Hytönen ja Saarsalmi 2009). Istutustiheys oli 40 000 kpl/ha. Kotimainen, pohjoinen pajulajike oli lajia *Salix phylicifolia* (kiiltolehtipaju). Sen keskikasvu kymmenen vuoden kierrolla (MAI) on laskennassa 7,0 tn ka/ha/v.

Voimaperäisesti viljelty lyhyen kierron (3 vuotta) jalostettu lajike saa pajutilalle aikaiseksi keskimääräisen hiilen nielun, jonka suuruus rungoissa ja oksissa asettuu tasolle seitsemän tonnia eli seitsemän megagrammaa hehtaarilla (7 tn C/ha = 7 Mg C/ha) (Kuva 5).

Vastaavasti laajaperäisesti viljelty pidemmän kierron (10 vuotta) maatiaispajun keskimääräinen hiilen nielu asettuu tasolle 18 tn C/ha. Molemmissa tapauksissa hiilen nieluvirta (tn C/ha/v) perustettavan pajukon runkoihin ja oksiin on nopeimmillaan ennen ensimmäisen lohkon sadonkorjuuta, *Salix gmelinii* lajilla (kantojen) iässä neljä vuotta ja

Salix phylicifolia lajilla (kantojen) iässä yksitoista vuotta. Sen jälkeen pajutilan keskihehtaarin hiilivarasto (maanpäällinen nielu) alkaa vakiintua lopulliselle tasolle.



Kuva 5. Pajutilan keskimääräinen hiilen varasto eli nielu pajun rungoissa ja oksissa, 50 vuoden tähtäimellä (X-akseli). Hiiltä tonnia hehtaarilla (tn C/ha, Y-akseli). Lohkoittain viljeltyä jalostettua pajua (*Salix gmelinii*) kasvatetaan pellolla 3 vuoden kierrolla, kotimaista pajua (*Salix phylicifolia*) turvesuon pohjalla 10 vuoden kierrolla.

Esimerkin laskenta vertaantuu Ruotsissa 2000-luvulla tehtyihin maastomittauksiin. Kun biomassapajua viljeltiin Keski-Ruotsissa, joutomaan pellolla, pajukon maanpäällinen nielun suuruus rungoissa ja oksissa oli viiden vuoden iässä noin kahdeksan tonnia hiiltä hehtaarilla (Rytter ym. 2015).

Esimerkin laskenta vertaantuu myös Suomen metsien keskimääräisen maanpäälliseen hiilen nieluun. Metsissämme (22,8 miljoonaa hehtaaria) on runkopuuta yhteensä 960 ja oksia lehvästöineen 338 miljoonaa tonnia, eli biomassana yhteensä 1298 miljoonaa kuivatonna (Luke 2014). Kertoimella 0,5 (Taulukko 1) metsiemme puuston maanpäällinen hiilen nielu, hiilen pääoma, on yhteensä 649 miljoonaa tonnia. Keskimäärin se vastaa 28,5 tonnia hiiltä (C) metsähehtaarilla.

Pitkällä kiertoajalla metsän hiilen nielun kuuluukin olla suurempi kuin lyhyellä kiertoajalla. Suomen metsien keskimääräinen hiilivarasto kasvaa vuosittain, vaikka metsiämme hakataan säännöllisesti. Nettomääräisesti, keskihehtaarille laskien jo kasvavan pitkän kiertoajan puustomme (rungot, oksat, lehvästö) keskimääräinen hiilen nielu 28,5 tn C/ha lisääntyy nieluvirralla noin 0,3 tn C/ha/v. Kuvaannollisesti kyseessä on hiilen pääomaan suhteutettu noin yhden prosentin hiilen korko.

Avoimelle peltomaalle tai metsättömän turvesuon pohjalle viljelty lyhytkiertometsä on ilmaston muutoksen kannalta alkuainehiilen uusi varasto eli uusi nielu. Kansainvälisessä nielulaskennassa lyhytkiertometsän on täytettävä Ilmastopaneelin avoimen maan

metsityksen (afforestation) ehto. Metsitys hyväksytään maapallon tasoiseen hiilen nielulaskentaan ja sen mahdollisesti tulevaan korvauslaskentaan, kun kyseinen alue on ollut metsätöntä vähintään edelliset 20 vuotta (IPCC 2006). Suomessa sekä peltomaalle että turvesuon pohjalle (Kuva 6) viljelty pajukko täyttää tämän ehdon.



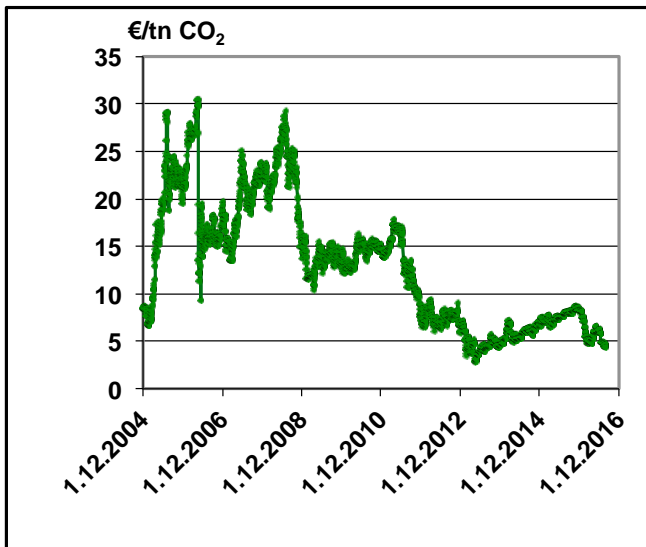
Kuva 6. Turvesuon pohjalle, vähintään 20 vuotta metsättömänä olleelle maalle viljelty biomassapaju. Alue Haapaveden Piipsanneva. Pajun lajike *Salix Klara*, 1v rungot & 1v rungot. Tri Jyrki Hytönen esittelee tutkimusaluettaan, kuva Jorma Issakainen.

Kun viljelypajukon hiilen nielu hyväksytään ilmastomaksatuksiin, nielun arvon voi määrittää kansainvälisen päästökaupan hiilidioksidin markkinahinnasta. Vuoden 2016 puolivälissä yksi tonni hiilidioksidin päästöjä hinnoiteltiin tasolle 4,7 E/tn CO₂ (EEX 2016). Alkuainehiileksi laskettuna se vastaa 17,2 Euroa hiilitonnia kohti (= 17,2 E/Mg C).

Näin hinnoitellen voimaperäisesti viljellyn peltomaan esimerkipajukon (*Salix gmelinii*) maanpäällisen hiilen nielun (pääoman) arvo on 121 euroa hehtaarille. Laajaperäisesti viljellyn turvesuon pohjan pajukon (*Salix phylicifolia*) arvo on vastaavasti 310 euroa.

Pajutilalla avomaalle kasvavaan viljelypajukon runkoihin ja oksiin syntyvän keskimääräisen hiilivaraston eli hiilen nielun arvot ovat perustasoa, mikä sekä peltomaan että turvesuon pohjan viljelypajukoiden tulisi saada nielutukenaan.

Tavoitteellisen tuen perustaso on suorassa suhteessa hiilidioksidin päästöjen markkinahintaan (Kuva 7). Se oli vuoden 2016 puolivälissä hyvin alhainen (alle viisi euroa tonnilta), alhaisempi kuin päästökaupan aloittamisvaiheessa (joulukuu 2004: noin kahdeksan euroa tonnilta). Korkeimmillaan päästöoikeuden hinta on käynyt 30 eurossa tonnilta hiilidioksidia, huhtikuussa 2006.



Kuva 7. Hiilidioksidin päästöoikeuden hinta (Euroa /tn CO₂) Euroopassa päästöoikeuskaupan alkutilanteesta (1.12.2004) lähtien (mm. EEX 2016).

3122 Hiiltä maaperään juurina

Maaperä peruskallion yläpuolella on maapallon tärkein elollisen hiilen varasto, suuruudeltaan 1500 petagrammaa (Kuva 3). Varasto on syntynyt aikojen saatossa metsien ekosysteemeissä humuksena, paljolti puiden ja pensaiden juurista ja kannoista. Nyt, maapallon metsiä raivattaessa, tämä humus eli maaperän hiilen varasto hupenee vuosittain koko maapallon tasolla. Jo peltonsa raivanneissa maissa maaperä menettää jatkuvasti ikivanhaa humustaan etenkin yksipuolisen peltoviljelyn (viljaa viljan perään) seurauksena.

Maaperästä on tullut eloperäisen hiilen lähde. Maaperästä käy hiilen lähdevirta kohti ilmakehää.

Maapallon viljelymaissa maaperän hiilen varasto on enää keskimäärin 50 – 75 prosenttia alkutasosta, mikä maapallolla oli ennen metsien raivausta pelloksi (Rytter ym. 2015). Kiertotalouden osaratkaisu ilmaston muutokseen on peltoviljelyn ja metsänhoidon monipuolistaminen niin että pelto- ja metsämaiden humus ja niiden myötä maaperän hiilivarasto alkavat taas kasvaa.

Biomassapajulla on tässä mahdollisuus. Muiden puiden tavoin paju kasvaa biomassaa paitsi maan päälle, myös maan alle. Lyhytkiertoviljelyn lehtipuilla tämä tapahtuu nopeammin kuin pitkän kiertoajan havupuilla. Sekä Englannissa että Ruotsissa biomassapajua pidetään eräänä lupaavimpana viljelypuuna, joka varastoi hiiltä maahan (Smith ym. 2000, Rytter ym. 2015).

