



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2022

Pajut biokiertotaloudessa

Materiaaleja, arvoaineita, ympäristöhyötyjä

Anneli Viherä-Aarnio, Tuula Jyske ja Egbert Beuker (toim.)

Pajut biokiertoaloudessa

Materiaaleja, arvoaineita, ympäristöhyötyjä

Anneli Viherä-Aarnio, Tuula Jyske ja Egbert Beuker (toim.)

Kirjoittajat:

Luonnonvarakeskus: Lasse Aro, Egbert Beuker, Marleena Hagner, Paula Jylhä, Tuula Jyske, Kirsi Järvenranta, Hanna Kekkonen, Petri Kilpeläinen, Anuj Kumar, Jaana Liimatainen, Jyri Maunuksela, Veikko Möttönen, Pertti Pulkkinen, Kimmo Rasa, Auvo Sairanen, Juha Siitonen, Aki Sinkkonen, Jenni Tienaho, Eeva-Maria Tuhkanen ja Anneli Viherä-Aarnio.

etunimi.sukunimi@luke.fi

Aalto-yliopisto: Jinze Dou, Pirjo Kääriäinen, Tia Lohtander ja Tapani Vuorinen.

etunimi.sukunimi@aalto.fi



Viittausohje:

Viherä-Aarnio, A., Jyske, T. & Beuker, E. (toim.). 2022. Pajut biokierrotaloudessa : Materiaaleja, arvoaineita, ympäristöhyötyjä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 129 s.

Viittausohje yksittäiseen artikkeliin:

Viherä-Aarnio, A. 2022. Pajun (*Salix* L.) suku ja tärkeimmät biomassapajulajit Suomessa. Julkaisussa: Viherä-Aarnio, A., Jyske, T. & Beuker, E. (toim.). Pajut biokierrotaloudessa : Materiaaleja, arvoaineita, ympäristöhyötyjä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 10–13.

Anneli Viherä-Aarnio ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-1777-637X>



ISBN 978-952-380-367-1 (Painettu)

ISBN 978-952-380-368-8 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-368-8>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Anneli Viherä-Aarnio (toim.)

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2022

Julkaisuvuosi: 2022

Kannen kuva: Anneli Viherä-Aarnio

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.juvenesprint.fi>

Alkusanat

Tämä synteesiraportti laadittiin Luonnonvarakeskuksen strategisessa hankkeessa "WillPot – Potential of willows (*Salix*) as a source of biomass and ecosystem services" (1.5.–31.12.2021). Raportin kirjoittamiseen osallistui Lukesta ja Aalto-yliopistosta useita eri aihepiirien asiantuntijoita.

Parhaat kiitokset kaikille kirjoittajille siitä, että tästä moniulotteisesta ja pajun tapaan moneen suuntaan vesovasta viidakosta valmistui asiapitoinen ja kattava kokonaisuus. Erityiskiitoksen ansaitsevat Aalto-yliopiston tutkijat, jotka lyhyellä varoitusajalla kirjoittivat nostot omista uusista tutkimustuloksistaan.

Kiitokset myös Jyrki Hytöselle, Johanna Kohlille, Mikko Kurttilalle ja Johanna Roudalle, jotka lukivat käsikirjoituksen tehden arvokkaita korjausehdotuksia sekä Luonnontieteellisen Keskusmuseon yli-intendentti Henry Väreille, joka auttoi pajujen muuttuneen nimistön tarkastamisessa. Kasvinjalostusjohtaja Bo Gertsson Lantmännen Ab:sta lähetti tietoja Ruotsin pajulajikkeista, mistä kiitokset hänelle.

Toimittajat

Tiivistelmä

Anneli Viherä-Aarnio, Tuula Jyske ja Egbert Beuker

Tämän synteesiraportin keskeinen tavoite on tarkastella, voisiko lyhytkiertopajun viljely ja kokonaisvaltainen hyödyntäminen osaltaan edistää kestävää biokiertoa ja samalla tarjota viljelijöille ja yrityksille uusia ansaintamahdollisuuksia. Raportin katsaus sisältää koko pajun arvoketjun: pajun lyhytkiertoviljelyn menetelmät, riskit, tuotoksen, kannattavuuden ja ympäristövaikutukset. Pajun raaka-aineominaisuuksia ja käyttömahdollisuuksia esitellään uusimpien tutkimustulosten kautta. Lopuksi tarkastellaan pajun kokonaisvaltaista käyttöä biojalostuksessa ja jalostamon kannattavuuden reunaehtoja.

Lyhytkiertoviljelmällä kasvatettavan pajun tulee olla viljelypaikan ilmastoon sopeutunut, kyseiselle kasvupaikalle sopiva sekä taudin- ja tuholaisten kestävä. Sen tulee sietää toistuvia korjuita ja vesoa voimakkaasti korjuun jälkeen, kasvaa nopeasti sekä tuottaa hyvin ja halutunlaista biomassaa. Viljelyyn käytetään lajikkeita, jotka ovat kasvullisesti monistettuja ja perinnöllisesti identtisiä kloonieja. Pajuviljelmän kokonaisikä on 19–25 vuotta, jonka aikana sato korjataan 3–5 vuoden välein. Viljelmän perustaminen ja kasvatus vaatii usein intensiivisiä toimenpiteitä, kuten pintakasvillisuuden torjuntaa, toistuvaa lannoitusta ja tarvittaessa kalkitusta. Pajujen maanpäällinen lehdetön kuiva-ainetuotos voi parhaimmillaan olla huomattavan suuri, mutta käytännön viljelmillä sen on arvioitu olevan Suomessa ihanteellisissa olosuhteissa keskimäärin 6,8 tn/ha/v. Viljelmän biomassan tuotos riippuu pajulajista ja -kloonista, viljelmän sijaintipaikan ilmasto-oloista, kasvupaikan ominaisuuksista, kasvukauden sääoloista ja viljelmän hoitotoimenpiteiden intensiteetistä. Merkittäviä tuhoja ja tuotostappioita pajuviljelmillä aiheuttavat pajujen lehtiruosteet sekä halla ja pakkaneen, mikäli käytetty klooni on heikosti ilmastoon sopeutunut. Jollekin tuholle alttiilla kloonilla perustettu viljelämä voi pahimmassa tapauksessa tuhoutua kokonaan. Pajuviljelämä korjataan koneellisesti lehdeettömänä aikana. Korjuuketjun valintaan vaikuttaa pajun käyttötarkoitus. Tehokkaiden erikoiskoneiden kannattava käyttö vaatii suurta viljelypinta-alaa ja keskitettyjä viljelmiä, joita Suomessa ei vielä toistaiseksi ole.

Energiapajun tuotanto Suomessa on kannattamatonta nykyisillä viljelijätuilla ja polttohakkeen hintatasolla. Kannattavaan tuotantoon vaaditaan huomattavasti suurempi biomassatuotos, kuin käytännön viljelmiltä on mitattu, sekä pajusta maksettava korkeampi hinta. Tulevaisuudessa pajunviljelyn kannattavuutta voivat parantaa uudet korkean lisäarvon tuotteet, biomassan kaskadikäyttö ja mahdollinen hiilikompensaatio. Keinolannoitteiden hinnannousu parantaa lietteen ja muiden kierrätyslannoitteiden kilpailukykyä, jota puolestaan suuret kuljetuskustannukset heikentävät.

Pajuviljelmillä voi olla sekä haitallisia että myönteisiä ympäristövaikutuksia. Maanmuokkaus ja toistuva lannoitus nopeavaikutteisilla ravinteilla saattaa aiheuttaa vesistökuormitusta. Ravinnehuuhtoumat pajuviljelmiltä ovat todennäköisesti melko pieniä, jos lannoitemäärät suhteutetaan oikein pajun kasvun ja kasvupaikan ominaisuuksien mukaisesti, ja samalla huolehditaan vesien suojelutoimenpiteistä. Tutkittua tietoa aiheesta on niukasti. Pintakasvillisuuden kemiallisessa torjunnassa käytetyllä glyfosaatilla on osoitettu olevan haitallisia vaikutuksia eri eliöryhmiin. Maatalouden monokulttuurin korvaaminen pajuviljelmällä lisää monimuotoisuutta, mutta esimerkiksi lajirikkaan niityn muuttaminen pajuviljelmäksi vähentää sitä. Varhain keväällä kukkivina pajut ovat tärkeitä pölyttäjähyönteisten ravintokasveja.

Paju soveltuu lievästi saastuneiden yhdyskuntavesien puhdistukseen poistamaan niistä tyypeä ja fosforia. Jätevedet kulkevat ensin puhdistamon kautta ja sen jälkeen pajua kasvavan valuma-alueen läpi. Saastuneiden maiden puhdistus pajun avulla Suomen oloissa vaatii pitkiä

puhdistusaikoja, ja saataviin tuloksiin vaikuttavat ilmasto- ja maaperätekijät sekä saasteiden ominaisuudet. Pajut pystyvät sitomaan itseensä raskasmetalleja, etenkin kadmiumia. Maan puhdistuksessa käytetty paju vaatii jatkokäsittelyn. Lietelannan käyttö pajuviiljelmillä mahdollistaisi ravinteiden kierrätyksen ja voisi parantaa viljelyn kannattavuutta.

Pajujen hiilensidontakyky perustuu niiden nopeaan kasvuun ja suureen biomassatuotokseen. Vaikutus on kuitenkin lyhytaikainen, koska pajun maanpäällinen sato korjataan muutaman vuoden välein. Suurin merkitys hiilivaraston lisäyksessä on tällöin kanto- ja juuribiomassan sekä maan orgaanisen hiilivaraston kasvulla. Turvepelloilla kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen voisi onnistua pajun kosteikkoviljelyllä, jossa pohjavedenpintaa nostetaan erilaisin ojitusratkaisuin. Viherrakentamisessa pajut soveltuvat erityisesti luonnonmukaiseen hulevesien hallintaan sekä kohteisiin, joissa kulutus on suurta, kuten päiväkotien ja koulujen piha-alueille. Pajut voivat myös lisätä monimuotoisuutta rakennetussa ympäristössä.

Pajujen rakenteelliset ja kemialliset raaka-aineominaisuudet voisivat mahdollistaa uudenlaisten tuotteiden kehittämisen. Pajun huokoinen puuaine sopii biohiilen valmistukseen. Biohiili on pyrolyysillä valmistettava materiaali, jonka sovellukset perustuvat sen huokoisuuteen. Biohiilellä on lukuisia mahdollisia käyttökohteita muun muassa aktiivihiilissä, elektroniikkateollisuudessa ja maanparannusaineena. Pajusta valmistettava biohiili soveltuu suurten huokosten ansiosta erityisesti maatalous- ja kasvualustakäyttöön. Pyrolyysiprosessissa syntyvillä nestejakeilla on potentiaalia kasvinsuojelukäytössä, mutta niiden kaupallistaminen lupakäytäntöjen mukaisesti edellyttää tutkimus- ja kehitystyötä. Lyhytkiertopajupuun on todettu sopivan erinomaisesti biokomposiitteihin, joiden tuotemahdollisuudet ovat laajat erilaisista pakkauksista ruokailuvälineisiin ja sisustuspaneeliin. Pajun sisäkuoren pitkistä kuitukimpuista olisi mahdollista valmistaa monia ominaisuuksiltaan erityisiä materiaaleja, kuten esimerkiksi komposiittien vahvikkeita, kestävä paperia, UV-säteilyä torjuvia ja happea läpäisemättömiä kalvoja sekä huokoista hiiltä sähköakkuihin. Myös pajun kuorella esiintyvillä bioaktiivisilla, antimikrobisilla ja antioksidatiivisilla uuteaineilla on monia sovellusmahdollisuuksia lääke-, kosmetiikka-, puhdistusaine-, pinnoite- ja elintarviketeollisuudessa. Pajunkuoriuutteiden toiminnallisten ominaisuuksien hyödyntämistä muovia korvaavissa, ympäristöystävällisissä materiaaleissa tutkitaan. Antimikrobisten ominaisuuksiensa ansiosta paju voisi olla mahdollinen turvetta korvaava kuivikevaihtoehto. Pajunkuoriuutteita voi hyödyntää myös biovärinä selluloosapohjaisille kuduille, korvaamassa tekstiiliteollisuuden saastuttavia synteettisiä väriaineita. Bioväreillä on myös antimikrobisia ominaisuuksia ja siten potentiaalia lääketieteellisiin sovelluksiin.

Biojalostamotasolla pajun käytön kannattavuus perustuu biomassan kokonaisvaltaiseen hyödyntämiseen, kaskadikäyttöön, jossa pääkomponenttien lisäksi hyödynnetään arvokkaat uuteaineet ja sivuvirrat. Biojalostamon toiminta edellyttää huomattavasti suurempia ja keskitettyjä viljelypinta-aloja ja laadukkaan raaka-aineen häiriötöntä saantia. Pajubiojalostamon kannattavuutta voidaan arvioida vasta, kun on selvillä valmistettavat tuotteet, valmistusprosessit ja niiden vaatima laitteisto sekä tuotteista saatava hinta.

Nykyisellä pajuraaka-aineen hintatasolla pajun viljelymäärä tai viljelyn kannattavuus ei lisääny ilman merkittäviä tukia. Pelkkä viljelyn lisääminen ei kuitenkaan riitä, vaan on kehitettävä koko ketjua viljelystä käyttöön ja lopputuotteisiin. Tarvitaan pajuraaka-aineen erityisominaisuuksiin perustuvaa tutkimus- ja kehitystyötä sekä tuotteistamista. Lisää tietoa tarvitaan myös pajuviiljelmien ympäristövaikutuksista, hiilitaseesta, soveltuvuudesta kosteikkokasviksi suopeltojen ja turvesoiden haitallisten ilmastovaikutusten vähentämisessä sekä soveltuvuudesta ravinteiden kierrätykseen ja ekologiseen viljelyyn.

Asiasanat: arvotuotteet, biojalostus, biomassa, ekosysteemipalvelut, fraktiointi, hiilen sidonta, lyhytkiertoviljely, monimuotoisuus, paju, *Salix*, viherrakentaminen, ympäristöhyödyt.

Sisältö

1. Johdanto	8
2. Pajun (<i>Salix L.</i>) suku ja tärkeimmät biomassapajulajit Suomessa	10
2.1. Pajujen yleisiä piirteitä	10
2.2. Suomen kotimaiset pajulajit biomassapajuina	11
2.3. Ulkomaiset biomassapajulajit.....	13
3. Pajujen perinteinen käyttö	14
4. Pajun lyhytkiertoviljely	15
4.1. Pajun lyhytkiertoviljelyn tutkimus Suomessa.....	15
4.2. Pajunviljelyn pinta-alat.....	15
4.3. Pajuviljelmän perustaminen ja kasvatusketjut.....	16
4.3.1. Viljelyaineisto	16
4.3.2. Kasvupaikan valinta, viljelmän perustaminen ja hoito.....	19
4.3.3. Pajuviljelmien tuhot.....	21
4.4. Tuotos	22
4.5. Viljely- ja korjuuteknologia	25
4.5.1. Suorahaketus.....	25
4.5.2. Kokopuuna korjuu.....	27
4.5.3. Paalaus.....	28
4.6. Pajuntuotannon kannattavuus.....	28
4.7. Lyhytkiertoviljelyn ympäristövaikutukset.....	33
5. Pajujen tarjoamat ympäristöhyödyt.....	34
5.1. Pajut monimuotoisuuden ylläpitäjinä	34
5.2. Pajut jätevesien puhdistuksessa.....	36
5.3. Pajut saastuneen maan puhdistuksessa.....	39
5.4. Pajut ravinteiden kierrätyksessä – lietelanta – tulevaisuuden optio?.....	42
5.5. Pajut hiilen sitoijina ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen turvemailla.....	45
5.5.1. Paju hiilen sitoijana	45
5.5.2. Päästöjen vähentäminen turvepelloilla.....	45
5.5.3. Päästöjen vähentäminen turvetuotantoalueilla.....	47
5.6. Pajut viherrakentamisessa	48
5.6.1. Puumaiset pajulajit julkisessa viherrakentamisessa	49
5.6.2. Pensasmaiset pajut julkisessa viherrakentamisessa.....	52
5.6.3. Pajujen käyttö hulevesien luonnonmukaisessa hallinnassa.....	54

6. Pajun raaka-aineominaisuudet ja käyttö	56
6.1. Pajun rakenteelliset ominaisuudet ja niihin perustuva käyttö.....	56
6.1.1. Puuaine	56
6.1.2. Kuori.....	62
6.2. Pajun kemialliset ominaisuudet ja niihin perustuva käyttö	71
6.3. Pajun käyttö biojalostuksessa	80
6.3.1. Biojalostamo	80
6.3.2. Pajun biojalostuspotentiaali	80
6.3.3. Pajun prosessointi biojalostamossa	82
7. Visio pajubiojalostamosta.....	85
8. Päätelmiä	90
Viitteet.....	92
Liitteet	121

1. Johdanto

Anneli Viherä-Aarnio, Tuula Jyske ja Egbert Beuker

Ilmastonmuutoksen hillitseminen, monimuotoisuuden säilyttäminen sekä luonnonvarojen kestävä käyttö ovat ihmiskunnan tulevaisuuden kannalta keskeisiä haasteita, joihin vastaamiseksi tarvitaan biokiertotaloutta. Se tarkoittaa fossiilisten raaka-aineiden korvaamista uusiutuvilla biopohjaisilla raaka-aineilla, biomassojen kokonaisvaltaista käyttöä, ravinteiden ja materiaalien kierrätystä sekä valmistusprosessien sivuvirtojen tarkkaa hyödyntämistä. Siirtyminen biokiertotalouteen edellyttää uudenlaista ajattelua ja innovatiivisuutta, mutta samalla se voisi tarjota uusia liiketoimintamahdollisuuksia ja uusia työpaikkoja (Suomen biotalousstrategia 2014). Kestävässä siirtymässä biokiertotalouteen tarvitaan myös yhteiskunnan tukea ja erilaisia politiikka-toimia.

Biopohjaisilla vaihtoehtoilla voidaan korvata fossiilisia raaka-aineita materiaalien, kemikaalien, lannoitevalmisteiden ja polttoaineiden valmistuksessa. Kasvu- ja kuiviketurpeen tuotantoon tarvitaan korvaavia ratkaisuja energiaturpeen tuotannon vähentyessä. Lupaavia vaihtoehtoja ovat esimerkiksi rahkasammal ja puukuidut puutarhakasvien ja metsäpuiden taimien kasvatukseen. Ilmakehän hiiltä voidaan sitoa pitkäikäisiin tuotteisiin tai maaperään biohiilen muodossa. Puun käytön uusia sovelluksia ovat myös hemiselluloosa elintarvikkeiden sakeuttajana ja ligniini elektroniikassa aktiivihiilenä. Erilaisia antimikrobisia ratkaisuja homeiden, bakteerien ja virusten torjuntaan etsitään metsäbiomassoista ja -sivuvirroista. Ravinteiden kierrätyksellä vaikutetaan maaperän hyvinvointiin ja vähennetään haitallisia ympäristövaikutuksia.

Pajujen (*Salix L.*) käyttö ihmisen taloudessa on ollut perinteisesti melko vähäistä rajoittuen lähinnä käyttöön rohtona, punontamateriaalina ja nahkojen parkitusaineena. Viimeaikaiset tutkimukset ovat osoittaneet pajujen puuaineella ja etenkin kuorella olevan kiinnostavia kemiallisia ja rakenteellisia ominaisuuksia, jotka voisivat mahdollistaa uudenlaisten tuotteiden ja sovellusten kehittämisen ja pajujen monipuolisen käytön osana kestävä biokiertotaloutta.

Pajubiomassan tuotantoa lyhytkiertoviljelmillä on tutkittu paljon sekä Suomessa että muualla maailmassa sitten 1970-luvun öljykriisin. Pajun lyhytkiertoviljelyn tutkimus ja kehitys on tähännyntä tuotetun biomassan käyttöön energiaksi polttohakkeena. Energiapajuviljelmien perustamisen, hoidon ja korjuun menetelmät tunnetaan hyvin ja se osaaminen voidaan valjastaa tuottamaan pajubiomassaa uusiin tarkoituksiin.

Pajujen nopea kasvu, voimakas vesominen ja lisättävyys pistokkaista tekevät niistä sopivia lyhytkiertoviljelyyn. Pajun suuren lajimäärän ja lajien välinen vaihtelu sekä risteytyminen mahdollistaisivat tarvittaessa myös suhteellisen nopean kasvinjalostuksen ja kloonien kehittämisen räättälöityjä sovelluksia varten. Pajun lyhytkiertoviljely saattaisi tarjota biomassan tuotannon ohessa ympäristöhyötyjä esimerkiksi hiilen sidonnan, maanpuhdistuksen, jätevesien suodatuksen, hulevesien säätelyn ja ravinteiden kierrätyksen muodossa sekä monimuotoisuuden ylläpitäjänä.

Energiapajujen kasvatusta polttohakkeeksi on koettu kannattamattomaksi. Viljelijöiden ansaintamahdollisuuksia voitaisiin ehkä parantaa siten, että suunnataan biomassan tuotanto ja käyttö korkeamman lisäarvon tuotteisiin, hyödynnetään biomassaa kaikilta osiltaan ja samalla käytetään kasvavia pajuja ympäristön kannalta hyödylliseen toimintaan. Yhteiskunnallisten hyötyjen tuottaminen pajun kasvatuksessa voisi mahdollistaa julkisten tai markkinapohjaisten kannustimien käyttöönoton, joka osaltaan voisi parantaa tuotannon kannattavuutta.

Tämän raportin keskeinen tavoite on tarkastella lyhytkiertopajun viljelyn mahdollisuuksia ja tuotetun raaka-aineen kokonaisvaltaista hyödyntämistä ja siten kestäväen biokiertoalouden monipuolistamista. Raportissa tehdään katsaus pajun biologisiin ominaisuuksiin, lyhytkiertoviljelyn perusteisiin, riskeihin ja kannattavuuteen. Lisäksi tarkastellaan pajuviiljelmien ympäristövaikutuksia ja mahdollisia ympäristöhyötyjä. Pajun raaka-aineominaisuuksia ja käyttömahdollisuuksia tarkastellaan nostoen esiin uusimpia tutkimustuloksia ja sovellusmahdollisuuksia. Lopuksi tarkastellaan pajun kokonaisvaltaista käyttöä biojalostuksessa ja jalostamojen toimintaedellytyksiä, nojautuen Luken asiantuntija-arvioihin, sillä kannattavuustarkastelujen pohjaksi ei ole vielä saatavilla ylös-skaalattuja esimerkkejä.

2. Pajun (*Salix* L.) suku ja tärkeimmät biomassapajulajit Suomessa

Anneli Viherä-Aarnio

2.1. Pajujen yleisiä piirteitä

Pajun (*Salix* L.) suku on hyvin suuri, siihen arvioidaan kuuluvan noin 450 lajia (Christenhusz ym. 2017), joskin arviot lajien määrästä vaihtelevat suuresti pajujen risteytymisen ja lajinsisäisen muuntelun vuoksi. Pajun suku kuuluu pajukasvien heimoon (Salicaceae) yhdessä poppelien (*Populus* L.) kanssa. Pajut ovat puuvartisia kasveja, joiden kasvutapa ja koko vaihtelee paljon lajien välillä. Suurimmat pajulajit voivat kasvaa yli 30-metrisiksi puiksi, kun taas pienimmät ovat tuskin kymmensenttisiä maanmyötäisiä varpuja. Valtaosa pajuista on kuitenkin 1–5 metrin korkeisia pensaita tai pieniä puita (Christenhusz ym. 2017).

Pajun suvun levinneisyys keskittyy pohjoisen pallonpuoliskon lauhkeaan ja viileään ilmasto-vyöhykkeeseen, kun taas eteläisellä pallonpuoliskolla kasvaa alkuperäisenä vain yksi pajulaji, humboldtinpaju (*Salix humboldtiana*) (Viherä-Aarnio & Hytönen 2020a).

Useimmat pajulajit kukkivat varhain keväällä, Suomessa huhti-kesäkuussa. Pajut ovat pääosin kaksikotisia ja hyönteispölytteisiä. Pajujen pienet siemenet voivat lenninkarvojensa turvin lentää tuulen mukana pitkiäkin matkoja. Pajut leviävät ja uudistuvat tehokkaasti myös oksien tai vukkaista ja vesomalla. Jokien varsilla kasvavat lajit leviävät myös katkenneista oksista virran kuljettamina (Budde ym. 2011). Pajut ovat pioneerikasveja, jotka suosivat avoimia, kosteita kasvupaikkoja sekä ihmisen toiminnan paljastamaa maata. Useimmat niistä sietävät hyvin tulvaa (Glenz ym. 2006) ja viihtyvät vesistöjen varsilla sekä tulvarannoilla.

Metsätaloudellista merkitystä on puumaisilla ja kookkaiksi kasvavilla pajuilla jokien suistoissa ja tulvaisilla alueilla, joilla muut puulajit eivät menesty. Esimerkiksi Argentiinassa, Paraná -joen suistoalueella harjoitetaan jalostettujen pajukloonien viljelyyn perustuvaa metsätaloutta, joka tuottaa puuta sekä mekaaniseen jalostukseen että sellu- ja paperiteollisuudelle (Cerrillo ym. 2018, Viherä-Aarnio & Hytönen 2020b). Pajuja käytetään myös jokirantojen ja rinnemaiden eroosion torjunnassa (Wilkinson 1999) (Kuva 1) sekä peltometsätalous (agro-forestry) -puina, jolloin ne voivat tuottaa polttopuuta, rehua, rakennus- ja huonekalupuuta (Gupta ym. 2014).



Kuva 1. Jokirannan eroosion torjumiseksi istutettuja kookkaita pajupistokkaita. Paraná-joen suisto, Argentiina (vas.). *Salix matsudana* × *alba* -kloonin 6-vuotias pajuviiljelämä, jonka puut ovat 15–20 metrin pituisia. Puut on karsittu 5–6 metrin pituuteen. El Milagro, Cipoletti, Rio Negro, Patagonia (oik.). Kuvat: Anneli Viherä-Aarnio.

2.2. Suomen kotimaiset pajulajit biomassapajuina

Suomessa kasvaa alkuperäisinä 21 pajulajia, 6 alalajia ja lukuisia lajien välisiä risteymiä. Pajuille ominaisen helpon risteytymisen seurauksena voi tavata yksilöitä, joilla on kolmen tai neljänkin kantalajin tuntomerkkejä (Väre ym. 2021), mikä tekee pajujen lajinmäärityksen joissakin tapauksissa vaikeaksi. Luonnonvaraisten pajujemme joukkoon mahtuu pajun suvun kasvutapojen ja mittojen koko kirjo maata myöden suikertavista varvuista kookkaisiin pensasiin ja puihin. Puumaisiksi kasvavina mainitaan tavallisesti raita (*S. caprea*) ja viitahalava (*S. pentandra*), mutta myös mustuvapaju (*S. myrsinifolia*), talvikkipaju (*S. pyrolifolia*) ja jokipaju (*S. triandra*) voivat joskus olla pieniä puita (esimerkkejä kotimaisista lajeista kuvassa 2).

Useimmat kotimaiset lajit esiintyvät jokseenkin yleisinä koko maassa tai siten, että niiden levinneisyysalue painottuu joko Etelä- ja Keski-Suomeen tai Pohjois-Suomeen (Väre ym. 2021). Kotimaisten pajujen joukkoon mahtuu myös ääriharvinaisuuksia, kuten rauhoitettu talvikkipaju.

Biomassapajuina kiinnostavimpia ovat pysty- ja nopeakasvuiset sekä voimakkaasti vesovat lajit. Nopeakasvuisten energiapajujen etsinnät 1970-luvulla tuottivat tulokseksi klooneja seuraavista kotimaisista lajeista: raita, tuhkapaju (*S. cinerea*), mustuvapaju, viitahalava, kiiltopaju (*S. phyllicifolia*) ja jokipaju (Viherä-Aarnio 1989). Seuraavassa nostetaan esiin niiden joitakin huomionarvoisia erityispiirteitä. Kotimaisten pajulajien diversiteetti on suuri, ja myös lajeilla, joita ei tässä mainita, voisi olla potentiaalia arvokemikaalien lähteinä tai risteytysjalostuksessa, jos esimerkiksi pyritään lisäämään näiden yhdisteiden pitoisuuksia tai parantamaan resistenssiominaisuuksia viljelypajuissa.

Raita on todennäköisesti kotimaisista pajulajeista nopeakasvuisin. Sen kantovesat voivat kasvaa yli 3-metriseksi yhden kasvukauden aikana (Heino 1983). Raita voi kasvaa hyvin monenlaisilla kasvupaikoilla, mutta se suosii kalkkipitoisia maita (Enescu ym. 2016). Raita viihtyy muita pajulajeja kuivemmilla kasvupaikoilla ja sietää heikommin pysyvää tulvaa ja veden kyllästämää maata (Talbot ym. 1987). Raidalla on kyky kerätä itseensä maasta raskasmetalleja (Cd ja Zn), ja sitä voidaan käyttää saastuneiden maiden puhdistamiseen (Enescu ym. 2016 viitteinen). Raidalla on laaja ja erityisen hyvin kehittynyt hienojuuristo, minkä ansiosta se on eroosiolle herkällä rinteillä keskeinen maansitoja (Enescu ym. 2016 viitteinen). Raita on hirven suosima ravintokasvi (Seiskari 1956). Raita ja sen hybridit ovat myös alttiita lehtikuusen-raidankeltaruosteelle (*Melampsora caprearum*). Raidan käytön biomassaviljelmillä on estänyt sen pistokkaiden heikko juurtuvuus.

Viitahalava on puu tai kookas, tavallisesti 2–14 metrin korkuinen pensas. Viitahalavan kasvupaikkoja ovat rannat, kosteat ja runsasravinteiset metsät, lehto- ja lettokorvet, mären niittyajat ja tienvarret. Halava sietää erittäin hyvin tulvaa ja kasvupaikan märkyyttä (Glenz ym. 2006). Muiden kasvupaikkavaatimustensa suhteen se on melko indifferentti tai lievästi emäksisyyttä suosiva (Jonsell 2000). Tosin sen mainitaan kasvavan myös happamilla (pH 4.5) turvemilla (Stott 1984, viitattu julkaisussa: Pohjonen 1991).

Mustuvapaju on kotimaisista lajeista saanut eniten huomiota mahdollisena biomassapajuna (Lumme & Törmälä 1988, Honkanen 1994, Pohjonen 2015). Mustuvapaju on tavallisesti 1–6 metrin korkuinen pensas. Mustuvapaju sietää hyvin tulvaa ja kasvupaikan märkyyttä (Glenz ym. 2006). Maaperän happamuuden suhteen se on indifferentti (Jonsell 2000). Mustuvapaju tunnetaan korkeista fenoliglykosidien, erityisesti salisiinin ja salikortiinin, pitoisuuksista (Julkunen-Tiitto 1986, Galambosi & Jokela 2009), mikä tekee siitä myös potentiaalisen arvokemikaalien lähteen. **Tuhkapaju** on pystykasvuinen, yleensä 2–4 metrin korkuinen pensas. Energiametsäkokeissa se ei osoittautunut erityisen lupaavaksi (Pohjonen 1991), mutta huomionarvoista on sen menestyminen kosteilla ja märilläkin kasvupaikoilla ja erityisen hyvä tulvansietokyky (Glenz

ym. 2006). Se voi kasvaa turve-, savi-, hiekka- sekä soramailla, ja ravinteisuuden suhteen keski- ja runsasravinteisilla mailla (Jonsell 2000). **Kiiltopaju** kasvaa yleensä 0,5–3 metrin korkuiseksi pensaaksi. Kiiltopaju on maamme yleisin pajulaji ja sopeutunut hyvin monenlaisille kasvupaikoille. Maaperän happamuuden suhteen se on indifferentti. Biomassapajuna kiiltopaju on osoittautunut lupaavaksi, esimerkiksi Haapaveden Piipsannevalla se ylsi 7,9 tn/ha/v keskimääräiseen kuiva-ainetuotokseen tavallista pidemmällä 10 vuoden kiertoajalla (Hytönen & Saarsalmi 2009, ks. kappale 4.4). **Jokipaju** on tavallisesti 2–5 metrin korkuiseksi kasvava pensas. Jokipaju on hyvin tulvaa sietävä avointen jokirantojen paju, jota kasvaa meillä luonnonvaraisena Pohjois-Suomen suurten jokien varsilla. Sitä on myös viljelty punontapajuna. Jokipaju on erittäin hyvä juurtumaan. Jokipajun kuiva-ainetuotos Haapaveden Piipsannevalla oli keskimäärin 6,2 tn/ha/v viiden kasvukauden ajalla (Hytönen ym. 1995, ks. kappale 4.4).



Kuva 2. Kotimaisia pajulajeja. Yläriivi: raita (vas.), viitahalava (oik.), keskirivi: talvikkipaju (vas.), tunturipaju (*S. glauca*) (oik.), alarivi: lettopaju (*S. myrsinites*) (vas.) ja jokipaju (oik.). Kuvat: Anneli Viherä-Aarnio.

2.3. Ulkomaiset biomassapajulajit

Energiametsätutkimusten alkaessa 1970-luvulla nopeakasvuisten pajujen etsijöiden huomion saivat erityisesti maahamme aiemmin tuodut punontapajut pitkine nopeakasvaisine vesoineen (ks. luku 3). Lisäksi energiametsäkokeiluihin tuotiin lisää ulkomaisia aineistoja etenkin Ruotsista, ja lisäksi mm. entisestä Neuvostoliitosta. Tärkeimmät biomassapajuina Suomessa viljellyt lajit ovat koripaju (*S. viminalis*), siperianpaju (*S. schwerinii*) ja vannepaju (*S. dasyclados*). Myös nykyisin saatavilla olevat jalostetut kaupalliset kloonit perustuvat näiden lajien perimään.

Koripaju (*S. viminalis*) on pystykasvuinen, tavallisesti 2–6 metrin korkuinen pensas tai joskus pieni puu. Korkein Suomessa mitattu koripaju on 10-metrinen (Kauppila ym. 2021). Koripajun vesat ovat pitkiä ja notkeita, mistä syystä se on ollut tärkeä punontapaju. Lyhytkiertoviljelykokeissa ja käytännön viljelyksissä se on myös ollut yksi tuottoisimmista vannepajun ohella (Ferm 1985). Koripajun levinneisyys ulottuu Keski- ja Kaakkois-Euroopasta pitkälle Siperiaan (Väre ym. 2021). Koripaju on ollut viljelyssä niin pitkään, että villin luonnonpajun levinneisyyttä ei voida varmuudella sanoa. Koripajun kasvupaikkoja luonnossa ovat jokien ja järvien tulvaiset ja ravinteiset rannat. Myös koripaju sietää hyvin tulvaa (Glenz ym. 2006). Koripaju on keskeinen biomassapaju, ja esimerkiksi Ruotsin energiapajujen jalostusohjelma perustuu pitkälti koripajuun. Myös Suomessa se oli yksi lajiristeytyksissä käytetyistä lajeista.

Siperianpaju (*S. schwerinii*) on koripajua puumaisempi, yleensä 4–8 metrin korkuiseksi kasvava pensas tai useimmiten pieni puu. Sen Suomessa mitattu ennätyskorkeus on 10,3 m. Sille on ominaista pysty kasvutapa, mikä on koneellisesti korjattavan biomassapajun toivottava ominaisuus. Siperianpaju esiintyy luonnonvaraisena Itä-Siperiassa ja Kaukoidässä, Baikalista itään, Kamtsatkalla ja Japanissa, missä sen kasvupaikkoja ovat jokien hiekka- ja sedimenttisärkät ja rantakasauamat. Siperianpaju on sopeutunut mantereiseen ilmastoon. Ruotsin pajunjalostusohjelmassa siperianpajua on käytetty sen edullisen kasvutavan vuoksi, sekä parantamaan ruosteenkestävyyttä. Siperianpaju ja sen risteytysjälkeläiset ovat olleet aineistoina biohiilitutkimuksissa (Rasa ym. 2021, ks. kappale 6.1.1).

Vannepaju (*S. dasyclados*) on yleensä 3–6 metrin korkuinen, leveäkasvuinen pensas tai pieni puu, jonka suurin mitattu yksilö Suomessa on 10,2-metrinen. Tämän tärkeän punontapajun ja energiapajun taksonomiassa ja nimistössä on hieman sekavuutta, ja siitä on käytetty myös nimeä *S. burjatica* (Pohjonen 1991) ja *S. gmelinii* (Väre ym. 2021). **Vesipaju**, josta on ollut käytössä erilaisia merkintätapoja, kuten esimerkiksi *S. cv. Aquatica*, *S. 'Aquatica'* ja *S. 'Aquatica Gigantea Korso'*, on vannepajun hedeklooni (Larsson 1995, Väre ym. 2021). Tämä kuuluisa vesipajuklooni tuotiin Suomeen Tanskasta 1950-luvun alussa, kun puunjalostusteollisuudessa oltiin kiinnostuneita raaka-aineen tuottamisesta lyhytkiertoviljelyn periaatteella (Hagman 1976). Vesipajusta tuli sittemmin tärkeä energiapajuviljelmien koekasvi. Se olikin nopeakasvuinen ja hyvin tuottoisa. Osoittautui kuitenkin, että se on altis pajunruosteelle eikä ole kestävä esim. Pohjanmaan turvesuonpohjilla (Hytönen & Saarsalmi 2009). Lisäksi sen leveä ja osittain lamoava kasvutapa on haittana koneellisessa korjuussa.