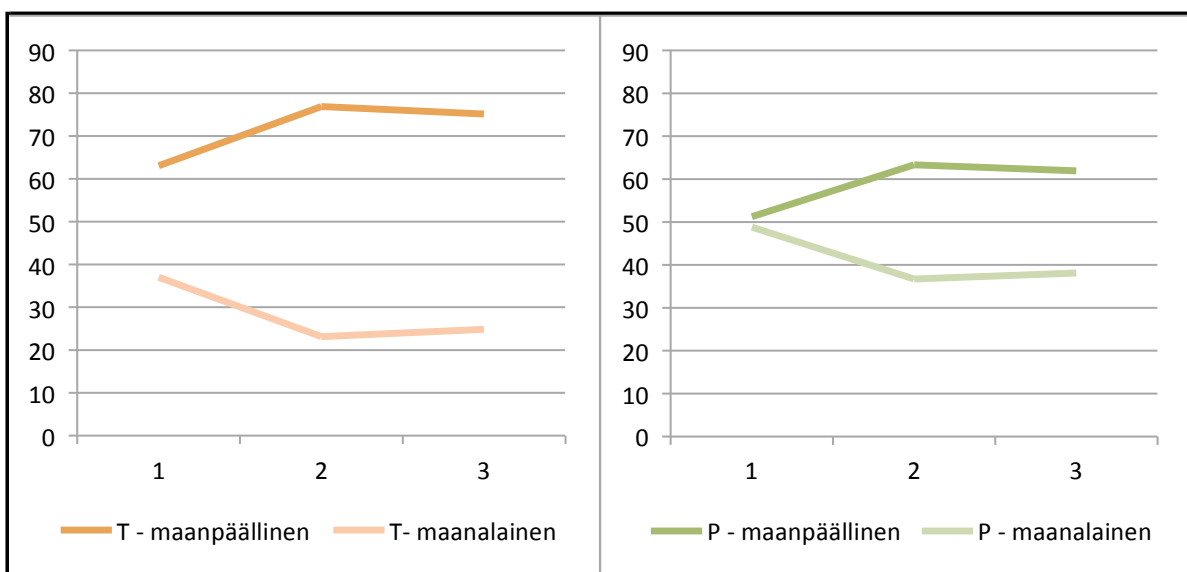
Kaikilla puilla on hiilen varasto eli nielu myös maanpinnan alapuolella, kannoissa ja juurissa. Normaalisti niiden hiilivarasto on määrältään pienempi nielu kuin vastaava

maanpinnan yläpuolinen nielu. Esimerkiksi Suomen metsien kokonaishiilestä (pääomasta) on maan päällä (rungot, oksat, lehvästö) 78 prosenttia ja maan alla (kannot, juuret) 22 prosenttia (Luke 2014).

Biomassapajun juuristoa ja siihen kertyvää hiilen maanalaista nielua on tutkittu Pohjoismaissa 1980-luvulta lähtien, ensin karulla turvesuon pohjalla, Haapaveden Piipsannevalla (Hytönen 1995) ja sittemmin hyväkuntoisella Uppsalan yliopiston peltomaalla (Rytter 2001). Suomen turvesuolle istutettiin pajulajia *Salix gmelinii* ja Ruotsin peltomaalle lajia *Salix viminalis*. Molemmat alueet viljeltiin voimaperäiseen tiheyteen 40000 kpl/ha. Kasvusto leikattiin vesamäärän lisäämiseksi ensimmäisen vuoden jälkeen. Sen jälkeen vesakon biomassa (rungot ja lehdet maan päällä, juuret maan alla, kuiva-ainetta tn/ha) mitattiin yhden, kahden ja kolmen vuoden iässä. Maanpäällisen ja maanalaisen biomassan (samalla hiilivaraston) prosenttiosuudet on esitetty Kuvassa 8.

Koealueiden tulokset Suomessa ja Ruotsissa olivat samansuuntaiset. Vesottamisen jälkeisenä ensimmäisenä kasvuvuonna maanalaisen biomassan osuus oli suurimmillaan, Ruotsin peltokokeessa noin 50 prosentissa ja Suomen turvemaan kokeessa noin 40 prosentissa. Toisena ja kolmantena kasvuvuonna maanalaisen biomassan (=juurten nielun) osuus asettuu hieman alemmalle tasolle, peltomaalla lähes 40 prosenttiin ja turvemaalla noin 25 prosenttiin.

Ruotsin ja Suomen kokeiden juuriosuuksien tasoero voi johtua paitsi maaperästä, myös pajulajista. *Salix viminalis* voi ylipäänsä kasvaa juurimassaa enemmän kuin *Salix gmelinii*. Eri pajulajien ja -lajikkeiden välillä on juurten kasvussa todennäköisiä eroja juurten kasvussa, mutta tällaisia vertailevia tutkimuksia on varsin vähän.



Kuva 8. Turvesuon pohjalle (vasen – T) viljellyn, vesotetun biomassapajun (*Salix gmelinii*) maanpäällisen (vesat lehtineen) ja maanalaisen (juuret) kuivamassan (hiilen nielun) prosenttiosuudet 1, 2 ja 3 vuoden iässä (Hytönen 1995), ja vastaavasti peltomaalle viljellyn (*Salix viminalis*) kuivamassan osuudet (oikea - P) (Rytter 2001).

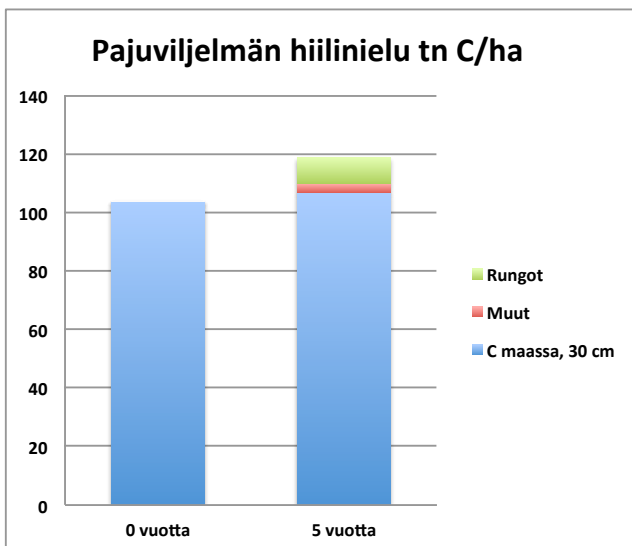
313 Hienojuurten merkitys

Pajun, muiden lyhytkiertopuiden ja ylipäänsä metsäpuiden juuristo jakaantuu nielujen kannalta kahteen erilliseen juurityyppiin. Karkeiksi juuriksi lasketaan monivuotiset, kannosta alun perin lähtevät puumaiset juuret, kahden millimetrin läpimittaan asti.

Hienojuuret (läpimitta alle 2 mm) lähtevät karkeiden juurten päästä. Hienojuuret muistuttavat toiminnaltaan maanpäällistä lehvästöä. Hienojuuret säilyvät sekä lehti- että havupuiden juuristossa elinvoimaisina vain rajallisen ajan, muutamasta kuukaudesta muutamaan vuoteen (Rytter 2001). Sen jälkeen hienojuuret irtoavat karkeista juurista ja varisevat maan sekaan. Uutta hienojuurta kasvaa tilalle koko roudattoman kauden ajan. Varisseiden lehtien tavoin hienojuuret muuttuvat maan karikkeeksi ja humukseksi. Humus vahvistaa maaperän hiilen varastoa.

Ruotsissa on mitattu vanhalle peltomaalle viljellyn pajukon hiilen määrän muutoksia viidessä vuodessa, sekä maanpäällisessä ja maanalaisessa kasvustossa että itse maaperässä (Kuva 9, Rytter ym. 2015).

Maaperästä kairattiin näytteet 30 senttimerin syvyyteen saakka kokeen alussa ja lopussa. Näytteet tutkittiin laboratoriossa erityisen tarkasti hienojuurten osalta. Kuvioon 6 on koottu aineistosta niiden kolmen keskiruotsalaisen pajuviiljelmän tiedot, joiden runkosatoa ei korjattu biomassaksi vielä viiden vuoden aikana. Myös vuotuinen lehtisato varisi maahan, kompostoitui hieman mutta muuntui pääosin maaperän humukseksi.



Kuva 9. Kolmen keskiruotsalaisen, vanhalle peltomaalle viljellyn pajukon hiilen keskimääräinen kokonaisnielu (varasto) viiden vuoden kuluttua, tonnia hiiltä hehtaarille (tn C/ha). Rungot: elävät rungot ja oksat 5 v. iässä. Muut: kannot, karkeat juuret, lehdet ja hienojuuret elävinä tai vielä maatumattomana karikkeena. C maassa: alkuperäinen hiili + noin 4 vuoden aikana lehtien ja hienojuurten karikkeesta kertyneen humuksen hiili (Rytter ym. 2015).

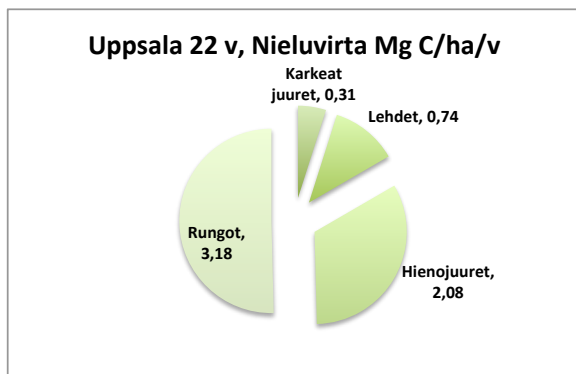
Hehtaarin hiilivarasto (nielu) ennen pajun viljelyä oli 103 tn C/ha, 30 cm:n kerroksessa. Viiden vuoden kuluttua hiilivarasto oli 119 tn C/ha. Nousua oli 15,3 tn C/ha/5v. Siitä oli maan päällä 57 prosenttia ja maan alla 43 prosenttia.

Pääosa viljelypajun ekosysteemin hiilestä on aina varastoitunut maaperään. Viiden vuoden aikana maaperän hiili (30 senttimetrin kerroksessa) lisääntyi noin kolmella prosentilla. Hiili oli peräisin karikkeesta humukseksi maatumista hienojuurista ja varisseista lehdistä.

Kuvan 9 mittaus on kertamittaus viiden vuoden iässä. Ruotsissa on tutkittu myös jokavuotista hiilen nieluvirtaa juuriin, Uppsalan yliopiston 22 -vuotisessa kokeessa (Rytter 2012). Viljelmä oli voimaperäisesti hoidettu, *Salix viminalis* lajikkeen L78183 kasvusto, joka oli istutettu pistokastiheyteen 20 000 kpl/ha. Nieluvirtaa hienojuuriin mitattiin varsin monimutkaisin menetelmin (lysimetrit, minirhizotronit, Rytter 2001).

Hiilen vuotuisesta nieluvirrasta ohjautui runkoihin keskimäärin 50,4 prosenttia, hienojuuriin 33,0 %, lehtiin 11,7 % ja karkeisiin juuriin 4,9 % (Kuva 10). Maanpäällinen lehtisato päättyy karikkeeksi, humukseksi ja lopulta osaksi maanalaista hiilen nielua.

Uppsalan pitkäaikaisesta kokeesta löytyi boreaaliseen vyöhykkeeseen viljellyn **biomassapajun hiililaskennan perussääntö ("Rytterin sääntö")**: paju kasvaa vuodessa biomassaa ja nielee alkuaine hiiltä yhtä paljon maan päälle ja maan alle.



Kuva 10. Hiilen vuotuinen nieluvirta Uppsalan 1989 perustetussa kokeessa (Rytter 2012). Laji ja lajike *Salix viminalis* L78183.

Käyttämällä tätä perussääntöä esimerkkipajutilojen (luku 321) hiilen nielun voi arvioida kokonaistasolleen. Kymmenen vuoden kierrolla turvesuolla, lajilla *Salix phylicifolia*, hiilen kokonaisnielu asettuu tasolle 36 tn C/ha (maanpäällinen 18 + maanalainen 18 tn C/ha). Vastaavasti peltomaan pajuviljelmällä, lajilla *Salix viminalis*, hiilen kokonaisnielu asettuu tasolle 14 tn C/ha (maanpäällinen 7 + maanalainen 7 tn C/ha).

Pajutilojen hiilen koko varaston (nielun) keskimääräiseksi arvoksi voi laskea heinäkuun 2016 hiilidioksidin päästöoikeuden hinnoilla: turvemaan 10 vuoden kierto 620 euroa per hehtaari, peltomaan 3 vuoden kierto 241 Euroa per hehtaari.

Esimerkkilaskelmien hiilinielut ovat suuntaa antavia, koska etenkin humuksen hiilen pitempiaikaista (yli 10 vuotta) säilymistä lyhytkiertoviljelmien luomassa maaperässä ei ole riittävästi tutkittu. Maaperän hiilipitoisuuden nopea ja luotettava mittaaminen on kiertotalouden suurimpia haasteita. Määrätietoisien tarkka maaperänäytteiden ottoon, analyysiin ja laskentaan perustuva menetelmä hallitaan jo (esim. Donovan 2013), mutta käytännön biotaloudessa näytteiden ottoon perustuva menetelmä on työläs. Nopean mittauksen, ei näytteenottoon perustuvia menetelmiä kehitetään. Odotukset ovat maaperän hiilen digitaalisessa arvioinnissa (esim. Wesemael 2013).

Samoin suuntaa antavia ovat pajuviiljelmien hiilinielujen kokonaisarvot. Jos Euroopan unioni päättäisi tukea tällaista avoimen maan uusien metsäviiljelmien ja niiden hiilinielujen perustamista, kertatuen haarukka (vuoden 2016 puolivälin hiilidioksidin hinnoilla) olisi 241 – 620 Euroa per hehtaari. Se vertautuu yleismaailmalliseen metsäviiljelyn kustannukseen 900 Euroa per hehtaari (= 1000 USD/ha).

Lyhytkiertopuiden hienoituksiinsa luoma hiilen nieluvirta on eräs lupaavimpia menetelmiä yhdistää maaperän ja ilmastoin hoito. Humuksen vähenemä on seuraus yksipuolisesta viljaa viljan perään menetelmästä. Humuksen huetessa pellot köyhtyvät ja tiivistyvät. Ne tarvitsevat enemmän keinolannoitteita ja voimakkaampia kyntötraktoreita.

On maa- ja metsätaloudelle eduksi palauttaa maaperään rikastuttavaa ja pehmentävää humusta. On ilmastotaloudelle eduksi siirtää ilmakehän liikahiiltä maaperän nieluun. Maaperän 25-50 prosentin hiilivaje on kiertotaloudella täytettävissä.

Lyhytkiertometsien hienoituksia ovat nimenomaan Pohjoismaiden ja boreaalisen vyöhykkeen mahdollisuus. Metsämaiden hiilen kierto ja kerrostuminen on 2000-luvulla yleistynyt tutkimusaihe (Pacaldo ym. 2013). Yleishavainto on, että metsämaa kerrostaa alkuaine hiiltä parhaiten boreaalisisessa vyöhykkeessä. Esimerkiksi New Yorkin osavaltiossa USA:ssa (vyöhyke boreaalisisesta etelään, Italian leveysasteilla) on mitattu *Salix dasyclados* viljelypajun hiilinielua 19 vuoden ajan (Pacaldo ym. 2013), mutta mitään tilastotieteellisesti merkittävää muutosta ei maaperän hiilen määrässä havaittu 45 senttimetrin kerroksessa.

Ristiriitaisia tuloksia on myös Ruotsissa. Tutkiessaan laajalti maan kaupallisia pajuviiljelmää Dimitriou ja Mola-Yudego totesivat yhtäältä (2012), että keskipitkällä ajanjaksolla (10-20 vuotta), verrattuna ympäristön normaaleihin peltoviljelmiin, pajuviiljelmien maan orgaanisen hiilen pitoisuus nousi merkittävästi (9 % pintamaassa, 27 % pohjamaassa). Myöhemmässä Ruotsin kaupallisten pajuviiljelmien tutkimuksessaan (2016) he eivät kuitenkaan vastaavaa ilmiötä tavanneet.

Hienoituksia säilyvät mahdollisimman maatumattomina boreaalisisessa suovyöhykkeessä, kuten esimerkiksi Ruotsin ja Suomen keski- ja pohjoisosissa. Hienoituksia ovat osaselitys

alueen luonnontilaisten soiden turpeen kerrostumiseen. Lyhytkiertometsän hienojuurilla hiiltä saadaan entiselle turpeennostoalueelle (Kuva 11) ilmeisesti nopeammin kuin soistamalla kenttä; viljelypajun hienojuuret maatunevat turpeeksi runsaammin ja nopeammin kuin rahkasammaleet.



Kuva 11. Turvesuon pohjalle viljelty biomassapaju nielee hiiltä sekä runkoihinsa että maaperään. Kuvassa tiheyteen 10,000 kpl/ha istutettu *Salix Klara* -lajikkeen pajuviljelmä Haapaveden Piipsannevalla 2014, turvesuon pohjalla, 4v rungot & 5v juuret (Hytönen & Vihanta 2015).

32 Happi ja vety

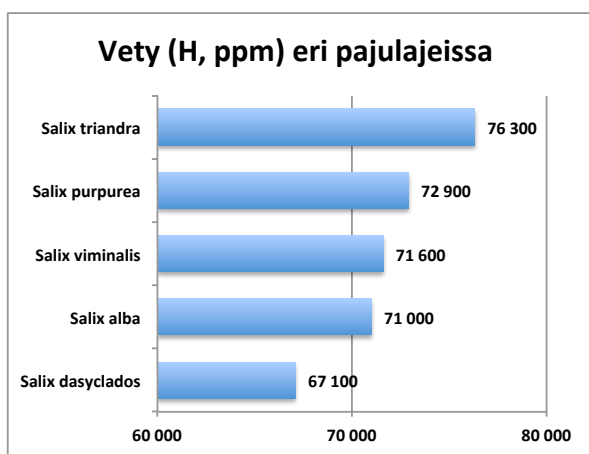
Hiilen jälkeen pajun biomassan yleisimmät alkuaineet ovat happi ja vety. Niihin ei ole juuri kiinnitetty huomiota ravinteina. Happea ja vetyä on biomassan kasvulle riittävästi aina kun vettäkin on.

Hapen alkuainepitoisuutta on mitattu pajun biomassasta harvoin. Happi määritetään yleisimmin jäännöksenä, kun muut alkuaineet on analysoitu. Näin on laskettu myös Taulukon 1 viitearvo hapelle (O): 422 406 miljoonasosaa.

Biomassan vetypitoisuus alkoi kiinnostaa 1900-luvun loppupuolella, kun biokaasun ja bioetanolin valmistus yleistivät. Puun vetypitoisuus vaihtelee normaalisti välillä 58 000 – 67 000 ppm (Hurskainen ym. 2013). Joensuun (Itä-Suomen) yliopiston ja Valtion Teknillisen Tutkimuskeskuksen (VTT) perusteellisissa viljelypajun polttokokeissa vedyn pitoisuus mitattiin 5-6 vuotiaan siperianpajusta (*Salix schwerinii*) tehdystä polttohakkeesta.

Vedyn pitoisuus oli 61 000 ppm (Hurskainen ym. 2013). Tätä lukemaa voi käyttää pajulle laskennan viitearvona (Taulukko 1).

Pajun suvussa vedyn pitoisuus vaihtelee eri pajulajien välillä. Aihetta on tutkittu etenkin Puolassa (Stolarski 2008). Korkeimmat vedyn pitoisuudet mitattiin jokipajun (*Salix triandra*) ja alhaisimmat vannepajun (*Salix dasyclados*, todennäköisesti laji *Salix gmelinii*) yksivuotisissa rungoissa (Kuva 12). Vedyn pitoisuudet ovat tasoltaan hivenen korkeammat kuin VTT:n Joensuun tutkimuksissa. Tasoero voi osaksi johtua erilaisista mittausten menetelmistä, tai osaksi siitä että Puolan pajunäytteet olivat kuoripitoisia yhden vuoden vesoja kun taas Joensuun näytteet olivat enemmän puupitoisia 5-6 vuoden vesoja.



Kuva 12. Vedyn alkuainepitoisuus (H, miljoonasosaa kuiva-aineesta) pajun rungoissa (1v rungot, 1v juuret; Stolarski 2008).

Biotaloudessa vedyn pitoisuuden vaihtelulla eri pajulajikkeiden välillä voi olla merkitystä tulevaisuuden neste- ja kaasumaisten biopolttoaineiden jalostuksessa. Biomassapaju joka tapauksessa nielee alkuaine vetyä mittavia määriä. Vedyn nielu on (ppm – mittauksella arvioituna) runsas kymmenesosa hiilen nielusta. Nykyisillä viljelymenetelmillä pajun sisältämän vedyn nieluvirtaan ei pystyine vaikuttamaan, mutta sopivan pajulajin ja –lajikkeen valinnalla vaikutuksen voi saada aikaan.

33 Tuhkaa ja typpeä

331 Tuhkassa tasapainoiset alkuaineet

Energiametsätalouden ja ylipäänsä uusiutuvan bioenergian tuottama tuhka on kiertotalouden tärkeimpiä tuotteita. Kun tuhkan saa biomassapajun hakkeen poltosta, tuhka on luonnonmukaisin pajuviiljelmän lannoite. Ravinteiden kirjo on monipuolinen, ja ravinteet ovat kasvun kannalta mahdollisimman tasapainoisessa suhteessa (Taulukko 2).