Tässä raportissa käytetään jatkossa, viitattaessa aiempiin tutkimuksiin, vanne- ja vesipajusta alkuperäisissä tutkimusjulkaisuissa käytettyjä laji- ja lajikenimiä. Näiden keskeisten biomassapajujen taksonomia on edelleen selvityksen kohteena, ja esimerkiksi Suomen puu- ja pensaskasviossa (Väre ym. 2021) oleva vannepajusta käytetty nimi on vielä tarkistettavana (Väre 2022).

3. Pajujen perinteinen käyttö

Anneli Viherä-Aarnio

Pajujen notkeiden ja pitkien **vesojen** käyttö erilaisiin punonta- ja sidontatöihin on yksi pajujen vanhimpia käyttömuotoja jo Rooman valtakunnan ajalta (Makkonen 1975). Pajukorit olivat tärkeitä kappaletavaran kuljetuksessa ja kaupankäynnin kehittymisen edellytys. Korinpunonta oli Euroopassa merkittävä elinkeino viime vuosisadan alkupuolelle asti (Ilén 2004). Pajua myös viljeltiin monissa Euroopan maissa. Johtavia maita olivat Ranska, Saksa ja Hollanti. Esimerkiksi Ranskassa oli 100 000 ha pajuviljelmää vuonna 1909 (Nordberg 1928).

Myös Suomessa on tehty aloitteita kotimaisen punontamateriaalin tuottamiseksi pajuviljelmillä (Flinta 1882, Nordberg 1928, Tapio 1965). Suomessa päre ja tuohi olivat tärkeimmät punontamateriaalit, eikä pajulla ei ollut yhtä suurta merkitystä lukuun ottamatta Pohjanmaata, jonne syntyi korimestarien ylläpitämä pohjalainen kopantekoperinne (Ilén 2004). Suomessa on käytetty paljon luonnonpajua, kuten kiiltopajua, tuhkapajua, virpajua (*S. aurita*) ja mustuvapajua (Rajala 1987). Käsityöpajun suunnitelmalliseen viljelyyn siirryttiin koritavaran määrä- ja laatuvaatimusten kasvaessa (Ilén 2004). Punontapajulta edellytettiin, että sen vesat olivat hienoja ja sitkeitä sekä helppoja kuoria ja halkaista. Lisäksi pajun piti tuottaa huononlaisessakin maassa ja tiheästi istutettuna riittävä sato mahdollisimman hoikkia, oksattomia vesoja. Punontapajuna viljeltiin harvoja, tarkoin tunnettuja lajeja kuten jokipaju, koripaju, punapaju (*S. purpurea*) ja valkosalava (*S. alba*) (Nordberg 1928). Pajuista on tehty koreja, pullokoreja, rasioita, astioita, tarjottimia, korituoleja, kalanpyydyksiä ja erilaisia taidekäsitöitä. Hienoimpiin punontatöihin sopivat mm. punapaju ja jokipaju, kun taas karkeampiin punontatöihin ja vanteiksi sopivat vannepaju, huurrepaju (*S. acutifolia*), koripaju ja mesipaju (*S. × smithiana*) (Tapio 1965).

Viime vuosikymmeninä erilaisten luonnonmateriaalien arvostus on kasvanut ja sen myötä pajun käyttö käsi- ja taideteollisuudessa, sisustus- ja koristemateriaalina sekä erilaisissa puutarhakaranteissa. Punontatöiden suosio on kasvanut, ja hyvälaatuisesta punontapajusta on ollut pulaa (Ilén 2004). Viimeisin laaja punontapajun kasvatuskokeilu tehtiin käsityöpajun tuotannon ja jalostuksen kehittämishankkeessa Pohjois-Savossa, jossa kokeiltiin kaikkiaan 300 paju-taksonin kasvatusta (Ilén 2001).

Pajujen **kuorta** on käytetty perinteisesti nahan parkitsemiseen (Laakso 2017). Pajun kuorella on parkittu kaikkien hienoimpia nahkoja, koska se tekee nahat erittäin pehmeiksi ja kauniin värisiksi (Tapio 1965). Värjäyksessä pajun kuorella saadaan aikaan erilaisia ruskean sävyjä (ks. kappale 6.2). Pajun kuoresta ja lehdistä tehdyllä keitoksella on hoidettu tulehduksia ja lievitetty kipuja jo tuhansien vuosien ajan (ks. kappale 6.2).

Pajun **lehtiä** on käytetty kotieläinten ravintona mm. keräämällä lampaille kerppuja talveksi. Lehtimassa sisältää runsaasti kivennäisaineita ja raakavalkuaista, mutta pajunlehtien korjuu ja säilöntä on hankalaa (Näsi & Pohjonen 1981). Luonnossa monet pajulajit ovat tärkeitä ravintokasveja riistaeläimille, kuten hirvälle, jäniksille ja riekolle (Seiskari 1956).

Pajujen **puuaine** soveltuu moniin tarkoituksiin. Suomessa puumaiseksi kasvavista pajuista raita on käytännössä ainoa, jolla voisi olla käyttöä perinteisessä puunjalostuksessa. Se jää kuitenkin yleensä kooltaan pieneksi ja tekniseltä laadultaan heikoksi nopean ränsistymisen ja lahovikojen vuoksi. Raidasta on valmistettu erilaisia käyttöesineitä, pakkauslaatikoita, lippaita, puukenkiä, aidaksia, työkalujen varsia sekä hammastikkuja, ja sitä on käytetty myös vanerin sokkopuuna ja massateollisuudessa (Fagerstedt ym. 2016). Raidan juuripahkat ovat erityisen arvostettuja koriste-esineiden raaka-aineena.

4. Pajun lyhytkiertoviljely

4.1. Pajun lyhytkiertoviljelyn tutkimus Suomessa

Anneli Viherä-Aarnio

Lyhytkiertoviljelyllä tarkoitetaan nopeakasvuisten, vesasyntyisesti uudistuvien lehtipuulajien kasvattamista lyhyin kiertoajoin tiheässä kasvatusasennossa ja käyttämällä tehokkaita maanmuokkaus-, pintakasvillisuuden torjunta- ja lannoituskäsittelyjä (esim. Hytönen ym. 1985, Pohjonen 1995, Hytönen 1996). Työvaiheet on koneellistettu pitkälle. Lyhytkiertoviljelyllä tavoitellaan mahdollisimman suurta biomassan tuotosta lyhyellä kiertoajalla. Suomessa kiinnostus metsäpuiden lyhytkiertoviljelyyn virisi 1970-luvun alussa, kun öljyn hinnan nousu loi tarpeen löytää kotimaisia uusiutuvia energialähteitä (Hakkila ym. 1978, Hakkila 1985).

Pajuilla on monia lyhytkiertoviljelyn kannalta edullisia ominaisuuksia (ks. kappale 4.3.1), ja siksi ne saivat keskeisen roolin 1970-luvulla käynnistyneissä ja myöhemmissäkin tutkimuksissa, joita on maassamme ollut useita (esim. Pohjonen 1974, Hakkila ym. 1978, Hakkila 1985, Lumme ym. 1984, Tahvanainen 1995). Aiemmat tutkimukset ovat tuottaneet runsaasti tietoa pajun lyhytkiertoviljelmien perustamisesta ja hoidosta, viljelyaineistoista, tuotoksesta, riskeistä, korjuusta ja kannattavuudesta. Myös Ruotsissa tehdyn energiapajututkimuksen tulokset ovat suurelta osin sovellettavissa Suomeen.

Myöhemmissä, 2000-luvun tutkimuksissa on keskitytty alkutuotannon sijasta pajujen raaka-aineominaisuuksiin ja käyttöön. Merkittävä avaus oli VTT:n ja Aalto-yliopiston yhteisprojekti ”Pajubiomassan rakenteen hallittu purkaminen”, jossa tutkittiin pajun rakennetta ja kemialla sekä nykyistä tehokkaampaa hyödyntämistä vuosina 2014–2015. Pajun käyttöä biohiilen ja muiden pyrolyysituotteiden raaka-aineena, komposiiteissa sekä pajunkuoren kemialla ja bioaktiivisia ominaisuuksia on tutkittu viime vuosina aktiivisesti sekä Lukessa että muissa tutkimusorganisaatioissa. Turvepeltojen hiilipäästöjen vähentämiseen tähtäävässä kosteikkoviljelytutkimuksessa paju on yksi koekasvi.

4.2. Pajunviljelyn pinta-alat

Paula Jylhä ja Anneli Viherä-Aarnio

Useista pajunviljelyn tutkimus- ja edistämishankkeista huolimatta pajun kasvatusta ei ole Suomessa saanut pysyvää suosiota, vaan viljelyinnostus on kausittain syntynyt ja jälleen laantunut. Heino ja Hytönen (2016) selvittivät pajun viljelypinta-alaa Suomessa ja Euroopan maissa sähköposti- ja puhelinkyselynä vuonna 2015.

Ruotsi on pajunviljelyn johtava maa Euroopassa. Siellä ensimmäiset kaupalliset pajuviljelmät perustettiin 1980-luvun puolivälissä. Pajun viljelyala oli suurimmillaan 16 000–17 000 ha, mutta se oli vähentynyt noin 10 000 hehtaariin vuoteen 2015 mennessä (Heino & Hytönen 2016). Myös Tanskassa (4 500 ha) ja Britanniassa (4 100 ha) pajua on viljelty melko paljon ja Latviasakin runsaat 1 600 ha, kun taas Virossa pajuviljelmien pinta-ala oli vain noin 50 ha (Heino & Hytönen 2016). Ruotsissa energiapajun tuotannon volyyymi on vaihdellut voimakkaasti riippuen pajunviljelyyn saatavilla olleesta tuesta, ja energiaverotus on puolestaan vaikuttanut biopolttoaineiden kysyntään (Mola-Yudego & Pelkonen 2008).

Pajun viljelypinta-ala Suomessa oli vuonna 2015 vain murto-osa Ruotsin viljelmiin verrattuna, Heinon ja Hytösen (2016) arvion mukaan kaikkiaan 110 ha. Viljelmät sijaitsivat Oulun eteläpuolisessa osassa maata ja olivat kooltaan alle puolesta yli viiteen hehtaariin. Kiinnostus pajua kohtaan on lisääntynyt sen raaka-aineominaisuuksien ja uusien käyttömuotojen sekä uusiutuvan energian käyttöä edistävän ilmastopolitiikan myötä (Heino & Hytönen 2016). Suomen tämänhetkistä pajunviljelyn pinta-alaa ei tiedetä tarkasti. Energiapajun viljelylle haettiin tukea vuosina 2015–2020 yhteensä noin 160 hehtaarille (Häggvik, U.-E., Pohjanmaan ELY-keskus, sähköposti 4.6.2021). Pajupistokkaita tuottavasta yrityksestä saatu arvio tämänhetkisestä pajunviljelypinta-alasta on 70 ha (Suutari, M., Carbons Finland Oy, sähköposti 29.9.2021).

4.3. Pajuviljelmän perustaminen ja kasvatuksetjut

4.3.1. Viljelyaineisto

Anneli Viherä-Aarnio

Lyhytkiertoviljelmällä kasvatettavan pajun tulee olla viljelypaikan ilmastoon sopeutunut sekä taudin- ja tuholaisien kestävä. Sen tulee sietää toistuvia korjuita ja vesoa voimakkaasti korjuun jälkeen, kasvaa nopeasti sekä tuottaa hyvin ja halutunlaista biomassaa. Pajun vesojen kasvutavan pitää olla pysty, jotta koneellinen korjuu sujuu vähäisin vaurioin. Viljelyyn käytettävien pistokkaiden pitää juurtua hyvin. Lisäksi viljeltävän pajukloonin pitää olla kyseiselle kasvupaikalle sopiva, mitä tulee maan ravinteisuuteen, happamuuteen ja märkyyteen. Pajulajien ja -kloonien välillä on suuria eroja kaikissa edellä mainituissa ominaisuuksissa (esim. Lepistö 1978, Viherä-Aarnio 1987, Lumme & Törmälä 1988, Glenz ym. 2006).

Lyhytkiertopajujen viljelyaineistoa on Suomessa hankittu sekä kotimaisilla keräyksillä että tuomalla pajuklooneja ulkomailta (Lepistö 1978, Pohjonen 1991). Keräysten tuloksena koottiin satoja klooneja kotimaisista lajeista ja aiemmin punontapajuiksi tuoduista lajeista (ks. kappaleet 2.2 ja 2.3). Tutkimustarkoituksiin pajuklooneja on tuotu pääasiassa Ruotsin energiametsäohjelmasta, mutta myös entisestä Neuvostoliitosta. Käytännön viljelmien perustamiseen on nykyisin saatavilla kaupallisia ruotsalaisia pajulajikkeita.

Lyhytkiertopajujen viljelyaineistojen kestävydestä ja tuotoksesta kivennäismaapelloilla ja turvesuonpohjilla on kertynyt tietoa useassa aiemmassa tutkimushankkeessa. Pohjonen (1991, 2015) on tehnyt kattavat katsaukset Suomessa tehtyihin lajikekokeisiin.

Lajiketesteissä ja viljelmillä on kokeiltu periaatteessa neljänlaista aineistoa: 1) nopeakasvuisia, eteläistä alkuperää olevia koripaju- ja vannepajuklooneja, joiden tuotos on korkea, mutta talvenkestävyys heikko, 2) kotimaisten mustuvapajun ja kiiltopajun klooneja, jotka ovat hyvin sopeutuneita ilmastoon, mutta niiden alkukehitys on hidasta ja siksi ne vaativat pidemmän kiertojen, 3) Ruotsin pajunjalostusohjelmassa risteyttämällä kehitettyjä kaupallisia klooneja, joiden menestymisestä pohjoisemmassa Suomessa on vielä melko vähän tietoa, sekä 4) Metsän-tutkimuslaitoksessa 1980-luvulla tehdyistä lajiristeytyksistä saatuja jälkeläistöjä ja klooneja.

Eteläiset **koripajukloonit** ovat kasvupaikan suhteen vaativia. Ne ovat tuotokseltaan hyviä vain Etelä-Suomen hyvillä peltomailla, pohjoisempana ne eivät menesty, ja turvemailla ne vaativat maaperän pH:n nostamisen kalkituksella ja voimakkaan lannoituksen. **Vannepajukloonit** sekä **vesipajuna** myös tunnettu klooni E4856 antoivat aluksi ennätysmääriä, kuten esimerkiksi klooni E4856 Rovaniemen Apukassa, mutta sitten klooni paleltui kantoja myöden (Pohjonen 1974). Vannepajut osoittautuivat sittemmin alttiiksi ruosteelle (*Melampsora epitea*), joka heikentää

myös talveentumista, joten vannepajujen käytöstä biomassaviljelmillä luovuttiin. Eri pajuklooneilla saavutettuja kuiva-ainetuotoksia on koottu taulukoihin 1 ja 2 (kappale 4.4.). On huomattava, että pieniltä, hoidetuilta koeruuduilta saadut tuotostulokset antavat usein käytännön viljelmiin nähden yliarvioita.

Pohjoisempaan Suomessa nopeakasvuiset eteläiset koripajualkuperät eivät ole kestäviä sikäläisessä ilmastossa vaan paleltuvat, ja niiden elävyys ja tuotos jää heikoksi. Limingan Hirvinevalla (64°42'N, 25°20'E) niin kävi kaikille 300 Ruotsista saadulle koripajukloonille. Nopean kasvun ja korkean tuotoksen taustalla on syksyllä pitkään jatkuva kasvu ja liian myöhäinen talveentuminen. Lumme & Törmälä (1988) osoittivat, että nopean kasvun ja vesojen talvenkestävyyden välillä oli merkitsevä negatiivinen riippuvuus.

Kotimainen mustuva- ja kiiltopaju olivat paikalliseen ilmastoon sopeutuneita, talveentuivat ajoissa ja välttyivät pakkasvaurioilta, mutta niiden tuotos jäi pienemmäksi Limingan Hirvinevalla (Lumme & Törmälä 1988). Pohjonen (1991, 2015) päätyikin suosittelemaan mustuvapajun kasvatusta pohjoisilla alueilla. Kiiltopajun kasvu oli erittäin hyvä Haapaveden Piipsannevalla (64°06'N, 25°36'E), 10 vuoden kiertoajalla sen kuiva-ainetuotos oli 7,9 tn/ha/v, kun taas vannepajukloonit (P6011, E4856) olivat tuhoutuneet kokeen aikana tyystin (Hytönen & Saarsalmi 2009).

Kotimaisista pajuklooneista muodostunut 'Jysky' syntyi, kun Kannuksesta Joensuuhun ja edelleen Jyskyn ja Siikasalmen tilalle lähetetyt 60 parhaaksi arvioitua kloonien menivät monistusvaiheessa sekaisin. Tuloksena oli mustuva- ja kiiltopajun sekoitus, josta käytetään toisinaan nimitystä lajike, mutta se ei kuitenkaan ole virallinen, rekisteröity lajike.

Mantereisesta ilmastosta Itä-Siperiasta peräisin oleva siperianpaju on osoittautunut meillä alttiiksi kevähallolle ja jänikselle hyvin kelpaavaksi (Pohjonen 2015). Suomeen on tuotu kolmea erilaista siperianpajukantaa: Olavi Luukkasen Amur-joelta tuoma, Lauri Kärjen tuoma kloonit SU8955 ja Voronezin kanta, 'Amgunkskaja'.

Suomeen on tuotu lajike- ja viljelykokeisiin sekä käytännön viljelmille pidemmälle kehitettyjä lajikkeita sitä mukaa kun Ruotsin pajunjalostusohjelma on edennyt. Viime vuosina aloitetuista biomassapajuviljelmistä suurin osa on perustettu juuri näillä kaupallisilla klooneilla. Niiden menestymisen ja käyttömahdollisuuksien ymmärtämiseksi Suomessa on syytä valottaa niiden jalostamistyön taustaa:

Ruotsissa energiaviljelmillä kasvatettavien puulajien valinta ja jalostus suunnattiin vuonna 1984 koskemaan vain sen lupaavinta osaa: **pajujen** kasvatusta **peltomailla Etelä-Ruotsissa** (Gullberg 1988). Ohjelma keskittyi koripajuun, mutta myös vannepajua pidettiin lupaavana. Aluksi Ruotsin pajunjalostusohjelma painottui ruotsalaiseen ja keskieurooppalaiseen aineistoon, mutta geneettistä taustaa laajennettiin keräämällä aineistoa Venäjältä, Kirovin alueelta sekä Siperiasta Novosibirskistä ja Amurilta. Keräykset sisälsivät koripajun klooneja ja lisäksi sen lähisukulaista, siperianpajua. Näiden lajien välisillä risteytyksillä on pyritty yhdistämään eri lajien toivottuja ominaisuuksia ja samalla saamaan aikaiseksi heteroosia (Åhman & Larsson 1994). Ohjelmassa on tuotettu suuri määrä erilaisia yhdistelmiä siten, että toisena vanhempana oli biomassaviljelmillä hyvin menestyneeksi tiedetty kloonit ja toisena Keski-Euroopan ja Venäjän keräyksistä saatu kloonit.

Jalostusohjelmassa on keskitytty seuraavien ominaisuuksien parantamiseen: korkea ja stabiili biomassan tuotos, resistenssi pajuruosteelle (*Melampsora epitea*), resistenssi lehtikuoriaisia vastaan (pajunviherkalvaja (*Phratora vitellinae*), isoviherkalvaja (*P. vulgatissima*), pajunälvikäs (*Galerucella lineola*)), pakkasenkestävyys sekä sopeutuminen lämpimille ja kuiville viljelymaille.

Ruosteen- ja talvenkestävyyttä on lisätty käyttämällä risteytyksissä erityisesti siperianpajun 'Amgunskaja' -kloonina, joka löytyikin useiden nykyisten kaupallisten kloonien sukupuusta. Testaustoiminta keskittyy Etelä-Ruotsiin, pohjoisin toimintapaikka on kloonikokoelma Lännäsissä Ångermanlandissa, noin Tukholman korkeudella (Gertsson, B., Lantmännen Ab, sähköposti 24.9.2021). Ruotsissa pajunjalostus on ollut kaupallista toimintaa vuodesta 1987. Lantmännen Ab tekee lajikekehitystä, ja Salix Energi Europa (SEE) hoitaa pistokastuotannon ja markkinoinnin (Gertsson, B., Lantmännen Ab, suull. 27.5.2016). Vuonna 2011 perustettiin myös toinen pajun jalostusta tekevä yhtiö, European Willow Breeding (EWB).

Salix Energi Europan myymistä kaupallisista ruotsalaisista klooneista voisivat periaatteessa olla Suomen oloihin sopivimpia ns. kolmannen sukupolven lajikkeet, joiden kehittämisessä on erityisesti kiinnitetty huomiota kestävyyteen ja käytetty jonakin risteytysvanhempana joko siperianpajun 'Amgunskajaa' tai Kirovin alueelta peräsin olevaa kloonina (Pohjonen 2015). Suomalaisissa tutkimuksissa ovat olleet mukana mm. kloonit 'Karin' ja 'Klara' (Kuva 3), joiden sukupuussa on myös kestävä 'Amgunskaja'. Kyseisillä klooneilla perustettiin Haapaveden Piipsannevan turvekentälle viljelykoe vuonna 2010 (Reinikainen ym. 2012), ja ne menestyivät aluksi hyvin neljän talvikauden yli, mutta korjuun jälkeen yksivuotiaat vesat kärsivät pahoja talvivaurioita (Hytönen J., suull. 28.10.2021). Vaikka uudet jalosteet menestyvätkin selvästi paremmin kuin aiemmin kokeillut kori- ja vannepajut, näyttää näidenkin aineistojen menestyminen epävarmalta Pohjanmaan turvekentillä.



Kuva 3. 'Klara'-lajike. Kuvassa 1-vuotiaita vesoja 2-vuotiailla juurilla Svalövissä, Ruotsissa. Kuva: Bo Gertsson

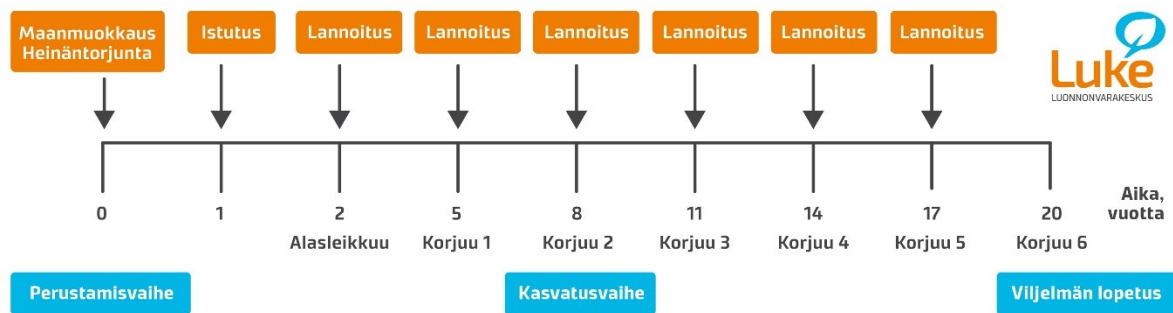
Myös Suomessa tehtiin biomassapajujen lajiristeytyksiä Metsäntutkimuslaitoksen PERA-projektissa 1980-luvulla. Tavoitteena oli saada aikaan uusia, aiempaa tuottoisampia klooneja sekä yhdistää eri lajien hyvä talvenkestävyys ja korkea tuotos lajien välisillä risteytyksillä (Viherä-Aarnio 1988). Ensin mainitussa tavoitteessa onnistuttiin, esimerkiksi koripajun ja raidan risteytysperheistä valitut kloonit olivat kloonikokeessa vanhempiaan nopeakasvuisempia Etelä-Suomessa (Viherä-Aarnio & Saarsalmi 1994). Pajujen risteyttäminen voidaan tehdä kasvihuoneessa hyötämällä lepotilaiset risteytysoksat kukkimaan. Myös tuloksia on mahdollista saada suhteellisen nopeasti verrattuna metsäpuihin. Pajuilla on monia muitakin jalostuksen kannalta edullisia ominaisuuksia (Viherä-Aarnio 1989).

4.3.2. Kasvupaikan valinta, viljelmän perustaminen ja hoito

Lasse Aro

Pellot

Pajun lyhytkiertoviljelyn lähtökohtana on, että pajuviljelämä perustetaan hyväkuntoiselle, viljavalle kivennäis- tai turvemaan pelloille, jonka happamuus on jo valmiiksi pajulle sopiva (pH 5,5–7,5 lajista riippuen; Tahvanainen 1995, Guidi ym. 2013, Caslin ym. 2015). Tarvittaessa pelto kalkitaan. Pajupistokkaiden istuttamista edeltävänä vuonna pelto muokataan ja pintakasvillisuus torjutaan kemiallisesti (esim. Tahvanainen 1995, Caslin ym. 2015) (Kuva 4). Pintakasvillisuuden kemiallinen torjunta voidaan joutua uusimaan vielä istuttamisvuonna, ja ehkä jopa pajujen alasleikkauksen jälkeenkin (Tahvanainen 1995). Myös pintakasvillisuuden mekaanisesta torjunnasta on saatu lupaavia tuloksia (Albertsson ym. 2016).



Kuva 4. Peltomaalla kasvatettavan pajuviljelmän vaatimat perustamis- ja hoitotoimet sekä sadonkorjuukierto.

Pintakasvillisuuden torjunta on tärkeä työvaihe, kun pajuviljelämä perustetaan peltomaalle, jossa pintakasvillisuuden kilpailu on voimakas. Kasvillisuus haittaa huomattavasti pajujen kasvua ja menestymistä etenkin alkuvuosina. Albertssonin ym. (2014a) mukaan pintakasvillisuuden torjunnan tekemättä jättäminen lisäsi pajun kuolleisuutta 37 % ja heikensi taimien kasvua jopa 93–96 % viljelmän perustamisvuonna. Ensimmäisen korjuusyklin aikana kuolleisuus oli 10–56 % suurempi ja biomassan tuotos 68–94 % alempi ilman torjuntaa (Albertsson ym. 2014b).

Pistokkaita (pituus 20 tai 40 cm) istutetaan koneellisesti 10 000–20 000 kpl/ha nykysuositusten mukaan (Pohjonen 1995, Tahvanainen 1995, Tahvanainen & Rytönen 1999, Mola-Yudego 2011, Caslin ym. 2015). Myös korkeampia istutustiheyksiä, jopa 40 000 pistokasta/ha, on käytetty, mutta istutustiheyden nostaminen ei juurikaan lisää tuotosta vanhemmissa kasvustoissa (Hytönen 1996). Yleensä pajupistokkaat istutetaan paririveihin, joiden väliin jätetään 1,5 metrin levyinen kasvutila ja korjuukäytävä. Jos istutusrivien etäisyys paririvissä on 75 cm, pistokkaiden etäisyys toisistaan 60 cm ja paririvien etäisyys toisistaan 1,5 m, tulee istutustiheydeksi noin 15 000 kpl/ha (Caslin ym. 2015).

Pajua täytyy lannoittaa typellä, fosforilla ja kaliumilla säännöllisesti. Hyvin kasvava pajukasvusto käyttää vuosittain typpeä 40–180 kg/ha, fosforia 6–34 kg/ha ja kaliumia 40–72 kg/ha pajulajista ja kasvuolosuhteista riippuen (mm. Tahvanainen 1995, Danfors ym. 1997, Perttu 1999, Tahvanainen & Rytönen 1999, Gonzalez-Garcia ym. 2012, Guidi ym. 2013, Caslin ym. 2015). Kun pajukasvusto perustetaan hyvälle peltomaalle, lannoitusta ei suositella perustamisvuodelle (Tahvanainen 1995, Danfors ym. 1997). Pajujen typen tarve on myös pienempi ensimmäisen

korjuukierron aloitusvuotena kuin kierron myöhemmässä vaiheessa (Tahvanainen 1995). Pajujen ravinteiden käyttöön ja korjuussa poistuvaan biomassaan suhteutettuna vuosittainen typen lannoitustarve on 24–140, fosforin 3–47 ja kaliumin 10–93 kg/ha pajulajin ja kasvuolosuhdeiden mukaan, jos pajun vuosituotos on 6,8 tn/ha (Guidi ym. 2013).

Käytännössä lannoitus on kuitenkin tehtävä kerralla teknisten syiden takia jokaisen kolmen tai neljän vuoden pituisen korjuukierron alussa (esim. Tahvanainen 1995), jolloin lannoitetyypen määrästä joudutaan hieman tinkimään. Tällöin typpeä levitetään hehtaarille 200 kg, fosforia 46 kg ja kaliumia 100 kg (Tahvanainen 1995, Danfors ym. 1997, Perttu 1999, Tahvanainen & Rytönen 1999, Gonzalez-Garcia ym. 2012, Guidi ym. 2013, Caslin ym. 2015; ravinnemääriä vastaavat kaupalliset lannoitemäärät, ks. liite 1). Nopeavaikutteisten lannoitteiden käyttöön liittyy riski vesistökuormituksen lisääntymisestä (ks. kappale 4.6). Yhdellä pistokassukupolvella saadaan kuudesta kahdeksaan satoa (Caslin ym. 2015), ja pajukasvuston kokonaisikä on 19–25 vuotta (Caslin ym. 2015). Lopuksi pajujen kannot ja juuret jyrsitään.

Kaupalliset lannoitteet voidaan korvata kierrätyslannoitteilla, kuten erilaisilla lietelannoilla (ks. kappale 5.4). Liete levitetään jokaisen kolmen tai neljän vuoden pituisen korjuukierron alussa. Lietteen käyttömäärä pajun kasvatuksessa perustuu tavoiteltavaan kokonaistypin määrään hehtaaria kohti. Lietteen käyttöä rajoittaa kuitenkin nitraattiasetuksen (1250/2014) mukainen vuotuinen maksimimäärä, joka on 170 kg kokonaistyppeä hehtaarille.

Suonpohjat

Tasaisina ja alavina alueina turvetuotannosta vapautuneet suonpohjat ovat hallalle alttiita kasvupaikkoja, mikä täytyy huomioida kasvatettavien pajujen valinnassa. Pajuviljelmän perustaminen suonpohjalle vaatii aluksi kasvupaikan kunnostamisen kalkituksella ja puutuhkalannoituksella, minkä jälkeen pajukasvustoa on lannoitettava säännöllisesti typellä, fosforilla ja kaliumilla (Hytönen 1994, 1995a, 1995b, 2005, 2016). Kalkki (6000 kg/ha dolomiittikalkkia) ja puutuhka (5000 kg/ha, irtotuhkana) sekoitetaan 10 cm:n paksuiseen pintakerrokseen muokkauksen yhteydessä. Pistokkaiden (pituus 20 tai 40 cm ja istutustiheys 15 000–20 000 kpl/ha, Hytönen 1996) koneellisen istuttamisen jälkeen viljelmiä lannoitetaan typellä (50 kg N/ha). Fosfori- tai kaliumlannoitusta ei tarvita ensimmäisen korjuukierron aikana, sillä perustamisvaiheen puutuhkalannoitus turvaa pajujen kalium- ja fosforitarpeen. Suonpohjilla ei yleensä tarvita pintakasvillisuuden torjuntaa.

Ensimmäisen korjuukierron aikana toisena, kolmantena ja neljäntenä keväänä pajut tarvitsevat typpilannoituksen (100 kg N/ha). Toinen korjuukierto aloitetaan typpi-, fosfori- ja kaliumlannoituksella (N 100, P 30 ja K 40 kg/ha), ja kierron toisen ja kolmannen vuoden aikana jatketaan pajukasvuston lannoitusta typellä (100 kg N/ha), kun tavoitellaan pajun optimituotosta.

Käytännössä lannoitus on kuitenkin tehtävä kerralla teknisten syiden takia jokaisen kolmen tai neljän vuoden pituisen korjuukierron alussa, jolloin lannoitetyypen määrästä joudutaan hieman tinkimään. Tällöin typpeä levitetään hehtaarille 200 kg, fosforia 30 kg ja kaliumia 40 kg (ravinnemääriä vastaavat kaupalliset lannoitemäärät, ks. liite 1). Nopeavaikutteisten lannoitteiden käyttöön liittyy riski vesistökuormituksen lisääntymisestä (ks. kappale 4.7). Yhdellä pistokassukupolvella saadaan noin seitsemän satoa, ja pajukasvuston kokonaisikä on noin 20 vuotta. Lopuksi pajujen kannot poistetaan jyrsimellä.

4.3.3. Pajuviljelmien tuhot

Anneli Viherä-Aarnio

Pakkanen voi aiheuttaa pajuviljelmällä merkittäviä vahinkoja, mikäli kasvatettava pajuklони ei ole sopeutunut viljelypaikkakunnan ilmastoon. Jos pajut ovat talveentuneet kunnolla, ne voivat sietää hyvinkin alhaista lämpötilaa (jopa $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$) (von Fircks 1992). Mikäli kasvu jatkuu syksyllä pitkään, pakkanen vaurioittaa vielä vihreitä ja puutumattomia versoja. Pahimmassa tapauksessa koko verso paleltuu ja paju kuolee. Väärää alkuperää olevan kloonin viljely onkin pajun kasvatuksessa merkittävä riski, mistä on olemassa useita esimerkkejä (Lumme & Törmälä 1988, Hytönen & Saarsalmi 2009). Myös kesähalla voi aiheuttaa merkittävää vahinkoa (Kuva 5). Verwijst ym. (1996) raportoivat 47 % ja 60 % tuotostappioista ankan kesähallan seurauksena kahden pajukloonin viljelmällä Etelä-Ruotsissa.

Kuivuus voi aiheuttaa kuolleisuutta ja alentaa tuotosta joillakin kasvupaikoilla, etenkin kun ilmaston muuttumisen myötä kesän kuivuusjaksojen ennustetaan yleistyvän (Veijalainen ym. 2012). Herkimmin kuivuudesta kärsivät taimet viljelmän perustamisvuonna. Ruotsin kaupallisten kloonien jalostusohjelmassa kuivuuden sietoa pyritään parantamaan jalostuksella (Gertson, B., Lantmännen Ab, suull. 27.5.2016).

Merkittävin bioottinen tuhoniheuttaja pajuviljelmillä ovat pajujen **lehtiruosteet** (*Melampsora* spp.). Ne voivat suuresti heikentää tuotosta, jopa 40 % satotappioita on raportoitu (Hanley ym. 2011). Vakavan ruosteinfektion jälkeen pajut ovat alttiita sekundäärisille taudinaiheuttajille, mikä voi edelleen johtaa sadon menetykseen. Ruosteiden itiömät näkyvät lehdillä oranssinpunaisina pilkkuina tai läiskinä, joissa kehittyvät sienien kesäitiöt. Tiheissä monokloonikasvustoissa ruosteilla on otolliset olosuhteet levitä. Lämpimien ja kosteiden säiden seurauksena ruoste-epidemia voi olla niin voimakas, että se aiheuttaa ennen aikaisen lehtien varisemisen (Kuva 5). Se voi puolestaan heikentää pajujen talveentumista, koska lehdet ottavat vastaan talveentumisen käynnistävän päivänpituussignaalin (Junntila 1976). Ruosteen heikentämät pajut kärsivät etenkin syyshalloista.



Kuva 5. Ankaru ruostetuho vesipajulla (vas.) ja koripajulla, jolla se on aiheuttanut lehtien varisemisen (kesk.) Kuvat: Anneli Viherä-Aarnio sekä hallatuho (oik.). Kuva: Jyrki Hytönen

Ruosteita on useita eri lajeja, jotka ovat usein erikoistuneet tiettyihin pajulajeihin (ks. kappale 5.1). Tärkein pajuviljelmien ruostetuhojen aiheuttaja on *Melampsora larici-epitea*. Se infektoi koripajua, joka on ollut tärkein biomassapaju kasvatapansa ja hyvän tuotoksen ansiosta. Etenkin vannepaju (Toome ym. 2006) ja Suomen energiapajututkimuksissa laajasti käytetty vesipaju ovat osoittautuneet hyvin alttiiksi ruosteelle. Vesipajun viljelystä luovuttiin juuri tästä syystä

(Pohjonen 2015). Kori- ja vannepajun risteymät ovat vähemmän alttiita ruosteelle kuin lajin sisäiset risteytykset (Johansson & Alström 2000). Ruotsin pajunjalostusohjelmassa koripajun vastustuskykyä ruosteelle on merkittävästi parannettu risteyttämällä sitä siperianpajun kanssa. Ruosteresistenssi voi myös murtua taudinaiheuttajan kehittäessä uusia kantoja (Hanley ym. 2011).

Pajut ovat pihlajan ja haavan ohella **hirven** suosimia ravintokasveja (Seiskari 1956). Hirville maistuvat erityisesti eteläistä alkuperää olevat, kasvuaan pitkälle syksyyn jatkavat kloonit, jolloin tuhoja syntyy pääosin syys-lokakuun vaiheessa (Rossi 1982). Hirven syönti kohdistuu vesojen kärkiin, joten tappiot biomassan tuotoksessa jäävät vähäisiksi, Rossin (1982) mukaan vain 3,4 % kokonaissadosta. Pistokkaiden tuotannossa menetykset voivat kuitenkin olla merkittäviä. Hirvituhojen riski pienenee pajuviiljelmän kasvaessa, koska hirvet karttavat korkeita ja tiheitä kasvustoja (Tahvanainen 1995). **Metsäjänis ja rusakko** syövät pajuista talvisaikaan lumenpäällisiä osia ja voivat kaulata perusteellisesti korkeitakin kasvustoja (Hakkila 1985). Pajulajien ja kloonien maistuvuudessa jäniksille on eroja, joita selittävät uuteaineiden, kuten fenoliglykosidien, pitoisuuksien erot nuorten pajujen kuoreissa (Tahvanainen ym. 1985). Kookkaiksi kasvilla lajeilla resistenssi syöntiä vastaan heikkenee iän myötä, mutta pysyy voimakkaana matala- kasvuilla lajeilla (Tahvanainen ym. 1985). Siperianpajun (Tahvanainen 1995) mainitsee olevan jänisten suosima. Eri **myyrälajit** vahingoittavat pajuntaimia eri tavoin juuristosta latvaan. Pahimpina biomassaviiljelmien tuholaisina on pidetty vesi-, lapin- ja peltomyyrää, jotka voivat tuhotta täysin osia pajuviiljelmästä (Hakkila 1985).

Hyönteistuhot biomassapajuilla voivat kohdistua lehtiin tai versoon. Lehtiä syövästä hyönteisistä tärkeimpiä ovat isohaavanlehtikuoriainen (*Chrysomela populi*), pajupistiäinen (*Pteronidea salicis*) ja lehdenkalvajat (*Phratora*). Tavallisesti ne ovat jokseenkin harmittomia, mutta joinakin vuosina niiden kannat voivat nousta niin korkeiksi, että pajut syödään lehdettömiksi, ja seurauksena on kasvatappioita (Tahvanainen 1995). Alttiudessa hyönteistuhoilta on kloonien välisiä eroja, esimerkiksi Peacockin ym. (2002) mukaan kelpaavuudessa lehdenkalvajahyönteisille (*P. vulgatissima*). Vannepaju todettiin *P. vulgatissiman* suhteen vastustuskykyiseksi, mitä selitti sen lehdistä mitattu korkea fenoliglykosidipitoisuus (salikortiini) (Kelly & Curry 1991). Ruotsin pajunjalostusohjelmassa on tehty valintaa kolmea lehtikuoriaislajia vastaan: pajunviherkalvaja (*P. vitellinae*), isoviherkalvaja (*P. vulgatissima*) ja pajunälvikäs (*Galerucella lineola*) (Bo Gertsson, Lantmännen Ab, suull. 27.5.2016). Versoja vahingoittavat hyönteiset aiheuttavat versoihin äkämiä ja pensastumista. Erityisesti niistä on haittaa punontapajuviiljelmillä, mutta myös pistokastuotannossa. Merkittävimpiä niistä ovat äkämäsääskiin kuuluva pajunversosääski (*Rhabdophaga terminalis*) ja pajunvirpisääski (*R. salicis*) (Tahvanainen 1995).

Pajuviiljelmät perustetaan kasvullisesti monistetuilla pistokkailla yleensä yhden tai muutaman kloonin monokulttuureina. Jos viljelty kloonin osoittautuu alttiiksi jollekin tuhoaiheuttajalle, on olemassa riski, että tuho kohdistuu koko viljelmään, ja pahimmassa tapauksessa menetetään koko sato.

4.4. Tuotos

Lasse Aro

Pajujen maanpäällinen lehdetön kuiva-ainetuotos on vaihdellut eri tutkimuksien mukaan 4 ja 16 tn/ha/v välillä (Lumme ym. 1984, Lehtonen & Tikkanen 1986, Pohjonen 1991, Hytönen 1995a, 1995b, 1995c, Pohjonen 1995, Toivonen & Tahvanainen 1998, Perttu 1999, Tahvanainen & Rytkönen 1999, Mola-Yudego & Aronsson 2008, Hytönen & Saarsalmi 2009, Mola-Yudego 2010, Sevel ym. 2012, Guidi ym. 2013, Cunniff ym. 2015, Nord-Larsen ym. 2015,

Albertsson ym. 2016, Dimitriou & Mola-Yudego 2017; Taulukko 1), kun epäonnistuneita tai poikkeuksellisen korkeita viljelytuloksia ei huomioida. Em. tutkimukset on tehty lähinnä maatalousmaalla Pohjoismaissa, Irlannissa, Iso-Britanniassa ja Quebecissä Kanadassa. Suomessa pajun tuotostuloksia on saatu myös entisiltä turvetuotantoalueilta (Taulukko 2). Tuotos riippuu pajulajista ja -kloonista, viljelmän sijaintipaikan ilmasto-oloista, kasvupaikan ominaisuuksista, kasvukauden sääoloista ja pajuviiljelmän hoitotoimenpiteiden intensiteetistä (esim. Tahvanainen 1995, Hytönen 1996, Mola-Yudego 2010, Guidi ym. 2013, Nord-Larsen ym. 2015). On myös huomattava, että pieniltä ja hyvin hoidetuilta tutkimuskoealoilta on saatu parempia satoja kuin käytännön viljelmiltä. Mola-Yudego (2010) arvioi pajun potentiaaliseksi tuotostasoksi maatalousmaalla Suomen ilmasto-oloissa 6,8 tn/ha/v.

Taulukko 1. Pajun (*Salix* spp.) lehdetön maanpäällinen biomassatuotos (kuiva-aineena) ki-vennäismaapelloilla. Ikä = vesojen ikä korjuuhetkellä. e.s. = tietoa ei saatavilla.

Laji/lajike*	Klooni	Sijainti	Viljelytiheys, kpl/ha	Ikä, vuotta	Tuotos, tn/ha/v**	Viite
Useita	Useita	Röykkä	20 000	3	2,3–15,3	Lepistö 1978
Useita	Useita	Inkoo	e.s.	3	3,3–16,3	Pohjonen 1991
<i>S. alba</i>	77803	Inkoo	e.s.	1–7	2,3–16,2	Pohjonen 1995
<i>S. 'Aquatica'</i>	DK6351	Suonenjoki	44 000	1	8,5	Rossi 1982
<i>S. 'Aquatica'</i>	E4856	Suonenjoki	40 000	1	0,5–10,5	Saarsalmi 1984
<i>S. 'Aquatica'</i>	e.s.	Lahti	50 000	2	5,5–13,5	Ferm 1985
<i>S. 'Aquatica'</i>	e.s.	Hollola	30 000	3	6–8	Ferm 1985
<i>S. 'Aquatica'</i>	V769	Nurmijärvi	36 000	3	3,0–6,1	Hytönen 1985a
<i>S. 'Aquatica'</i>	V769	Nurmijärvi	36 000	1	0,7–5,2	Hytönen 1995c
				3	5,1–7,2	
				7	6,5	
<i>S. 'Aquatica'</i>	E4856	Sukeva	40 000	5	< 0,1	Hytönen ym. 1995
<i>S. burjatica</i>	Useita	Inkoo	e.s.	1–7	1,3–18,1	Pohjonen 1995
<i>S. x dasyclados</i>	P6011	Sukeva	40 000	5	0,2	Hytönen ym. 1995
<i>S. phyllicifolia</i>	e.s.	Sukeva	40 000	5	2,4	Hytönen ym. 1995
<i>S. smithiana</i>	77681	Inkoo	e.s.	1–2	2,8–5,5	Pohjonen 1995
<i>S. triandra</i>	P6010	Sukeva	40 000	5	1,9	Hytönen ym. 1995
<i>S. viminalis</i>	S15211	Suonenjoki	44 000	1	8,5	Rossi 1982
<i>S. viminalis</i>	e.s.	Lahti	50 000	2	3,5–10	Ferm 1985
<i>S. viminalis</i>	Useita	Inkoo	e.s.	1–7	1,6–27,5	Pohjonen 1995

* laji ja lajike ilmoitetaan siten kuin se on viitatussa julkaisussa (ks. kappale 2.3)

** keskiarvojen vaihteluväli, kun kokeessa on useita käsittelyjä

Taulukko 2. Pajun (*Salix* spp.) biomassatuotos (kuiva-aineena) turvetuotannosta vapautuneilla suonpohjilla. Kokonaistuotos sisältää pajujen maanpäälliset ja maanalaiset osat. Viljelykohteiden sijainti: J-P = Juva, Pakinsuo; H-P = Haapavesi, Piipsanneva; L-H = Liminka, Hirvineva; M-K = Mikkeli, Kovalansuo; R-P = Ruukki, Paloneva; T-V = Tohmajärvi, Valkeasuo. Ikä = vesojen ikä korjuuhetkellä. e.s. = tietoa ei saatavilla.

Laji/lajike*	Klooni	Sijainti	Viljelytiheys, kpl/ha	Ikä, v	Tuotos, tn/ha/v			Viite
					koko-nais	lehdetön**	maanalla***	
<i>S. 'Aquatica'</i>	E4856	T-V	40 000	3		0,7–1,3		Hytönen 1995a
<i>S. 'Aquatica'</i>	E4856	H-P	40 000	5		0,2		Hytönen ym. 1995
<i>S. cv. aquatica</i>	V761	L-H	42 533	1		0,8–5,7		Lehtonen & Tikkanen 1986
<i>S. cv. aquatica</i>	V769	L-H	40 000	1		1,8–4,1		Lumme ym. 1984
<i>S. 'Aquatica'</i>	V769	H-P, R-P	40 000	1	1–3			Hytönen 1994
<i>S. cv. aquatica</i>	V769	L-H	42 533	1		0,6–3,2		Lehtonen & Tikkanen 1986
<i>S. 'Aquatica'</i>	V769	H-P, R-P	40 000	3		2,6–4,7		Hytönen 1994
<i>S. 'Aquatica'</i>	V769	H-P, R-P	40 000	3	1,7–6,8	0,9–4,1	0,5–1,6	Hytönen 1995b
<i>S. x dasyclados</i>	P6011	L-H	40 000	1		4,8–5,2		Lumme ym. 1984
<i>S. x dasyclados</i>	P6011	H-P	40 000	1	2–4		0,7–1,4	Hytönen 1994
<i>S. x dasyclados</i>	P6011	H-P	40 000	3	10,2	6,3	2,1	Hytönen 1994
<i>S. x dasyclados</i>	P6011	L-H	40 000	1–4		0,5–9,3		Lumme ym. 1984, Lumme & Kiukaanniemi 1987
<i>S. x dasyclados</i>	P6011	H-P	40 000	5		3		Hytönen ym. 1995
<i>S. x dasyclados</i>	P6011	T-V	40 000	5		1,2		Hytönen ym. 1995
<i>S. myrsinifolia</i>	Si-1 Si-5	J-P, M-K	33 300	2		6,35		Galambosi & Jokela 2009
<i>S. myrsinifolia</i>	K2183	L-H	20 000	2		2,3		Lumme & Törmälä 1988
<i>S. phylicifolia</i>	e.s.	T-V, H-P	40 000	5		4,3–7,5		Hytönen ym. 1995
<i>S. phylicifolia</i>	e.s.	H-P	40 000	10		7–8,7		Hytönen & Saarsalmi 2009
<i>S. phylicifolia</i>	e.s.	H-P	40 000	18		5,9–6,5		Hytönen & Saarsalmi 2009
<i>S. triandra</i>	P6010	L-H	40 000	1		1,8–2,3		Lumme ym. 1984
<i>S. triandra</i>	P6010	H-P	40 000	5		6,2		Hytönen ym. 1995
<i>S. triandra</i>	P6010	H-P	40 000	10		5–5,6		Hytönen & Saarsalmi 2009
<i>S. triandra</i>	P6010	H-P	40 000	18		2,2–2,3		Hytönen & Saarsalmi 2009

* laji ja lajike ilmoitetaan siten kuin se on viitatussa julkaisussa (ks. kappale 2.3)

** lehdetön, maanpäällinen tuotos; keskiarvojen vaihteluväli, kun kokeessa on eri käsittelyjä

*** juuret ja kannot ilman hienojuuria; keskiarvojen vaihteluväli, kun kokeessa on eri käsittelyjä

4.5. Viljely- ja korjuuteknologia

Paula Jylhä

Pajuviljelmän perustamistyöt (maanmuokkaus, lannoitus, kalkitus ja kasvinsuojelu) voidaan pistokkaiden istutusta lukuun ottamatta tehdä tavallisilla maatalouskoneilla. Paju korjataan yleensä lehdettömänä, myöhäisestä syksystä kevääseen. Tällöin kasvukausi ei keskeydy, ja lehtien sisältämät ravinteet jäävät kasvupaikalle. Kasvukauden aikainen korjuu saattaa johtaa viljelmän tuhoutumiseen, koska uudet vesat eivät ehdi talveentua ajoissa ja ne saattavat paleltua syksyn ja talven aikana (Hytönen 1985b). Heikosti kantavilla alustoilla, esimerkiksi turvemaidella, korjuu on parasta tehdä jäisen maan aikana. Korjattaessa pajun katkaisuläpimitta on tavallisesti 3–7 cm ja vesojen pituus 5–10 m (Sihvonen ym. 2013). Kaatotuoreen pajun kosteus korjuuajan kohtana on tyypillisesti 55–60 % (Hytönen ja Ferm 1984, Kofman 2012). Pienet lämpökattilat vaativat kuivaa polttoainetta, ja pajuhake poltetaan tyypillisesti 35–40 %:n kosteudessa (Alakangas ym. 2016).

Pajun korjuussa voidaan hyödyntää tavanomaista maatalous- ja puunkorjuukalustoa, mutta tarkoitukseen on kehitetty myös erikoiskoneita. Paju voidaan korjata suoraan hakkeena tai lyhyinä pätkinä, kokopuuna tai paaleina (Danfors & Nordén 1995, Caslin ym. 2015). Korjuumenetelmän valinnassa tulee ottaa huomioon muun muassa tuotannon laajuus ja pajun käyttötarkoitus. Korkeiden pääomakustannusten vuoksi suurten ja tehokkaiden koneiden käyttö ei ole kannattavaa, jos korjuumäärät jäävät pieniksi. Sihvosen ym. (2013) mukaan vuotuisen korjuupinta-alan tulisi olla vähintään 50–300 ha vuodessa, jotta erikoiskaluston hankinta olisi kannattavaa.

4.5.1. Suorahaketus

Suorahaketus on Ruotsissa energiapajun korjuun valtamenetelmä (Xiong ja Finell 2009). Suorahaketuksen tuottavuus on useissa tutkimuksissa todettu suuremmaksi kuin erillisen korjuun ja haketuksen (esim. Vanbeveren ym. 2014, 2017). Tuoretta haketta ei voida varastoida pitkään ilman merkittävää kuivamassahävikkiä (Jirjis 2005). Whittakerin ym. (2018) tutkimuksessa tuoreen pajuhakkeen kuivamassahävikki oli 20–23 % puoli vuotta kestäneen varastointikokeen aikana, kun kokopuuna varastoidulla pajulla se oli korkeintaan 10 %. Kosteaa hake myös homehtuu helposti, ja homeitiöt ovat terveystarvittavia ihmisille (Jirjis 2005). Pitkään varastoitava hake onkin syytä kuivata. Varastointitappioita voidaan vähentää myös säätämällä hakkeen palakokoa suuremmaksi (Kofman 2012).



Kuva 6. Energiapuupöydällä varustettu ajosilppuri pajun suora haketuksessa. Kuva: Henriksson Salix AB.

Pajun suoraan hakkeena korjaavat koneet on yleensä muunnettu jostakin maatalouskoneesta, esimerkiksi säilörehun korjuussa käytetystä ajosilppurista, jonka alkuperäinen pöytä on korvattu energiapuupöydällä (Kuva 6). Nämä itsekulkevat koneet sopivat parhaiten kantoläpimitaltaan alle 6–7 cm:n pajun korjuuseen (Di Fulvio ym. 2012). Tehokkaimmilla koneilla pystytään hakettamaan jopa läpimitaltaan 15 cm:n puita (Sihvonen ym. 2013). Ajosilppureiden tuottavuus tunnissa vaihtelee kertymän ja muiden viljelmän ominaisuuksien mukaan 17–35 tuoretonnin tai 0,34–1,42 hehtaarin välillä. Sokeriruo'on korjuukoneet käyvät pajunkorjuuseen lähes sellaisenaan, ja niiden tuottavuudeksi on mitattu jopa 46 tuoretonnia tunnissa (Sihvonen ym. 2013). Vakiovarusteiset sokeriruo'on korjuukoneet katkovat pajun 10–15 cm pitkiksi pätkiksi (Sihvonen ym. 2013), mutta yleensä tällainen materiaali joudutaan vielä hakettamaan ennen polttoa (Kofman 2012). Suorahaketusmenetelmässä hake syötetään perävaunuun tai rinnalla kulkevan maataloustraktorin perävaunuun. Ajosilppurin tuntikustannus on korkea, esimerkiksi nurmen korjuussa se oli keskimäärin 473 €/h vuonna 2020 (Palva 2021). Lisäksi hakkeen kuljetukseen tarvitaan vähintään kaksi traktoria, joten toimintaan ei saisi tulla keskeytyksiä. Suorahaketus-koneissa on ollut myös omia hakesäiliöitä, joiden tyhjentämismatkat vievät aikaa (Vanbeveren ym. 2017). Myös erillisten, maahan tiputettavien ja myöhemmin kerättävien hakekonttien käyttöä on selvitetty, mutta tämä vaihtoehto ei osoittautunut kilpailukykyiseksi (Karpachev 2020). Pajun korjuussa käytetään myös edullisempia maataloustraktorisovitteisiä suorahaketus-koneita, joko lyhytkiertoisien energiapuun korjuuseen suunniteltuja tai esimerkiksi tarkkuussilppurista muokattuja, mutta niiden tuottavuus on pienempi kuin ajosilppureiden (Sihvonen ym. 2013, Vanbeveren ym. 2017). Poppelin lyhytkiertoviljelyssä käytetty kaksivaiheinen korjuuketju voisi soveltua myös pajulle. Siinä puut kaadetaan karholla maataloustraktorin perään kiinnitettävällä kaatolaitteella ja haketetaan maasta keräävällä hakkurilla, mutta lumi rajoittaa tämän menetelmän käyttöä Suomessa (Sihvonen ym. 2013).

Erittäin lyhyillä kuljetusmatkoilla (esimerkiksi Itävallassa alle 9–13 km; Handler & Blumauer 2010) hake kannattaa viedä traktoreilla suoraan käyttöpaikalle, pidemmillä matkoilla vaihtolavat ovat kustannustehokkaampi vaihtoehto. Suorahaketuksessa korjuu ja hakkeen kuljetus ovat kiinteässä vuorovaikutuksessa keskenään. Siten huomattava osa ajasta voi kulua odotuksiin, mikä nostaa tuotantokustannuksia (Asikainen & Nuuja 1999). Hake voidaan myös kasata viljelmän lähelle myöhemmin käyttöpaikalle kuljetettavaksi, mutta ketjuun saatetaan tarvita ylimääräinen kone hakkeen kuormaukseen (Sihvonen ym. 2013). Heikosti kantavilla mailla korjuukoneiden pintapainetta voidaan vähentää teloilla, mutta telavarusteltuna konetta ei voida siirtää teitä pitkin ajamalla paikasta toiseen (Kofman 2012). Tällöin korjuukone joudutaan siirtämään lavetilla, mikä nostaa tuotantokustannuksia.

4.5.2. Kokopuuna korjuu

Suomessa energiapajun tuotantoketjut, joissa paju varastoidaan ja kuivatetaan ennen hake- tusta, ovat todennäköisesti kustannustehokkain vaihtoehto ennen suurten viljelykeskittymien syntyä. Pienimuotoisessa viljelyssä paju voidaan kaataa kokonaisina vesoina käsityökaluilla, moottori- tai raivaussahalla (Kofman 2012) ja kuljettaa esimerkiksi traktorilla tienvarteen hake- tettavaksi. Suuremmilla viljelmillä voidaan käyttää traktorisoivitteisia korjuulaitteita. Ne kokoa- vat pajunippuja kuormatilaan, joka tyhjennetään suoraan toisen traktorin lavalle tai maahan odottamaan jatkokuljetusta esimerkiksi metsäperävaunulla varustellulla maataloustraktorilla tai kuormatraktorilla. Lyhyillä kuljetusmatkoilla voidaan käyttää myös pyöräkuormaajaa tai ku- rottajaa. Sihvosen ym. (2013) kirjallisuuskatsauksen mukaan nämä kokopuun korjuuseen tar- koitetut koneet pystyvät korjaamaan läpimitaltaan noin 8 cm:n pajua ja niiden tuottavuus vaihtelee välillä 0,1–0,9 ha/h.

Pajua voidaan korjata myös energiapuun korjuuseen varustelluilla metsäkoneilla, mutta pajun- vesojen pienen koon vuoksi tuottavuudet jäävät alhaisiksi. Kahden koneen (hakkuukone ja kuormatraktori) ketjun lisäksi korjuu voidaan tehdä korjureilla, joilla paju hakataan ja kuljete- taan välivarastolle. Ruotsalaisen systeemanalyysin (Bergström ym. 2011, Di Fulvio ym. 2012) mukaan korjurin käyttö ylikasvaneen pajun korjuussa oli kannattamatonta, sillä korjuukustan- nukset ylittivät energiapuun tienvarsihinnan. Jatkuvatoimisella energiapuun kaatolaitteella va- rustetulla hakkuukoneella ja kuormatraktorilla korjuun kustannukset tienvarressa jäivät ener- giapuun tienvarsihinnan alle, mutta työ olisi ollut pajun korjuuseen kehitetyillä tuotantoketjuilla huomattavasti tehokkaampaa ja kannattavampaa. Metsäkoneet ovat kilpailukykyisimmillään ylikasvaneen pajun korjuussa.

VTT tutki keräävällä energiapuukouralla (Naarva E-20) varustetun maataloustraktorin tuotta- vuutta ja kustannuksia energiapajun korjuussa erilaisilla työmalleilla (Sihvonen ym. 2013). Lähi- kuljetus tehtiin samaan traktoriin kytketyllä metsäperävaunulla. Korjurityömallilla paju hakattiin kokopuuna suoraan kuormatilaan, kaksivaiheisessa menetelmässä hakkuulaitteen tilalle vaih- dettiin puutavarakoura ja lähikuljetus tehtiin erikseen. Pajun koko vaikutti hakkuun tuottavuuteen, joka vaihteli välillä 0,6–1,6 kuivatonna (1,5–3,7 m³) tehotunnissa 5–6 vuoden iässä korja- tuissa, paririviin istutetuissa kasvustoissa. Bergströmin ym. (2011) tutkimuksessa saavutettiin jatkuvatoimisella kaatolaitteella varustetulla hakkuukoneella noin 40 % suurempi tuottavuus kuin parhaalla Sihvosen ym. (2013) tutkimalla työmallilla lähes vastaavissa olosuhteissa. Tasa- riveihin istutetun yli-ikäisen (13-vuotiaan) mustuvapajun hakkuussa päästiin 1,8–2,3 kuivaton- nin tehotuntituottavuuteen. Suoraan perävaunuun hakattaessa hakkuun tuottavuus heikkeni 23–58 %. Lähikuljetuksen tuottavuus oli 150 metrin matkalla 1,7–3,8 tn kuiva-ainetta (4,2–9,2 m³) tehotunnissa. Suurin tuottavuus saavutettiin 13-vuotiaalla pajulla, jolla kuormakoko oli suurin. Ruotsalaisessa tutkimuksessa (Bergström ym. 2011) samalla kuljetusmatkalla lähikulje- tuksen tuottavuus oli 8,4 tn kuiva-ainetta tehotunnissa. Hakkuun ja lähikuljetuksen

sisältävänä korjurityönä Sihvosen ym. (2013) tutkimuksessa päästiin 150 metrin matkalla 0,53–0,9 kuivatonnin (1,3–2,1 m³:n) tehotuntuottavuuteen. Pienimmät korjuukustannukset saavutettiin kahden koneen ketjulla yli-ikäisellä viljelmällä.

4.5.3. Paalaus

Kokopuukuormien tiiviys on pieni varsinkin kaukokuljetusta ajatellen. Kuormista saadaan tiiviimpiä paalaamalla. Pyöröpaalaimesta kehitetty kone kaataa, murskaa ja paalaa pajun. Menetelmä sopii vain pienikokoiselle, läpimitaltaan 4–5 cm:n pajulle. Pyöröpaalaimella on saavutettu noin puolen hehtaarin tuntituottavuuksia. Leikkuujälki on huono, mikä heikentää pajun vesomista. Lisäksi paalit joudutaan murskaamaan ennen polttoa. Pajun korjuuseen kehitetty paalain on jatkuvatoiminen. Pajut kaadetaan teräketjulla ja niputetaan määrämittäisiksi paaleiksi, jotka pudotetaan maahan koneen viereen ja kuljetetaan varastolle (Sihvonen ym. 2013).

4.6. Pajuntuotannon kannattavuus

Paula Jylhä

Pajun lyhytkiertoviljelyn kannattavuus riippuu erityisesti biomassatuotoksesta ja biomassasta saatavasta hinnasta (Hauk ym. 2014). Vuotuista 10–12 tonnin kuivamassatuotosta on pidetty kannattavuusrajana energiapajun tuotannolle, tuotantokustannuksista ja hakkeesta maksettusta hinnasta riippuen (Lindegaard ym. 2001). Julkaistut kannattavuuslaskelmat perustuvat usein viljelykokeissa mitattuihin kuivamassatuotoksiin, joita ei tavallisesti saavuteta käytännön viljelmillä. Energiapajun viljely onkin todettu lähes poikkeuksetta yksityistaloudellisesti kannattamattomaksi ilman tukea (El Kasmio & Ceulemans 2012, Niemi 2014). Keski- ja Etelä-Ruotsin kaupallisilla pajuviljelmillä (yht. 2082 kpl) mitattiin vuosina 1989–2005 keskimäärin vain 2,6–4,5 tonnin kuivamassatuotokset kolmella ensimmäisellä korjuukierrolla (Mola-Yudego & Aronsson 2008). Muun muassa viljelmän hoidon tason, maantieteellisen sijainnin ja kasvupaikan ominaisuuksien on päätelty selittävän tuotoseroja (Mola-Yudego 2011), mutta Ericsson ym. (2009) ovat arvioineet, että pajun biomassatuotosta voidaan parantaa merkittävästi jalostuksella ja viljelykäytäntöjä kehittämällä.

Mola-Yudegon (2010) skenaarion mukaan puolet parhaista pajunviljelijöistä olisi voinut saavuttaa Suomessa keskimäärin 5,8 tonnin kuivamassatuotoksen ja paras neljännes 8,5 tonnin tuotoksen vuonna 2010. Toivosen ja Tahvanaisen (1998) tutkimuksen mukaan energiapajun tuotanto olisi ollut 1990-luvun lopulla nettonykyarvolla (korkokanta 5 %) mitattuna kannattavaa ilman tukia 8,2 tonnin vuotuisella kuiva-ainetuotoksella, jos hakkeesta saatava hinta käyttöpaikalla 25 km:n päässä viljelmältä olisi ollut vähintään 130 mk/MWh (nykyrahassa noin 30 €/MWh; Tilastokeskus 2021a). Metsähakkeen keskimääräinen nimellishinta on vaihdellut vuosina 2016–2021 välillä 20,2–23,2 €/MWh (Tilastokeskus 2021b). Energiapajun tuotannon yhdistäminen jätevedenpuhdistamoiden tai turvetuotantoalueiden vesienkäsittelyyn ja liete- ja tuhkalannoitukseen uskotaan parantavan viljelyn kannattavuutta (Xiong & Finell 2009, Niemi 2014).

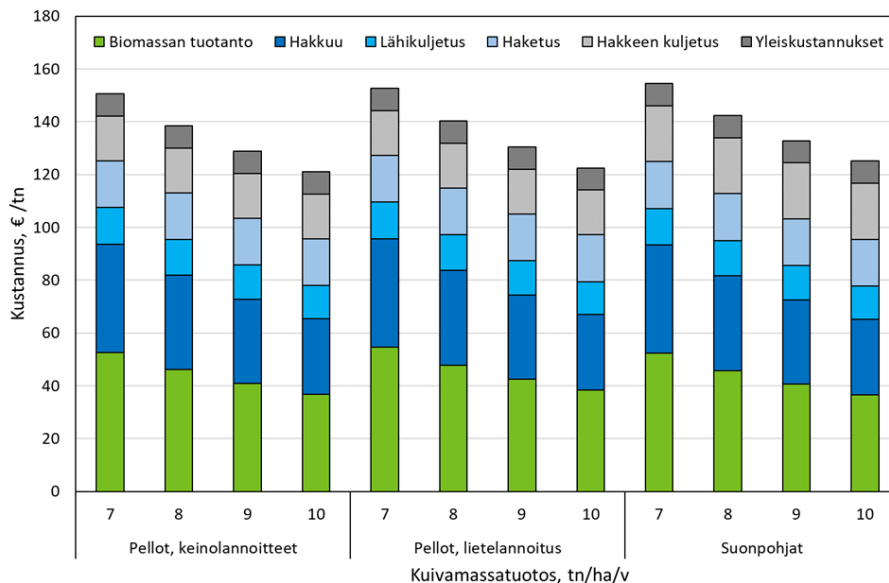
Käsitys Suomessa kannattavaan pajunviljelyyn vaadittavasta pinta-alasta vaihtelee 5:n ja 30 ha:n välillä (Niemi 2014, Viholainen 2017). Pellonmetsityshankkeissa keskimääräinen pinta-ala on ollut 2,0 ha vuosina 2010–2019 (Suomen metsäkeskus 2020), joten riittävän suurten viljelykeskittymien muodostaminen pelloille on haastavaa. Turvesoilla tuotantolohkot ovat tyypillisesti kymmenien hehtaarien suuruisia, joten suonpohjille perustetuilla pajuviljelmillä on paremmat mahdollisuudet käyttää tehokkaita korjuuketjuja.

Kannattavuuslaskelmat

Esimerkkilaskelmissa pajuntuotannon kannattavuutta mitattiin investoinnin netto nykyarvolla (NNA), jolla tarkoitetaan tulo- ja menovirtojen nykyarvojen erotusta (Copeland & Weston 1988). Laskelmat tehtiin erikseen pelloille ja suonpohjille olettamalla kuivamassatuotokseksi 7–10 tn vuodessa. Valittu alaraja perustuu Mola-Yudegon (2010) arvioon, jonka mukaan pajun vuotuinen kuivamassatuotos voi Suomessa ihanteellisissa olosuhteissa olla maatalousmaalla keskimäärin 6,8 tn/ha. Energiapajun tuotannon kannattavuuden lisäksi arvioitiin tuorelle pajuhakkeelle vaadittavaa hintaa, jolla sen tuotanto olisi kannattavaa muussa käytössä. Laskelmissa otettiin huomioon korkokannan vaikutus, ja energiapajulaskelmissa tarkasteltiin myös maataloustukien vaikutusta kannattavuuteen. Esimerkkialueeksi valittiin C2-tukialue (Valtioneuvoston asetus 8.1.2015/5), jonne sijoittuu huomattava osa turvetuotannosta ja jolla peltojen metsityspotentiaali on merkittävä.

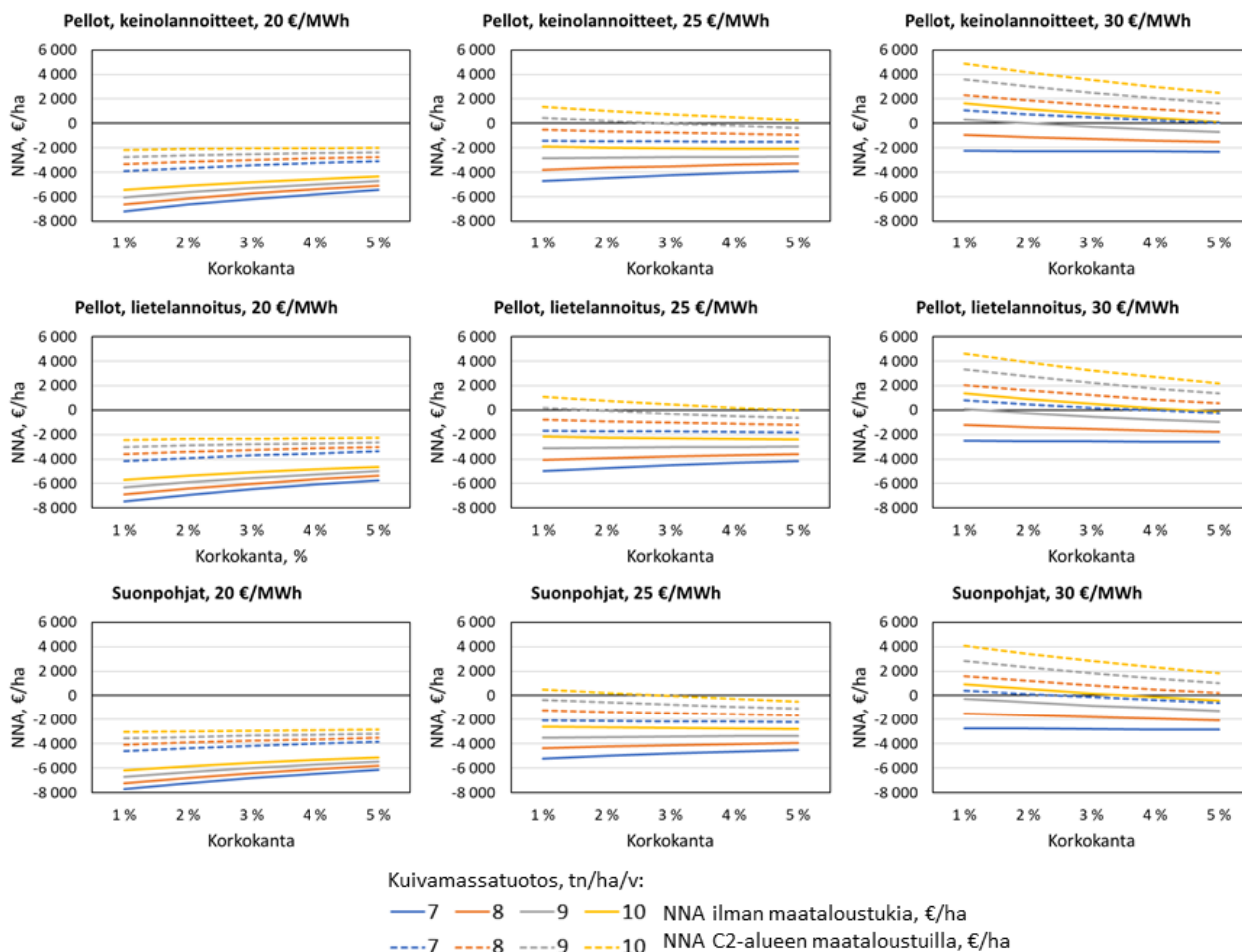
Kivennäis- ja turvemaapeltojen toimenpideketjut ja biomassatuotokset oletettiin samanlaisiksi, koska tutkimusten mukaan hyvään lopputulokseen on mahdollisuus päästä molemmilla kasvupaikoilla. Lähtötilanteeksi oletettiin viljava peltomaa, joka ei tarvitse peruskunnostusta. Pelloilla verrattiin pajunkasvatuksen kannattavuutta keinolannoitteilla ja lietalannoituksella. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa pellolle levitettiin kymmenen kilometrin päästä ilmaiseksi saatavaa nautakarjan lietalantaa, ja tällöin ainoastaan kuljetus- ja levityskustannukset otettiin huomioon. Suonpohjilla käytettiin keinolannoitteiden lisäksi tuhkaa ja maa kalkittiin. Biomassan tuotanto oletettiin samaksi kaikissa vaihtoehdoissa kasvupaikasta ja lannoituksesta riippumatta. Kiertoajaksi oletettiin kolme vuotta, ja sato korjattiin yhteensä kuusi kertaa. Lehdetön paju hakattiin kokopuuna energiapuun korjuuseen kehitetyllä, kaivinkonesovitteisella kaatopäällä. Lähikuljetus tehtiin kuormatraktorilla ja haketus tienvarressa tehokkaalla autohakkurilla. Polttohake kuljetettiin täysperävaunuautolla lämpölaitokselle 64 tai 103 km:n päähän 40 %:n toimituskosteudessa korjuuvuoden lopussa. Hakkeen myyntihinta oli kannattavuuslaskelmissa 20, 25 tai 30 €/MWh. Muuhun käyttöön välittömästi korjuun jälkeen toimitettavan pajuhakkeen kosteudeksi oletettiin 57 % (Hytönen & Ferm 1984), ja kuljetusmatkat käyttöpaikalle oletettiin samoiksi kuin polttohakeella. Laskelmien oletukset ja käytetyt tietolähteet on kuvattu yksityiskohtaisesti liitteessä 1. Kasvupaikan valintaa ja viljelmän perustamista on käsitelty kappaleessa 4.3.2.

Polttohakkeen diskonttaamattomat kustannukset käyttöpaikalla olivat 121–155 €/tn (Kuva 7). Muuhun käyttöön menevä pajuhake oli kosteampaa, mikä lisäsi kuljetuskustannuksia noin kahdella eurolla kuivatonna kohti.