Taulukko 2. Biomassapajun runkojen poltosta syntyneen tuhkan tyypillinen koostumus alkuaineittain. ppm = miljoonasosaa kuiva-aineen painosta. Vihreä: pajun tarvitsemat välttämättömät ravinteet tuhkassa (12 kpl), keltainen: yleisimmät pajun maaperästä keräämät ja poltossa tuhkaan jääneet muut alkuaineet. Arvot laskennan viitearvoja.

TUHKA		Ppm
Happi	O	484 450
Kalkki	Ca	208 000
Kalium	K	110 000
Pii	Si	87 000
Magnesium	Mg	37 000
Fosfori	P	25 000
Alumiini	Al	14 000
Rikki	S	12 000
Natrium	Na	9 600
Rauta	Fe	6 300
Mangaani	Mn	3 800
Sinkki	Zn	1 400
Barium	Ba	500
Boori	B	160
Lyijy	Pb	150
Titanium	Ti	120
Kupari	Cu	115
Koboltti	Co	75
Kromi	Cr	72
Seleeni	Se	65
Molybdeeni	Mo	62
Nikkeli	Ni	58
Vanadiini	Va	45
Kadmium	Cd	18
Arseeni	As	9,8
Elohopea	Hg	0,5

Pajuhakkeen alunperin 16 välttämättömästä ravinteesta yhteensä 12 ravinnetta jää tuhkaan. Poltossa pääravinteista haihtuu hapettumalla kolme: hiili, vety ja typpi. Hivenravinteista haihtuu yksi: kloori (Cl).

Puun, erityisesti lehtipuiden tuhkaa on tutkittu maailmalla varsin paljon 1970-luvun öljykriisin jälkeen. Taulukon 2 alkuaineiden pitoisuusarvot tuhkassa ovat kirjallisuudesta kerättyjä viitearvoja ("keskiarvoja").

Pajun tuhkassa on eniten happea, koska poltossa useimmat alkuaineet hapettuvat oksideiksi. Hapen pitoisuus tuhkasta on siksi lähes puolet (viitearvo [jäännösarvo] 484 450 ppm).

Toiseksi yleisin tuhkan alkuaine on kalkki (208 000 ppm). Siitä seuraa tuhkan kalkitusvaikutus. Kolmanneksi yleisin alkuaine on pääravinne kalium (110 000 ppm). Neljänneksi yleisin alkuaine pii ei ole pajulle välttämätön, mutta paju nielee sitä aineenvaihdunnassaan runkoihin muiden alkuaineiden tapaan. Viidenneksi yleisin alkuaine magnesium vaikuttaa kalkin tavoin ja vähentää maan happamuutta. Kaikille kasveille tärkeä pääravinne fosfori on pajuhakkeen tuhkan kuudenneksi yleisin alkuaine.

Pajun runkojen tuhkapitoisuus vaihtelee välillä 13 000 – 30 000 miljoonasosaa kuivamassasta. Joensuun kaukolämpövoimalan polttokokeissa siperianpajun (*Salix schwerinii*) 5-6 vuoden ikäisistä rungoista haketun pajuhakkeen tuhkapitoisuus oli 15 000 miljoonasosaa (Hurskainen 2013). Tätä lukemaa (15 000 ppm = 1,5 %) voi myös käyttää laskennan viitearvona.



Kuva 13. Tuhkalannoitus on oleellinen turvesuon pohjilla ennen pajun viljelyä. Kotimaista mustuvapajua (*Salix myrsinifolia*) syyskuussa 2007 Jukaturve Oy:n kasvatuskentällä Merijärvellä. 1v rungot & 1v juuret.

Tavoiteltava ja laskennassa vertailuarvona käytettävä voimaperäisesti viljellyn biomassapajun vuotuinen kuiva-ainesato on 10 tonnia vuodessa hehtaarilla (esim. Christersson ym. 2005). Tuhkan pitoisuudella 15 000 ppm sen keskimääräinen vuositarve rungoissa on 150 kiloa hehtaarille (150 kg tuhkaa/ha/v). Kun paju nielee hiiltä maan alle saman verran kuin maan päälle (etupäässä hienojuuriinsa, ”Rytterin sääntö”), paju nielee myös tuhkan alkuaineita samassa suhteessa.

Runkosadon tuhka-ainesten tarve on siten kerrottava kahdella. Näin biomassapajun laskennallinen kokonaistarve on 300 kg tuhkaa/ha/v.

332 Typen tärkeä vuotuinen tarve

Typen pitoisuus pajukasvustojen rungoissa vaihtelee melkoisesti; mittaustuloksia tutkimuskirjallisuudessa lienee kaikista alkuaineista eniten. Lannoittamattomissa pajukoissa pitoisuus on alimmillaan luokkaa 2000 miljoonasosaa (Alakangas ym. 2016).

Korkeimmillaan typen pitoisuus on pajukkopuhdistamoissa, missä typpipitoista jätevettä johdetaan jatkuvasti pajukasvuston alle. Tanskalaisissa pajupuhdistamoissa pajun rungoista on mitattu lähes 13 000 miljoonasosan lukemia (Gregersen ja Brix 2001). Keskimääräisen voimallisesti viljellyn pajukon rungon typen pitoisuudelle voi käyttää vertailulukemaa 5000 ppm (ks. esim. Rytter 2001, Hurskainen ym. 2013).

Tavoiteltavalla viljelypajun satotasolla 10 tn ka/ha/v ja runkojen keskimääräisellä typen pitoisuudella 5000 ppm runkosadon vuotuinen tuhkan tarve on 50 kiloa hehtaarille. Kun lukeman kertoo nielusäännön kertoimella kaksi, vuotuinen typen tarve nousee tasolle 100 kg typpeä per hehtaari.

Lukema on samaa tasoa kuin typen lannoitussuositukset biomassapajulle niin Euroopassa (esim. Caslin ym. 2010) kuin Pohjois-Amerikassa (Abrahamson ym. 2010). Tanskassa typpilannoituksen suositus on 120 kg N/ha/v (Sevel ym. 2014a). Ruotsissa typpilannoituksen keskisuositus käytännön viljelmille on ollut 70 kg N/ha/v (Dimitriou and Mola-Yudego 2016).



Kuva 14. Kasvuissa biomassapajukko tarvitsee typpeä noin 100 kg N/ha/v. 2010-luvun lajikekoe, European Willow Breeding, Billeberga, Ruotsi, syyskuu 2014. 1v rungot & 2v juuret.

Tanskassa on tutkittu myös lannoitetypen huuhtoumista pajuviiljelmien peittämästä maaperästä, kun vuotuinen typen määrä ylittää suosituksen (Sevel ym. 2014b). Aina tasolle 120 kg N/ha/v asti typen huuhtoutuminen oli vähäistä, vain 1-7 kg N/ha/v. Suuremmilla typpilannoituksilla 240 ja 360 kg N/ha/v huuhtoutuminen nousi selvästi, tasolle 66-99 kg N/ha/v.

Typen lannoitussuosituksen perustaso 100 kg N/ha/v noudattaa myös Suomen nitraattiasetusta (Valtioneuvoston ... 2014). Ympäristötukien vaatimukset täyttävässä peltoviljelyssä vuotuisen typpilannoituksen taso on yleensä 100 – 120 kg N/ha/v (Opas ... 2009). Vuosittain annettavan typen kokonaismäärä saa olla enimmillään 170 kiloa per hehtaari (Valtioneuvoston ... 2014).

Typpi on kiertotalouden avainravinteita. Koska biomassapaju ei kuulu typpeä ilmakehästä sitoviin puihin, vuotuinen typen tarve on hoidettava lannoittamalla tavalla tai toisella. Typpi on maaperästä helpoimmin huuhtoutuvia ravinteita. Kivennäislannoitteiden typpi huuhtoutuu maasta nopeimmin, luontaislannoitteiden typpi hitaimmin. Biomassapajun lannoituksessa täytyy olla menetelmä, millä typen tärkeä vuositarve hoituu.

4 Viljelypajun lannoitussuositukset

41 Lannoitus kolmen vuoden jaksoissa

Viljelypaju on useimmiten yksinkertaisin lannoittaa kaupallisin kivennäislannoitein. Lannoitemäärä perustuu pajun kasvuunsa nielemien pääravinteiden määrään (Taulukko 1). Kivennäislannoitteet ovat 2000-luvulla kuitenkin jäämässä pois pajun lyhytkiertoviljelystä yhtäältä hintavuutensa vuoksi ja toisaalta ympäristöongelmiensa vuoksi.

Kivennäislannoitteiden typpi ja fosfori huuhtoutuvat helpoiten vesistöihin. Euroopan unionin ympäristötukien järjestelmässä lyhytkiertopaju yleisesti hyväksytään ympäristöä hoitavaksi viljelykasviksi, mutta ilman kivennäislannoitteita (Lindegaard ym. 2016). Luontainen lannoitus on sen sijaan hyväksyttävää.

Viljelypajun luontainen lannoitus perustuu yksinkertaisimmillaan parivaljakkoon tuhka ja typpi. Typellä lannoitus tapahtuu esimerkiksi karjanlannalla, jätevesien puhdistuslietteellä tai biokaasulaitoksen jätteillä.



Kuva 15. Lietelannan, jäteveden puhdistuslietteen ja biokaasulaitoksen typpipitoisen nestelannoitteen multaavaan levittämiseen on jo menetelmiä (kuvan esimerkki: Livakka / Pel-Tuote Oy)

Ensimmäisen tuhkaerän voi levittää pajun viljelyalueen perusmuokkauksen yhteydessä joko varhain keväällä ennen istutusta tai jo edellisenä syksynä.

Typpi levitetään normaalisti istutuksen jälkeen. Paju viljellään pistokkaina, ja ensimmäisen kesän kasvu liittyy suurelta osin pajun juurtumiseen. Tähän on tavanomaisessa peltomaassa yleensä riittävästi pääravinne tyyppiä. Jo vakiintunut käytäntö on, että ensimmäisenä keväänä pajuvielmää ei lannoiteta typpipitoisin lannoittein. Ne edistävät liiaksi pajua häiritsevien rikkaruohojen kasvua.

Ensimmäisen kasvukauden jälkeen pajukko on perinteisesti leikattu kanton vesomisen lisäämiseksi. Pajun varsinainen lannoitusjaksotus on alkanut toisen kasvukauden keväällä. Voimaperäisessä pajun viljelyssä kolmen vuoden kierto on luonteva. Kun lannoitteet levitetään traktorilla, joko raemaisina tai nesteinä, levitys on helpointa aina korjuuta seuraavan kevään tai alkukesän aikana.