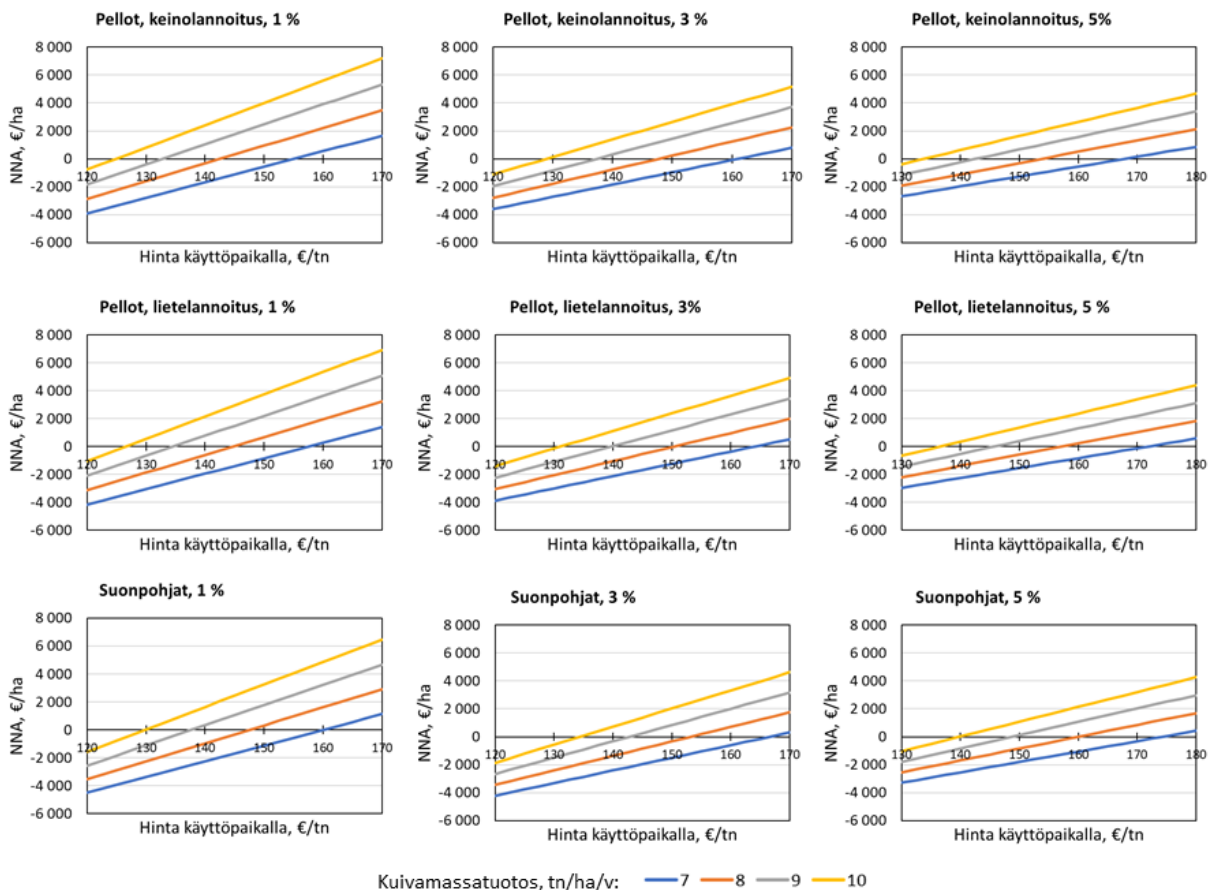


Kuva 7. Keskimääräiset haketetun energiapajun diskonttaamattomat tuotantokustannukset kuivatonna kohti kuusi korjuukiertoa sisältävän viljelmän elinkaaren aikana.

Energiapajun tuotanto oli laskelmissa käytetyillä oletuksilla selkeästi kannattamatonta kaikilla kasvupaikoilla myös nykyisillä maataloustuilla, kun polttohakkeen hinta käyttöpaikalla oli 20 €/MWh (Kuva 8). Maataloustuet nostivat tuotannon kannattavaksi pienimmillä korkokannoilla vasta, kun hakkeen hinta oli 25 €/MWh ja kuivamassatuotos vähintään 9 tai 10 tn/ha. Tälle tuotostasolle voidaan Suomessa päästä vain poikkeustapauksissa. Pitkä lietteen kuljetusmatka heikensi lietalannoituksen kilpailukykyä pelloilla niin, että investoinnin nettonykyarvo jäi 265–281 €/ha pienemmäksi kuin keinolannoitteilla. Lietteen kuljetusmatkan puolittuminen viiteen kilometriin nostaisi investoinnin nettonykyarvoa esimerkiksi polttohakkeen hinnalla 25 €/MWh ja kolmen prosentin korkokannalla ilman maataloustukia 725 €/ha, mutta tuotanto olisi edelleen selkeästi tappiollista kaikilla biomassan tuotostasoilla. Viimeaikainen keinolannoitteiden hintojen nousu (Kiviranta 2021) on kuitenkin parantanut lietalannoituksen kilpailukykyä. Energiapajun tuotanto oli keinolannoitetuilla pelloilla hieman kannattavampaa kuin suonpohjilla. Ero selittyy lähinnä lyhyemmällä hakkeen kuljetusmatkalla pelloilta käyttöpaikalle (64 km vs. 103 km, ks. liite). Lisäksi suonpohjilla kannattavuutta heikensi hieman tuotantokustannusten painottuminen laskentajakson alkuun.



Kuva 8. Energiapajun kasvatuksen kannattavuus pelloilla ja suonpohjilla erilaisilla kuivamassatuotoksilla (7–10 tn/ha/v), polttihakkeen hinnoilla (20–30 €/MWh) ja laskentakorkokannoilla (1–5 %) ilman maataloustukia (yhtenäiset viivat) ja C2-alueen tukitasolla (katkoviivat). Kannattavuuden mittarina käytettiin investoinnin nettonykyarvoa (NNA).



Kuva 9. Tuoreesta pajuhakkeesta maksettavan hinnan vaikutus pelloilla ja suonpohjilla kasvatetun pajun tuotannon kannattavuuteen yhden, kolmen ja viiden prosentin korkokannoilla.

Pajuraaka-aineen kilpailukyky määräytyy biomassan tuotantokustannusten ja jalostusprosessin maksukyvyyn tai suoraan kilpailevan tuotteen hinnan perusteella. Esimerkiksi kolmen prosentin laskentakorkokannalla kannattava tuotanto vaatisi pajuhakkeen hinnaksi käyttöpaikalla vähintään 160 euroa kuivatonnilta, jos paju kasvatettaisiin pelloilla keinolannoitteilla ja kuivamassatuotos olisi 7 tn/ha/v (Kuva 9). Pajua pidetään mm. lupaavana korvikkeena kuiviketurpeelle. Kuivattonni kuiviketurvetta suolta noudettuna maksoi syyskuussa 2021 kuiva-aineen tilavuuspainosta (turpeen maatuneisuudesta) riippuen 87–174 € (Vapo Oy 2021). Kun tähän lisätään kuljetuskustannukset, paju saattaa olla kilpailukykyinen kuivikemateriaali, mikäli sen ominaisuudet sopivat käyttötarkoitukseen ja biomassatuotos on riittävä. Kuivikekäyttöön menevä paju joudutaan kuitenkin todennäköisesti hienontamaan pienempään palakokoon kuin polttohake, mikä nostaa tuotantokustannuksia (Jylhä 2013).

Lääkepajun kasvatukseen oli vuonna 2021 tarjolla moninkertaiset tuet energiapajun tuotantoon verrattuna (Ruokavirasto 2021a), mutta tätä mahdollisuutta ei ole vielä hyödynnetty. Uudet innovaatiot voisivatkin parantaa pajuntuotannon kannattavuutta olennaisesti, mikäli tukipolitiikka pysyy ennallaan. Tulevaisuudessa myös mahdollinen hiilikompensaatio voi parantaa pajunviljelyn kannattavuutta.

Pajuntuotannon kannattavuustekijöitä havainnollistetaan liitteessä 2.

4.7. Lyhytkiertoviljelyn ympäristövaikutukset

Lasse Aro

Pajun lyhytkiertoviljelyssä vaaditaan tehokkaat toimenpiteet niin viljelmän perustamisvaiheessa kuin myöhemmin jokaisen korjuukierron aloituksessa (ks. kappale 4.3.2), jotta pajun biomassatuotos olisi mahdollisimman suuri viljelmän kokonaisiän ajan. Maanmuokkaustoimenpiteet, toistuva lannoitus nopeavaikutteisilla ravinteilla ja pintakasvillisuuden kemiallinen torjunta saattavat lisätä vesistökuormitusta. Erytisen suuri riski on tilanteissa, joissa pajukasvusto ei pysty heti hyödyntämään helppoliukoisia ravinteita, lannoitemäärät on mitoitettu liian suuriksi viljeltävän pajulajin ja kasvupaikan olosuhteiden kannalta, eikä riittävän laajoista suojavyöhykkeistä ojen varrella ole huolehdittu. Kierrätyslannoitteiden käyttöä ohjataan myös lainsäädännöllä, esim. nitraattiasetus (1250/2014; ks. kappale 5.4). Tärkeimmät vesistöä kuormittavat tekijät ovat kiintoaines, typpi ja fosfori (ks. myös Liite 3).

Yleisesti on todettu, että ravinnehuuhtoumat pajuviljelmiltä ovat melko pieniä, jos lannoitemäärät on suhteutettu oikein pajun kasvuun nähden kasvupaikan ominaisuuksien mukaisesti (esim. Caslin ym. 2015). Tämä perustuu siihen, että hyvin kasvava paju kuluttaa paljon vettä ja ravinteita, ja pajukasvusto myös kierrättää ravinteita tehokkaasti. Hyvään kasvuun päästyään pajun tiheä kasvusto ja laaja juuristo ehkäisevät pintavalunnan tai eroosion kautta vesistöihin päätyvää kuormitusta.

Lyhytkiertoviljelyn vesistökuormituksesta on vähän käyttökelpoista, tutkittua tietoa. Hamelin ym. (2012) ja Parajuli ym. (2017) arvioivat, että pajuviljelmän kuormitus voisi olla kokonaistypen osalta 9–14 kg/ha/v ja kokonaisfosforin osalta 0,1–1,6 kg/ha/v. Tanskassa tehdyssä kenttäkokeessa (Sevel ym. 2014b) typen vuosittainen huuhtoutuminen jäi 1–7 kg/ha tasolle, kun vuosittainen typpilannoitus oli enintään 120 kg/ha, mutta nousi lähes 100:aan kg/ha, jos typpilannoitus tehtiin kertalannoituksena ja suurin annoksin (360 kg N/ha). Dimitriou ym. (2012a) vertailivat pajun- ja viljanviljelyn vaikutuksia pohjaveteen ja havaitsivat, että pajunviljelyssä nitraattitypen ($\text{NO}_3\text{-N}$) pitoisuudet pohjavedessä laskivat selvästi, mutta fosfaattifosforin ($\text{PO}_4\text{-P}$) pitoisuudet sen sijaan nousivat. Ledin (1998) osoitti, että vuosittainen 80–200 kg/ha typpilannoitus lisäsi peltomaan (0–90 cm kerros) typen määrää kolmessa vuodessa 110–324 kg/ha, mikä jäi kokonaisuudessaan pajujen typen käytön ulkopuolelle ja siten alttiiksi huuhtoutumiselle. Typen ja fosforin huuhtoutumiseen pajuviljelmältä vaikuttaa kuitenkin voimakkaasti pajulaji ja sen tuotostaso, viljelytoimenpiteet, kasvupaikan ominaisuudet ja kasvukausien sääolot. Vesistökuormituksen hallinnan kannalta hyvään tulokseen päästäisiin, jos kunkin pajuviljelmän ravinnetase arvioitaisiin huolellisesti. Tämä ei kuitenkaan ole usein mahdollista käytännön viljelmillä.

Pajunviljelyssä tehokas pintakasvillisuuden torjunta perustuu yleisesti kemiallisiin torjunta-aineisiin, joista tehoaineita saattaa päätyä ravintoketjuihin, mutta myös sitoutua biomassaan (esim. Muola ym. 2021). Bioenergiäkäytössä biomassaan kertyneet torjunta-aineiden mahdolliset jäämät eivät aiheuta ongelmaa, mutta kaikessa muussa käytössä torjunta-aineiden aiheuttama terveysriski on tunnistettava. Rikkakasvihävitteissä yleisin tehoaine on glyfosaatti, jolla on haitallisia vaikutuksia ekosysteemissä muille eliöille (Helander ym. 2012). Pintakasvillisuuden kemiallisen torjunnan haitallisista vaikutuksista, samoin kuin keinoista niiden välttämiseksi tarvitaan lisää tietoa. Nykyisten torjunta-aineiden vaihtoehtoja voisivat olla mekaaninen rikkaruohontorjunta (Albertsson 2016) sekä biopohjaiset torjunta-aineet (Hagner 2020, Korkalo ym. 2022, ks. kappale 6.2)

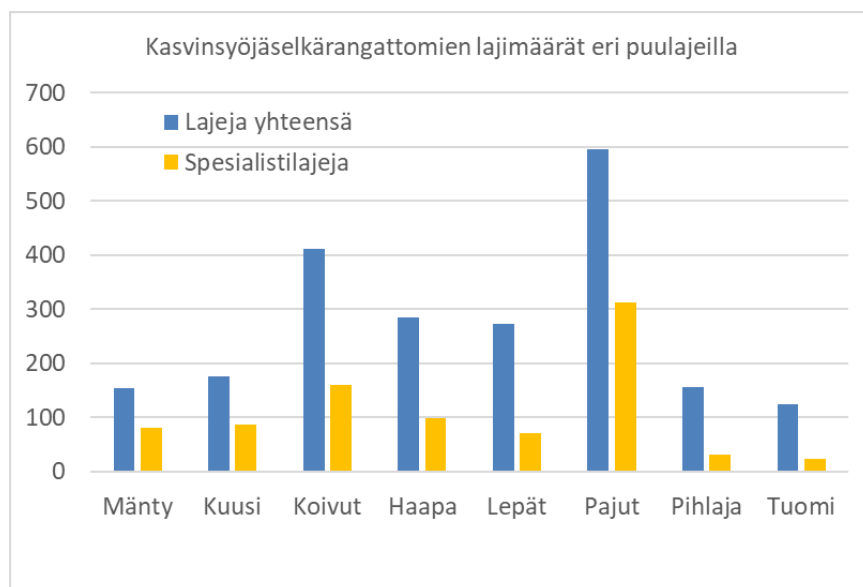
Elinkaarianalyysin menetelmin on osoitettu, että ympäristökuormitus pienenee selvästi viljelmän koon kasvaessa (Kowalczyk & Kwasniewski 2021). Pajun hiilensidontaa ja pajunviljelyn mahdollisuuksia ilmastovaikutuksien haittojen pienentämisessä on käsitelty kappaleessa 5.5.

5. Pajujen tarjoamat ympäristöhyödyt

5.1. Pajut monimuotoisuuden ylläpitäjinä

Juha Siitonen

Suomessa kasvaa kolmisenkymmentä pajulajia, kun mukaan lasketaan kotimaisten lajien lisäksi viherrakentamiseen yleisesti käytetyt pajut. Pajuilla esiintyy yhteensä satoja niistä riippuvaisia seuralaislajeja. Muihin puulajeihin verrattuna pajuilla elää erityisen paljon kasvinsyöjälajeja (Kuva 10). Pajuilla elää noin 600 selkärangattonta herbivorilajia, kun koivuilla niitä elää vähän yli 400, haavalla sekä lepillä vähän alle 300 ja muilla borealisilla puulajeilla kullakin alle 200 lajia. Pajuilla eläviin kasvinsyöjälajeihin kuuluu noin 250 perhosta, 150 sahapistiäistä, 80 kovakuori- aista, 30 kaskasta, 26 ludetta, 17 kirvaa, 16 kemppeä, 11 äkämäpunkkia, 8 äkämäsäskeä 7 kil- pikirvaa ja 5 miinaajakärpästä.



Kuva 10. Yleisillä borealisilla puulajeilla elävien kasvinsyöjäselkärangattomien kokonaislaji- määrä sekä yhteen puusukuun erikoistuneiden spesialistilajien määrä. Lajimääräarvioiden pe- rustana olevat tietolähteet on kuvattu tarkemmin julkaisussa Keto-Tokoi ja Siitonen (2021).

Osa pajuilla esiintyvistä herbivorilajeista on moniruokaisia, ja ne pystyvät pajujen lisäksi käyt- tämään ravintonaan haapaa tai muitakin lehtipuulajeja. Tällainen moniruokainen laji on esimer- kiksi suruvaippa (*Nymphalis antiopa*), joka raidan ohella voi elää koivuilla ja haavalla. *Salix*- sukuun erikoistuneita herbivoreja on yhteensä yli 300 lajia. Pajuihin erikoistunut spesialistilaji on Etelä-Suomessa runsastunut ja levinneisyysaluettaan laajentanut häiveperhonen (*Apatura iris*), jonka toukka elää erityisesti raidalla. Sahapistiäisissä on monia spesialisteja, jotka ovat tiu- kasti muutama tai ainoastaan yhteen pajulajiin erikoistuneita. *Euura*-suvussa on peräti 115 pajuja syövää lajia, joihin kuuluu lähes jokaiselle yksittäisellekin pajulajille erikoistuneita lajeja.

Pajujen seurassa elää joitain kymmeniä pajuihin erikoistuneita juurisienilajeja. Pajujen lehdillä esiintyy kymmeniä ruostesieniä, härmäsieniä ja lehtien soluväleissä kasvavia mikroskooppisia endofyyttisieniä, joista valtaosa kuuluu kotelosieniin (Ascomycota). Esimerkiksi raidalla, halavalla ja jokipajulla esiintyy kullakin oma erikoistunut keltaruostesienilajinsa (*Melampsora caprearum*, *M. laricis-pentandrae*, *M. amygdalina*).

Suomessa luontaisesti esiintyvistä pajulajeista puumaisiksi kasvaa neljä: raita, halava, mustuvapaju sekä jokipaju. Viljellyistä pajuista puumaisia ovat esimerkiksi hopeasalava (*S. alba* f. *sericea* 'Sibirica') ja terijoensalava (*S. euxina* 'Bullata'). Puumaisilla pajuilla esiintyy niiden eläviä ja kuolleita runkoja lahottavia käävääkkäitä ja muita lahottajasieniä sekä lahoppuusta riippuvaisia selkärangatonlajeja, joita varpumaisilla ja pensasmaisilla pajulajeilla ei esiinny joitain yksittäisiä lajeja lukuun ottamatta. Yhteensä pajuilla esiintyviä saproksyyililajeja on yli tuhat, joista noin 500 on lahottajasieniä ja noin 600 selkärangaton lajia. Raita on tämän lajiston kannalta ylivoimaisesti tärkein pajulajimme, jolla suurin osa pajujen saproksyyililajeista voi elää tai on raidan spesialisteja. Esimerkiksi Euroopan pienin kovakuoriaislaji, vain noin 0,5 mm pitkä ja hyvin kapea raidankääpäripsikkä (*Baranowskiella ehnstromi*), elää raidankäävän (*Phellinus conchatus*) pilleissä.

Elävien puiden rungoilla kasvaa päällysvieraina eli epifyytteinä viitisensataa jäkälälajia ja viitisenkymmentä sammallajia. Myös tämän lajiston kannalta vanhat metsäraidadat ovat tärkeä kasvualusta. Raidalla voi kasvaa parisataa epifyyttijäkälä- ja sammallajia. Keskimäärin vanhan metsäraidan tyvirungolla esiintyy kolmisenkymmentä lajia, kun kuusella, männyllä ja koivulla lajeja on parikymmentä (Kuusinen 1996).

Pajuilla voi esiintyä yhteensä joitain kymmeniä uhanalaiseksi tai silmälläpidettäväksi luokiteltuja eliölajeja. Suurin osa uhanalaisista pajujen seuralaislajeista on joko soilla tai paljakalla kasvavista pajulajeista riippuvaisia herbivoreja tai sitten puumaisista vanhoista tai kuolleista pajuista riippuvaisia epifyyttejä, lahottajasieniä tai muita saproksyyililajeja. Uhanalaisia pajujen seuralaisia ovat muun muassa kääpiöhopeatäplä (*Clossinana improba*), eläviä vanhoja raitoja lahottava raidantuoksukääpä (*Haploporus odorus*) sekä toistaiseksi ainoastaan Suomesta tunnettu, lahoissa halavan ja mustuvapajun rungoissa elävä halavasepikkä (*Eucnemis zaitzevi*).

Herbivorilajiston ylläpitämisen lisäksi pajujen toinen tärkeä merkitys sekä monimuotoisuuden että ekosysteemipalvelujen kannalta on niiden runsas ja varhainen kukinta. Kukkivat pajut tarjoavat keväällä tärkeän ravintolähteen niin kimalaisille, liikkeelle lähteville kesymehiläisille kuin monille erakkomehiläisille, päivä- ja yöperhosille ja monille muillekin pölyttäjähönteisille. Pölyttäjien kannalta tärkeimmät pajulajit ovat todennäköisesti raita ja kiiltopaju, jotka ovat laajalle levinneitä ja yleisiä. Raidan erityinen merkitys sekä herbivoreille että pölyttäjille liittyy siihen, että se on Suomessa ainoa kangasmetsissä yleisesti esiintyvä pajulaji (esimerkkejä raidalla elävistä kovakuoriaisista kuvissa 11 ja 12). Muiden pajulajien esiintyminen keskittyy lähinnä rannoille, soille, luhtiin ja muihin kosteikkoihin.



Kuva 11. Lehtikuoriaisiin (Chrysomelidae) kuuluvan pallokalvajan (*Plagioderma versicolora*) toukkaryhmä raidan lehdellä. Lehtikuoriaisten toukat kalvavat puiden lehtiä tyypillisesti siten, että vain luurankomainen lehtiranka jää jäljelle. Kuva: Juha Siitonen



Kuva 12. Myskijäärä (*Aromia moschata*) on komea, ränsistyvillä vanhoilla raidoilla toukkana elävä kovakuoriaislaji. Aikuiset myskijäärät vierailevat kukilla. Kuva: Juha Siitonen

Yhden pajulajin ja usein vain yhden tai muutaman pajukloonin muodostamilla **lyhytkiertoviljelmillä** ei ole yleisesti ottaen **monimuotoisuuden** kannalta positiivista merkitystä. Tällaisessa voimakkaasti muokatussa ja täysin keinotekoisessa habitaatissa on sopivia elinympäristöjä vain hyvin pienelle osalle pajuista riippuvaisesta lajistosta. Lähinnä lyhytkiertoviljelmällä voi esiintyä joitain yleisimpiä, viljeltäviä pajulajeja syöviä herbivorilajeja sekä lehtitauteja. Usein tällaiset lajit esiintyvät viljelmällä kasvaa häiritsevinä tuholaisina.

Lyhytkiertoviljelmien biodiversiteettivaikutuksia pitää kuitenkin tarkastella osana laajempaa maisemakokonaisuutta. Vaikutukset riippuvat siitä, millaisille paikoille lyhytkiertoviljelmiä perustetaan, mikä on niiden pinta-ala ja osuus maisemasta sekä millaisia vaihtoehtoisia kasvuyhteisöjä lyhytkiertoviljelmät korvaavat. Tutkimusten perusteella puiden (erityisesti pajujen) lyhytkiertoviljelmät ylläpitävät korkeampaa lajiversiteettiä kuin maatalouden monokulttuurit, mutta alemmaa lajiversiteettiä kuin lehtisekametsät. Niinpä puiden lyhytkiertoviljelmät voivat lisätä monimuotoisuutta maisemassa, jossa yhden satokasvin viljelysmaat ovat vallitsevia (Vanbeveren ja Ceulemans 2019). Jos taas viljelmät korvaavat lajirikkaita niittyjä tai lehtisekametsiä, vaikutukset paikalliseen ja alueelliseen monimuotoisuuteen ovat negatiivisia. Lyhytkiertoviljelmien ylläpitämä lajiversiteetti kasvaa, mikäli viljelmät koostuvat useista eri pajulajeista tai genotyypeistä (Müller ym. 2018). Lyhytkiertoviljelmät voivat vaikuttaa positiivisesti kukkivilla pajuilla vierailevien pölyttäjähyönteisten kantoihin.

5.2. Pajut jätevesien puhdistuksessa

Pertti Pulkkinen

Yhdyskuntajätevedet ovat olleet kasvava ongelma koko teollistumis- ja kaupungistumiskehityksen ajan. Sekä maa- että metsätalous ovat myös vaikuttaneet merkittävästi vesistöjen tilan huonontumiseen. Suomen ympäristökeskuksen mukaan joka vuonna pelkästään Itämereen valuu pääosin maa- ja metsätaloudesta ja yhteiskuntajätevesistä peräisin olevaa tyyppä yli 70 000 tonnia ja fosforia yli 3 000 tonnia (Mohsin ym. 2021). Erityisesti maatalouden valumavedet saattavat sisältää varsin korkeita fosfori- ja typpimääriä. Näiden rehevöittävien ravinteiden pääsyä

vesistöihin on perinteisesti yritetty estää erilaisilla kasvillisuutta sisältävillä puskurivyöhykkeillä. Jätevesien käsittely vaatiikin tehokkaita menetelmiä, mutta ne eivät saisi lisätä ilmastopäästöjä (Zouboulis & Tolkou 2015).

Suhteellisen lievästi saastuneiden vesien puhdistamiseen on yritetty kehittää mahdollisimman tehokkaita ja taloudellisia biologisia puhdistusmenetelmiä esimerkiksi käyttämällä nopeakasvuisia puita, kuten pajuja ja poppeleita (Zouboulis & Tolkou 2015). Pulford ja Dickinsonin (2006) mukaan edellytyksenä puiden käytölle niin maaperän kuin vesienkin puhdistamiseen *in situ* ovat seuraavat: 1) puulajin kasvu on puhdistuksen kohteessa riittävää, 2) puulaji kestää hyvin kohteen olosuhteita ja spesifisesti kohteen saasteita, 3) lajia on helppo lisätä, 4) laji pystyy joko itse tai yhteistyössä bakteerien kanssa neutraloimaan ja/tai ottamaan itseensä kasvupaikan saasteita, 5) korjuu ja tarvittaessa saasteiden käsittely onnistuu ja 6) taloudelliset tekijät mahdollistavat puulajin käytön.

Puhdistustehokkuuteen vaikuttavat hyvin monet tekijät, kuten puhdistettavien yhdisteiden laatu, määrä, koostumus ja sitoutuminen muihin yhdisteisiin sekä veden määrä ja liikkuminen maaperässä. Tärkeitä vaikuttavia tekijöitä ovat myös ilmastotekijät kuten sateiden määrä (myös kasteluveden laatu ja määrä), lämpötila sekä paikan pinnanmuodot ja maaperän rakenne. Joihinkin näistä tekijöistä voidaan jossain määrin vaikuttaa, mutta yleensä hyvin vähän. Pohjoismaissa suhteellisen lyhyt kasvukausi ja myös maaperän kylmyys rajoittavat käytävien puulajien juuriston sekä bakteerien aktiivista toiminta-aikaa vuodessa (Sillanpää 2007).

Jätevedet kulkevat yleensä ensin puhdistamojen kautta, mutta sen jälkeen niitä voidaan johtaa puita sisältävien valumakenttien läpi, joissa pyritään poistamaan ainakin typpeä ja fosforia. Kentät saattavat olla vanhoja viljelypohjia, mutta myös suonpohjia tai vastaavia. Puhdistusta varten voidaan myös rakentaa erillisiä altaita, liittyen esimerkiksi haihduttavaan, pajujen avulla tapahtuvaan puhdistukseen, mutta myös laajempia kostean maan puskurivyöhykkeitä (Jablonska ym. 2020) joko puilla tai ilman. Tanskassa on rakennettu myös niin sanottuja suljettuja pajupuhdistamoita (Zero Discharge Willow Facility) alueille, joilla esim. vesistöt ovat lähellä asutusta. Suurimmillaan suljettuihin säiliöihin on johdettu lähes 100 kotitalouden jätevedet systeemissä, jossa säiliöiden päälle istutetut nopeakasvuiset pajukloonit puhdistavat jätevedet. Vastaavan tyyppisiä puhdistamoita on kokeiltu tilakohtaisesti myös Suomessa (Onkamo 2016).

Biologisessa puhdistuksessa (*in situ*) kyseessä on fytoimediaatio, jossa yleensä hiilivetyperäiset saasteet kuten öljyt ja PAH-yhdisteet hajotetaan puiden ja bakteerien sekä muiden mikrobien avulla harmittomiksi yhdisteiksi tai fytoekstraktio, jossa saasteet, kuten raskasmetallit, allokoituvat puun eri osiin, lehtiin, runkoon ja juuriin, ja edellyttävät jatkokäsittelyä ongelmajätteenä.

Ruotsissa selvitettiin pajubiomassan energiakäytön lisäksi pajujen mahdollista käyttöä jätevesien puhdistamiseen, keskittyen aluksi yhdyskuntajätevesien kastelukäyttöön (Aronsson & Perttu 1994). Vesistöihin joutuneet vedet sisälsivät kuitenkin melkoisia määriä fosforia ja typpeä sekä muita haitallisia yhdisteitä, varsinkin pajupuhdistuskenttien alkuvaiheissa (Perttu & Aronsson 2000).

Pajukenttien puhdistustulokset ovat vaihdelleet 3–4 vuoden lyhytaikaisissa pajukokeissa Euroopassa (Suomi, Viro, Ruotsi, Tanska, Pohjois-Irlanti, Slovenia, Ranska, Kreikka) 30 %:sta lähes sadan prosentin alenemaan typen ja fosforin määrissä (mm. Istenic & Božic 2021, Mohsin ym. 2021, Holm & Heinsoo 2013, Dimitriou ym. 2012b, Larsson 2003) yhdistettynä hyvään biomassakasvuun ja suhteellisen pieneen kuolleisuuteen. Vastaavia puhdistustasoja on saavutettu myös muualla (Land ym. 2016). Nelivuotisessa Ruotsin, Ranskan, Pohjois-Irlannin ja Kreikan alueilla toteutetussa EU-hankkeessa pajun rungoista mitatut arvot vaihtelivat 18–73 kg N/ha,

3–9 kg P/ha and 6–27 kg K/ha välillä (Larsson 2003). Raskasmetallien (Cu, Zn, Cd and Pb) määrät rungoissa eivät selkeästi korreloineet raskasmetallien konsentraatioihin jätevedessä millään testipaikkakunnalla (Larsson 2003). Eteläruotsalaisilla lyhytkiertoviljelmillä havaittiin olevan selkeästi vähäisemmät typen valuma-arvot kuin läheisillä viljapelloilla, mutta vastaavilla 16 koepaikalla ja kolmen vuoden aikana fosforiarvot pohjavedessä näyttivät kohonneen lyhytkiertoviljelmien pajupalstoilla (Dimitriou ym. 2012b). Kasvihuoneolosuhteissa on päästy eri pajulajikkeilla huomattavan korkeisiin typen ja fosforin akkumulaatiotuloksiin (Salam ym. 2016, 2019a). Akkumulaatiotehokkuutta voidaan myös yrittää parantaa erilaisin ravinteiden ja eritoten raskasmetallien akkumuloitumista helpottavien yhdisteiden kuten kelaattien avulla (Mohsin ym. 2019).

Suomessa tehdyissä kokeissa on keskitytty lähinnä siperianpajuun ja sen erilaisiin risteytyksiin, erityisesti ruotsalaisiin kaupallisiin lajikkeisiin kuten 'Klaraan'. Valintaperusteena saastekokeisiin on näyttänyt olevan 'Klاران' runsas viljely varsinkin Etelä-Ruotsissa, joskin varsinkin 'Klاران' viljelykäyttö biomassan tuotantoon on hiipumassa. Kotimaisia kokeita pajun käytössä vedenpuhdistuksessa ei juurikaan ole, mutta alustavien tulosten mukaan Outokummussa sijaitsevalla koelalla 'Klara' pystyi yhteiskuntajätevesikokeessa poistamaan 30–60 % tyyppistä ja fosforista 2–4 vuoden koeaikana ja samalla tuottamaan biomassaa 2,5–6,5 kertaa enemmän kuin yhteiskuntajätevedellä kastelemattomissa koeruuduissa olevat vastaavat pajut (Mohsin ym. 2021). Myös koepuiden kuolleisuus oli puolet alhaisempi kuin vastaavien kontrollien.

Vaikka hyperakkumulaatiokasveja ei puulajeista juurikaan löydy (Reeves ym. 2017), pajuissa on kuitenkin useita ominaisuuksia, jotka mahdollistavat niiden tehokkaan käytön niin biomassan tuottajana kuin ympäristöongelmien hallinnassa (mm. Isebrands ym. 2014). Pohjoisen lyhyen kasvukauden olosuhteissa korkea puhdistustehokkuus korostuu, koska ilman tehokasta kasvua ei ole tehokasta akkumulaatiotakaan (mm. Saarsalmi 1984). Myös kasvupaikkavaatimukset puoltavat tehokkaaksi kilpailijaksi osoittautunutta pajua, tosin tässäkin, kuten monessa muusakin ominaisuudessa, on suuria eroja pajulajien ja lajikkeiden välillä (Istenic & Božić 2021, Holm & Heinsoo 2013, Watson ym. 2003). Valintaa vaikeuttavat myös hyvinkin eri tasoiset tulokset eri laboratoriokokeista ja lyhytaikaisista kenttäkokeista. Varsinkin raskasmetallien, mutta myös typen ja fosforin talteenottoa saatettaisiin pystyä parantamaan oikealla lajikevalinnalla. Nelivuotisen EU-hankkeen mukaan (Larsson 2003) jäteveden laadun "valinta" ja tiukka kloonivalinta tiettyjen metallien akkumuloimiskyvyn perusteella tehostaisi puhdistustoimintaa (Larsson 2003, Larsen ym. 2018). Akkumulaatiokykyisten lajikkeiden ja/tai lajien risteyttämistäkin sekä metallien akkumuloitumista helpottavien yhdisteiden käyttöä (esim. Mohsin ym. 2019, Salam ym. 2019b) voisi kokeilla.

Pajupuhdistamoiden kannattavuuden arviointi on ollut riittävän pitkien kenttäkokeiden puuttuessa varsin haasteellista. Lyhytaikaisissa laboratorio- ja pienen mittakaavan kenttäkokeissa saadaan helposti liian positiivisia arvioita puiden tehokkuudesta. Asiaan liittyvät myös oleellisesti jälkikäsitteilyiden kustannukset ja mahdollisuudet. Esimerkiksi biomassan poltosta jää jäljelle raskasmetalleja, ja varsinkin kadmiumpitoisuudet ylittävät helposti lannoitesopivuuden rajat. Myös pyrolyysin käyttömahdollisuudet jälkikäsitteilyssä vaatisivat ehkä kokonaisvaltaisempaa tarkastelua. Tutkimustarpeet kohdistuvatkin aika selkeästi käytännön puhdistumista palveleviin pitkäaikaisiin koekenttiin ja lajikkeiden tehokkuuden testaamiseen. Tätä korostaa myös se, että on suhteellisen vaikeaa saada vertailukelpoisia tuloksia maiden välillä tai edes suhteellisen pienien alueiden sisällä, saati sitten eri saastelähteiden välillä, sillä mukana on yleensä liikaa arviointiin vaikuttavia tekijöitä alkaen ympäristöolosuhteista, pajulajeista ja -lajikkeista päätyen maaperäolosuhteisiin ja saastelähteisiin. Yhteenvetona voisi sanoa, että riittävän pitkäaikainen ja samalla myös käytäntöä palveleva testaaminen maksaa vaivan lisäksi runsaasti rahaa ja vaatii paljon aikaa.

5.3. Pajut saastuneen maan puhdistuksessa

Pertti Pulkkinen

Biologisen maanpuhdistuksen taustaa

Ympäristön saastuminen on ongelma, joka on ihmistoiminnan myötä levinnyt kaikkialle (Bezie ym. 2021). Sen vaikutuksia voidaan yrittää korjata maaperän saasteiden teollisilla ja teknisillä käsittelyillä, joissa yleensä saastunut maa kaivetaan ylös, siirretään ja käsitellään kemiallis-teollisesti, mutta halvempaan vaihtoehtona on käytetty myös erilaisia biologisia puhdistusmenetelmiä. *In situ*-menetelmissä saastuneen alueen puhdistaminen tapahtuu suoraan saastumis-kohteella ja puhdistamiseen osallistuvat kasvit ja/tai saasteesta riippuen myös bakteerit ja muut mikrobit (Tangahu ym. 2011). Näitä bioremediaatiomenetelmiä yhdistää se, että puhdistuminen vaatii aikaa ja tehokkaasti kasvavaa kasvipeitettä puhdistettavassa kohteessa. Fytoremediaatiossa mikro-organismit hajottavat orgaaniset saasteet harmittomiksi yhdisteiksi ja fytoekstraktiossa saasteet allokoituvat suoraan kasviin itseensä; joko juureen, varteen tai lehtiin (Sillanpää 2007). Näin muodostuvat metallipitoiset kasvinosat tulee hävittää (Vallinkoski ym. 2007).

Bioremediaatiossa usein käytettyjä kasvilajeja ovat erilaiset *Brassica*-lajit, tupakka ja varsinkin pohjoisella pallonpuoliskolla myös poppelit ja pajut. Näitä kaikkia yhdistää hyvä kasvu ja toleranssi vaikeita ympäristöolosuhteita vastaan. Bezien ym. (2021) yhteenvedon mukaan vajaan 90 % tutkimuksista on koskenut lähinnä raskasmetallien poistamista kasvien avulla ja vain runsaat 10 % orgaanisia yhdisteitä, mikä korostaa raskasmetallisaasteiden yleisyyttä, mutta myös ehkä niiden vaarallisuutta terveydelle ja ekosysteemille.

Poppeleiden ja pajujen käyttö laajemmin ekosysteemipalveluissa alkoi 1900-luvun alkupuolella lähinnä saastumisen estämisessä (Isebrands ym. 2014). Pohjoisella pallonpuoliskolla päähuomio onkin paljolti kiinnittynyt juuri poppeleihin ja pajuihin, koska ne ovat nopeakasvuisia ja yleensä suhteellisen toleranteja kasvupaikan ja stressien suhteen (Tangahu ym. 2011). Molemmista suvuista löytyy fytooremediaatioon kykeneviä lajeja myös Pohjois-Euroopan suhteellisen kylmiin olosuhteisiin, joissa kasvukauden lyhyiden vuoksi myös puhdistuskausi on suhteellisen lyhyt.

Pajut ja bioremediaatio

Kontaminoituneen maan käsittelyyn on kokeiltu pohjoisella pallonpuoliskolla pajujen ja poppeleiden lisäksi mm. leppiä ja tammia, joskin suurin kiinnostus on kohdistunut nopeasti kasvaaviin lajeihin, joilla on selvitetty toleranssia ja akkumulaatiota lähinnä fytooremediaatiota ajatellen (Pulford & Watson 2003). Punshon ja Dickinsonin (1999) mukaan pajujen raskasmetalliresistenssiä (kupari, kadmium, nikkeli ja sinkki) selittävät enemmän erot kloonien- ja hybridien välillä kuin erot pajulajien välillä. Yleisesti ottaen *S. viminalis* ja *S. triandran* kloonit olivat sensitiivisiä ja *S. caprea*n vähemmän sensitiivisiä (Punshon & Dickinson 1999). Varsinkin kuparin ja sinkin konsentraatiot eri puun osissa vaihtelivat tutkituilla kahdeksalla pajulajilla huomattavasti, mutta yleisenä trendinä oli, että sinkki konsentroituu kupariin verrattuna suhteessa enemmän maanpäällisiin osiin (Nissen & Lepp 1997). Tämä suhde voi muuttua ainakin *S. viminalis*illa maaperän raskasmetallikonsentraatioiden noustessa (Sander & Ericsson 1998) ja lehtien varistessa. Raskasmetallien akkumulaatiossa onkin havaittu suuria eroja, sillä Greger ja Landberg (1999) havaitsivat pajugenotyyppien välillä 43 kertaisen eron kadmiumpitoisuuksissa. Heidän mukaansa parhaat genotyypit pystyivät akkumuloimaan viisi kertaa enemmän kadmiumia kuin

hyperakkumulaattorilaji *Alyssum murale*. Syynä siihen oli eräiden pajugenotyyppien erittäin voimakas biomassan kasvu ja kadmiumin tehokas siirto runkoon.

Mikro-organismit, kuten bakteerit ja sienet saattavat auttaa metalli-ionien kulkeutumisessa ja rakenteen muutoksessa muotoon, johon bioprosessit vaikuttavat (Wang ym. 2021). Orgaanisten saasteiden hajotuksessa (esim. öljyt ja PAH-yhdisteet) mikro-organismeilla on yleensä paljon suurempi rooli (Tagahu ym. 2011). Pajujen ja mikro-organismien suhdetta kadmiumin akkumulaatiossa selvitettiin eri pajugenotyypeillä ja havaittiin, että tiettyjen bakteerien runsaus on yhteydessä kyseisten pajugenotyyppien kykyyn allokoida kadmiumia (Wang ym. 2021).

Felixin (1999) mukaan *S. viminalis* on yksi parhaiten raskasmetalleja akkumuloivista kasveista, mutta hänen arvionsa oli, että kadmiuminpitoisuuden laskeminen hyväksyttävälle tasolle kestäisi kuitenkin yli 70 vuotta, mikä on käytännön puhdistustilanteessa liian pitkä aika. Näyttää myös siltä, että mitä pohjoisemmassa kasveilla yritetään maata puhdistaa, sitä pidempään puhdistumisaikaan pitää varautua. Sillanpää (2007) selvitti öljyhiilivedyillä saastuneeseen maaperän haavan hybridin (*Populus tremula x tremuloides*), rauduskoivun (*Betula pendula*) ja kiiltopajun (*S. phlycifolia*) *in situ* -kunnostusvaikutusta Helsingissä, Ylöjärvellä ja Kokkolassa. Saasteet olivat pääosin öljyjä ja PAH-yhdisteitä. Kokeilla ei saavutettu mitään selkeitä puhdistustuloksia ehkä johtuen testauksen erittäin lyhyestä kestoajasta (2–4 vuotta). Samoin Salam ym. (2020) havaitsivat, että vanha PAH-yhdisteitä ja öljyjä sisältävä metsäpohja ei ollut juurikaan puhdistunut kymmenessä vuodessa valituilla haapaklooneilla. Riddell-Black (1993) esittikin, että kolmenkymmentä vuottakaan ei ehkä riittäisi voimakkaasti saastuneen maan metallipitoisuuden laskemiseen hyväksyttävälle rajalle, jos tämän saasteen pitäisi allokoida puiden runkoihin. Hänen mukaansa tämä vaikeuttaa lyhytkiertoisten puulajien kuten pajun käyttöä varsinkin voimakkaasti saastuneiden kohteiden puhdistamisessa. Tosin Košnář ym. (2020) mukaan myös PAH-yhdisteiden puhdistaminen pajuilla onnistuu hyvin. He raportoivat kolmevuotisesta *S. smithianalla* tehdystä kokeesta, jossa onnistuttiin poistamaan yli 50 % polysyklisistä aromaattisista hiilivedyistä, kun vastaava arvo ilman pajuja oli vain alle 10 %.

Perinteisesti pajujen kykyä puhdistaa maaperää selvitetään ensin toleranssikokeilla ja laajalla joukolla raskasmetalleja kuten kadmiumilla, kromilla, kuparilla, nikkelillä, lyijyllä ja sinkillä. Lähinnä kasvukyvyn perusteella valittuja testattavia pajulajeja ja lajikkeita on tässä vaiheessa vielä yleensä runsaasti. Meers ym. (2007) käyttivät ulkona toteutetussa pottikokeessaan seuraavia lajikkeita: *S. dasyclados* 'Loden', *S. triandra* 'Noir de Villaines', *S. fragilis* 'Belgisch Rood', *S. purpurea* × *S. daphnoides* 'Bleu', *S. schwerinii* 'Christina' istutettuina eritavoin saastutettuihin potteluihin. Tutkituista lajikkeista 'Christina', 'Loden' and 'Belgisch Rood' lajikkeilla oli korkeat kadmium- ja sinkki- konsentraatiot ja ne valittiin ensivaiheen kenttätestaukseen, jossa määritettiin kuinka paljon kadmiumia ja sinkkiä ne pystyvät allokoidaan. Tämän jälkeen selvitettiin näiden lajikkeiden kasvukyky, sillä käytännön puhdistustehokkuus on allokointikykyyn ja biomassan kasvun yhteistulos (Meers ym. 2007).

Pajukokeissa on useimmiten yhdistetty kasvihuonekokeita ja lyhytaikaisia parin-kolmen vuoden kenttäkokeita (Traunfeld & Clement 2001, Chang ym. 2009, Hasegava ym. 2009). Raskasmetalleista useimmiten on testattu kadmiumtoleranssia ja -ekstraktiota, mutta myös sinkki ja kupari on usein ollut kiinnostuksen kohteena. Myös raskasmetallien allokointiolla pajun eri osiin on merkitystä; Roy ym. (2005) mukaan *S. viminalis*in kadmiumpitoisuudet olivat kaksivuotisen kenttäkokeen jälkeen pajun lehdissä suuremmat kuin rungossa. Vastaavanlaisia kenttäkoetuloja on saatu *S. viminalis*in kyvystä orgaanisten jätteiden hajottamisessa (öljypohjainen jäte) ja PAH-yhdisteiden määrissä varsinkin juuristovyöhykkeellä (Vervaeke ym. 2003). Pajun runko- puusta mitatut ekstraktiotehokkuudet olivat Mohan ja Pitmannin (2007) mukaan korkeimmat kadmiumilla, mutta taso jäi siltikin alle 0,5 %:n kymmenen koevuoden aikana ja vastaavasti

muilla tutkituilla raskasmetalleilla alle 0,1 %:n. Laboratoriokokeissa tosin *Salix* sp:llä päästiin lähes 10 % ekstraktioon käyttökelpoisesta lyijystä ja 1 % ekstraktioon arseenista. Nämä olivat noin 10 kertaa korkeammat lukemat kuin hybridipoppelien vastaavassa kokeessa (Mohan & Pittman 2007). Dos Santos Utmazian ym. (2007) mukaan näyttäisi siltä, että huolimatta pajujen suhteellisen alhaisista kadmium- ja kobolttikonsentraatioista metallitolerantit kloonit lajeista *S. matsudana*, *S. fragilis* ja *S. purpurea* olivat lupaavia fytoekstraktiokasveja niiden kovan kasvupotentiaalin ansiosta. Varsinkin kadmiumin ekstraktiokyky näyttää pajuilla olevan korkea voimakkaasti saastuneilla mailla (Dickinson & Pulford 2004). Tähän liittyvät kiinteästi myös pajujen vuorovaikutukset erilaisten mikrobien, kuten mykorritsasienten kanssa. Näyttääkin siltä, että *Salix*-hybridien genotyypit ovat hyvin erilaisia suhteessa mikro-organismien määrään, mikä vaikuttaa myös niiden kykyyn ottaa puun eri osiin kadmiumia (Wang ym. 2021).

Etelä-Ruotsissa pitkäaikaisen, kymmenen aluetta käsittävän energiapajukokeen tuloksena havaittiin runsaan 10 %:n lasku pintamaan kadmiumpitoisuuksissa verrattuna vastaaviin viljapeltöihin, mutta mitään selkeitä eroja ei havaittu kuparin, nikkelin, lyijyn ja sinkin suhteen (Dimitriou ym. 2012b). Poppelin ja pajun välisiä vertailukelpoisia fytoekstraktioarvoja on saatavilla suhteellisen vähän, mutta ainakin Algreenin ym. (2014) mukaan Tanskassa tehdyissä suhteellisen edustavissa kokeissa pajun fytoekstraktiokyky oli parempi kuin poppelilla ainakin kadmiumin, kuparin, nikkelin ja sinkin suhteen.

Suomessa on tutkittu pajujen käyttöä erityisesti kaivostoiminnan tuottamien raskasmetallien poistamisessa, mutta lähinnä vain lyhytaikaisilla laboratorio- ja kasvihuonekokeilla (Salam ym. 2016). Lajeina ovat olleet erilaisten pajuhybridien kuten *S. viminalis* × *S. schwerinii* × *S. dasycardos* lajikkeet, jotka olivat kasvaneet kuparilla, nikkellillä ja sinkillä kontaminoituneessa maassa. Metalliallokoitumista on myös yritetty lisätä erilaisilla kelaateilla ja kalkilla (Salam ym. 2019ab, Mohsin ym. 2019). Vaste näissä kokeissa oli varsin hyvä; vahvasti kontaminoituneessa maassa kasvaneiden 'Klara'-lajikkeen taimien biomassassa ja fytoekstraktiokyky kasvoi.

Metalliakkumulaation molekyyli-tason perustaa selvitettiin *S. caprea*lla ja todettiin, että saastuneessa ja puhtaassa maassa kasvaneet pajut eroavat toisistaan ainakin 20:n lehdistä löytyvän metalleja käsittelevän geenin suhteen (Konlechner ym. 2013) Geneettisesti modifoidut mikroorganismit (GMO) ovat parina viime vuosikymmenenä olleet myös remediaatioon liittyvissä tutkimuksissa keskeisesti esillä (Agnihotri & Seth 2019). Ei ainoastaan bakteerien ja sienten tehokkuutta, mutta myös suoraan kasvien fyto-remediaatiokykyä on yritetty parantaa geneettisten modifikaatioiden avulla (Davison 2005). Puulajeista ovat olleet mukana mm. eräät amerikkalaiset poppelilajit, kuten *P. deltoides* (Che ym. 2003).

Johtopäätöksiä

Dickinson ja Pulfordin (2004) mukaan kadmiumilla saastuneen maan puhdistus pajulla ja varsinkin lyhyen kiertoajan valittuja tehokkaita kloonveja viljelemällä on hyvin tehokasta verrattuna muihin raskasmetalleihin tai muihin puulajeihin. Tosin puhdistuksen onnistumisen edellytyksenä he pitävät voimakkaasti saastuneiden hotspottien etukäteiskartoitusta, toistuvaa sadonkorjuuta ennen lehtien putoamista ja kantojen poistoa lopullisessa hakkuussa (Dickinson & Pulford 2004).

Yhteenvedon voidaan todeta, että pajuissa on selkeästi potentiaalia maanpuhdistukseen ja tämä jopa saattaa korostua kylmissä olosuhteissa, joissa kasvukausi jää suhteellisen lyhyeksi. Toimivan puhdistuksen paikallisuus vaatii aina monivuotista paikallista kenttätestausta sekä lajike- tai kloonitason metallitoleranssin testausta. Paikallisesti pitäisi myös selvittää tarvitaanko maaperää parantavia käsitteilyjä kuten kalkitseminen ja/tai kelaatit (Tangahu ym. 2011, Mohsin

ym. 2019) auttamaan saasteiden kulkeutumisessa pajuihin. Puiden kasvua ja saastetoleranssia voidaan yrittää parantaa jalostuksella ja tiukalla kloonivalinnalla, tosin Punshon ja Dickinsonin (1999) mukaan pajulajien ja eri genotyyppien hyvinkin erilaiset vasteet raskasmetalleihin saattavat vaikeuttaa puiden valintaa ja vaatia pitkäkestoisia kenttäkokeita. Puhdistamistehokkuuteen vaikuttaa kuitenkin aina keskeisesti kaksi asiaa: kasvu ja toleranssi. Nämä pitäisi aina testata paikallisesti, sillä koetulokset vaihtelevat suuresti pajulajista ja lajikkeesta (kloonista), samoin kuin testaustavasta ja testauksen kestosta riippuen.

5.4. Pajut ravinteiden kierrätyksessä – lietelanta – tulevaisuuden optio?

Auvo Sairanen ja Kirsi Järvenranta

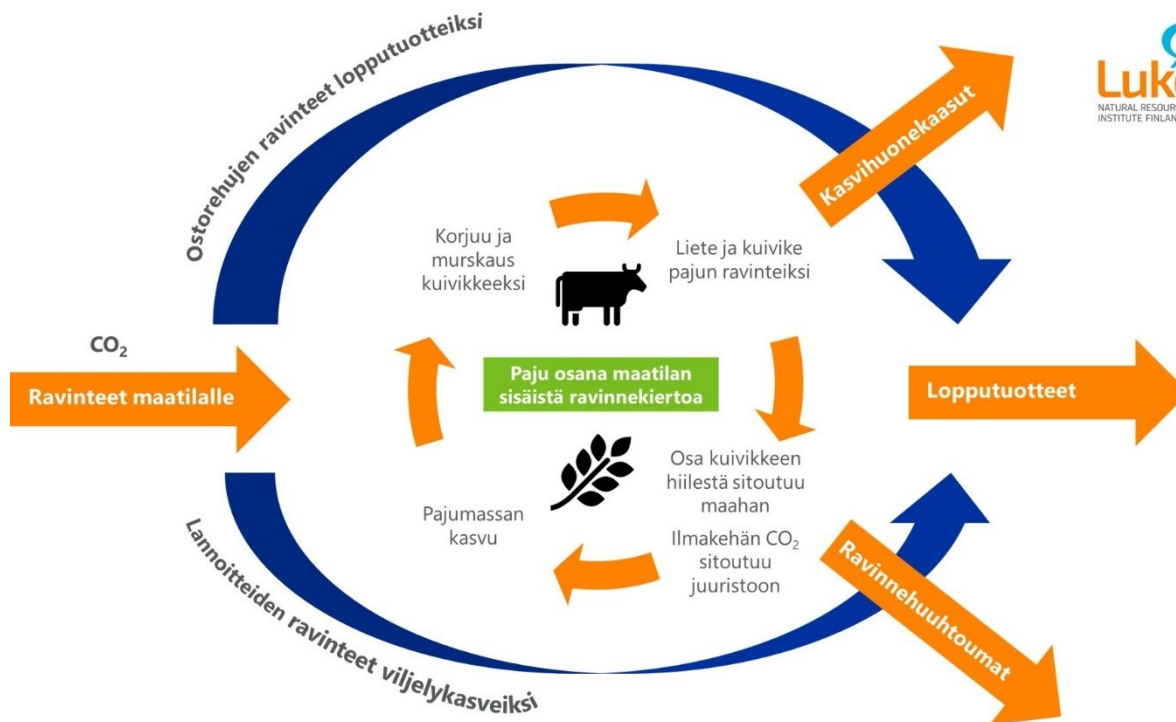
Kotieläinten tuottama lanta on arvokas ravinteiden lähde ja vaihtoehto kaupallisille lannoitteille, joiden tuottamiseen käytetään fossiilista energiaa. Lannan ongelmana on sen suuri vesipitoisuus, joka tekee lannan ravinteiden hyödyntämisen ekologisesti ja taloudellisesti kannattamattomaksi. Traktorikäyttöisellä kalustolla jo yli 10 km siirtomatkan kustannukset ylittävät ravinteiden arvon, jos arvona käytetään 5 €/m³, ja lisäkuljetuskilometrin hinta on 0,5 €/km. Rekkakuljetuksella voidaan pidentää kannattavaa kuljetusmatkaa isoissa yksiköissä. Vesipitoisuuden vuoksi lietteen ravinteiden hyväksikäyttö rajautuu joka tapauksessa suhteellisen lähelle talouskeskusta.

Kotieläintiloille ravinteet kuljetetaan tiivistetyssä muodossa rehujen ja kaupallisten lannoitteiden mukana jopa satojen kilometrien päästä. Ravinteiden kulkulogiikan vuoksi maatilat muodostuvat ravinteita kerryttäviksi alueelliseksi tiivistymiksi. Lannoitesuosituksien, nitraattiasetuksen, ympäristökorvausjärjestelmän ja lannoitelaki säätelevät pelto- ja kasvilajikohtaista lannoitusta (Ruokavirasto 2021b).

Kasvinviljelytilat voisivat käyttää kaiken tarjolla olevan lannan ravinteet, mukaan lukien turkiseläinten tuottama lanta. Ongelmana on kotieläin- ja kasvitilojen etäisyys. Kuljetuskustannuksia voitaisiin vähentää tiivistämällä lannan ravinteet pienempään tilaan. Teknisesti tämä on mahdollista, mutta taloudellisesti liian kallista tällä hetkellä käytössä olevalla teknologialla.

Vallitsevan käytännön mukaan lannan ravinteet hyödynnetään kotieläintiloilla joko omaan käyttöön tulevan rehun tuottamiseen tai ravinteita sisältäviksi myyntikasveiksi, joista viljat ovat tyypillisimpiä. Pohjoisessa viljakasvien laatu ei välttämättä täytä elintarviketeollisuuden vaatimuksia. Viljan lisäksi pelloilla voi tuottaa erikoiskasveja kuten kuminaa tai vihanneksia. Erikoiskasvit vaativat kuitenkin oman ammattitaidon ja viljelytekniikan. Rehun tuottamisen, lannan levitysalavaatimusten ja edellä mainittujen rajoitteiden vuoksi naudatilat hankkivat laskennalliseen rehutarpeeseen verrattuna ylimääräistä peltoa ja peltojen kasvupotentiaalista osa jää käyttämättä.

Maidon kulutus (Luke 2021a) ja lypsylehmien määrä on viime vuosina tasaisesti laskenut (Luke 2021b). Lehmien määrän vähentyessä vähenee myös vasikoiden määrä sekä naudanlihan tuotanto. Peltoala pysyy ennallaan, jolloin nautoihin perustuvasta kotieläintuotannosta on vapautunut ja vapautuu edelleen merkittävä määrä viljelysmaata.



Kuva 13. Maatalan sisäinen ravinteiden kierrätys ja kuivikkeen tuotanto pajun lyhytkiertoviljelyllä.

Paju tarjoaa yhden harvoista vaihtoehdoista rehuntuotannosta vapautuvalle peltomaalle viljanviljelyn kannattavuusrajan pohjoispuolella. Lyhytkiertopajun kannattava viljely vaatii peltomaan tukikelpoisuuden ja korkean satotason. Energiakäytössä paju ei ole osoittautunut kannattavaksi, mutta tulevaisuudessa maan hiilensidontavaatimus ja siihen mahdollisesti liitettävä tuki voivat kääntää tilanteen pajulle edullisempaan suuntaan. Juuristosidontan lisäksi hiilen takaisinkierrätystä voi lisätä käyttämällä pajua kestokuivituksen osana. Pajun lyhytkiertoviljely voisi tarjota mahdollisuuden ravinteiden kierrätykseen maatilalla (Kuva 13).

Kotieläinten lannoista naudanlanta soveltuu ravinnesuhteeltaan pajun lannoitteeksi. Pajulajikkeet hyötyvät typpilannoituksesta, mutta reagoivat vähemmän fosfori- tai kaliumlannoitukseen (Hytönen 1995b). Siipikarjan ja turkiseläinten lanta on hyvin fosforipitoista ja niiden kuiva-ainepitoisuus on korkea verrattuna tyypilliseen naudan lietelantaan (Taulukko 3). Näiden eläinten lanta soveltuu fosforiköyhille maille. Rehuntuotannosta vapautuva peltoala painottuu nautakarjatuotantoalueille, missä naudanlietteellä on suurin lannoituspotentiaali.

Taulukko 3. Lannan ravinnepitoisuuksia, kg/m³

	Kuiva-aine	Kokonais-N	Liukoinen N	Fosfori	Kalium
Naudanliete ¹	6 %	2,8	1,7	0,5	2,8
Sianliete ²		3,4	2,2	0,8	
Turkiseläimet ²	40 %	5,9	1,1	12,4	
Siipikarja ²		8,4	2,9	4,0	

¹ Eurofins 2021

² Ruokavirasto 2021b

Lannan ravinteiden käyttöä ohjaa nitraattiasetus (1250/2014), minkä vuoksi käytettävän lannan kokonaistypen vuotuinen käyttömäärä on Suomessa enintään 170 kg N/ha. Kokonaistypestä vain liukoinen osa katsotaan kasveille käyttökelpoiseksi eli taulukkoarvon (Ruokavirasto 2021b) mukaan vuotuinen maksimimäärä liukoista tyyppiä on 103 kg N/ha.

Paju korjataan keväällä ja tavanomaista istutustiheyttä käytettäessä lietteen levitys tehdään kesän alussa. Kasvukauden aikana levitettävä maksimimäärä naudanlietettä on 60 m³/ha, joka sisältää 170 kg kokonaistyyppiä, 30 kg fosforia ja 170 kg kaliumia. Ilman täydennyslannoitusta lietteen sisältämät N ja P alittavat energiapajun viljelyssä kappaleessa 4.3.2 esitetyn suositusmäärään 200 kg N, 46 kg P ja 100 kg K. Paju ei välttämättä ensimmäisenä kasvuvuonna pysty hyödyntämään kerralla annettua ravinnemäärää varsinkaan mineraalilannoitteena, jolloin ravinteiden huuhtoumariski suurenee. Liete sisältää tarpeeseen nähden ylimääräisesti kaliumia, mutta tämä ei nykyisen tiedon valossa ole kasveille eikä ympäristölle haitallista. Osa kaliumista voi sitoutua maahan ja olla kasvien käytettävissä lannoitusta seuraavina vuosina.

Lietteen kokonaistypestä osa mineralisoituu hitaasti kasveille käyttökelpoiseen muotoon, joten lannoitusvaikutus yltyä osittain levitystä seuraavaan vuoteen. Tässä suhteessa lietteen lannoitusvaikutus on kolmen vuoden lannoitusvälillä jopa parempi kuin kaupallisilla tuotteilla. Kaupallisten mineraalilannoitteiden ongelma pajun kannalta on niiden nopealiukoisuus. Korjuun jälkeen annetun suuren kertalannoituksen vaikutus seuraavina kasvukausina on heikko. Paju hyötyisi vuosittain annettavasta N-lannoituksesta, mutta käytännössä tavanomaisen pajuviljelmän vuosittainen lannoitus ei onnistu (Hytönen 1995b).

Viljelykokeissa erilaisilla lannoitteilla saadut typpilannoituksen vasteet ovat vaihdelleet 15–67 kg ka/kg N (Larsen ym. 2016, Sevel ym. 2014a, Aronsson ym. 2014). Satovasteet lisäfosforille ovat olleet vähäisiä. Yleispätevää lannoitusuositusta on vaikea antaa, koska lannoitavaste riippuu pajulajikkeesta, kasvuston iästä, maalajista ja maan orgaanisen aineksen määrästä, mykoritsoista, maan vedenpidätyskyvystä sekä lannoitelajista (Baum ym. 2020). Koska ravinteiden hyväksikäyttö vaihtelee paljon, myös ravinnehävikit vaihtelevat. Huuhtoutuminen ja kaasumaiset emissiot kasvavat, jos kasvusto ei hyödynnä ravinteita (Sevel ym. 2014b, Larsen ym. 2016).

Yksi vaihtoehto lietteen käytön lisäämiselle on pajun vuoroviljely nurmen kanssa, agroforestry (Dupraz ym. 2018). Tällöin lietettä voidaan levittää kasvulohkolle vuosittain ja sijoitettavaa menetelmää käytettäessä tyyppien haihtumistappiot pienenevät täystiheän pajun hajalevitykseen verrattuna (Mattila & Joki-Tokola 2003). Viljellyn kaistan leveys täytyy olla vähintään 4 m käytettävän koneistuksen mukaan. Viljelykaistojen välillä voi olla paririvi 80 cm välillä. Nurmivaihtoehto täytyy valita käyttökohteen mukaan. Biokaasun raaka-aineeksi valitaan talvenkestävä perusnurmilajike. Hiilensidonnalla kannalta ruokohelpi on huomionarvoinen, pitkäikäinen laji. Kuivikekäyttöön ennen kasvukauden alkua korjattavan ruokohelven uusimisväli voi olla 10 vuotta.

5.5. Pajut hiilen sitojina ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen turvemailla

Lasse Aro ja Hanna Kekkonen

5.5.1. Paju hiilen sitojana

Pajujen hyvät hiilensidontaominaisuudet perustuvat niiden nopeaan kasvuun ja suureen biomassatuotokseen, kun kasvupaikan olosuhteet ovat sopivat kulloinkin viljeltävälle lajille (ks. kappale 4.3; Keoleian & Volk 2005, Caslin ym. 2015, Cunniff ym. 2015). Pajuviljelmien vuotuisesta hiilensidonnasta voi jopa 40–50 % kohdistua karikkeen ja maanalaisen hiilivaraston lisäykseen (esim. Agostini ym. 2015). Erityisen tärkeä merkitys tässä yhteydessä on pajun juuristolla, joka on yleensä laaja ja joka vielä suurenee pajun ikääntyessä (esim. Matthews 2001, Keoleian & Volk 2005, Pacaldo ym. 2013, Cunniff ym. 2015). Suuri osa maanalaisesta biomassatuotoksesta tulee hienojuurten kasvun kautta (Rytter 2001, Rytter ym. 2015). Pajun maanalaisesta biomassasta 85–92 % sijaitsee maaperän 30 cm:n paksuisessa pintakerroksessa (Rytter & Hansson 1996, Pacaldo ym. 2013).

Maanpäällinen pajukasvusto korjataan pois 3–5 vuoden korjuukierroilla, joten kasvupaikan hiilivaraston lisäys perustuu maanalaiseen juuribiomassaan ja maan orgaanisen hiilivaraston kasvuun (ks liite 3). Arviot maanalaisen hiilivaraston kertymisestä vaihtelevat kuitenkin suuresti. Caslin ym. (2015) raportoivat, että pajuviljelmä voi sitoa vuosittain hiiltä kanto- ja juuribiomassojen sekä maan orgaanisen hiilen lisäyksen kautta 0,12 tn C/ha. Rytter ym. (2015) sen sijaan saivat maanalaisen hiilivaraston lisäykseksi ruotsalaisilla pelloilla 0,98–2,79 tn C/ha/v, kun pajun maanpäällinen biomassatuotos oli 2,0–5,7 tn/ha/v. Hamelin ym. (2012) mallinsivat pajukasvuston aiheuttamaksi maan orgaanisen hiilen lisäykseksi Tanskan hiekkaisilla peltomailla keskimäärin 524 kg C/ha/v 20 vuoden aikana. Ruotsissa Rytter (2012) sai maahiilen lisäykseksi 22 vuoden aikana keskimäärin 410 kg C/ha/v hyvin hoidetuissa pajuviljelmissä viljavilla pelloilla ja Rytter ym. (2015) viiden vuoden seurannassa 150–450 kg C/ha/v. Hiilen kertyminen lyhytkiertoviljelmien eri osiin tunnetaan varsin hyvin, mutta maan orgaanisen hiilen dynamiikasta ja hiilen huuhtoutumisesta kasvupaikalta tiedetään vähän (esim. Sartori ym. 2006, Rytter 2012, Rytter ym. 2015, Agostini ym. 2015).

Pajun kasvatuksella on positiivisia ilmastovaikutuksia, kun pajun viljelyä tarkastellaan koko arvoketjun osalta esim. energia- ja elinkaarianalyysien perusteella, jolloin huomioidaan mm. fossiilisten raaka- ja polttoaineiden korvaaminen uusiutuvalla biomassalla (esim. Heller ym. 2003, Keoleian & Volk 2005, Djomo ym. 2011, González-García ym. 2012, Holland ym. 2015, Parajuli ym. 2017).

Suomessa pajuviljelmien kasvatus sopii hyvin maatalousmaille. Kun turvemaiden käytön negatiivisia ilmastovaikutuksia pyritään vähentämään, pajua voisi harkita yhtenä kosteikkoviljelyn vaihtoehtona turvemaiden pelloilla, suonpohjilla ja turpeennostoalueilla käyttämällä lyhytkiertoviljelyn menetelmiä (ks. kappale 4.3).

5.5.2. Päästöjen vähentäminen turvellidoilla

Yli puolet maatalouden ja maatalouden maankäytön tuottamista päästöistä muodostuu viljeltyiltä turvemailta, jotka kattavat noin kymmenyksen Suomen kokonaisviljelyalasta (Tilastokeskus 2021c).

Tehokkaimmat keinot vähentää turvemailta muodostuvia päästöjä ovat ennallistaminen, metsittäminen, kosteikkoviljelyyn siirtyminen tai pohjavedenpinnan nostaminen erilaisin ojitusratkaisuin (Lehtonen ym. 2021). Kekkonen ym. (2019) mukaan Suomessa on noin 26 000 hehtaaria heikkotuottoista eloperäistä peltoalaa, joka ei ole ollut elintarvikkeiden tai rehuntuotannossa. Nämä pellot lisäävät Suomen maankäyttösektorin päästötaakkaa hyödykkeiden tuotannon sijaan, ja siksi ne voisivat ensisijaisesti soveltua aktiivisten päästövähennystoimenpiteiden jalkauttamiseen, jolloin niiden päätuote olisi päästövähennys. Kun kosteikkoviljelyä arvioitiin maankäyttösektorin ilmastotoimenpiteiden päästövähennysmahdollisuutena (Lehtonen ym. 2021), sen tavoitepinta-alaksi kirjattiin 30 000 hehtaarin määräala, joka vastaa suunnilleen Maatalouden ilmastotiekartan (Lehtonen ym. 2020) keskiskenaariossa asetettuja tavoitteita.

Ennallistaminen ja metsittäminen johtavat peltolohkon poistumiseen aktiivisesta viljelystä, mikä voi tarkoittaa maanomistajalle pinta-alaan sidonnaisten tukien menetystä, mikä puolestaan voi heikentää maanomistajan halukkuutta toimenpiteiden toteuttamiseen.

Metsittämisen ja ennallistamisen sijaan maanomistajilla on olemassa vaihtoehto siirtyä kosteikkoviljelyyn, jossa tavoitteena on nostaa pohjavedenpintaa joko säätösalaajitusmenetelmin tai padotusjärjestelmin mahdollisimman lähelle maan pintaa, noin 0–20 cm:n maanpinnan rajasta viljelykasvista ja vedenhallinnallisista rajoitteista riippuen. Tällöin peltolohko on mahdollista pitää tuottavana ja viljeltävästä kasvilajista riippuen pinta-alaperusteisten maataloustukien piirissä. Kosteikkoviljely ei toistaiseksi ole maataloustuin tuettu viljelymenetelmä, mutta ohjauskeinoihin pyritään saamaan muutoksia (Berninger ym. 2020).

Vedenpinnan hallinnasta johtuen viljelykasvien valikoima rajautuu perinteisistä viljelykasveista hyvin kosteutta sietäviin kasveihin. Mahdollisia kasveja kosteikkoviljelyyn olisivat muun muassa erilaiset helpet, osmankäämi, erilaiset märissä oloissa viihtyvät marjat sekä paju, joista mm. ruokohelpi ja paju kuuluvat tuettaviin kasveihin (Naukkarinen 2021). Näiden kasvien ohella muita kosteikkoviljelyyn soveltuvia kasveja ovat luonnolliset kasvit, jotka viihtyvät kosteissa oloissa (Laurila 2018), mutta peltomaan ravinteikkaus ja korkea pH saattavat vaikuttaa kasvien menestymiseen. Peltomaassa on usein myös suuri nopeakasvuisten rikkakasvien siemenpankki, joten pienten taimien kasvuresurssien riittävydestä kasvun alkuvaiheessa on huolehdittava, mikä tarkoittaa ahkeraa rikkakasvien torjuntaa.

Maatalousmaana olleet peltomaat eroavat turvetuotantoalueista muun muassa ravinteikkuaudeltaan. Peltomaat on usein kalkittu ja lannoitettu ja maaperä on perustusvaiheessa kuiva ja tasainen, jolloin niiden muuttaminen pajuviljelmiksi onnistuu turvetuotantoalueisiin verrattuna vähemmällä alkupanostuksilla. Siksi vähäravinteisemmat ja happamammat turvetuotantoalueiden pohjat voisivat olla luonnostaan parempi vaihtoehto esimerkiksi suomarjojen kosteikkoviljelyyn.

Pajun soveltuvuutta kosteikkoviljelyyn tutkitaan parhaillaan Luonnonvarakeskuksen koordinoimassa SOMPA-hankkeessa (Uudet maatalous- ja metsämaan viljely- ja hoitomenetelmät – avain kestävään biotalouteen ja ilmastomuutoksen hillintään - hanke). Tutkimuksessa verrataan kolmen kasvilajin, pajun, rehunurmen sekä juolukan soveltuvuutta kosteikkoviljelyyn Suomen oloissa, ja tutkitaan maaperän kaasunvaihtoa sekä kasvien hiilensidontaa pimeä- ja valokammioimenetelmin sekä mittaamalla maahengitystä. Peltomaan peltoviljelykasveille optimoidut viljelyolosuhteet eivät ole kuitenkaan olleet juolukalle suotuisat, ja ne eivät menestyneet koekentällä lainkaan. Nämä ruudut muutettiin myöhemmässä vaiheessa koetta luonnonhoitopeltoa vastaaviksi. Sen sijaan paju ja rehunurmi ovat menestyneet korkeasta vedenpinnasta huolimatta, ja ensimmäisiä tuloksia sadoista sekä kasvihuonekaasuista saadaan vuosien 2022 ja 2023 aikana. Pajuruutujen sato korjattiin ensimmäisen kerran helmikuussa 2021.

Kosteikkoviljelmän perustamiseen sisältyy viljeltävän kasvin istutus- ja kylvötyöt, minkä jälkeen pellon padotus suljetaan, jolloin sade- sekä lumien sulamisvedet pidättyvät alueelle. Turvepelot voivat poutaisina jaksoina olla todella kuivia, ja siksi istutusvuonna taimien alkuunlähtövaiheessa maaperän kosteudesta on huolehdittava, kun pelto ei vielä ensimmäisenä vuonna ole läpikotaisin märkä. Tämä voi aiheuttaa viljelijälle lisätyötä, sillä mikäli kasvuun lähdöstä ei huolehdi, taimet kuivuvat ja niihin kohdennettu investointi menee hukkaan. Selkeiden markkinoiden puute askarruttaa viljelijöitä, samoin viljelyn tukitaso. Alkuinvestoinnille saa sadon tuoton kautta vastinetta vasta noin kolmen vuoden kuluttua, kun ensimmäinen sato on korjattavissa.