Tanskassa on jo yleistymässä vaihtoehtoinen viljelymenetelmä, missä pajua ei vesoteta ensimmäisen kasvuvuoden jälkeen. Vesottamismenetelmä sopi 1900-luvun lamoaville mutta voimallisesti vesoville *Salix gmelinii* (vesipajun sukuisille) lajikkeille. 2000-luvun *Salix schwerinii* (siperianpaju) -peräiset lajikkeet eivät ole enää hyötäneet ensimmäisen kasvukauden jälkeisestä vesotuksesta. Myös Ruotsissa suositellaan siirtymistä Tanskassa jo koeajettuun menetelmään (Verwijst & Nordh 2010).



Kuva 16. Ensimmäisen kierron vesottamaton biomassapaju, siperianpajuun (*Salix schwerinii*) pohjaava Klara –lajike Jukaturve Oy:n vanhalla turvetuotannon maalla 2014, Alavieskassa. 4v runko & 4v juuret.

Seuraavissa lannoitussuosituksissa biomassapajun viljelyssä käytetään kolmen vuoden kiertoaikaa alusta lähtien. Pistokkaat viljellään traktorivetoisella istutuskoneella tarkoiksi, suoriksi riveiksi niin, että yhdistetty rivivälien rikkakasvien haraus ja nestelannoitus voidaan myöhemmin hoitaa saman rivivälin traktorilla ja lisäkoneilla.

42 Tuhkalannoitus

421 Fosfori

Tuhkalannoituksen ohjaava ravinne on fosfori. Vaikka tuhkalannoituksen yleistavoite on levittää ravinteet useammaksi vuodeksi, fosforin kertalannoituksella on ylärajansa. Fosforin huuhtoumien ehkäisemiksi ympäristöohjeistus suosittelee mineraalilannoituksen enimmäismääräksi 50 kiloa fosforia vuodessa hehtaarille. Tuhkalannoituksen fosforista lasketaan kuitenkin vain 40 prosenttia. Näin kerrallaan annettava tuhkalannoitus määräytyy siten, että tuhkan fosforin määrä on korkeintaan 125 kg P/ha.

Viitearvolla 25 000 ppm fosforia tuhkassa, tuhkalannoituksen kertamääräksi tulee 5000 kg tuhkaa hehtaarille. Jos tuhkan fosforipitoisuus on alempi, tuhkan enimmäismäärä nousee vastaavassa suhteessa.

Tämän tason tuhkalannoitus vertaantuu suomalaisen metsälannoituksen käytäntöön. Suometsien lannoituksessa kerralla annettavan, monivuotisen tuhkalannoituksen määrä on normaalisti 3000 – 5000 kiloa hehtaarille (Huotari 2012).

Teoreettisesti, kun pajun runkojen kuiva-aineessa on 900 ppm fosforia, keskikasvu 10 tn ka/ha/v tarvitsee vuodessa 9 kg P/ha. Kertomalla kahdella (Rytterin sääntö) vuositarve on 18 kg P/ha. Kertalannoituksen 5000 kg tuhkaa per hehtaari, fosfori 125 kg P/ha riittää siten 7 vuodeksi.

422 Kalium

Puun tuhkaa pidetään erityisen kalium-pitoisena lannoitteena. Paju nielee runkoihinsa kaliumia noin neljä kertaa enemmän kuin fosforia. Taulukon 2 kaliumin viitearvo on 110 000 ppm. Tällä pitoisuudella tuhkan kertalannoituksen suositusmäärässä 5000 kg/ha on tuhkaa 550 kg.

Pajuviljelmille kaliumin keskimääräisen vuosilannoituksen suositus esimerkiksi Irlannissa on: 40 kg K/ha/v (Caslin 2010). Teoreettisesti, kun pajun runkojen kuiva-aineessa on 3500 ppm kaliumia, keskikasvu 10 tn ka/ha/v tarvitsee 35 kg K/ha/v. Kertomalla lukema kahdella

(Rytterin sääntö), vuositarve on 70 kg K/ha. Kertalannoituksen 5000 kg tuhkaa per hehtaari kalium 550 kg K/ha/v riittää 8 vuodeksi.

423 Kalkki

Tuhkan kalkin pääetuna pidetään sen maan happamuutta vähentävää vaikutusta. Itse kalkkia arvioidaan maassa olevan ravinteena yleensä niin paljon, että varsinaista kalkkilannoitusta ei edes tunneta.

Paju on kuitenkin merkittävä kalkin nielu; viitearvo kuiva-aineessa on 4700 ppm. Teoreettisesti paju siis, kun pajulla tavoitellaan runkojen keskikasvua 10 tn ka/ha/v, tarvitsee 47 kg Ca/ha/v. Kertomalla lukema kahdella (Rytterin sääntö), vuositarve on 94 kg Ca/ha/v. Kertalannoituksen 5000 kg tuhkaa per hehtaari kalkki 1040 kg K/ha riittää 11 vuodeksi.

424 Muiden ravinteiden seuraaminen

Puun tuhkaa pidetään tasapainoisena ja monipuolisena ravinteena ja erityisen hyödyllisenä myös hivenravinteiden osalta. Niitä kaikkia (haihtunutta klooria lukuun ottamatta) on keskimäärin riittävästi viljelypajun tuhkassa (Taulukko 2). Jos pajua kasvattaa hivenravinteista jo köyhtyneessä maassa, hivenravinteita ei kerry tuhkaankaan. Esimerkki tällaisesta voisi olla kupari. Pajun hivenravinteita tulisi siksi edelleen seurata, tutkia ainakin perustutkimuksen tasolla.

Lähimpänä käytännön toimenpiteitä voisi olla hivenravinne boori, kun pajua viljellään turvesuon pohjalla. Boorin puutteen tiedetään aiheuttaneen puille kasvuhäiriöitä suomalaisessa suometsien hoidossa. Boorin puute voi aiheuttaa muuten pystykasvuiselle pajulajikkeelle ylimääräistä vesomista ja monilatvaisuutta.

Tulevaisuudessa seurattava hivenravinne voisi olla molybdeeni. Muihin välttämättömiin ravinteisiin verrattuna molybdeenin analyysijä on pajusta ja muista puista tehty kirjallisuuslähteiden perusteella yllättävän vähän.

Viljelypajun mikroravinteiden kierrolle on eduksi, kun tuhkalannoituksessa käytetään ajoittain muunkin puun tuhkaa. Kun mitä tahansa puun tuhkaa käytetään peltoalueiden lannoituksessa, tuhka-analyysit on ajoittain tehtävä niin typen ja fosforin kuin haitallisten raskasmetallien pitoisuuksien selvittämiseksi.

425 Tuhkalannoituksen kehittäminen

Tuhkalannoituksen perussuositus 5000 kg hehtaarille riittää ravinteiden puolesta kasvuisalle biomassapajulle noin 10 vuodeksi. Lyhytkiertopajun kasvatusaika yhdellä istutuksella on noin 20 vuotta, minkä jälkeen istutus uusitaan. Tämän mukaan pajukon tuhkalannoitus 5000 kg/ha tulee uusia kauden puolivälissä, noin 10 vuoden kohdalla. Jos tuhkan ravinnearvot ovat alhaisemmat kuin taulukossa 2, tuhkalannoitus on uusittava jo ennen 10 vuoden ikää, esimerkiksi 3 kierron jälkeen 9 vuoden iässä tai jo 2 kierron jälkeen jo 6 vuoden iässä.

Tuhkan peruslannoituksen ennen istutusta voi tehdä perinteisin, maanparannuskalkin levitystä muistuttavin menetelmin. Hajalevitetty tuhka on myös tarpeen äestää maahan ennen istutusta.



Kuva 17. Irtotuhkan voi levittää koneellisesti turvesuon pohjalle (Hytönen & Vihanta 2015).

Tuhkan välilevityksessä, korjuun jälkeen esimerkiksi 6 tai 9 vuoden iässä on huomioitava riveissä olevat kannot. Tuhkan tarkkuuslevitys riviväleihin, kantoja vaurioittamatta vaatii oman koneensa. Niissä koneissa on vielä kehitettävää. Jos levityskone ei tee sitä automaattisesti, kantorivien välit on syytä muokata tuhkan levityksen jälkeen.

43 Luontaisen typpilannoituksen mahdollisuuksia

Perinteisesti luontainen typpilannoite on saatu karjanlannasta. Nykyään sen yleisin muoto on lietelanta. Muita luontaisen typpilannoituksen mahdollisuuksia ovat esimerkiksi jäteveden puhdistamoiden mädätysjäännös ja biokaasulaitoksen jäteliete. Ne ovat kaikki nestemäisiä luontaislannoitteita. Nestemäisen lannoitteen tarkkuuslevitykseen (ja multaukseen) biomassapajukon riviväleihin on jo toimivat traktorivetoiset koneet.

Luontaisen typpilannoitteen vuosittaista tai kerrallaan annettavaa määrää säätelevät seuraavat ohjeet tai rajat:

- Voimallisesti kasvavan biomassapajun vuotuinen typen tarve on luokkaa 100 kg N/ha/v
- Kasvukauden aikana levitettävän typen määrä saa olla enimmillään 170 kg N/ha/v. Yhdellä levityskerralla annettavan typen määrä saa olla maksimissaan 150 kg N/ha; kesän maksimimäärä 170 kg N/ha/v on luontevaa jakaa kahteen levitykseen, esimerkiksi 85 kg N/ha/levityskerta. Levityskertojen välin on oltava vähintään kaksi viikkoa
- Nykyisillä, traktorilla vedettävillä lannoituskoneilla nestemäisen lannoitteen levitys onnistuu vain istutusta tai korjuuta seuraavan kasvukauden aikana. Siksi kolmen vuoden kierrossa suositeltava typpilannoitus rajautuu joko määrään kertalannoitus 150 kg N/ha (= 50 kg N/ha/v) tai lannoituskesän kahteen lannoitukseen 2 x 85 kg N/ha = (57 kg N/ha/v)
- Jos typpilannoitukseen alun perin tavoiteltavassa luontaislannoitteessa on sivuravinteena merkittävästi fosforia, fosforin määrä ei saa nousta yli 50 kg P/ha/v

431 Typpeä lietelannasta

Lietelannan typen määrä lasketaan lietteen kuutiometriä kohti. Normaali pitoisuus on 1,8 kg typpeä kuutiometrissä (1000 litrassa) (Mavi 2009). Kun typen lannoitustavoite on 100 kg N/ha, lietettä tarvitaan 56 m³. Jos tavoitellaan maksimityppilannoitusta 170 kg N/ha, lietettä kuluu yhteensä 94 kuutiometriä hehtaarille. Se on levitettävä kahdessa erässä. Yhden levityskerran lietemäärä on 47 m³ (sisältää 85 kg N/ha).

Lietelannan fosforipitoisuuden viitearvo on 0,5 kg P/m³. Mikäli lietelantaa levitetään enimmäismäärä 94 kuutiota kasvukaudessa, määrä sisältää fosforia yhteensä 47 kg P/ha/v. Se alittaa vuoden aikana annettavan maksimin 50 kg P/ha/v.

Kaliumia karjan lietelannassa on 2,9 kg K/m³. Lietelannan enimmäismäärällä 94 kuutiota kasvukaudessa kaliumia tulee 274 kiloa hehtaarille. Se ylittää moninkertaisesti Biomassapajun kaliumlannoituksen suosituksen 40 kg K/ha/v. Kalium pääosaksi sitoutuu maahan. Sen ylilannoitusta ei pidetä huuhtoutumisen riskinä.

432 Typpeä jäteveden puhdistamon mädätysjäännöksestä

Myös jäteveden puhdistamon mädätysjäännöksen typen määrä lasketaan kuutiometriä kohti. Jätevesien mädätysjäännöksessä on korkeampi typen pitoisuus kuin karjan lietelannassa. Normaali mädätysjäännöksen typen pitoisuus on 5 kiloa typpeä kuutiometrissä

(Puhdistamolietteen ... 2103). Typpilannoituksen tavoitteella 100 kg N/ha mädätysjäännöstä tarvitaan 20 m³. Jos tavoitellaan maksimityppilannoitusta 170 kg N/ha, mädätysjäännöstä kuluu yhteensä 34 kuutiometriä hehtaarille. Se on levitettävä kahdessa erässä. Yhden levityskerran mädätysjäännöksen määrä on 17 m³ (sisältää 85 kg N/ha).

Jäteveden puhdistamon mädätysjätteen fosforin pitoisuus on kymmenen kertaa korkeampi kuin karjan lietelannassa. Mädätysjätteen viitearvo on 5 kg P/m³ (Puhdistamolietteen ... 2013). Tällä määrällä pajuviiljelmälle vuosittain annettava puhdistamolietteen määrä on vain 10 kuutiota hehtaarille. Se sisältää siis fosforia 50 kg P/ha/v; typen määrä on sama 50 kg N/ha/v.

Kaliumia jäteveden puhdistamon mädätysjätteessä on vähän, normaalisti luokkaa 0,4 kg K/m³. Kun pajuviiljelmää lannoitetaan mädätysjätteen määrällä 10 m³/ha, kaliumia tulee 4 kg K/ha. Se on vain kymmenesosa viljelypajun vuotuisesta kaliumin tarpeesta (noin 40 kg K/ha/v).

433 Typpeä biokaasutuksen jäteliitteestä

Tyypillinen biokaasulaitoksen jäteliete on esimerkiksi Jepuan Biokaasu Oy:n sivutuote Jepuan Kasvuvoima (Jeppo 2015). Siinä biokaasutuksen raaka-aineita ovat lanta (73,7%), rehu- ja elintarviketeollisuuden lietteet (16,7%), nahkatehtaan karvontaliete (4,1%), vihermassat (2,8%) ja muut biojätteet (2,7%). Raaka-aineidensa puolesta biokaasun jäteliete vertautuu pääravinteiltaan karjanlantaan.

Biokaasun jätelietteen typen pitoisuus on 3,7 kiloa typpeä kuutiometrissä. Typpilannoituksen tavoitteella 100 kg N/ha biokaasun jäteliitettä tarvitaan 27 m³. Jos tavoitellaan maksimityppilannoitusta 170 kg N/ha, mädätysjäännöstä kuluu yhteensä 46 kuutiometriä hehtaarille. Se on levitettävä kahdessa erässä. Yhden levityskerran mädätysjäännöksen määrä on 23 m³ (sisältää 85 kg N/ha).

Biokaasun jätelietteen fosforin pitoisuus on 0,8 kg P/m³. Mikäli jäteliitettä levitetään enimmäismäärä 46 kuutiota kasvukaudessa, määrä sisältää fosforia yhteensä 37 kg P/ha. Se alittaa vuoden aikana annettavan maksimin 50 kg P/ha/v.

Kaliumia biokaasun jäteliitteessä 1,5 kg K/m³. Kun pajuviiljelmää lannoitetaan jätelietteen enimmäismäärällä 46 m³/ha, kaliumia tulee 69 kg K/ha. Se ylittää hyvin viljelypajun vuotuisen kaliumin tarpeen (noin 40 kg K/ha/v).

434 Nestemäisten sivutuotelannoitteiden levityksen enimmäismäärät

Nestemäisinä annettavilla sivutuotelannoitteiden (jäännöstuotteiden) levityksellä pyritään normaalisti enimmäismäärään minkä kasvustoon voi levittää vuotta ja hehtaaria kohti, kun

otetaan huomioon typen ja fosforin ympäristösäännökset. Taulukkoon 3 on koottu lukujen 431-433 laskennasta lannoitussuositukset kolmelle tyypilliselle nestemäiselle jäännöstuotteelle.

Taulukko 3. Vuotuinen lannoitussuositus biomassapajulle tyypillisillä nestemäisillä jäännöstuotteilla, kun tavoitteena on nesteen maksimilevitys ympäristörajoitteilla enintään 170 kg N/ha/v tai 50 kg P/ha/v (suluissa; kaliumilla ei rajoitetta, suluissa suositus)

NESTELANNOITE	m ³ /ha/v	N kg/ha/v	P kg/ha/v	K kg/ha/v
Lietelanta	94	170 (170)	47 (50)	274 (40)
Jätevesi jäännös	10	50 (170)	50 (50)	4 (40)
Biokaasu jäännös	46	170 (170)	37 (50)	69 (40)

Lietelantaa voi levittää suhteellisen runsaasti, esimerkin (luku 431) ravinnekoostumuksella enintään 94 m³/ha/v. Typen ja fosforin tasapaino on hyvä. Kaliumia pajukasvusto saa noin seitsenkertaisesti vuositarpeensa verran. Kaliumia ei lasketa kuitenkaan huuhtoutuvaksi ravinteeksi; kaliumin lasketaan sitoutuvan maahan.

Jäteveden puhdistamon mädätysjäännöstä voi levittää pajukasvustoon vain 10 m³/ha/v, koska jäännösnesteen fosforipitoisuus on korkea. Kymmenen kuution levitysmäärällä typen määrä jää kohtuulliseksi (50 kg N/ha/v). Kaliumin määrä jää kymmenesosaansa pajukasvuston vuositarpeesta.

Biokaasun jäteliete on verraten ihanteellisen nestemäinen lannoite. Määrällä 46 m³/ha/v tyypeä saadaan enimmäismäärä ja fosforiakin (37 kg P/ha/v) lähes enimmäismäärä (50 kg). Kaliumin määrä (69) on hivenen korkeampi kuin viljelypajukon suositus.

44 Lannoitusmenetelmien kehittäminen

Kiertotaloudelle on tyypillistä, että tyypeä sisältävät lannoitteet ovat nestemäisiä. Ne ovat joko jätteitä tai sivutuotteita, joilla on ollut aikaisemmin haittavaikutuksia niin vesistöihin kuin ilmaan. Nestemäisten lannoitteiden levitykseen on jo tavalliseen maataloustraktoriin liitettäviä laitteistoja. Niiden kehittäminen edelleen on kiertotalouden haasteita.

Viljelypajulle pinta-alaltaan merkittävimpiä maa-alueita on tulossa turpeennostolta vapautuvista suopohjista. Ne ovat ravinteiltaan köyhiä maita, joissa lannoituksen parivaljakko tuhka ja tyyppi tiedetään tarpeelliseksi, jopa välttämättömäksi. Tuhka- ja tyyppilannoituksen koneellistamista on kehitettävä suopohjien erityisvaatimuksiin.

Kun turpeen tuotanto suopohjalla loppuu alue näyttää ihanteellisen tasaiselta ja ongelmattomalta pajun viljelyn aloittamiseksi. Haasteita on kuitenkin kolme.

Ensiksi, turvesuon pohjalla on tyypillisesti ikivanhoja, jo ennen soistumista kasvaneen metsän puiden kantoja, liekoja ja juuria. Traktorivetoiset istutuskoneet ja maahan sijoittavat lannoituskoneet eivät suopohjalla toimi ilman suopohjan jyrsimistä. Tällaista muokkausta on kehitettävä tarkkuusjyrsinän suuntaan. Yhteen jyrsimyyn vakoon istutetaan pajupistokkaat, toiseen sijoitetaan multaavilla tarkkuuskoneilla nestemäiset lannoitteet.

Toiseksi, turvesuon pohjat ovat köyhimpiä maa-alueita, mitä pajun viljelyyn otetaan. Erityisesti tuhkalannoitusta tarvitaan mittavia määriä. Koska tuhkaa ei voi fosforirajoitteen levittää kerralla parille kymmenelle pajun kasvuvuodelle riittäviä määriä, tuhkalannoitus on voitava toistaa muutaman vuoden välein. Myös tuhkan tarkkuuslevitykseen tarvitaan sopiva, traktorivetoinen, riviväleihin multaavasti tuhkaa levittävä kone.

Kolmanneksi, turvesuonpohjat ovat herkkiä liikaravinteiden valumalle naapurivesistöihin. Sekä typpeä (nestelannoitteista) että fosforia (tuhkasta) on seurattava. Molempien lannoitukseen tarvitaan multaava tarkkuuslevitys joka on mitoitettu aikaisempiin tarkkuusjyrsinän vakoihin. Turvesuon pohjan avo-ojiin tarvitaan riittävä suojakaista, mihin tuhkaa ja typpeä ei ole syytä levittää ollenkaan.



Kuva 18. Tanskalainen (Nyvraa Ltd) biomassapajun viljelymenetelmä yhdistää tehokkaasti maanmuokkauksen, rikkakasvien torjunnan ja typpipitoisella nesteellä lannoittamisen.