5.5.3. Päästöjen vähentäminen turvetuotantoalueilla

Turvetuotantoalueet ja turvetuotannosta vapautuneet suonpohjat (Kuva 14), jotka eivät ole vielä siirtyneet uuteen maankäyttöön, ovat merkittäviä hiilen lähteitä. Näiden alueiden uudella maankäytöllä, kuten soistaminen tai metsitys, voidaan vähentää päästöjä, ja osa alueista saattaa muuttua jopa hiilinieluiksi (esim. Lehtonen ym. 2021). Suonpohjien ominaisuudet tukevat osittain myös pajun viljelyä.

Suonpohjille on tyypillistä jäännösturpeen suuri typpimäärä, mutta puiden hyvän kasvun kannalta turpeessa on niukasti fosforia ja kaliumia (Aro ym. 1997, Hytönen ym. 2018). Suonpohjien kasvualusta on hapan, pH on tyypillisesti selvästi alle 5 (Hytönen 1996). Suonpohjien kuivatus-tila on yleensä hyvä. Sen sijaan alavat osat turvetuotantoalueista pidetään kuivina pumpppamalla, jolloin turpeennoston päätyttyä ne sopisivat hyvin kosteikkoviljelyyn korkealle nousevan pohjavesipinnan takia.

Hiilipäästöjen vähentäminen suonpohjilta pajun lyhytkiertoviljelyllä vaatii tehokkaat ja oikein ajoitetut toimenpiteet sekä kasvupaikalle sopivan viljelymateriaalin (ks. kappale 4.3). Pajun lehdetön, maanpäällinen tuotos on ollut suonpohjilla parhaimmillaan 4–9 tn/ha/v (Taulukko 2, kappale 4.4). Biomassaa kertyy sekä maan päälle että alle, ja hiilensidonnan kannalta on tärkeää, että sitä kertyy mahdollisimman paljon juuri maan alle (esim. Lemus & Lal 2005). Hytösen (1994, 1995a, 1995b) mukaan pajujen (*Salix x dasyclados*, *S. cv. aquatica*) maanalainen biomassatuotos ilman hienojuuria oli 32–39 % maanpäällisestä lehdettömästä tuotoksesta suonpohjilla, kun typpi- ja fosforilannoitus oli riittävä pajun hyvän kasvun kannalta.

Jos oletetaan, että pajun maanpäällinen, lehdetön biomassatuotos on 6 tn/ha/v (Taulukko 2, kappale 4.4), kuiva-aineen hiilipitoisuus 50 %, maan orgaanisen hiilen (SOC) vuotuinen lisäys karikesyötteen kautta 13 % maanpäälliseen puubiomassaan vuosittain sitoutuvasta hiilimäärästä (Rytter 2012), niin 20 vuoden kuluessa maan orgaanisen hiilen varasto kasvaisi vuosittain keskimäärin 392 kg/ha. Jos maanalaisen puubiomassan vuosituotos on 36 % pajun maanpäällisestä lehdettömästä tuotoksesta, niin sen sitoman hiilen määrä on 1 080 kg/ha, mitä voidaan myös pitää pitkäikäisenä kasvupaikan maaperään kertyvänä hiilenä 20 vuoden aikajänteellä. Lisäksi maanpäälliseen puubiomassaan sitoutuisi hiiltä joka vuosi keskimäärin 3 000 kg/ha, joka tosin poistettaisiin kasvupaikalta 3–5 vuoden välein. Rytter ym. (2015) arvioivat, että korjuun jälkeen kasvupaikalle jäävä hiilen määrä pajujen kannoissa ja karkeissa juurissa olisi noin 20 % maanpäällisen runkobiomassan hiilimäärästä ruotsalaisilla pelloilla.

Kun metsitetyiltä suonpohjilta on mitattu jäännösturpeen hajoamisen hiilipäästöksi 2 840–3 810 kg/ha/v (Mäkiranta ym. 2007, Silvan & Hytönen 2016), niin pajun lyhytkiertoviljelyllä voitaisiin parhaimmillaan sitoa hiiltä vuosittain enemmän kuin turpeesta vapautuu. Jos huomioidaan vain maaperään kertyvä hiili, niin silloin pajun viljelyllä voitaisiin kompensoida 39–52 % suonpohjaturpeen hiilipäästöistä. Yksinkertaistetussa laskelmassa ei ole huomioitu

kosteikkoviljelystä aiheutuvaa metaanipäästöä, hiilen huuhtoutumista pois kasvupaikalta eikä pintakasvillisuuden hiilensidontaa, jonka merkitys voidaan tosin olettaa pieneksi suonpohjalla. Osa hienojuurten tuotoksesta ja lehtibiomassasta puolestaan jää karikkeen hajoamisen kautta maan orgaanisen hiilivaraston lisäykseksi kunkin korjuukierron aikana (Rytter 2012). Maaperän hiilivaraston kasvu ei kuitenkaan ole jatkuva prosessi, vaan se pienenee ajan myötä.



Kuva 14. Pajuviljelmää turpeennostosta vapautuneella suonpohjalla Haapaveden Piipsannevalla. Kuva: Lasse Aro.

5.6. Pajut viherrakentamisessa

Eeva-Maria Tuhkanen ja Aki Sinkkonen

Pajujen (*Salix* spp.) käyttömahdollisuudet viherrakentamisessa ovat hyvät, sillä pajulajeja ja -risteymiä on suuri määrä, kasvumuotojen vaihdellessa maanpeittopensaasta korkeaan pensaaseen ja puumaisiin muotoihin. Pajut myös sietävät erilaisia haastavia olosuhteita, kuten märkyyttä, tuulisuutta ja savisuutta. Pajujen käyttö on aiemmin kuitenkin rajoittunut lähinnä muutama suositun puumaiseen muotoon, ja pensaita on käytetty vähemmän.

Nykyinen suuntaus monipuolistaa viheralueiden kasvivalikoimaa (Turun kaupunki 2021) ja pyrkii luonnonmukaisempaan viherrakentamiseen, jossa otetaan luonnosta mallia ekosysteemi- ja palveluiden tuottoon, luo tilausta myös pajujen käytölle. Viherrakentamisen kasveilla, erityisesti puuvartisilla, voidaan vähentää rakennetun ympäristön haittoja, kuten vähentää ja puhdistaa hulevesiä (Juhanoja & Tuhkanen 2019), viilentää ja lieventää lämpösaarekeilmiötä, sitoa ilmansaasteita ja vaimentaa melua (Malinen ym. 2020). Pajujen käyttöön onkin kasvava kiinnostus mm. hulevesien luonnonmukaisessa hallinnassa (ks. liite 3).

Viherrakentamisen lajivalinnoissa pyritään esteettisen ja maisemallisen elementin ja ekosysteemi- ja palveluiden tuoton lisäksi tukemaan myös rakennetun ympäristön eliöstön monimuotoisuutta. Pajut ovat varhain keväällä kukkivina lajeina tärkeitä pölyttäjähyönteisten ravintokasveja aikana, jolloin muuta ravintoa on vähän tarjolla.

Ihmisen terveyden ja hyvinvoinnin sekä monimuotoisuuden tukemisessa viherympäristön kasvillisuuden avulla on olennaista lajiston monimuotoisuus, myös toiminnallisessa mielessä, sekä kasvillisuuden kerroksellisuus ja biomassan runsaus, sillä monien ekosysteemipalveluiden määrä, kuten hiilensidonta, haihduttaminen ja ilmansaasteiden sidonta, riippuu suoraan kasvillisuuden lehtipinta-alasta. Pajut ovat vielä aliedustettu ryhmä viherrakentamisen kasvivalikoimassa.

5.6.1. Puumaiset pajulajit julkisessa viherrakentamisessa

Kaupunkipuurekisteri antaa hyvän kuvan Turun julkisen kaupunkipuuston *Salix*-suvun valikoimasta tällä hetkellä (Taulukko 4). Kaupunkipuurekisteriin sisältyvät keskustan julkisten alueiden kaupunkipuut, jotka ovat kaupungin hoidossa, sekä julkisten tonttien, kuten koulujen, sairaaloiden yms. puut. Turussa puurekisterissä on noin 33 400 puuta, ja lähes 900 niistä on pajuja (Taulukko 4, Aki Männistö 22.9.2021). Kaupunkipuurekistereitä käytetään apuvälineenä kaupunkipuuston hallinnoinnissa ja hoidon suunnittelussa ja ne liittyvät kaupungin paikkatietojärjestelmiin.

Puurekisterin perusteella yleisin pajulaji on raita (*Salix caprea*), joista valtaosa on luontaisesti kasvaneita, ja vain kymmenkunta kappaletta istutettuja. Raita kukkii varhain keväällä ennen lehtien puhkeamista, millä on merkitystä pölyttäjähyönteisille ja maisemallisesti. Raitaa on suunnitelmassa istuttaa Turussa hulevesikohteeseen puhdistamaan vettä ja hidastamaan veden virtausta yhdessä tervalepän kanssa.

Yleisimpiä istutetuista puumaisista lajeista ovat pitkään olleet hopeasalava (*S. alba* f. *sericea* 'Sibirica', rekisterissä *S. alba* 'Sibirica') ja pyöreä- ja tiheälätvuksinen terijoensalava (*S. euxina* 'Bullata', rekisterissä *S. fragilis* 'Bullata'). Näiden käyttö on vähentynyt ja määrät vähenevät, kun ikääntyviä puita joudutaan riskien vuoksi poistamaan. Terijoensalavaa ei enää juurikaan istuteta lisää. Se kärsii kovasti kuivista kesistä eikä toivu. Hopeasalava on moneen kasvupaikkaan liian iso puu, mutta tilan riittäessä ja korvausistutuksiin niitä istutetaan jonkin verran (sähköpostikeskustelu syyskuussa 2021, puuasiantuntija Aki Männistö, Turun kaupunki ja ympäristösuunnittelija Jyrki Lehtimäki, Tampereen kaupunki).

Melko yleinen on myös kujasalava (*S. x fragilis* f. *fragilis*, rekisterissä *Salix x rubens*) ja isoriippasalava 'Lasipalatsi' (*S. x pendulina* f. *pendulina*, rekisterissä *Salix x rubens* 'Lasipalatsi').

Taulukko 4. *Salix*-lajit ja lukumäärät Turun kaupunkipuurekisterissä (Aki Männistö 22.9.2021). Luettelo ei ole täydellinen. Nimistö Väre ym. (2021) mukaan.

Pajulaji/lajike	Lukumäärä
<i>S. sp.</i> (salava)	12
<i>S. alba</i> (valkosalava)	6
<i>S. × fragilis</i> f. <i>vitellina</i> 'Britzensis' (korallisalava)	4
<i>S. caprea</i> (raita)	307
<i>S. × pendulina</i> f. <i>salamonii</i> 'Chrysocoma' (keltariippasalava)	1
<i>S. × fragilis</i> (jokisalava)	2
<i>S. euxina</i> 'Bullata' (terijoensalava)	154
<i>S. pentandra</i> (viitahalava)	9
<i>S. alba</i> f. <i>sericea</i> 'Sibirica' (hopeasalava)	225
<i>S. × fragilis</i> f. <i>vitellina</i> (keltasalava)	3
<i>S. × fragilis</i> f. <i>fragilis</i> (kujasalava)	117
<i>S. × pendulina</i> 'Lasipalatsi' (isoriippasalava)	56
<i>S. × fragilis</i> 'Vinterglöd' E (korallisalava)	3
Kaikki yhteensä	899

Tampereen (Tampereen kaupunki 2020) ja Helsingin kaupungeilla on yhteistyöhanke Mustilan Kotikunnas Säätiön kanssa, jossa etsitään uusia, kestäviä ja ilmastonmuutokseen sopeutuvia kaupunkipuulajeja koeistutuksilla. Säätiö etsii sopivaa lisäysmateriaalia ja kaupungit huolehtivat istutuksesta ja hoidosta. Taimien menestymistä erilaisissa olosuhteissa tahot seuraavat yhteistyössä. Tampereen kaupungille on tämän yhteistyön puitteissa tullut kokeiluun mm. seuraavia pajulajeja (Taulukko 5).

Taulukko 5. Tampereen kaupungilla kokeilussa olevia puulajihankkeen *Salix*-lajeja (Jyrki Lehtimäki 22.9.2021). Nimistö Väre ym. (2021) mukaan.

Pajulaji / lajike	Suomenkielinen nimi
<i>S. × fragilis</i> f. <i>vitellina</i> 'Basfordiana'	keltasalava
<i>S. × fragilis</i> f. <i>fragilis</i>	kujasalava
<i>S. × pendulina</i> f. <i>pendulina</i> 'Lasipalatsi'	isoriippasalava
<i>S. × fragilis</i> f. <i>fragilis</i> 'Padasjoen Pendula'	kujasalava
<i>S. × fragilis</i> f. <i>fragilis</i> 'Russelliana'	kujasalava
<i>S. × pendulina</i> f. <i>pendulina</i> 'Blanda'	kyynelsalava

Puumaisten pajulajien käyttöä rakennetussa ympäristössä rajoittaa herkkyys kuivuudelle (Niinemets & Valladares 2006). Päälystettyjen pintojen ympäröimänä puut kärsivät usein kuivuudesta jo normaalina kesänä. Tahtotila johtaa hulevesiä puiden ja muun kasvillisuuden käyttöön sekä varastoida hulevettä esim. katupuiden kantavien kasvualustojen yhteydessä saattaa tulevaisuudessa tuoda helpotusta tähän ongelmaan ja tuoda lisää käyttömahdollisuuksia pajulajeille. Puumaiset pajut sopivat hyvin vaikkapa ranta-alueille, puistoihin ja luonnonmukaisemille viheralueille.

Useilla puumaisilla pajuilla on taipumus revetä myrskyissä puuaineksen hauraudesta johtuen. Pajut ovat myös yleensä nopeita lahoamaan. Tämä toki tarjoaa lahoppuuta kaupunkiympäristöön, ja esim. Tampereella on jätetty Sorsapuistoon kaatuneen hopeasalavan kanto ja juurakko.

Pajujen käyttöä kaupunkipuuna rajoittaa lyhytikäisyys. Hoidon kannalta pajujen elämänkaarta rakennetussa ympäristössä lyhentää myös se, että ne eivät kestä kovinkaan hyvin kevennyksiä tai latvuksen pienentämistä. Latvuksen pienentäminen on leikkuutapa, jolla huonokuntoisen puun ympäristölle aiheuttamia riskejä pystytään pienentämään ja säilyttämään puu vielä muutamia vuosia kasvupaikallaan turvallisesti. Se toteutetaan usein yhdessä latvustuennan kanssa.

Monista pajulajeista varisee myös pieniä ja isompiakin oksia melko paljon, mikä rajoittaa niiden käyttöä katujen ja kulkuväylien varrella. Pajujen voimakas juuristo pystyy myös tunkeutumaan rakenteisiin, kuten hulevesi- ja jätevesiputkiin.

Pajuilla on kuitenkin hyvä ekologinen merkitys erityisesti hyönteisten kannalta, ja ne tarjoavat myös linnuille risuja pesänrakentamiseen. Pajut kasvavat parhaiten aurinkoisella kasvupaikalla ja sietävät keskinkertaisesti varjoa (Niinemets & Valladares 2006). Pajujen menestyminen savi- ja maalla sekä avoimilla ja tuulisilla paikoilla on hyvä puoli. Pajulajeja käytetään suojaistutuksiin, joissa nopeakasvuisuus on myös etu. Pajulajien, varsinkin pensasmaisten käyttö hulevesien hallintaan tulee todennäköisesti lisääntymään lähitulevaisuudessa (Kuva 15).



Kuva 15. Hulevesipainanteen istutus Ranta-Tampellassa Näsijärven rannassa Tampereella. Kuvassa villapajua (*Salix lanata*), tervaleppiä (*Alnus glutinosa*) ja lähempänä rantaa kotipihlajia (*Sorbus aucuparia*). Lähistöltä johdetaan hulevesiä painanteeseen imeytymään maaperään. Kuva: Jyrki Lehtimäki.

5.6.2. Pensasmaiset pajut julkisessa viherrakentamisessa

Pensasmaiset pajut eivät sisälly puurekisteriin, mutta Turussa istutetut pensasryhmät ja niiden pinta-alat ovat omassa rekisterissään. Tähän sisältyvät Turun keskustan julkisille alueille istutetut pajuryhmät ovat Taulukossa 6. Pensasrekisteriin sisältyy myös puumaiseksi kasvavia pajulajeja. Yleisempiä ryhminä istutettuja pajupensaita ovat Turussa punapaju (*S. purpurea*), kiiltopaju (*S. phylicifolia*), kääpiöpunapaju (*S. purpurea* 'Nana') ja koripaju (*S. viminalis*).

Pensaspajuista löytyy eroja niin kasvumuotojen, korkeuden kuin lehvästön ja versojen värin suhteen, mikä tuo viheralueille kaivattua vaihtelua. Matalia maanpeittäjiä ovat lehvästöltään tummanvihreä ja kiiltävälehtinen peittopaju 'Tuhkimo' (*S. x aurora*) ja harmahtavanvihreä paljakkapaju 'Haltia' (*S. glauca* var. *callicarpaea*). Nämä ovat saaneet FinE-tunnuksen (<https://www.taimistoviljelijat.fi/finekasvit/mikaonfine>), mikä kertoo, että kasvi on Suomessa tutkittu, ilmastollisesti kestävä, terve, lajikeaito, käyttö- ja koristearvoltaan hyvä kasvi.

FinE-kasvit lisätään testatuista emokasveista, jotka on puhdistettu tärkeimmistä kasvitaudeista ja tuhoojista.

'Haltia' ja 'Tuhkimo' olivat testissä myös Liikennevihreä-koealueella moottoritien keskiosan viherkaistalla, jossa ne menestyivät kohtuullisen hyvin ja kasvoivat peittäviksi (Tuhkanen 2015, 2016). 'Haltian' huono puoli on, että lehvästö saa helposti ruostesienitaudin ja ränsistyy syksyllä.

Pensasmaisten pajujen käytön kannalta hyvät ominaisuudet ovat pitkälti samoja kuin puumais-tenkin lajien kohdalla, eli märkyyden-, tuulen- ja savisen maan sieto. Huono puoli kunnossapidon kannalta on melko nopea pensasryhmän ränsistyminen, eli alasleikkuun tarve tulee useammin kuin monella muulla lajilla. Pajut eivät yleensä siedä myöskään lumikuormaa kovinkaan hyvin. Hyvän uudistumiskyvyn ja kasvun takia pajut sopivat kuitenkin kohteisiin, joissa kulutus on suurta, kuten päiväkotien ja koulujen piha-alueille.

Taimimateriaalin saanti saattaa kuitenkin rajoittaa pajujen käyttöä kysynnän kasvaessa. Puumaisten taimia on saatavilla perusvalikoima, mutta eri pajupensaslajien taimien saatavuus on ollut heikko.

Taulukko 6. Turun kaupungin julkisilla alueilla olevia pensasmaisia pajulajeja ja istutusten pinta-alat (Aki Männistö 22.9.2021). Luettelo ei ole täydellinen. Nimistö Väre ym. (2021) mukaan.

Pajulaji / lajike	Pinta-ala (m ²)
<i>S. sp.</i> (paju)	126,0
<i>S. cinerea</i> (tuhkapaju)	134,0
<i>S. euxina</i> 'Bullata' (terijoensalava)	1 173,0
<i>S. lanata</i> (villapaju)	26,0
<i>S. myrsinifolia</i> (mustuvapaju)	157,0
<i>S. phyllicifolia</i> (kiiltopaju)	2 926,0
<i>S. purpurea</i> (punapaju)	5 416,0
<i>S. purpurea</i> 'Nana' (kääpiöpunapaju)	2 346,0
<i>S. repens</i> (siropaju)	132,0
<i>S. repens</i> ssp. <i>repens</i> var. <i>argentea</i> (hietikkosiropaju)	10,0
<i>S. repens</i> 'Saret' (hanhenpaju)	5,0
<i>S. repens</i> ssp. <i>rosmarinifolia</i> (kaitasiropaju)	885,0
<i>S. viminalis</i> (koripaju)	1 750,0
<i>S. x fragilis</i> f. <i>vitellina</i> (keltasalava)	4,0
<i>S. x aurora</i> 'Tuhkimo' (peittopaju)	805,0
<i>S. glauca</i> ssp. <i>callicarpaea</i> 'Haltia' (paljakkapaju)	471,0
<i>S. x mollissima</i> (vakkapaju)	0,0
<i>S. triandra</i> (jokipaju)	0,0
<i>S. dasyclados</i> (vannepaju)	0,0
Kaikki yhteensä	16 366,0

Uusia tutkimuksia 1: Luontokosketuksen merkitys ja pajujen käyttö päiväkotij- ja kouluympäristöissä

Luontokosketuksen vähyys arkiympäristössä on osaltaan johtanut siihen, että ihmisen mikrobiyhteisön koostumus on muuttunut länsimaissa (Roslund ym. 2019, 2020, 2021), millä on yhteys puolustusjärjestelmän häiriöiden, kuten siitepöly- ja ruoka-aineallergioiden, yleistymiseen (Haahtela ym. 2021, Nurminen ym. 2021). Lasten motorisen kehityksen, luontosuhteen muodostumisen ja puolustusjärjestelmän kehittymisen kannalta on tärkeää, että lapset saavat jokapäiväisessä arjessaan koskettaa monenlaisia luontoelementtejä (Puhakka ym. 2019). Tällaisia ovat esimerkiksi monivuotiset viherrakentamisen kasvit, viljelykasvit, lahoava kasviaines ja orgaaninen pintamaa (Hui ym. 2019, Parajuli ym. 2020). Lapsilla tulisi olla mahdollisuus tutustua ja olla vuorovaikutuksessa kaikkien näiden elementtien kanssa haluamalla tavalla. Käytännössä tämä tarkoittaa, että pihan kasvien ja pintakerrosten tulisi kestää pienimuotoinen repiminen, nyhtäminen, maistelu ja tallominen, ilman että lapsille aiheutuu vaaraa. Mikrobit terveyshyötyineen siirtyvät lähikontaktissa paljon tehokkaammin kuin ilma-teen. Päiväkotien ja koulujen viheralueiden pensaiden olisikin hyvä olla hyvin uudistuvia ja vaurioita sietäviä. Pajulajit ovat tässä mielessä hyviä, sillä ne lähtevät hyvin kasvuun myös pistokkaista ja pikkutaimista ja uudistuvat hyvin leikkaamisen ja oksien taittamisen jälkeen. Päiväkotij- ja kouluympäristöissä olisi myös tärkeää olla kasveja, joista lapset saavat ottaa materiaalia leikkeihin.

5.6.3. Pajujen käyttö hulevesien luonnonmukaisessa hallinnassa

Kaupungistumisen myötä läpäisemättömien pintojen, kuten asfaltoitujen alueiden ja kattojen, määrä kasvaa, minkä vuoksi sadevedet eivät enää imeydy maaperään, pintavalunta kasvaa ja kaupunkitulvien mahdollisuus kasvaa. Perinteisissä kaupunkien järjestelmissä hulevesi johdetaan putkia pitkin mahdollisimman pian pois syntypaikalta, osa suoraan vesistöön ja osa jätevedenkäsittelylaitoksille. Huleveden johtaminen suoraan vesistöön aiheuttaa pintavesien liikaantumista. Rankkasateiden aikana jätevedenpuhdistamon kapasiteetti saattaa ylittyä huleveden vuoksi, jolloin joudutaan turvautumaan jäteveden ylijuuksutuksiin, mikä saastuttaa vesistöä.

Hulevesien hallintaan rakennetussa ympäristössä on ryhdytty ottamaan mallia luonnosta. Tavoitteena on, että suurin osa hulevedestä **imeytetään** syntypaikalla maaperään ja pohjavedeksi. Imeyttämisen lisäksi hulevettä voidaan **varastoida** paikallisesti ja ohjata kasvillisuuden käyttöön. Kasvillisuus auttaa **haihduttamalla** vähentämään pois johdettavan huleveden määrää. Kun hulevettä joudutaan johtamaan eteenpäin, sitä **viivytetään** ja **johdetaan hallitusti**, millä vaikutetaan huleveden määrään ja laatuun (Eskola & Tahvonen 2010, Hulevesiopas 2012).

Luonnonmukaisessa hulevesien hallinnassa vettä voidaan imeyttää rakennetuissa imeytyspaineissa eli biosuodatus- tai biopidätysalueilla ja sadepuutarhoissa. Kun vettä imeytetään maa-ainesten läpi, ravinteita ja haitta-aineita sitoutuu maapartikkeleihin ja mikrobistoon ja vettä pidättyy hetkellisesti huokostilavuuteen. Kasvillisuudella on tällaisilla alueilla ratkaiseva rooli veden imeytymisen edistäjänä, haihduttajana sekä ravinteiden ja haitta-aineiden poistajana.

Veden kulkua viivytetään erilaisissa kosteikoissa ja vesielementeissä, joissa vesi virtaa luonnon-tilaisissa tai rakennetuissa kasvipeitteisissä ja mutkitteluissa uomissa, ja kerääntyy välillä viivytys- tai patoaltaisiin. Viivyttäminen mahdollistaa kiintoaineksen ja siihen sitoutuneiden ravinteiden laskeutumisen pohjaan ja vähentää eroosiota, mikä parantaa veden laatua.

Vesielementeissä kasvillisuus hidastaa vettä, vähentää veden määrää, sitoo ravinteita ja haitta-aineita ja parantaa alueen ekologista toimivuutta ja monimuotoisuutta monien mekanismien kautta.

Huleveden luonnonmukainen hallinta perustuu eläviin mekanismeihin eli kasvillisuuteen, kasvualustaan ja maaperäeliöstön toimintaan. Parhaan tuloksen saavuttamiseksi tarvitaan monimuotoinen ja biomassaltaan runsas kasvillisuus. Hulevesialueet ovat usein myös tärkeitä ulkoilu- ja oleskelupaikkoja, ja kasvillisuuden merkitys alueen viihtyisyydelle ja estetiikalle on suuri. Hulevesiuomat ja -altaat luovat mahdollisuuden käyttää erilaisissa kosteusoloissa viihtyvää kasvillisuutta, ja tarjota elinympäristöjä, ravintoa ja suojaa hyvin monenlaiselle eliöstölle.

Luonnonmukaiset hulevesialtaat ja uomat tulevat lisäämään pajujen käyttöä (sähköpostikeskustelu, Aki Männistö, Jyrki Lehtimäki, Minna Terho, syyskuu 2021). Luonnosta mallia ottaen monet pajulajit menestyvät vaihtelevissa kosteusoloissa. Ne sietävät hyvin vettynyttä maata ja tulvimista (Glenz ym. 2006, Niinemets & Valladares 2006). Pajujen runsas ja syvällekin menevä juuristo sitoo maata ja toisaalta edistää veden imeytymisestä maaperään.

Turussa joitakin harvinaisempia pensasmaisia pajulajeja on istutettu Vaisten huleveden viivytysaltaan penkereille (Taulukko 6, Juhanoja & Tuhkanen 2019). Alueelle on suunniteltu uudisrakentamista, ja ympäristön hulevedet johdetaan kolmen purkuputken kautta altaaseen. Ympäristö on peltoa ja niittyä, ja altaan reunat enimmäkseen savimaata, joka halkeilee kuivuessaan. Allas on hyvä esimerkki kohteesta, jossa tarvitaan maata sitovaa ja ajoittain kuivuvassa savimaassa menestyvää kasvillisuutta.

Altaan penkereillä parhaiten menestyneitä pajuja olivat jokipaju (*S. triandra*) ja vakkapaju (*S. mollissima*) (Juhanoja & Tuhkanen 2019). Pienikokoinen laji kaitasiropaju (*S. repens* ssp. *rosmarinifolia*, aiemmin kapealehtipaju) oli kolmantena vuonna istuttamisesta edelleen pientä ja matalaa. Kasvupaikan haastavuudesta kertoi myös altaan penkereiden melko hidas luontainen kasvittuminen. Hulevesikohteissakin on kiinnitettävä huomiota kyseisen kasvupaikan olosuhteisiin ja valittava myös pajulajit kohteen mukaan.

Pajujen kykyä sietää mm. tulvimista ja huleveden suolaisuutta on tutkittu jonkin verran (esim. Mirck & Volk 2010). Eräs pajulajien huleveden hallintaa edistävä ominaisuus on voimakas haihduttaminen. Kirjallisuuskatsauksessa havaittiin kasvuolosuhteiden, kuten veden saatavuuden, ravinteisuuden ja saastuneisuuden, vaikuttavan haihdutuksen määrään enemmän kuin pajulajin (Fredette ym. 2019).

6. Pajun raaka-aineominaisuudet ja käyttö

6.1. Pajun rakenteelliset ominaisuudet ja niihin perustuva käyttö

6.1.1. Puuaine

Anneli Viherä-Aarnio, Tuula Jyske ja Kimmo Rasa

Pajujen **puuaineen tiheydestä** on tehty useita tutkimuksia sekä nuorista vesoista että vanhemmista puista, ja saadut keskimääräiset kuivatuoretiheyden arvot vaihtelevat välillä 260–480 kg/m³ (Lehtonen ym. 1978, Hytönen & Ferm 1984, Sennerby-Forsse 1985, 1989, Mosseler 1988, Monteoliva ym. 2007). Pajujen puuaine on yleensä kevyttä, mutta esim. puumaisella raidalla on mitattu yhtä korkea puuaineen tiheys kuin koivuilla (Lehtonen ym. 1978, Fagerstedt ym. 2016). Kuivatuoretiheys vaihtelee pajulajien ja -kloonien välillä (Sennerby-Forsse 1985, 1989, Mosseler ym. 1988). Esimerkiksi kahdesta puumaisesta pajustamme raidalla puuaineen tiheys on korkeampi kuin halavalla (Sennerby-Forsse 1989). Saman lajin ja kloonin sisällä kuivatuoretiheys kasvaa vesojen iän kasvaessa (Hytönen & Ferm 1984). Puuaineen tiheys laskee vesojen tyveltä latvaan (Hytönen & Ferm 1984). Koivuun verrattavissa olevasta tiheydestä huolimatta raidan puuaines on lujuudeltaan selvästi sitä heikompaa. Sen syiden suuntaisen kimmomoduulin, taivutusmurtolujuuden ja Brinell-kovuuden arvot ovat 40–50 % pienemmät kuin koivulla (Sandberg 2019).

Pajujen puuaine koostuu pääosin veden kuljetukseen erikoistuneista **putkiloista** ja puun rungolle tuen antavista **kuiduista**. Niiden lisäksi pajuilla on varastosoluina toimivia **tylppysoluja** sekä **ydinsädesoluja**, jotka kuljettavat vettä ja ravinteita säteen suunnassa vaakasuoraan. Pajujen ydinsäteet ovat yksirivisiä (Fagerstedt ym. 2016). Solutyyppien suhteellisissa osuuksissa on pajulajien välistä vaihtelua. Esim. raidalla putkiloiden, kuitujen ja tylppysolujen suhteelliset osuudet ovat 26, 60 ja 14 %, ja halavalla puolestaan 30, 42 ja 28 % (Sennerby-Forsse 1989). Pajupuun huokosrakenne, jolla on merkitystä etenkin biohiilisovelluksen kannalta, määräytyy pitkälti putkiloiden ja kuitujen koon ja suhteellisen osuuden perusteella, ja muilla solutyypeillä on siihen vain vähäinen vaikutus.

Putkilot ovat päistään toisiinsa liittyneiden, kuolleiden solujen muodostamia solusulautumia, joilla on tukevat sekundääriset soluseinät (Hacke & Sperry 2001). Pajujen putkilot ovat läpimitaltaan suuria, noin 60–80 µm (Sennerby-Forsse 1989, Cobas ym. 2013). Ne voivat muodostaa pitkiä, veden kuljetukseen erikoistuneita putkia, joissa yksittäiset putkilosolut ovat 0,4–0,5 mm pituisia (Sennerby-Forsse 1989). Pajut ovat hajaputkiloisia tai heikosti kehäputkiloisia lehtipuita.

Pajujen **kuidut** ovat läpimitaltaan putkiloita selvästi pienempiä. Niiden halkaisija vaihtelee keskimäärin 13–20 µm, mistä soluontelon läpimitta on noin 7–14 µm ja soluseinän paksuus 2–4 µm (Monteoliva ym. 2007, Cobas ym. 2013). Pajujen kuidut ovat pidempiä kuin putkiloita muodostavat solut, ja niiden pituus vaihtelee 0,5–1,6 mm (Cobas ym. 2013, Gupta ym. 2014). Kuitujen pituuksissa esiintyy lajien ja kloonien välistä vaihtelua. Pajupuun tai vesan sisällä kuitujen pituus vaihtelee sekä säteen suunnassa että korkeussuunnassa. Lähellä rungon pintaa kuidut ovat pidempiä kuin lähellä ydintä, ja tyvellä pidempiä kuin latvassa (Sennerby-Forsse 1989, Rasa ym. 2021). Kuitujen koko vaihtelee myös vuosiluston sisällä: kesäpuun kuidut ovat kevätpuun kuituja pidempiä (Sennerby-Forsse 1989).

Putkiloiden ja kuitujen kokoerojen seurauksena pajuilla on lehtipuille tyypillinen huokosrakenne ja kaksihuippuinen huokoskokojakauma, jossa kuidut muodostavat pienemmän kokoluokan huipun ja putkilot suuremman. Rasan ym. (2021) työssä nämä jakaumahuiput olivat 6,0–7,8 μm (kuidut) ja 42,0–52,9 μm (putkilot) kohdalla. Kuidut muodostavat noin kaksi kolmannesta huokostilavuudesta ja putkilot kolmanneksen. Kokonaishuokoisuudella ja huokoskokojakaumalla on iso merkitys seuraavassa tarkemmin esiteltävän biohiilisovelluksen kannalta.

Uusia tutkimuksia 2: Biohiili

Kimmo Rasa, Tuula Jyske, Anneli Viherä-Aarnio

Biohiili on pajun puuaineen huokoiseen rakenteeseen perustuva sovellus. Biohiiltä valmistetaan pyrolyysillä eli kuumentamalla puuta hitaasti hapettomissa oloissa lämpötilan ollessa yleensä 350 ja 800 °C:n välillä. Biohiiltä valmistetaan pääasiassa puupohjaisista raaka-aineista, mutta pyrolyysi teknologiana soveltuu periaatteessa minkä tahansa hiiltä sisältävän orgaanisen aineen käsittelyyn. Pyrolyysin tuloksena syntyy kiinteän hiilen lisäksi nestemäinen ja kaasumainen jae, joilla molemmilla on lupaavia käyttömahdollisuuksia (Keskinen ym. 2018, Hagner, kappale 6.2).

Pyrolyysissä biomassan sisältämä hiili muuntuu aromaattisiksi rakenteiksi, jotka ovat biologisesti hitaasti hajoavia, ja siten biohiili voi toimia pitkäaikaisena hiilen varastona. Erilaisten sovellusten kannalta tärkein ominaisuus on kuitenkin biohiilen huokoinen rakenne, joka voi absorboida, varastoida ja luovuttaa vettä ja esim. ravinteita tai epäpuhtauksia.

Biohiilen huokoisuuteen perustuvia mahdollisia **sovelluskohteita** on lukuisia. Biohiiltä voidaan käyttää esimerkiksi uusiutumattomien raaka-aineiden korvaajana veden ja ilman puhdistukseen käytetyissä aktiivihiihissä (Siipola ym. 2018), anaerobista ruuansulatusta edistävissä lisäaineissa (Wang ym. 2019), kemiallisten reaktioiden katalysaattorina ja biopolttoaineiden tuotannossa (Xiong ym. 2017) ja elektroniikkateollisuudessa käytettävien harvinaisten alkuaineiden uusiutuvana vaihtoehtona (esim. superkondensaattorit, Jiang ym. 2013). Monissa korkeamman jalostusasteen sovelluksissa ja niihin käytettävissä aktiivihiihissä (Bartoli ym. 2020) biohiilen laatu ja homogeenisuus on tärkeä. Rääätälöidyt biohiilet, joilla on tarkasti määritellyt rakenneominaisuudet, ovat esimerkki biopohjaisesta materiaalista, jota voitaisiin modifioida edelleen ja käyttää energian varastointi- ja muuntosovelluksissa. Määrällisesti suurin sovelluskohde on biohiilen käyttö maanparannusaineena maaperässä tai kasvatusalustoissa (Brassard ym. 2016, Turunen ym. 2020), missä se vaikuttaa maan rakenteellisiin ominaisuuksiin ja vedenpidätyskykyyn (Rasa ym. 2018), joskin hyödyt viljelijöille ovat vielä osittain epävarmoja (Soinne ym. 2020).

Biohiilen **huokosrakenne** voidaan jakaa karkeasti kahden kokoluokan huokosiin: pieniin, **nanometriluokan** ja suuriin, **mikrometriluokan** (läpimitta > 1 μm) huokosiin. Edelliset syntyvät pyrolyysi- tai hiilen aktivointiprosessin aikana, kun taas jälkimmäiset, suuret huokokset johtuvat raaka-aineen solukkorakenteesta (Gray ym. 2014). Nämä kaksi huokosjärjestelmää tarjoavat biohiilisovelluksille erilaisia toiminnallisia ominaisuuksia. Biohiilen alkuperäistä mikrometriluokan runkorakennetta ei voida merkittävästi muokata esim. pyrolyysilämpötilaa muuttamalla, mikä korostaa raaka-aineen merkitystä (Hyväluoma ym. 2018a). Myös biohiilen kemialliset ominaisuudet vaihtelevat raaka-aineen mukaan, mutta niihin voidaan vaikuttaa muuttamalla käytettyä prosessiteknologiaa ja/tai prosessin lämpötilaa, kuumennusnopeutta sekä muita olosuhteita.