Kun suopohjan pajukasvusto saadaan voimalliseen kasvuunsa, pajun juurien (etenkin hienoituurett) alkavat toimia niin, että ravinnepestöjen uhka poistuu. Suopohjan pajukko tarvitsee ravinteita kasvuunsa niin paljon, että ojien ravinnepestösuudet alkavat vähetä alkuperäiseen pajuttomaan vaiheeseen verrattuna.

5 Yhteenveto

2000-luvun kiertotalous on jo osoittanut, että periaatteessa kaikkia alkuaineita voi kasveissa kierrättää. Viljelypaju voi toimia monien alkuaineiden nieluna. Pohjoisista puulajeista pajujen mahdollisuudet ovat tässä suurimpia.

Koko maapallon ekologian kannalta ylivoimaisesti tärkein kierrätettävä alkuaine on hiili. Ilmastonmuutos, hallitsematon lämpiäminen ja kasvihuoneilmiö ovat vuosikymmenestä toiseen ihmiskunnan suurenevia haasteita. Viimeksi tähän kiinni huomiota Pariisin kansainvälinen (YK:n) ilmastokokous joulukuussa 2015.

Biomassapajulla on pohjoisessa (borealisessa) vyöhykkeessä lupaava osa hiilen kierrätyksessä. Erityisesti pajun hienoituksiinsa sitomaa, ja maaperään siirtyvää hiiltä tulisi vaalia. Pajun rungoista on myös mahdollinen valmistaa biohiiltä, osana biotalouden tuotepalettia. Biohiilen voi muokata maanparannusaineena maahan, humukseltaan köyhtyneeseen ja rakenteeltaan tiivistyneihin peltoihin. Biomassapajua kannattaa pitää entistä vahvemmin esillä tulevissa ilmaston muutokseen liittyvissä, maankäytön kehittämistä tavoittelevissa neuvotteluissa.

Viljelypajulla voi kierrättää myös kasvien pääravinteista tärkeimpiä: typpeä ja fosforia. Ne ovat sitä paitsi 2000-luvun vesistötalouden ongelmallisimmat alkuaineet. Kaupunkien mekaanis-fyysis-kemiallinen jätevesien puhdistus ei ole onnistunut luomaan näille alkuaineille riittävän tehokkaita nieluja. Osa typpeä ja fosforia pääsee aina vesistöön.

Biomassapajun viljely on kehittynyt jo vuosikymmenten ajan typen ja fosforin nielujen suuntaan. Pisimmällä tässä ovat suljetun kierron jäteveden pajukkopuhdistamot. Typen ja fosforin kiertoa on tutkittu laajalti myös vilja- ja rehuotuotannosta poistuneilla, alemman hyvyysluokan peltomailla sekä turvesuonpohjilla. Pajun vuosittain runkoihinsa (ja hienoituksiinsa) tarvitsemien ravinteiden määrät ja suhteet tunnetaan kirjallisuudessa verraten tarkoin. Samoin tunnetaan tuhkaan jäävien ravinteiden määrät ja suhteet, kun viljelypajun rungot poltetaan hakkeena nykyaikaisessa lämpö- ja sähkövoimalassa (CHP-laitoksessa).

Metsien tuhkalannoituksesta Suomessa on jo yli 50 vuoden perinne. Viljelypajun tuhkalannoituksesta on saatu hyviä kokemuksia etenkin käytöstä poistuneilla turvesuonpohjilla. Ravinteidensa perusväkevyydellä **tuhkalannoituksen perussuositus on 5000 kg/ha**. Ensimmäinen tuhkalannoitus annetaan juuri ennen pistokkaiden istuttamista. Seuraava tuhkalannoitus, edelleen määrällä 5000 kg/ha, annetaan kahden tai kolmen kasvukierron jälkeen, tarkkuuslannoituksen kantorivien väliin, 6 tai 9 vuoden iässä, riippuen käytettävän tuhkan väkevyydestä. Yhden kesän aikana annettavan tuhkalannoituksen määrä ei saa ylittää tuhkafosforin ympäristösuositusta niin että määrä 125 kg P/ha/v ylittyy.

Pajuviljelmien typpilannoitus on kehittymässä nestemäisiin luontaislannoitteisiin. Monien eurooppalaisten ja amerikkalaisten tutkimusten ja käytännön kokemusten perusteella viljelypajun **typpilannoituksen perussuositus on 100 kg N/ha/v**. Tällä tasolla viljelypaju saavuttaa luontaisen kasvuisuutensa, nielee maaperän typpeä ja samalla varmistuu, että

typen huuhtouma vesistöön ei vielä kiihdy. Typpilannoitusta ei kuitenkaan suositella ensimmäisen kasvukauden eli viljelykesän aikana. Tuhkalannoitus varmistaa taimien juurtumisen ja ensimmäisen vuoden talvenkestävyyden.

Kun pajua viljellään säännöllisesti kolmen vuoden kierrolla, nykyinen konekanta mahdollistaa nestemäisen typen levityksen korjuun jälkeen ainoastaan ensimmäisenä vuonna kolmesta. Siksi typpilannoituksen käytännön suositus on mitoittava ympäristösuositusten mukaan niin, että yhden kasvukauden aikana levitettävän typen kokonaismäärä nousee enimmäistasolle 170 kg N/ha/v. Määrä on jaettava kasvukauden aikana kahteen levityskertaan, kahden viikon välein, esimerkiksi 85 + 85 kg N/ha/v. Kolmen vuoden kasvukierrolla typpilannoituksen **keskimääräiseksi suositustasoksi tulee näin 57 kg N/ha/v.**

Jos nestemäinen typpilannoite sisältää oheisravinteena merkitsevästi fosforia, lannoituksen tasoa on laskettava niin, että yhden kasvukauden aikana levitettävän **fosforin määrä on enintään 50 kg P/ha/v.**

Viljellyn biomassapajun kierrättämät hiili, typpi ja fosfori tunnetaan määrältään ja kiertotavoiltaan 2010-luvulla jo verraten tarkoin. Myös muiden alkuaineiden kiertotalouden perustietämys on jo olemassa; tutkimusta näistä aiheista on tehty 1980-luvulta lähtien.

Käytännön sovelluksia muun muassa pajukkopuhdistamoista tunnetaan 1990-luvulta lähtien. Pajukon toimiminen tehokkaana hiilen nieluna oli 2000-luvun alun merkittäviä löydöksiä, erityisesti kun tutkimus oppi mittaamaan hiilen nieluvirran pajun hienojuuriin.

Biomassapaju on 2010-luvulla valmis ilmastotalouden ja entistä puhtaampaa ympäristöä tavoittelevan kiertotalouden uusiin haasteisiin.

6 Kirjallisuus

Abrahamson, L.P., Timothy A. Volk, Lawrence B. Smart, Kimberly D. Cameron. 2010. Shrub willow biomass producer's handbook. State University of New York. 27 p.

Adegbidia, H.G., Timothy A. Volk, Edwin H. White, Lawrence P. Abrahamson, Russell D. Briggs, Donald H. Bickelhaupt. 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass and Bioenergy* 20: 399–411.

Alakangas, E. ym. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 258. 229 s. ISBN 978-951-38-8418-5.

Burke, M. & Raynal, D. 1994. Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant and Soil* 162:135-146.

Caslin, B., Finnan, J. & McCracken A. 2010. Short rotation coppice willow best practice guidelines. 66 p. ISBN 1-84170-568-3.

http://www.seai.ie/Renewables/Bioenergy/Willow_Best_Practice_Guide_2010.pdf

Christersson, L., Theo Verwijst & Swoyambhu Man Amatya 2005. Wood production in agroforestry and in short-rotation forestry systems – synergies for rural development. Proceedings of the IUFRO:s conference (session 12, 128) held in Brisbane, August 8 - 13, 2005. https://www.slu.se/globalassets/gamla_strukturen/externwebben/nl-fak/vaxtproduktionsekologi/dokpublikation/vpe-report/vpe-report-no-4.pdf

Cyganiuk, A., Olga Gorska, Andrzej Olejniczak, Jerzy P. Lukaszewicz 2012. Pyrolytic peoduction of microporous charcoals from different wood resources. *J. Analytical and Appl. Pyrolysis* 98:15-21.

Dimitriou, I., Mola-Yudego, B., Aronsson, Pär & Eriksson, J. 2012. Changes in organic carbon and trace elements in the soil of willow short-rotation coppice plantations. *Bioenerg. Res.* 5:563-572.

Dimitriou, I. & Mola-Yudego, B. 2016. Poplar and willow plantations on agricultural land in Sweden: Area, yield, groundwater quality and soil organic carbon. *Forest Ecol. Manage.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.022>

Donovan, P. 2013. Measuring soil carbon change. Soil Carbon Coalition. 61 p. <http://soilcarboncoalition.org/files/MeasuringSoilCarbonChange.pdf> 18.7.2013.

Ecoregion 2016. Industry - Energy: Ashes from power plants as fertilizers for energy forests (a closed loop). http://www.baltic-ecoregion.eu/index.php?node_id=110.75&lang_id=1

Edling, L. 2010. Biohiilellä peltoon tuottavuutta. *Käytännön Maamies.* 14:28-29.

EEX Market Data 2016. <https://www.eex.com/en/market-data#/market-data> 7.7.2016.

European Commission 2016a. Factsheet on the Commission's proposal on binding greenhouse gas emission reductions for Member States (2021-2030). [http://europa.eu/rapid/press-release MEMO-16-2499_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-16-2499_en.htm) 20.7.2016.

European Commission 2016b. Proposal to integrate the land use sector into the EU 2030 Climate and Energy Framework. [http://europa.eu/rapid/press-release MEMO-16-2496_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-16-2496_en.htm) 20.7.2016.

Forrester, J.W. 1961. Industrial Dynamics. Cambridge MA: MIT Press. ISBN 1-883823-36-6.

Forrester, Jay W. 1969. Urban Dynamics. Waltham, MA: Pegasus Communications. 285 pp.

Globe Carbon cycle. 2016. University of Hampshire. <http://globecarboncycle.unh.edu/CarbonCycleBackground.pdf> 5.7.2016.

Gregersen, P. & Brix, H. 2001. Zero-discharge of nutrients and water in a willow dominated constructed wetland. *Water Science and Technology* 44(11-12):407-412. [http://mit.biology.au.dk/~biohbn/cv/pdf_files/Wat_Sci_Tech_44%20\(2001\)%20407-412.pdf](http://mit.biology.au.dk/~biohbn/cv/pdf_files/Wat_Sci_Tech_44%20(2001)%20407-412.pdf)

Guidi, W., Pitre, F.E. & Labrecque M. 2013. Short-Rotation Coppice of Willows for the Production of Biomass in Eastern Canada. *Biomass Now – Sustainable Growth and Use*. Intech Open Science pp. 421-448. <http://dx.doi.org/10.5772/51111>

Huotari, N. 2012. Tuhkan käyttö metsänlannoitteena. Metla. ISBN 978-951-40-2370-5. 49 s. <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/504366/tuhkan-kaytto-metsalannoitteena%5B1%5D.pdf?sequence=1>

Hurskainen, M. ym. 2013. Pajun käyttö polttoaineena kerrosleijukattiloissa. VTT-R-06093-13. 43 s.

Hytönen, J. 1995a. Effect of fertilizer treatment on the biomass production and nutrient uptake of short-rotation willow on cut-away peatlands. *Silva Fennica* 29(1):21-40.

Hytönen, J. 1995b. Ten-year biomass production and stand structure of *Salix 'Aquatica'* energy forest plantation in Southern Finland. *Biomass and Bioenergy* 8(2):63-71.

Hytönen, J. 2016a. Henkilökohtainen tiedonanto.

Hytönen, J. 2016b. Wood ash fertilisation increases biomass production and improves nutrient concentrations in birches and willows on two cutaway peats. *Baltic Forestry* 22(1): 98-106.

Hytönen, J., Saarsalmi, A. & Rossi, P. 1995. Biomass production and nutrient uptake of short-rotation plantations. *Silva Fennica* 29(2):117-139.

Hytönen, J. & Saarsalmi, A. 2009. Long-term biomass production and nutrient uptake of birch, alder and willow plantations on cut-away peatland. *Biomass and Bioenergy* 33: 1197–1211.

Hytönen, J. & Vihanta, S. 2015. Pajut suopohjalla Haapaveden Piipsannevalla – 4 v biomassa 2014. Esitelmä. Luke / Kannus. 26 s.

IPCC 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Chapter 4. Forest land. 83 p. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

Jensen, J., Holm, P., Nejrup, J. Larsen, M., Borggaard, O. 2009. The potential of willow for remediation of heavy metal polluted calcareous urban soils. *Environmental Pollution* 157:931-937.

Jeppo Biogas 2015. Mädätysjäännös, maanparannusaineena sellaisenaan käytettävä sivutuote 3A5. Tuoteseloste 10.2.2015. <http://www.jeppobiogas.fi/assets/Jepuan-kasvuvoima-2015-01.pdf>

Kaidi 2016. <http://www.kaidi.fi/uusiutuva-diesel/> 18.7.2016.

Katterer T., Fabiao A., Madeira M., Ribeiro C. and Steen E. 1995 Fine-root dynamics, soil-moisture and soil carbon content in a Eucalyptus-globulus plantation under different irrigation and fertilization regimes. *For. Ecol. Manage.* 74:1–12.

Krzyzaniac, M. et al. 2014. Thermophysical and chemical properties of biomass obtained from willow coppice cultivated in one- and three-year rotation cycles. *J. Elem. s.* 161-175. DOI: 10.5601/jelem.2014.19.4.695.

Kyoto Protocol to the United Nations framework Convention on Climate Change. 1997. Document FCCC/CP/1997/L.7/Add.1, 10 December 1997. 24 p.

Kärki, J. & Hurskainen, M. 2015. Pajun käyttö energiantuotannossa – tuloksia polttokokeista. Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektin loppuseminaari Esitelmä. 28.1.2015, Jyväskylä, VTT.

Lehmann, J. 2007. Handful of Carbon. *Nature* 447:143-144.

Lindegaard et al 2016. Short rotation plantations policy history in Europe: lessons from the past and recommendations for the future. *Food and Energy Security.* 5(3):125-152. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fes3.86/full>

- Luke 2014. Metsätilastollinen vuosikirja 2014. 426 p.
http://stat.luke.fi/sites/default/files/vsk14_koko_julkaisu.pdf
- Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. & Mikkola, H. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaset ja uudet liiketoimintakonseptit. Espoo. VTT Tiedotteita 2357. 134 s. + liitt. 19 s.
- Mavi 2009. Opas ympäristötuen ehtojen mukaiseen lannoitukseen 2007-2013.
<http://www.mavi.fi/fi/opaat-ja-lomakkeet/viljelijä/Documents/Opas%20ymp%C3%A4rist%C3%B6tuen%20ehtojen%20mukaiseen%20lannoitukseen%202007-2013.pdf>
- Mavi 2014. Viljelijätukihakemuskoulutus. <http://maaseutuvirasto.mobiezone.fi/zine/175/pdf>
- Mavi 2016. Lannoitus ja ympäristökorvaus. Paljon muistettavaa lannoituksesta.
<http://www.mavi.fi/fi/tuet-ja-palvelut/viljelijä/Sivut/lannoitus.aspx>
- Meier, S. 2013. Elemental analysis of wood fuels. New York State Energy Research and Development Authority. NYSEDA Report 13-13. <https://www.nyserda.ny.gov/-/./elemental-analysis-wood-fuel.pdf>
- Opas ympäristötuen ehtojen mukaiseen lannoitukseen 2009. Maaseutuvirasto. ISBN 978-952-453-473-4. 28 s.
<http://www.mavi.fi/fi/opaat-ja-lomakkeet/viljelijä/Documents/Opas%20ymp%C3%A4rist%C3%B6tuen%20ehtojen%20mukaiseen%20lannoitukseen%202007-2013.pdf>
- Origin of System Dynamics. 2006. Jay W. Forrester and the history of system dynamics.
<http://www.systemdynamics.org/DL-IntroSysDyn/origin.htm> (4.7.2016).
- Pacaldo, R., Volk, T. & Briggs, R. 2013. No significant differences in soil organic carbon contents along a chronosequence of shrub willow biomass crop fields. Biomass and Bioenergy 58:136-142.
- Plasma gasification 2016. https://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_gasification 18.7.2016.
- Pohjonen, V. 1998. Energy forests with willow as a carbon sink. Energy, environment and economy aspects of short rotation forestry in the Baltic Sea region. International workshop and harvesting demonstration 21.-24.3.1998. Estonian University of Agricultural Sciences, Tartu, Estonia. 14 p.
- Puhdistamolietteen käyttö maataloudessa 2013. Vesilaitosyhdistys. ISBN 978-952-6697-91-8. 51 s. [http://www.vvy.fi/files/3870/Puhdistamolieteopas_2013\(20032014s\).pdf](http://www.vvy.fi/files/3870/Puhdistamolieteopas_2013(20032014s).pdf)
- Rytter, R. 2001. Biomass production and allocation, including fine-root turnover, and annual N uptake in lysimeter-grown basket willows. For Ecol Manage 140:177-192.

Rytter, R. 2012. The potential of willow and poplar plantations as carbon sinks in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 36:86-95.

Rytter, R., Rytter, L. & Högbom, L. 2015. Carbon sequestration in willow (*Salix* spp.) plantations on former arable land estimated by repeated field sampling and C budget calculation. *Biomass and Bioenergy* 83:483-492.

Salix i kretsloppet. 2004. Hållbar användning och behandling av avloppsvatten och slam i Salixodling. <http://www.bioenergiportalen.se/attachments/42/407.pdf>

Sevel, L. Et al. 2014a. Fertilization of SRC Willow, I: Biomass production response. *Bioenergy Res.* 7: 319-328.

Sevel, L. et al. 2014b. Fertilization of SRC Willow, II: Leaching and Element Balances. *Bioenerg. Res.* 7:338-352.

Smith, P., R. Milne, D.S. Powlson, J.U. Smith, P. Falloon, K. Coleman 2000. Revised estimates of the carbon mitigation potential of UK agricultural land. *Soil Use Manag.* 16(1):293-295.

Stolarski, M. 2008. Contents of carbon, hydrogen and sulphur in biomass of some shrub willow species. *J. Elementol.* 13(4):655-663.
<http://www.uwm.edu.pl/jold/poj1342008/jurnal-19.pdf>

Takala, M. 1985. Asumajätevesien imeyttäminen maahan ja energiapajun viljely imeytyskentällä. Maatalouden tutkimuskeskus. Tiedote 12/85. Jokioinen. ISSN 0359-7652.

Use of NOAA ESRL data 2016.
ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_weekly_mlo.txt 20.7.2016.

Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta 2014. 1250/1214. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20141250>

Verwijst, T. & Nils-Erik Nordh 2010. Effekter av skottnedklippning efter etableringsåret på produktionen under första och andra omdrevet i salixodlingar. Projektnummer E06-652. ISSN 1653-1248. 26 s.

Vesilaitosyhdistys 2013. Puhdistamolietteen käyttö maataloudessa. 51 s.
[http://www.vvy.fi/files/3870/Puhdistamolieteopas_2013\(20032014s\).pdf](http://www.vvy.fi/files/3870/Puhdistamolieteopas_2013(20032014s).pdf)

Viherä-Aarnio, A. & Saarsalmi, A. 1994. Growth and nutrition of willow clones. *Silva Fennica* 28(3): 177-188.

Wesemael, Bas van, Antoine Stevens, Marco Nocita & Isabelle Cousin 2013. Digital mapping of soil C using Vis-NIR reflectance spectroscopy and geo-electrics. Institut

National de Recherche Agronomique, Science du Sol, Orléans. http://scs2013.land.is/wp-content/presentations/s3_03-vanwesemael_scs2013.pdf 18.7.2016.

Xu, W., Liu, J., Liu, X. et al. 2013. J. Soils Sediments 13: 1150. doi:10.1007/s11368-013-0718-y.

Etusivun (ensimmäisen sivun) kuva: *Salix gmelinii* Gudrun Jukaturve Oy:n arboretumin viljelmässä Alavieskassa. 4v rungot & 5v juuret.

Takasivun (viimeisen sivun) kuva: *Salix Klara* Haapaveden Piipsannevalla 16.8.2016, entisen turvetuotannon suon pohjalla. Alue on peruslannoitettu keväällä tuhalla (kuonalla), määrällä 8000 kg/ha. Alue on viljelty sen jälkeen tiheyteen 10 000 pistokastainta per hehtaari. Kasvusto on ensimmäisen kasvukauden jälkeen vesotettu. Typpilannoitus koesuunnitelman mukaan. Kuvassa 6v rungot & 7v juuret.