Mikrometriluokan huokokset ovat tärkeitä maatalouden sovelluksissa, koska niissä olevaa vettä ja ravinteita kasvit pystyvät käyttämään toisin kuin nanoluokan huokosissa olevaa. Nämä

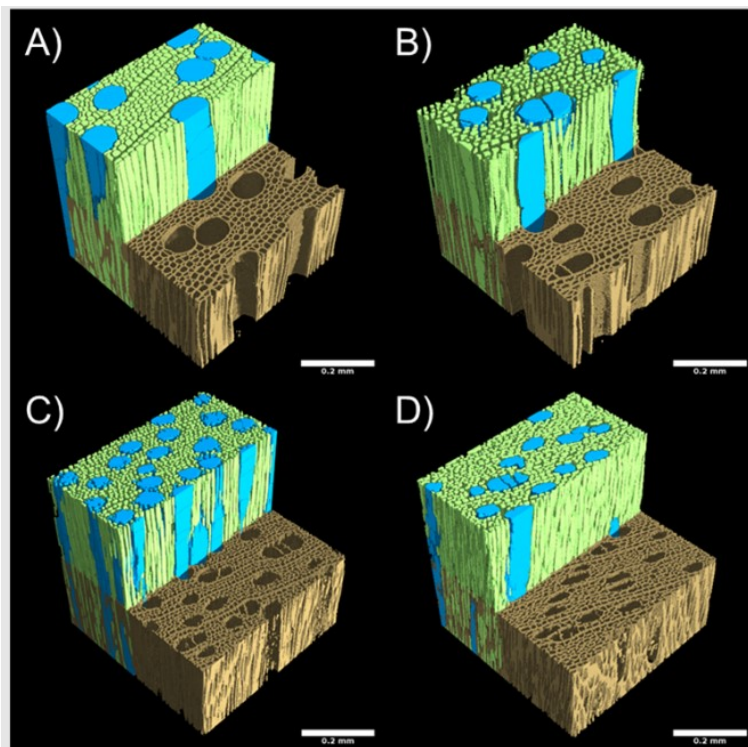
suuret huokokset vastaavat veden kuljetuksesta, ja niiden kokojakauma heijastuu suoraan maaperän (Rasa ym. 2018) tai kasvatusalustan vedenpidätysominaisuuksiin (Turunen ym. 2020). Mikrometriluokan huokosten kokojakauma ja jatkuvuus myös säätelevät veden ja liuenneiden aineiden pääsyä nanoluokan huokosiin biohiilen runkorakenteessa (Caguiat ym. 2018, Siipola ym. 2018). Mikrometriluokan huokosten muodostama runkorakenne myös määrittää kokonaistilavuuden, johon nanohuokosia voi muodostua (Gray ym. 2014). Pajun puuaineen huokosrakenne, erityisesti sen suuret putkilot, tekee pajusta mielenkiintoisen ja lupaavan esimerkiksi maatalouden ja kasvualustakäytön sovelluksia silmällä pitäen. Pajuista pyrolyysillä alle + 500 asteessa valmistetuilla biohiilillä ominaispinta-ala on alhainen ($< 10 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, Rasa ym. 2018), mikä kertoo heikosti kehittyneestä nanometriluokan huokoisuudesta ja suurten huokosten valitsevasta osuudesta.

Biohiilen toiminnallisten ominaisuuksien, kuten veden liikkuvuuden, kannalta huokosten jatkuvuudella on myös suuri merkitys. Putkilot ovat pitkiä solusulautumia, joten niiden huokosten jatkuvuus biohiilikappaleissa lienee hyvä. Koska kuidut muodostavat kaksi kolmanneltä kokonaishuokoisuudesta, myös kuituhuokosten jatkuvuus on tärkeä.

Biohiilen ja siihen käytetyn raaka-aineen tutkimukseen on käytetty viime vuosina uusinta **röntgensädemikrotomografiaa** (μCT) ja **kuva-analyysiä** (Jyske ym. 2016, Hyväluoma ym. 2018b). Menetelmän resoluutio kattaa puuaineen (Suuronen & Jyske 2019) ja biohiilen runkorakenteen huokoskoon vaihteluvälin (Hyväluoma ym. 2018b) ja soveltuu siksi juuri mikrometriluokan huokosten tutkimiseen. Menetelmällä koottava μCT kuvantamisdata mahdollistaa edustavan kvantitatiivisen tilavuusanalyysin puun putkiloista ja kuiduista sekä biohiilen huokosrakenteesta, mukaan lukien 3D-visualisoinnin rakenteellisista ominaisuuksista, jotka ovat relevantteja kohdennettujen biohiilisovellusten kannalta (Hyväluoma ym. 2018b).

Röntgensädemikrotomografiaan ja kuva-analyysiin perustuva menetelmä on kuitenkin melko työläs ja kallis. Kuituanalyysiaattoria, joka on 10–50 kertaa halvempi sellu- ja paperiteollisuuden rutiinimenetelmä, voidaan myös käyttää biohiilen huokosrakenteen ennustamiseen puunäytteistä ennen pyrolyysiä (Rasa ym. 2021). Myös puun tiheyttä voidaan käyttää helposti mitattavana proxyinä puun solurakenteelle. Alemman tiheyden puuaine on huokoisempaa: soluseinät ovat ohuempia ja soluontelot suurempia kuin korkeamman tiheyden puussa. Alhaisen tiheyden puusta valmistettava biohiili pidättää paremmin kasvien kannalta käyttökelpoista vettä kuin korkean tiheyden puusta valmistettava (Werdin ym. 2020).

Pyrolyysin tuloksena syntyvässä **biohiilessä** toistuu pajun puuaineen solukoiden runkorakenne, mutta myös muutoksia tapahtuu (Rasa ym. 2021). Biohiilen kokonaishuokoisuus pysyy kuta-kuinkin samana kuin pajuraaka-aineen. Myös lehtipuulle tyypillinen kaksihuippuinen huokoskojakauma säilyy biohiilessä. Puun massasta häviää suuri osa haihtuneina kaasuihin ja puukappaleet kutistuvat, ts. hiilen partikkelikoko muuttuu. Tämä tasoittaa raaka-aineessa olevaa rakenteellista vaihtelua, mm. käytettyjen pajukloonien eroja (Rasa ym. 2021). Pyrolyysi muuttaa selkeästi puun huokosten kokoa (Kuva 16). Suurin muutos tapahtuu putkilohuokosissa, jotka litistyvät, ja joissa soluontelon läpimitta kutistuu lähes puoleen (Hyväluoma ym. 2018a, Rasa ym. 2021). Myös kuituhuokokset kutistuvat, mutta niissä muutos on pienempi.



Kuva 16. Tyypillisiä μ CT kuvia pajun pyrolysoimattomasta (A, B) ja pyrolysoidusta (C, D) puuainesta. Kuvat A ja C edustavat nopeakasvuisen kloonin ja kuvat B ja D hidaskasvuisen kloonin huokoisuutta. Putkilosolujen soluontelot näkyvät sinisinä ja kuitujen sekä tylppysolujen vihreinä. Ruskea väri kuvaa soluseinien rakenteita. Mittajana = 0,2 mm.

Oletusarvoisesti korkeamman jalostusasteen hiilissä on tärkeitä hiilen ja sen huokosominaisuuksien tasalaatuisuus. Yllä mainitut tutkimukset osoittavat, että hiilen tasalaatuisuutta voidaan parantaa käyttämällä raaka-aineen yhden kloonin viljelmiltä saatavaa pajua, ja kehittämällä korjuuteknologiaa siten, että voidaan käyttää vain tiettyä osaa vesasta, esim. tyveä tai latvaa.

Uusia tutkimuksia 3: Biokomposiitit

Veikko Möttönen, Tuula Jyske ja Anuj Kumar

Euroopan komission uudessa ehdotuksessa uusiutuvan energian direktiiviksi edellytetään, että polttoon saa mennä vain puuta, jolle ei ole muuta käyttöä. Perinteisen metsä- ja puuteollisuuden käyttöön sopimattomalle, mutta perusominaisuuksiltaan (tiheys, lujuus, kemiallinen koostumus) kelvolliselle puuraaka-aineelle kaivataan siten uusia tuotteita ja niille uusia innovatiivisia valmistusmenetelmiä.

Biokomposiitit määritellään materiaaleiksi, joissa niiden perusainekset, polymeerimatriisi ja luonnonkuitulujite (esim. puulastu, sahajauho, kierrätyskuidut), on valmistettu kokonaan uusiutuvista luonnonvaroista. Viime vuosina puupolymeerikomposiitit (engl. wood polymer composites, WPC) ovat meillä ja maailmalla herättäneet suurta kiinnostusta ympäristöystävällisinä, biohajoavina öljypohjaisten muovituotteiden korvaajina (esim. Satyanarayana ym. 2009, Lepistö 2014, Gurunathan ym. 2015). Puulaji sekä puun ikä ja kasvupaikka vaikuttavat puukuitujen ominaisuuksiin ja parhaisiin lopputuotteen ominaisuuksiin päästään käyttämällä tuotteen vaatimusten mukaisia puukuituja. Puupolymeerikomposiiteissa voidaan hyödyntää havu- tai lehti-puukuituja ja myös nopeakasvuisia tai pienikokoisia puulajeja kuten pajua, joita muutoin on

vaikkea hyödyntää arvokkaiksi tuotteiksi. Pajupuupohjaisten biokomposiittien tuotemahdollisuudet ovat laajat erilaisista pakkauksista (mm. kosmetiikka- ja lääkepakkaukset) ruokailuvälineisiin ja sisustuspaneelisiin. Vastaavista materiaaleista valmistettuja tuotteita, joissa puukaana on käytetty tavanomaisempia puulajeja ja metsäteollisuuden sivuvirtoja, on jo markkinoilla.

Luonnonvarakeskuksen AspenWill-projektissa (2018–2020) tutkittiin pajupuun käyttöä biohajoavan komposiittimateriaalin raaka-aineena (Kumar ym. 2020). Biokomposiitin valmistuksessa käytettiin raidasta (*Salix caprea* L.) jauhettua puujauhetta, jota sekoitettiin polylaktidin (PLA) lujitteeksi tilavuusosuuksilla 10, 20, 30 ja 40 %. PLA on yksi tunnetuimmista biopohjaisista biohajoavista muoveista, jota valmistetaan fermentoimalla tuotetusta D- tai L-maitohaposta (Muoviyhdistys ry 2021). Maitohappo valmistetaan yleensä teollisesti jalostetuilla bakteerikannoilla, jotka käyttävät ravintonaan glukoosia tai sakkaroosia. Ominaisuuksiltaan PLA on jäykkää, haurasta ja läpinäkyvää. Puujauheen hiukkaskoko vaihteli välillä $0,2 \times 1,0 \times 2,0 \text{ mm}^3$ – $0,5 \times 1,0 \times 6,0 \text{ mm}^3$. Sekoitemassa ruiskuvalettiin lujuustestikappaleiksi, joista määritettiin standardien mukaiset pinnan Brinell-kovuus (EN 1534) sekä taivutus- ja vetolujuudet (ISO 13061-3, ISO 13061-4, ISO 13061-6) (Kuva 17). Lisäksi tutkittiin raaka-aineen väriä spektrofotometrisesti CIEL*a*b* -värikoordinaatistossa (ISO 11664-4) ja puupartikkeleiden ja muovin välisten sidosten mikrorakennetta valomikroskoopilla ja infrapunaspektroskopiolla (FTIR).



Kuva 17. Lujuustestejä varten valmistettuja eri tilavuusosuuksia (10–40 %) pajupuujaetta sisältäviä biokomposiittikappaleita

Pinnankovuus oli suurin puun tilavuusosuuden ollessa 40 % ja pienin puun tilavuusosuuden ollessa 10 % (Taulukko 7). Tulos oli siinä mielessä yllättävä, että pajupuun kovuus on PLA:n kovuuteen verrattuna pieni, kirjallisuuden mukaan noin 16 MPa (Sandberg 2019). Todennäköisesti puun tilavuusosuuden kasvaessa biokomposiitin vähentynyt sitkeys vaikutti sen kovuusarvoja kasvattavasti. Eniten puuta sisältävät näytteet olivat hauraita, mikä ilmeni erityisesti taivutuslujuustesteissä. Brinell-kovuuden hajonta oli suuri kaikissa pajupuun tilavuusosuuksissa, mikä pienentää erojen tilastollista merkitsevyyttä.

Taulukko 7. Puupolymeerikomposiitin mekaaniset ominaisuudet pajupuujakeen eri tilavuusosuuksilla.

Lujuustunnus	Pajujakeen tilavuusosuus komposiitissa			
	10 %	20 %	30 %	40 %
Brinell-kovuus, MPa	91,80 ($\pm 2,62$)	95,94 ($\pm 2,74$)	94,14 ($\pm 2,75$)	98,80 ($\pm 2,93$)
Vetolujuus, MPa	48,22 ($\pm 1,06$)	49,00 ($\pm 1,17$)	47,24 ($\pm 1,17$)	44,12 ($\pm 1,20$)
Taivutuslujuus, MPa	89,39 ($\pm 1,56$)	90,00 ($\pm 1,37$)	89,39 ($\pm 1,49$)	86,41 ($\pm 2,09$)
Taivutuskimmokerroin, GPa	3,86 ($\pm 0,05$)	4,41 ($\pm 0,09$)	5,07 ($\pm 0,13$)	5,66 ($\pm 0,17$)

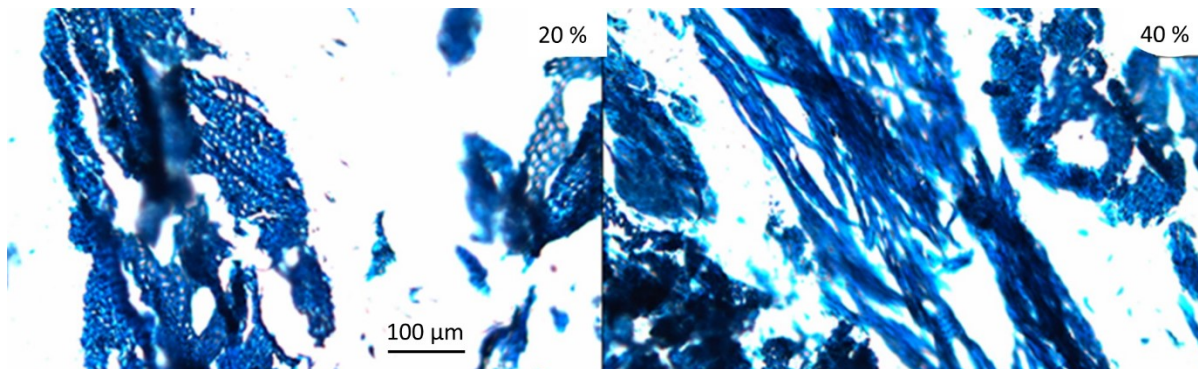
Vetolujuus oli suurin 10 ja 20 %:n tilavuusosuuksilla, mutta pajupuujauheen lisäys heikensi materiaalin vetolujuutta merkittävästi vasta 40 %:n tilavuusosuudella. (Taulukko 7). Taivutuslujuuteen pajupuun tilavuusosuudella ei ollut merkittävää vaikutusta, vaikka materiaalin jäykkyyttä kuvaava taivutuskimmokerroin kasvoi lineaarisesti tilavuusosuuden kasvaessa noin 1,5 kertaiseksi (Taulukko 7).

Puujakeen tilavuusosuuden kasvaessa biokomposiitin punaisuus kasvoi voimakkaasti vaaleus- ja keltaisuusarvojen pysyessä lähes muuttumattomina (Taulukko 8). Punaisuuden lisääntymisestä johtuen väriero puun tilavuusosuuden suhteen eroavien biokomposiittien välillä oli selvästi silmin havaittava. Komposiittimatriisina käytetty PLA oli lähes väritöntä ja valoa suhteellisen hyvin läpäisevää materiaalia ja kuituvahvisteena käytetty pajupuu määräsi siten hyvin pitkälle biokomposiitin lopullisen värin.

Taulukko 8. Puupolymeerikomposiitin CIEL*a*b* -väriarvot pajupuujakeen eri tilavuusosuuksilla.

Värikoordinaatti	Pajujakeen tilavuusosuus komposiitissa			
	10 %	20 %	30 %	40 %
L* - vaaleus	45,11 ($\pm 0,74$)	47,73 ($\pm 0,61$)	48,19 ($\pm 1,00$)	47,48 ($\pm 0,88$)
a* - punaisuus	8,11 ($\pm 0,28$)	8,77 ($\pm 0,26$)	9,53 ($\pm 0,37$)	9,79 ($\pm 0,34$)
b* - keltaisuus	26,39 ($\pm 0,54$)	26,51 ($\pm 0,58$)	26,46 ($\pm 0,63$)	25,21 ($\pm 0,57$)

Kuva 18 esittää biokomposiitin mikrorakennetta pajupuun erilaisilla tilavuusosuuksilla PLAmatriisissa. Puujauhe sekoitettiin tasaisesti sideaineen kanssa ja puun solujen piirteet ovat mikroskooppikuvissa hyvin tunnistettavissa. Pienemmällä puun tilavuusosuudella puupartikkeleiden sitoutuminen biopolymeerin ja puujauheen rajapinnoilla oli homogeenista ja polymeerimatriisi peitti puupartikkelit tasaisesti. Suuremmalla puun tilavuusosuudella homogeenisuus väheni, mikä saattoi vaikuttaa heikentävästi materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Erityisesti vetolujuus pieneni puun osuuden kasvaessa pienemmän rajapinnan muodostumisen vuoksi.



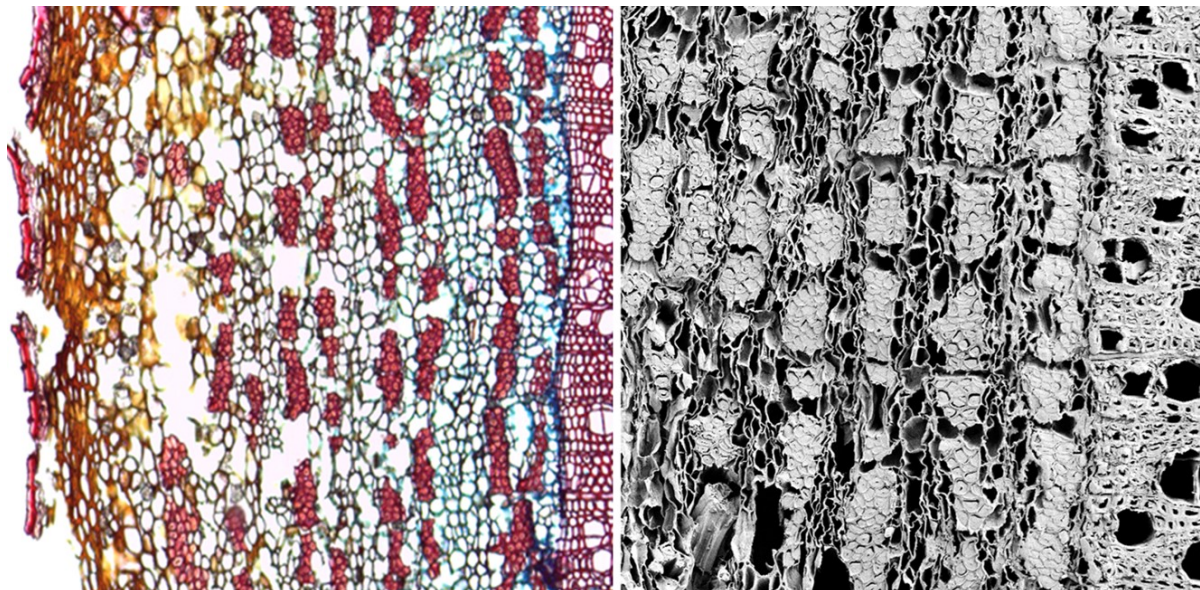
Kuva 18. Biokomposiittien mikrorakenne pajupuujakeen tilavuusosuuksilla 20 % ja 40 %. Vaaleat alueet sinisten puupartikkeleiden välissä ovat läpikuultavaa PLA-matriisia.

Tutkimuksia pajupuukuidun käytöstä puumuovikomposiittien lujitteena on julkaistu varsin vähän. Tämän tutkimuksen tulokset olivat vertailukelpoisia Barton-Pudlik ja Czajan (2018) tutkimuksen kanssa, jossa koripajun (*Salix viminalis*) puujauheesta ja polyeteenistä valmistetun komposiitin iskulujuus oli suurempi kuin havupuujauheesta ja yhtä suuri kuin lehtipuujauheesta valmistetun komposiitin. Pajupuujauheen tilavuusosuuden lisäys 30 %:sta 50 %:iin laski heidän tutkimuksessaan vetolujuutta 10 %, mutta kasvatti kovuutta hieman. Tulosten perusteella voidaan todeta, että lyhytkiertoinen pajupuu soveltuu erinomaisesti biokomposiittien tuotantoon ja siten voi osaltaan edistää kestäväää biotaloutta. Optimaalinen tilavuusosuus komposiitissa on polylaktidin kanssa noin 20–30 %, jolloin puukuidut muodostavat vielä riittävän yhtenäisiä sidoksia polymeerimatriisin kanssa eivätkä lujuusominaisuudet ole merkittävästi heikenneet.

6.1.2. Kuori

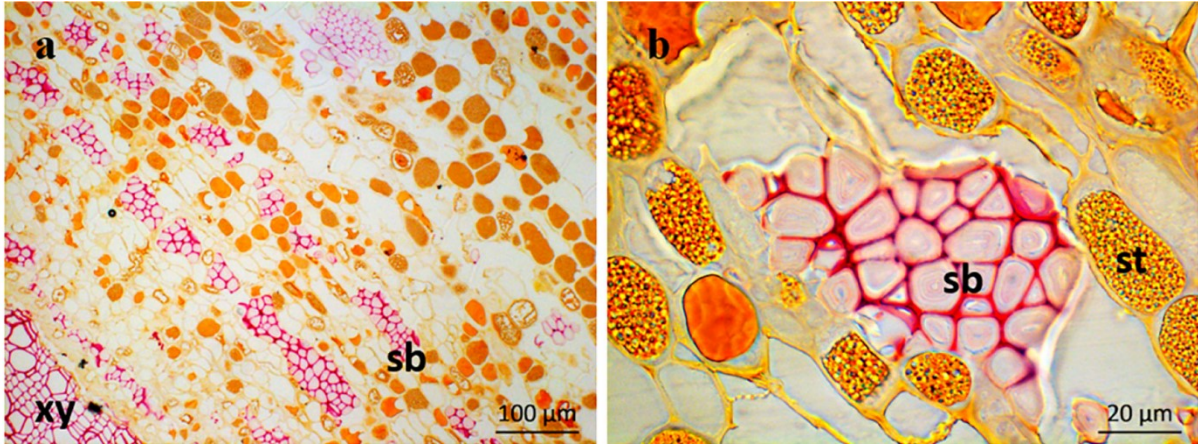
Tapani Vuorinen ja Jinze Dou

Puuaineksen ohella pajun varsi tai runko sisältää n. 10 % kuorta. Energiapajun kaltaisessa nuoressa puussa kuolleen ulkokuoren osuus on suhteellisen pieni ja ravintoaineita kuljettava ja varastoiva sisäkuori muodostaa pääosan kuoresta. Kuoren pinnalla esiintyy ilma-aukkoja soluhengityksen tarvitseman hapen ja siinä muodostuvan hiilidioksidin kuljettamiseksi. Sisäkuori on yhteydessä rungon puuainekseen ydinsäteiden kautta, jotka huolehtivat aineensiirrosta kuoren ja puuaineksen välillä. Sisäkuoreen muodostuu vuosittain uusi kasvu, jossa erottuu rungon suuntaisten kuitukimppujen, niinikuitujen, muodostama kehä sitä ympäröivässä ohutseinäisessä solukossa (Kuva 19) (Dou 2015, 2018).



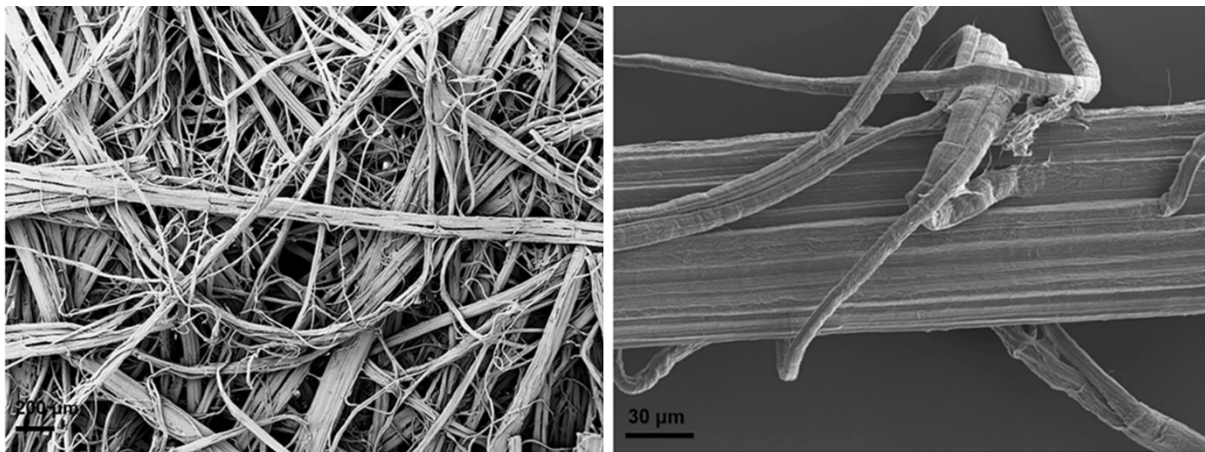
Kuva 19. Raidan (*Salix caprea*) kuoren mikroskooppinen rakenne. Safraniini värjää ulkokuoren ja puuaineksen välillä olevan sisäkuoren ligniinipitoiset kuitukimput voimakkaan punaisiksi (vas.) (Dou 2018). Paksuseinäisten kuitujen muodostamat kimput erottuvat niitä ympäröivästä ohutseinäisestä solukosta myös elektronimikroskooppikuvassa (oik.).

Erilaisen rakenteensa lisäksi kuori poikkeaa myös kemialliselta koostumukseltaan puuaineksesta. Pajun sisäkuoren uuteaine- ja tuhkapitoisuudet ovat kymmenkertaisia puuainekseen nähden (Dou ym. 2016). Yhdessä nämä voivat muodostaa neljäsosan kuoren kuiva-aineesta. Kuoren polysakkaridit sisältävät runsaasti pektiineille tyypillistä arabinoosia, galaktoosia ja rannoosia, kymmenkertaisesti puuainekseen verrattuna. Vielä julkaisemattomassa tutkimuksessa eristimme pajun kuoresta pektiiniä, joka sisälsi n. 60 % galakturonihappoa neutraalien monosakkaridien lisäksi. Näistä tiedoista arvioituna sisäkuoren kuiva-aineesta jopa viidesosa on pektiiniä. Glukoosin (selluloosan) määrään suhteutettuna kuoressa on puuta vähemmän hemiselluloosaperäistä ksyloosia ja mannoosia. Kuori sisältääkin melko vähän hemiselluloosia (n. 10 %) ja selluloosankin pitoisuus (n. 30 %) on huomattavasti alhaisempi kuin puuaineksessa. Sisäkuoren Klason-ligniinipitoisuus on lähes 20 %, mutta tämä antaa virheellisen kuvan todellisesta ligniinipitoisuudesta. Ligniiin lisäksi kuori sisältää huomattavia määriä tanniineja, jotka kondensoituvat ligniinin kanssa happokäsittelyssä ja vääristävät analyttistä tulosta (Dou ym. 2021a).



Kuva 20. Hybridipajun ("Karin") kuoren mikroskooppinen rakenne floroglusinolilla värjättyinä. Ligniinin karbonyyliryhmiä sisältäville rakenteille tyypillistä punaista väriä esiintyy vain kuitukimpuissa ja erityisesti niissä olevien välilamellien alueella (Dou ym. 2016). Kuvat a ja b esittävät eri suurennoksia.

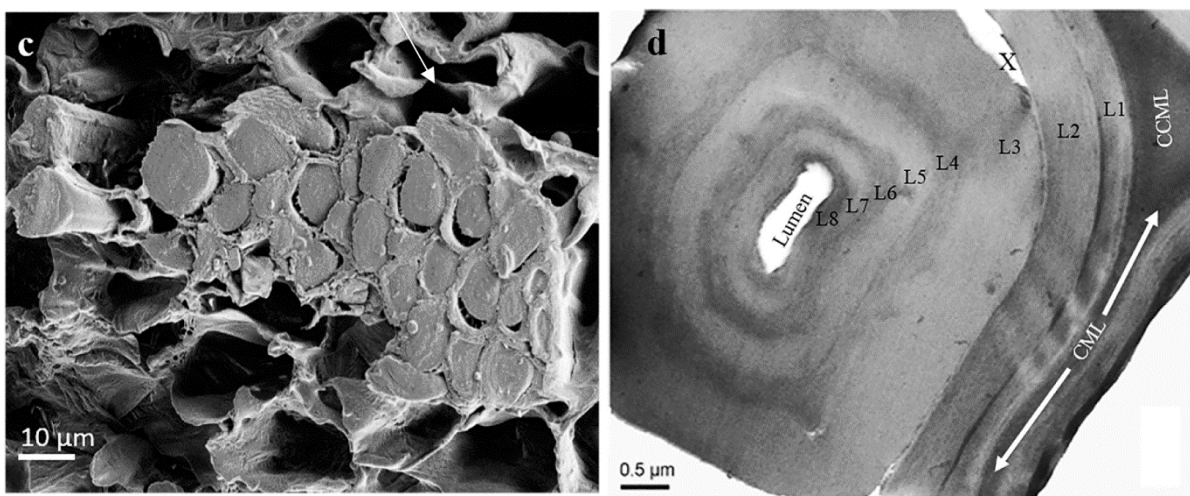
Safraniinilla (Kuva 19 vas.) ja floroglusinolilla (Kuva 20) värjättyissä poikkileikkeissä kuoren ligniini näyttäisi esiintyvän vain kuitukimpuissa (Kuva 19). Floroglusinoli värjää selektiivisesti karbonyyliryhmiä sisältävät ligniinin rakenneyksiköt, jotka keskittyvät selkeästi välilamellien alueelle. Märkäkemiallisten menetelmien ja NMR-spektroskooppisten analyysien perusteella on selvää, että ligniinin guajasyyliyksiköiden osuus on selvästi korkeampi kuoressa kuin puussa (Dou ym. 2018a). Koska ligniiniä ei esiinny kuoren ohutseinäisten solujen välillä, nämä sitoutuvat toisiinsa vain pektiinin avulla.



Kuva 21. Hybridipajun ("Klara") kuoresta erotettuja kuitukimppuja (vas.) elektronimikroskopilla kuvattuna (Dou ym. 2019b). Kimppujen pinnalla näkyy myös niistä erkanevia yksittäisiä kuituja (oik.).

Sisäkuoren käsittely kuumalla natriumvetykarbonaatti- tai natriumhydroksidiliuoksella irrottaa ohutseinäiset solut toisistaan (Dou ym. 2019b, 2021b). Hiertämällä ja pesemällä näin keitettyä massaa saadaan erotettua kuitukimput tai niiden muodostamat nauhat, jotka ovat rungon vuosikasvun pituisia ja tyypillisesti alle 0,1 mm paksuisia (Kuva 21). Nauhamaisten rakenteiden leveys vaihtelee ja ne ovat käsin eroteltavissa kapeampiin kimppuihin. Piirre on ominaista pajulle, mutta muidenkin puulajien, kuten lehmuksen ja pihlajan, kuori käyttäytyy vastaavasti. Sen sijaan mm. kuusen sisäkuoren keittäminen natriumvetykarbonaattiliuoksessa irrottaa kaikki solut toisistaan, eikä kuitukimppuja jää jäljelle.

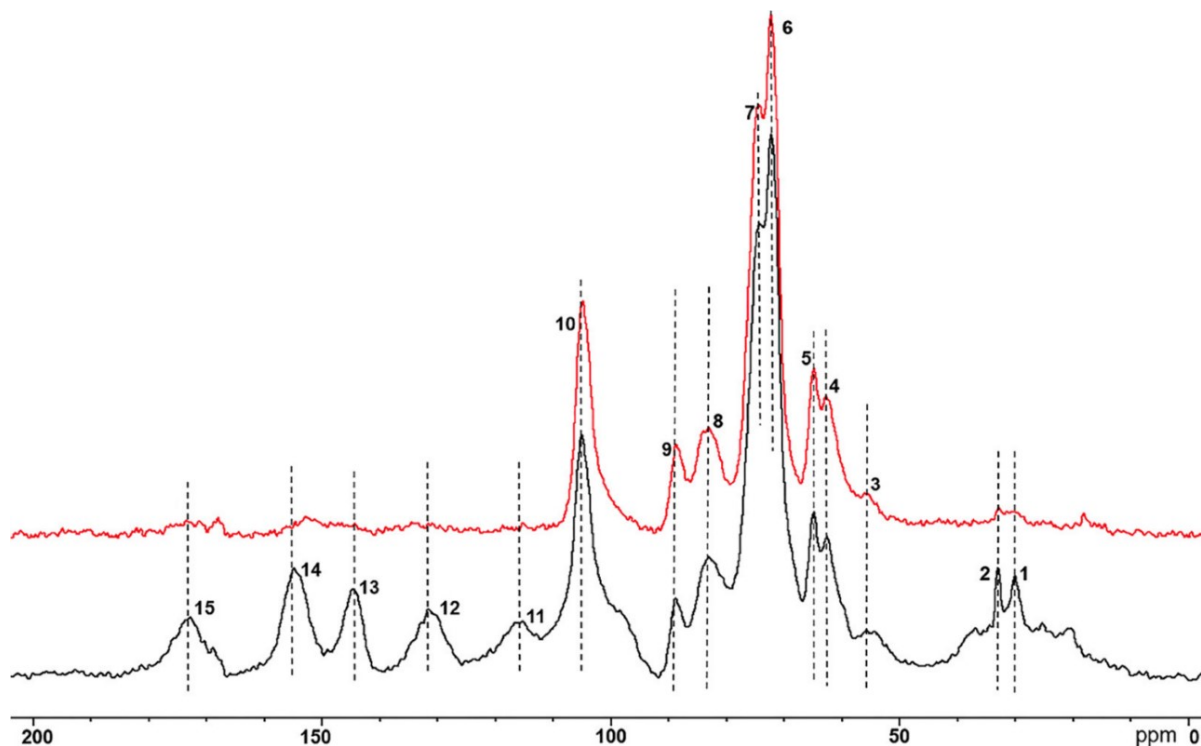
Ohutseinäisten solujen irtoaminen toisistaan heikostikin emäksisissä liuksissa selittyy metyloituneen poly(ramno)galakturonihapon β -eliminaatioreaktiolla, joka on esterihydrolyysin kanssa kilpaileva reaktio. Pektiniin pääketjun pilkkoutuessa solujen välinen sitoutuminen heikkenee. Käsittelyn alussa liuoksen viskositeetti nousee korkeaksi, mikä viittaa suurimolekyylisen pektiinin liukenemiseen. Pitkittynyt käsittely muuttaa liuoksen juoksevammaksi pektiinin pilkkoutuessa edelleen. Vielä julkaisemattomassa tutkimuksessa havaitimme pektinaasien irrottavan pajun kuoren ohutseinäiset solut toisistaan vastaavasti. Pektinaaseilla eristetyt kuitukimput ovat vaalean ruskeita, kun taas kuoren keittäminen alkali- tai vetykarbonaattiliuoksessa muuttaa sekä keittoliuoksen että kuitukimput punertaviksi (Dou ym. 2019b, 2021b). Syytä tähän värimuutokseen ei ole vielä osoitettu, mutta todennäköisesti kysymys on kuoren tanniineissa ja/tai muissa (poly)fenolisissa yhdisteissä tapahtuvista muutoksista.



Kuva 22. Hybridipajun ('Karin') kuoren kuitukimppun (vasen) ja kuidun (oikea) poikkileikkaus elektronimikroskopiolla kuvattuna (Dou ym. 2016).

Sulfaattikeiton olosuhteissa pääosa kuoren (kuitukimppujen) ligniinistä pilkkoutuu ja liukenee, minkä seurauksena kuidut irtoavat toisistaan (Dou 2015). Eri pajulajien ja -hybridien kuoresta erotetut kuidut olivat keskimäärin 1,2–1,7 mm pituisia, kun vastaavat puusta erotetut kuidut olivat keskimäärin vain 0,5–0,6 mm mittaisia. Sen sijaan kuoren kuidut olivat vain vähän puukuituja leveämpiä (vastaavasti 23–24 μm ja 18–22 μm), mutta hyvin paksuseinäisiä. Kuitujen soluontelot ovat tyypillisesti hyvin kapeita ($< 1 \mu\text{m}$) ja soluseinä muodostuu useista valo- ja elektronimikroskopiolla erottuvista kerroksista (Kuva 22). Polarisaattioramanmikroskopian avulla yksittäiskuitujen fibrillikulmaksi määritettiin $n. 0^\circ$, mikä osoittaa kuoren kuitujen fibrillien olevan pääasiassa kuidun pituusakselin suuntaisia.

Sisäkuoresta poiketen pajun ulkokuori sisältää suberiinia ja siihen sitoutunutta hydrolysoituvaa tanniinia. Suberiinin pitoisuus uutetussa hybridipajun ('Karin', 'Klara') kuoressa oli $n. 5 \%$ (Dou ym. 2021a). Samassa yhteydessä arvioitiin uutetun kuoren todellisen ligniinipitoisuuden olevan 7–10 %. Tanniinin pitoisuutta ei määritetty, mutta uutetun kuoren NMR-spektrin mukaan pitoisuus oli varsin korkea (Kuva 23). Kuoren reflukointi vedettömässä natriummetoksidin ja metanolin seoksessa näytti liuottavan myös ligniinin lähes täydellisesti toisin kuin kuumentaminen emäksisessä vedessä (Dou ym. 2019b, 2021b). Käsittely kuumalla *p*-tolueenihapon ja veden seoksella puolestaan näytti johtavan suberiinin ja tanniinien kiinnittymiseen kuituihin (Dou ym. 2019a). Varsinkin suberiinin käyttäytymisellä on suuri vaikutus kuitujen ja niistä valmistettujen fibrillien hydrofobisuuteen (Dou ym. 2021c).



Kuva 23. Hybridipajun ('Karin') uutetun kuoren ^{13}C NMR-spektri ennen natriummetoksidi-metanolikäsittelyä (musta) ja sen jälkeen (punainen) (Dou ym. 2021a). Käsittely poistaa suberiinin (1,2), polyfenolit (tanniini, ligniini) (11–14) ja mm. näihin liittyvät karboksyyliyhdyt (15) lähes täydellisesti. Vaimeat signaalit alueella 130–155 ppm sekä heikohko metoksyylisignaali (3) osoittavat ligniinipitoisuuden hyvin alhaiseksi käsittelyn jälkeen.

Kiinnostavien kemiallisten komponenttien lisäksi pajun kuoresta voitaisiin potentiaalisesti valmistaa suuri joukko materiaaleja, joilla on erityisiä ominaisuuksia. Varsinkin natriumvetybikarbonaatilla eristetyt kuitukimput estävät tehokkaasti *Staphylococcus aureus* -bakteerin kasvua ja absorboivat UV-säteilyä (Dou ym. 2021b). Kuitukimppuja ja kuituja voitaisiin mahdollisesti käyttää komposiiteissa vahvikkeina (Dou 2015, Dou ym. 2019b). Kuoren kuiduista valmistettu paperi on huomattavasti lujempaa kuin havupuusellusta valmistettu 'voimapaperi' (Dou 2015). Pajun kuoresta voidaan valmistaa myös erittäin hydrofobista fibrilliselluloosaa, josta puolestaan voitaisiin tuottaa tiiviitä estokalvoja UV-säteilylle ja hapelle (Dou ym. 2019a, 2021c). Kuoresta valmistettu huokoinen hiili voisi sopia käytettäväksi energian varastointiin sähköakuissa (Hobisch ym. 2020).

Uusia tutkimuksia 4: Kokeiluja pajun kuorella

Pirjo Kääriäinen

Pajun kuori on inspiroiva materiaali, jota on viime vuosina käytetty monin eri tavoin Aalto-yliopiston CHEMARTS-kursseilla. CHEMARTS on vuonna 2011 käynnistynyt Kemian tekniikan ja Taiteen ja suunnittelun korkeakoulujen välinen yhteistyö, jonka tavoitteena on innostaa opiskelijoita ja tutkijoita kehittämään biopohjaisia materiaaliratkaisuja monialaisessa oppimisympäristössä (chemarts.aalto.fi) (Kuvat 24–29).



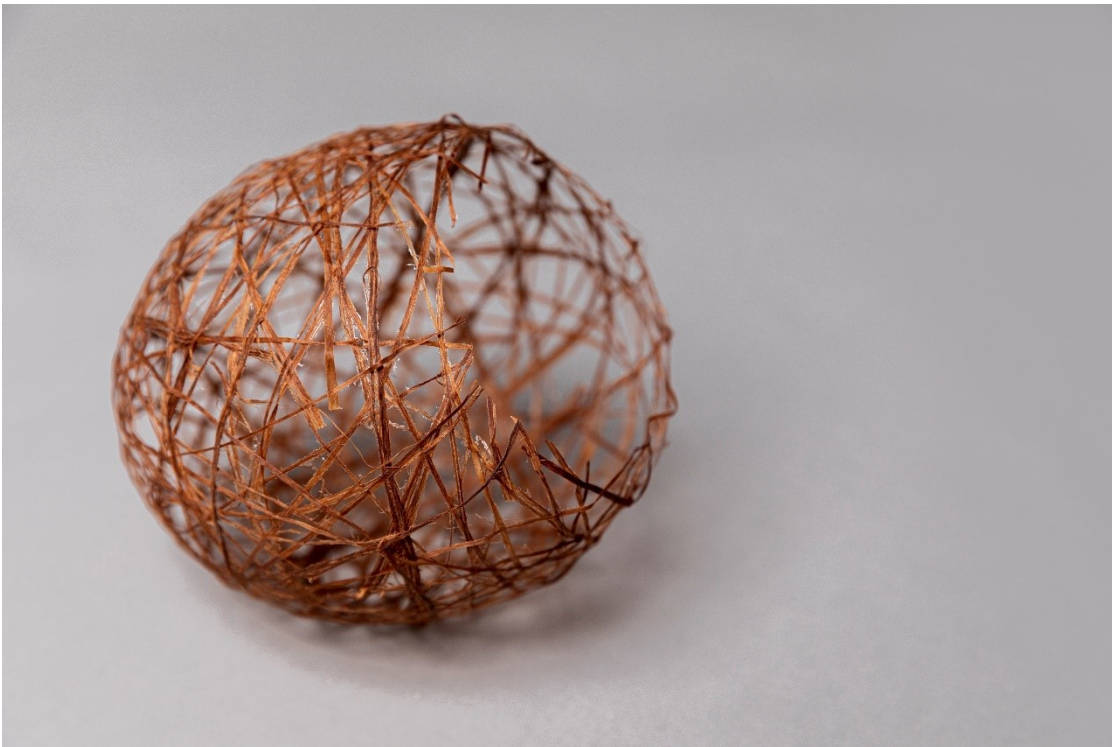
Kuva 24. Pajun sisäkuoressa on pitkiä kuitukimppuja. Aalto-yliopisto / CHEMARTS. Kuva: Eeva Suorlahti



Kuva 25. Kuitukimppujen erottelua soodakeiton jälkeen (vas.) Kuva: Eeva Suorlahti. Edith Kankusen materiaalikokeiluja (oik.) Aalto-yliopisto / CHEMARTS. Kuva: Esa Kapila.



Kuva 26. Kertakäyttöisiä astioita pajun sisäkuoren kuidusta. Ruskea väri on luonnollinen. Eve-
liina Juuri, Sanna-Liisa Järvelä & Jinze Dou, Aalto-yliopisto / CHEMARTS 2017. Kuva: Eeva Suor-
lahti



Kuva 27. Materiaalikoikeilu pajun sisäkuoren kuiduista. Tapani Vuorinen, Aalto-yliopisto /
CHEMARTS. Kuva: Eeva Suorlahti



Kuva 28. Pajun kuorta on perinteisesti käytetty kasvivärjäyksessä. Kuoren tanniinit toimivat myös puretteena, joten erillinen esikäsitteleminen ei ole välttämätöntä. Aalto-yliopisto / CHEMARTS. Kuva: Eeva Suorlahti



Kuva 29. Pajun kuoresta saadaan kauniita sävyjä. Juulia Holmin ajatuksena on kehittää luonnonvärejä helppoon kotivärjäykseen. Aalto-yliopisto / CHEMARTS 2021. Kuva: Esa Kapila

Uusia tutkimuksia 5: Eläinten hyvinvoinnin edistäminen uusien materiaaliratkaisujen ja käytäntöjen avulla: monitieteellisellä tutkimuksella kohti eläintauditonta tulevaisuutta (NOZOON)

Jaana Liimatainen

Turve on yleinen tuotantoeläinten kuivikemateriaali Suomessa. Erityisesti broilerituotannossa turpeen käyttö on laaja-alaista: kuiviketurve kattaa 99,5 % broilerituotannossa käytetyistä kuivikkeista (Korhonen ym. 2021) ja n. 90 % broileritiloista käyttää kuivikkeena pelkästään turvetta (Soimakallio ym. 2020). Muualla Euroopassa puulastut ja oljet ovat yleisimpiä kuivikkeita broilereille. Turve on pehmeää, tasalaatuista, helposti levitettävää ja broilerin luontaiseen kuopsutteluun soveltuvaa. Turpeella on antimikrobisia ominaisuuksia ja se sitoo hyvin nestettä ja ammoniakkia. Se siis hillitsee haittamikrobien ja ammoniakkihöyryn määrää kasvattamossa. Turvekuivikelantaa voidaan käyttää sellaisenaan tai kompostoituna peltolannoitteena. Turve soveltuu suomalaisiin olosuhteisiin hyvin ja on broilerin jalkapohjaterveyden kannalta optimaalinen kuivikemateriaali (Kaukonen 2017). Turvetta onkin pidetty osavaikuttajana broilerin hyvinvointiin ja elintarviketurvallisuuteen. Suomessa turpeen suosioon kuivikkeena vaikuttaa myös sen helppo saatavuus ja hinta (Kaukonen ym. 2017). Tähän on kuitenkin tulossa muutos, sillä energiaturpeen käytön alasajo vähentää myös kuiviketurveutuotantoa ja on nostamassa kuiviketurpeen hintaa (Korhonen ym. 2021).

NOZOON-projektin tavoitteena on etsiä kuiviketurpeelle kilpailukykyisiä vaihtoehtoja, joiden avulla ylläpidetään suomalaisen broilerituotannon korkeaa laatua, alhaista tautitilannetta ja eläinten hyvinvointia. Yksi tutkittavista vaihtoehtoista on paju. Pajun kuoriuute on anti-inflammatorinen, antibakteerinen, antioksidatiivinen ja antiviraalinen (Shara & Stohs 2015, Quosdorf ym. 2017, Tienaho ym. 2021), joten paju vaikuttaa lupaavalta materiaalilta taudinaiheuttajia vastaan. Broilerin lajityypilliseen käyttäytymiseen kuuluu, että broilerit kuopsuttelevat, nokkivat ja jopa kuluttavat kuivikemateriaalia. Broilerin ruokintakokeessa, jossa lämpöstressistä kärsivien broilerin rehuun lisättiin 1 % paju-uutetta, havaittiin että paju-uutetta saaneiden broilerin umpisuolen patogeenisten bakteerien määrä laski ja hyödyllisten maitohappobakteerien määrä kasvoi tilastollisesti merkittävästi verrattuna verrokkiryhmään (Saracila ym. 2018).

Pajua voidaan kasvattaa tuottoisasti monenlaisilla maaperillä eteläisessä Suomessa. Siipikarjatuotanto on painottunut Länsi- ja Lounais-Suomeen (Korhonen ym. 2021), joten hyvin biomassaa tuottavien pajulajien viljeleminen broilerin kuivikekäyttöön olisi mahdollista broilerikasvattamoiden läheisyydessä. Tämä mahdollistaisi tulevaisuudessa kuivikkeen helpon saatavuuden tai jopa omavaraisuuden tiloilla. Pajumateriaalin kuivikeominaisuuksista on kuitenkin hyvin vähän tietoa saatavilla, vaikka pajua käytetään pienimuotoisesti kuivikkeena kotieläintiloilla Euroopassa. Broilereilla tehdyssä kuivikekokeessa pajuhakkeen nesteen ja ammoniakkin sitomis-kyky sekä pH olivat yhteneviä mäntylastujen vastaavien kanssa (Hile ym. 2012).

Pajuhake on yksi NOZOON-hankkeessa testattavista antiseptisistä materiaaleista. Pajuhakkeen, sen seoksien ja muiden vaihtoehtoisten kuivikemateriaalien kuivikeominaisuudet määritetään laboratoriotestein. Vaihtoehtoisista kuivikemateriaaleista määritetään myös niiden antimikrobisuus ja niillä toteutetaan kuivikekoe Luken omassa broilerikasvattamossa, Koe-eläintallissa. Broilerin käyttäytymisen ja yleisen hyvinvoinnin lisäksi seurataan broilerin suoliston mikrobistoa.

Broilerikasvattajan kyky ylläpitää kuivikkeen kuntoa, kuivikemateriaalista riippumatta, on tärkeä osa kuivikkeen toimivuutta ja broilerin hyvinvointia (Kaukonen ym. 2017). NOZOON-hankkeen materiaalikehitysohjelmaan kuuluu oleellisena osana vaihtoehtoisten kuivikemateriaalien elinkaarihallinta. Elinkaarihallinta pitää sisällään mm. riskien hallintaa ja kuivikemateriaalien

muutoksesta aiheutuneiden käytäntöjen implementointia tilallisille. Hanke toteutetaan monitieteellisenä yhteistyönä ajalla 1.4.2021-31.12.2023. Hankkeesta antaa lisätietoja tutkija Jaana Liimatainen (jaana.liimatainen@luke.fi).

6.2. Pajun kemialliset ominaisuudet ja niihin perustuva käyttö

Jaana Liimatainen

Puiden kuiva-aineesta lähes 99 % koostuu kolmesta alkuaineesta, hiilestä, vedystä ja hapesta. Eri puulajien alkuainekoostumuksissa on vain vähän eroja. Puun biomassa jakaantuu runkopuuhun, kuoreen, oksiin, lehtiin/neulasiin sekä juuriin. Biomassan jakautuminen puussa ja sen kemiallinen koostumus riippuu puulajista ja puun iästä (Alakangas ym. 2016). Muiden lignoselluloosamateriaalien tavoin pajun pääkomponentit ovat selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini. Näiden päärakennekomponenttien lisäksi pajuissa on muita polymeerisiä komponentteja, kuten proteiineja, pektiinejä, suberiinia, sekä epäorgaanisia aineita että uuttuvia aineita. Uuttuvia aineita ovat esimerkiksi rasvahapot, fenoliset yhdisteet ja uuttuvat hiilihydraatit.

Tässä osiossa käsitellään pajun runkopuun ja kuoren kemiaa. Nopeakasvuisten pensasmaisten pajujen rungon halkaisija on yleensä pieni ja kuoren osuus rungon biomassasta suuri. Kuoren osuus rungosta on korkeimmillaan ensimmäisen kasvukauden aikana, jolloin kuoren osuus voi olla jopa puolet rungon kuivapainosta, mutta pajun ikääntyessä kuoren osuus rungon biomassasta pienenee (Kenney ym. 1990, Hytönen 1995a). Pajun kuori sisältää puuosaa enemmän uutaineita, ligniiniä, tuhkaa ja kosteutta, ja näiden osuus korostuu nuorissa yksilöissä (Adler ym. 2005), kun taas puosaa sisältää kuorta enemmän selluloosaa ja hemiselluloosaa (Han & Shin 2014).

Paju on sopeutunut moniin erilaisiin kasvuympäristöihin ja ympäristön aiheuttama stressi näkyy lajien erilaisina kemiallisina koostumuksina. Hyvänä esimerkkinä erikoistumisesta toimii *Salix psammophila* (desert willow) -paju, jonka kuoren suuren vahapitoisuuden otaksutaan suojaavan pajua veden liialliselta haihtumiselta ja sokerialkoholien korkean pitoisuuden lisäävän pakkaskestävyyttä (Kubo ym. 2013).

Selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini

Pajun runkopuussa on polysakkarideja eli pääasiassa selluloosaa ja hemiselluloosaa yhteensä 60–79 % (Kubo ym. 2013, Han & Shin 2014, Dou 2015). Pajun, kuten muidenkin lehtipuiden hemiselluloosa on pääosin ksylaania. Polymeerista fenolilyhdistettä, ligniiniä on pajun puuosassa 17–24 % (Kubo ym. 2013, Han & Shin 2014, Dou 2015, Dou ym. 2018a). Pajun puuosan ligniinin koostumusta on tarkasteltu tarkemmin 'Klara'-lajikkeesta: sen puosan ligniini koostuu suurimmaksi osaksi syringyyliyksiköistä (S), mutta myös guajasyyli- (G) ja *p*-hydroksifenylyyksiköistä (H) ja ligniinin S/G suhde vaihtelee välillä 1,4–2,1 (Dou ym. 2018a)

Pajun kuoreessa on polysakkarideja 44–58 % ja ligniiniä 24–32 % (Kubo ym. 2013, Han & Shin 2014, Dou ym. 2018a). Pajun kuoreessa esiintyy selluloosan ja hemiselluloosan lisäksi myös pektiinipolysakkarideja selvästi enemmän kuin puuosassa (Toman ym. 1975, Dou ym. 2018a). Sisäkuoreessa ligniiniä on hieman vähemmän kuin kuoreessa, noin 18 %. 'Klara'-pajun kuoren ligniini koostuu suurimmaksi osaksi G-yksiköistä, mutta myös S- ja H-yksiköistä. Ligniinin S/G suhde vaihtelee välillä 0,2–0,9 ja on siis alhaisempi kuin puuosassa (Dou ym. 2018a).

Suberiini, lipidit ja proteiinit

Suberiinin koostumusta ja pitoisuutta pajuissa on tutkittu lajikkeiden 'Klara' ja 'Karin' kuorista. Näiden pajujen kuorissa on suberiinia noin 5 % ja se sijaitsee ulkokuoressa. Kuoren suberiini koostuu rasvahapoista, aromaattisista yhdisteistä, pitkäketjuisista alifaattisista alkoholeista ja steroleista. Pajun suberiinin tunnistetuista osista noin 40 % on rasvahappoja ja noin 15 % aromaattisia yhdisteitä. Rasvahapoista noin 60 % on rasvahappojen metyyliestereitä. Aromaattisista yhdisteistä eniten on ferulahappoa ja isoeugenolia. Suberiini toimii kuoressa vedeneristeenä. Lisäksi sen aromaattisten osasten on esitetty toimivan puolustuksena patogeeniä vastaan ja rasvahappo-osien energialähteenä metabolisissa prosesseissa. (Dou ym. 2021a)

Zaiter ym. (2016) ovat määrittäneet valkosalavan (*S. alba*) kuoren lipidien ja proteiinien kokonaispitoisuutta jauhetuista ja seulotuista raefraktioista. Lipidien kokonaisuusmäärä kuoressa vaihteli eri raefraktioissa 5 ja 13 %:n välillä: lipidipitoisuus oli korkeimmillaan kaikista hienojakoisimmassa fraktiossa (raekoko 20–50 µm). Kuoren kokonaisproteiinipitoisuus eri fraktioissa vaihteli välillä 11–18 %, paitsi karkeimmassa raefraktiossa (>500 µm), jossa proteiinipitoisuus oli 6 %. (Zaiter ym. 2016)

Tuhka, ravinteet ja raskasmetallit

Puiden tuhka eli palamisjäännös sisältää epäorgaanisten aineiden suoloja, mm. kaliumin, kalsiumin ja raudan fosfaatteja ja karbonaatteja. Puiden poltosta syntyvää tuhkua pyritään hyötykäyttämään esimerkiksi lannoitteena metsissä. Ravinneaineiden lisäksi tuhkassa on kuitenkin myös puuhun kertyneitä raskasmetalleja. Eräät pajukloonit keräävät itseensä erityisen paljon raskasmetalleja. Raskasmetallit rikastuvat palamisjäännökseen ja saattavat estää tuhkan hyötykäytön lannoitteena. Raskasmetallien akkumulaatioerot pajujen välillä ovat monesti suurempia lajin sisällä kuin lajien välillä, mutta joitakin pajulajeja pidetään yleisesti raskasmetalleja akkumuloivina, kuten esimerkiksi koripajua (*S. viminalis*). Myös eri raskasmetallien akkumuloitumis- ja kuljetusominaisuuksissa on eroja. Eräitä pajuklooneja voidaanakin käyttää raskasmetalleilla saastuneen maan puhdistajina (fytoekstraktio), mutta tällaisten pajulajien jatkokäyttö saattaa olla estynyt korkeiden raskasmetallipitoisuuksien takia. (Landberg & Greger 1996, Greger & Landberg 1999, Pesonen ym. 2014) Pajujen fytoekstraktiota on tarkemmin käsitelty kappaleissa 5.2. ja 5.3.

Pajun kuoressa on ravinnealkuaineita ja raskasmetalleja suurempina pitoisuuksina kuin puuosassa. Adler ym. (2005) ovat tutkineet koripajun (*S. viminalis*) kuoren ja puuosan ravinne- ja raskasmetallipitoisuuksia 1–5-vuotiaista vesoista: kuoressa oli merkittävästi korkeammat pitoisuudet typpeä, fosforia, kaliumia, magnesiumia, kalsiumia, kadmiumia, lyijyä, kobolttia ja sinkkiä kuin puuosassa. Määritetyistä ravinteista korkein pitoisuus kuorissa oli kalsiumilla, jota oli n. 17 mg/g (kuivapainoa kohti). Kalsiumpitoisuudessa ei ollut tilastollisesti merkittäviä eroja eri ikäisten vesojen kuorissa. Puuosissa kalsiumpitoisuus oli n. 2 mg/g. Muiden makroravinteiden (typpi, fosfori, kalium ja magnesium) pitoisuudet olivat ensimmäisen vuoden vuosikasvainten puu- ja kuoriosissa korkeammat kuin vastaavissa vanhemmissa osissa. Yksittäisten raskasmetallien pitoisuudet ylivät välille 0,03–4,1 µg/g. Kromipitoisuus oli yksittäisistä raskasmetalleista korkein sekä kuorissa (n. 2 µg/g) että puuosissa (n. 3 µg/g) (Adler ym. 2005).

Han ja Sin (2014) ovat määrittäneet raidan (*S. caprea*) tuhkapitoisuutta sekä kuorissa että puuosassa. Kuoren tuhkapitoisuus oli keskimäärin 4,3 % kuoren kuivapainosta ja puuosan tuhkapitoisuus oli 0,9 % puuosan kuivapainosta. Dou (2015) ja Dou ym. (2016) määrittivät tuhkapitoisuuksia kahden pajulajin (*S. myrsinifolia*, *S. schwerinii*) ja kahden lajikkeen ('Karin', 'Klara')

sisäkuorista (4–7 %) ja puuosasta (0,5 %) ja havaitsivat, että sisäkuorissa oli jopa kymmenkertainen tuhkapitoisuus puuosiin verrattuna.

Fenoliset yhdisteet

Pajujen ja poppelien (Salicaceae-heimo) nimikkoyhdisteitä ovat niiden tuottamat salisinoidit (*synonymi* salisylaattit), vaikka salisinoidien esiintyvyys ei rajoitu näihin lajeihin. Salisinoidit ovat fenolisia glukosideja, tarkemmin salisyylialkoholin johdannaisia, joita esiintyy mm. pajun kuorissa, lehdissä ja kukinnoissa (Julkunen-Tiitto & Virjamo 2017). Pajuissa esiintyviä salisinoideja tunnetaan yli 20 erilaista (Boeckler ym. 2011, Kim ym. 2015, Noleto-Diaz ym. 2018, Ward ym. 2020, Tawfeek ym. 2021). Yleisin ja ensimmäisenä tunnistettu salinoidi, salisiini, eristettiin pajun kuoresta v. 1828. Salisiini yhdistettiin pajun kuoren kipua lievittäviin ominaisuuksiin, jotka tunnettiin jo 1500 eaa muinaisen Egyptin alueella. Muutama vuosikymmen salisiinin eristämisen jälkeen v.1852, salisiinista kehitettiin synteettinen johdannainen asetyylisalisyylihappo. Kului kuitenkin useampi vuosikymmen ennen kuin v.1897 aloitettujen kliinisten kokeiden jälkeen Bayer toi asetyylisalisyylihapon markkinoille v. 1899 kauppanimellä aspiriini. Asetyylisalisyylihappo on edelleen yksi myydyimmistä lääkkeistä, mutta ei enää niinkään sen kipua lievittävien ominaisuuksien, vaan verihutaleiden aggregoitumista estävän vaikutuksen takia (Desborough & Keeling 2017).

Muut salisinoidit ovat pääasiassa salisiinin johdannaisia, joissa salisiinin hydroksyyliiryhmiin on liittynyt esterisidoksin orgaanisia happoja. Esimerkiksi salikortiini on yleinen salinoidi, jota esiintyy useiden pajulajien kuorissa. Uusia, farmakologisesti lupaavia salisinoideja on tunnistettu myös viime vuosina: tällaisia yhdisteitä ovat vannepajusta (*S. dasyclados*) ja *S. miyabeana* -pajusta eristetty syklo dimeerinen salinoidi, joka on aktiivinen useita syöpäsoluminjoja vastaan (Ward ym. 2020) sekä salisiini-7-sulfaatti, jota esiintyy useissa rohdoksina käytetyissä pajulaeissa ja jolla saattaa olla muista salisiineista eroava metaboloitumisreitti (Noleto-Dias ym. 2018). Pajulajien välillä on suuria eroja salisinoidien pitoisuuksissa ja eräissä pajulaeissa, kuten jokipajussa, salisinoidien pitoisuudet ovat hyvin alhaisia (Julkunen-Tiitto & Virjamo 2017). Lisäksi salisinoidit ovat herkkiä hajoamaan, mikä tulee ottaa huomioon mietittäessä niiden hyödyntämistä osana biojalostusta.

Pajunkuorivalmiste on mainittu Euroopan farmakopeassa lääkinnällisenä tuotteena. Euroopan lääkeviraston (European medical agency, EMA) kasvirohdoskomitean (Committee on Herbal medicinal Products, HMBC) monografiassa on määritelty, että alaselkäkipuun käytettävä kuoriute voi olla useasta pajulajista, mm. punapaju (*S. purpurea* L.), *S. daphnoides* Vill. ja silosalava (*S. fragilis* L.), valmistettu etanolin vesiliuoksella (70 % V/V) uutettu kuivattu tuote, jonka salisii-nipitoisuus on 15 % (EMA 2016a). Alaselkäkipun hoidon lisäksi, pajunkuorivalmisteilla on arvioitu olevan näyttöä myös perinteisestä käytöstä lievien nivelkipujen, päänsäryn sekä vilustumisoireisiin liittyvän kuumeen hoidossa (EMA 2016b).

Euroopan komission luettelossa hyväksytyistä uuselinvarikkeista ei ole mainintaa pajuista, eikä myöskään Ruokaviraston listauksessa luonnonvaraisten kasvien elintarvikekäytöstä ole mainittu paju. Viiden eri pajulajin kuoret on kuitenkin mainittu ns. BELFRIT-listalla. BELFRIT-lista on Belgian, Ranskan ja Italian viranomaisten laatima listaus kasvituohteista, joiden käyttö ravintolisissä on sallittua. BELFRIT-listauksen mukaisia, ravintolisissä sallittuja pajulajien kuoria ovat valkosalava (*S. alba* L.), raita (*S. caprea* L.), silosalava (*S. fragilis* L.), viitahalava (*S. pentandra* L.) ja punapaju (*S. purpurea* L.). Pajunkuoriravintolisien edellytyksenä on, että salisinoidien pitoisuus tuotteissa on määritetty. Pajun käytöstä ravintolisissä ja rehuissa on tarkemmin kerrottu ”Kosteikkokasveista uusia elinkeinomahdollisuuksia” -raportissa (Laurila 2018).

Pajun kuoriuutteilla on myös tulehduksia ja kasvainten kasvua estäviä, antimikrobisia sekä antioksidatiivisia ominaisuuksia (Ramos ym. 2019, Antoniadou ym. 2021, Tienaho ym. 2021). Salisinoidit eivät yksinään kykene selittämään kaikkia kuoriuutteiden positiivisia ominaisuuksia, vaan kuoren muilla fenolisilla glukosideilla, fenolisilla hapoilla, kondensoituneilla tanniineilla ja flavonoideilla otaksutaan olevan vaikutuksia pajunkuoriuutteiden ominaisuuksiin, joko yksinään tai synergisesti. Muilla fenolisilla glykosideilla viitataan Salicaceae -lajeille ominaisiin pienimolekyylisiin yhdisteisiin kuten piseiiniin, triandriiniin ja salidrosidiin, joita esiintyy lähinnä kuorissa salisinoideja vastaavina pitoisuuksina (Julkunen-Tiitto 1985, Heiska ym. 2008). Kuoren fenoliset hapot ovat mm. hydroksikanelihappoja ja niiden johdannaisia (Piątczak ym. 2020). Pajun kuoren flavonoidit ovat flavonoleja (mm. kversetiinin glykosidit), flavanoneja (mm. naringeniini ja sen glukosidit), flavan-3-oleja ja kalkoneja (mm. isosalipurposidi ja sen johdannaiset) (Kammerer ym. 2005, Krauze-Baranowska ym. 2013, Ramos ym. 2019). Eräiden pajujen kuorissa, kuten punapajussa, valko- ja silosalavassa, esiintyy myös flavonoideihin kuuluvia antosyaaniväriaineita (Bridle ym. 1973).

Pajunkuoren tanniinit ovat pääosin prosyanidiineja eli katekiinin ja epikatekiinin oligomeerejä ja polymeerejä, joissa monomeerit ovat liittyneet toisiinsa B-typin hiili–hiili-sidoksin (C4-C8 tai C4-C6), sekä osittain myös A-typin sidoksin, jolloin rakenteessa on toinen flavanoliinien välinen sidoks (C2-O7) (Kolodziej 1990, Jürgenliemk ym. 2007, Wiesneth ym. 2015). Valkosalavan (*S. alba*) kuoresta on tunnistettu myös prodelfinidiini-tyyppisiä kondensoituneita tanniineja, jotka koostuvat (epi)katekiinien lisäksi (epi)gallokatekiineista (Piątczak ym. 2020). (Epi)katekiinimonomeerien lisäksi pajun kuoresta on tunnistettu muita flavan-3-oleja mm. (epi)gallokatekiineja sekä (epi)katekiinijohdannaisia eli flavan-3-oleja, joihin on liittynyt esterisidoksin hiillivetyjä tai hiili-hiili-sidoksin fenolisia ryhmiä ja yhdisteit (Kolodziej 1988, Mizuno ym. 1990, Jürgenliemk ym. 2007, Piątczak ym. 2020).

Julkunen-Tiitto (1985) on määrittänyt kotimaisten pajulajien, raidan (*S. caprea*), viitahalavan (*S. pentandra*), mustuvapajun (*S. myrsinifolia*), kiiltopajun (*S. phyllicifolia*) ja pohjanpajun (*S. lapponum*) sekä ulkomaisten, mutta Suomessa viljeltyjen koripajun (*S. viminalis*), ja vesipajun (*S. cv. aquatica*) kuoren ja puuosan fenolisten glykosidien pitoisuuksia nuorista (1–2-vuotiaista) ja täysikasvuisista pajuista. Mustuvapajun kuoressa oli eniten määritettyjä fenolisia glykosideja, yhteensä 35 mg/g nuorissa ja 29 mg/g täysikasvuisissa pajuissa (kuoren kuivapainoa kohti). Salikortiinin määrä mustuvapajun kuoressa oli fenolisista glukosideista korkein, 22 mg/g nuorissa ja 12 mg/g täysikasvuisissa pajuissa. Piseiinin pitoisuus mustuvapajun kuoressa oli 5 mg/g sekä nuorissa että täysikasvuisissa pajuissa. Muiden yhdisteiden pitoisuus oli kaikissa pajulajeissa alle 3 mg/g, lukuun ottamatta fragiliinia, jota oli täysikasvuisten viitahalavien kuorissa 9 mg/g. Pajujen puuosissa fenolisten glykosidien pitoisuudet olivat alhaisia, 4–10 % kuorien vastaavista kokonaispitoisuuksista, paitsi pohjanpajussa 40 %. Eniten fenolisia glukosideja oli nuorten viitahalavien puuosissa, yhteensä 2 mg/g. Mustuvapajun puuosissa fenolisia glykosideja oli yhteensä 1,9 mg/g nuorissa ja 1,5 mg/g täysikasvuisissa pajuissa. Puuosien alhaisista fenolisten glykosidien pitoisuuksista huolimatta, puuosien fenolisten glykosidien koostumukset vastasivat pääosin kuorien koostumusta. Poikkeuksena koripaju, jonka puuosassa ei ollut fenolisia glykosideja lainkaan (Julkunen-Tiitto 1985).

Julkunen-Tiitto ja Meier (1992) ovat laskeneet mustuvapajun (*S. myrsinifolia*) salisinoidien saantoja viljeltyä pajuhehtaaria kohti pohjautuen yhdeksän eri lannoittamattoman 2-vuotiaan kloonin biomassan (lehdet ja rungot) salisiinipitoisuuksiin (salisinoidien hydrolyysituote). Mustuvapajukloonien biomassan kokonaissalisiinipitoisuudet vaihtelivat välillä 17–33 mg/g. Julkunen-Tiitto ja Meier (1992) arvioivat, että salisiini-saanto biomassasta vaihteli välillä 136–333 kg/ha, kun huomioon otettiin kloonien erilainen biomassan tuotto hehtaaria kohti (5 900–13 700 kg/ha). Vastaavasti Heiska ym. (2005) määrittivät salisiini-saantoja viljeltyjen 2-vuotiaiden

mustuvapajukloonien kokonaisbiomassasta. Biomassan määrä vaihteli välillä 1 500–13 700 kg/ha. Lehtien osuus kokonaisbiomassasta oli noin 27 %. Biomassan salisiinipitoisuus vaihteli välillä 6–23 mg/g ja salisiini-saannot välillä 20–220 kg/ha riippuen kloonista ja viljelytavasta. Lannoitettujen pajujen salisiini-saannot olivat 24 % korkeammat kuin lannoittamattomien mustuvapajujen. Mustuvapajujen viljely polyetyleenikatteella keskimäärin kaksinkertaisti salisiini-saannon, mutta vaikutus oli samalla myös klooniriippuvainen. (Heiska ym. 2005)

Heiska ym. (2008) ovat määrittäneet eri lannoitemäärillä ja alustoilla viljeltyjen 2-vuotiaiden mustuvapajukloonien kuorien tanniinipitoisuuksia. Keskimäärin mustuvapajujen kuorissa oli kondensoituneita tanniineja 15 % kuoren kuivapainosta, mutta yksilöiden välistä vaihtelua esiintyi laajasti (10–22 %) (Heiska ym. 2008). *Salix pyrolifolia* varpujen kuluvaan ja edeltävän vuoden vuosikasvujen kuorissa ei ollut tilastollisesti merkittäviä eroja kondensoituneiden tanniinien pitoisuuksissa 1-, 3- ja 20-vuotiailla pajuilla: kondensoituneiden tanniinien pitoisuudet vaihtelivat välillä 70–100 mg/g (Lavola ym. 2018).

Brereton ym. (2017) ovat tutkineet mm. kondensoituneiden tanniinien saantoja viiden pajukloonin rungon biomassasta (*Salix x dasyclados* 'SV1', *Salix viminalis* 'SV5027', *Salix miyabeana* 'SX61', 'SX64', 'SX67'). Tanniinisaannot olivat suurimmillaan *S. miyabeana* 'SX67'-kloonilla, saannon yltäessä alueellisesti jopa 36 kg/ha/vuosi (Brereton ym. 2017)

Pajuyhdisteiden käyttö

Pajun kemiaan perustava käyttö on tällä hetkellä pienimuotoista ja keskittyy kuoren yhdisteisiin. Pajun kuoren salisinoideilla ja mahdollisesti myös muilla fenolisilla yhdisteillä on käyttöä farmaseuttisina yhdisteinä ja ravintolisinä. Farmaseuttinen käyttö on keskittynyt pajulajeihin, joiden salisinoidipitoisuudet ovat korkeat. Ravintolisissä sallittujen pajulajien kuoret on rajattu viiteen pajulajiin, valkosalavaan, raitaan, silosalavaan, viitahalavaan ja punapajuun. Pajun kuorta käytetään myös kosmetiikassa, osittain samojen ominaisuuksien takia kuin ravintolisissä. Kasviaineiden perinteinen käyttö esimerkiksi lankojen ja kankaiden värjäyksessä ja nahkojen parittamisessa voivat tulevaisuudessa olla mahdollisia käyttökohteita ja vaihtoehtoja nykyisille teollisille kemikaaleille.

Kasvivärjäys. Synteettisiä väriaineita käytetään laajalti tekstiiliteollisuudessa, vaikka niillä on haittavaikutuksia sekä luonnolle että niille altistuville henkilöille. Synteettisten väriaineiden käytöstä syntyvät voimakkaan väriset jätevedet vaikuttavat kasvien fotosynteesiin ja vesieläimiin muuttuneen hapen kulutuksen ja valon läpäisevyyden takia (Holkar ym. 2016). Lisäksi väriaineet voivat aiheuttaa työntekijöille kroonisia sairauksia ja jätevedet voivat sisältää klooria ja metallioneja. Synteettisiä väriaineita ei ole vielä mahdollista täysin korvata luonnonväreillä, mutta ekologisen vaihtoehtona kasviväreillä värjättyjä tekstiilejä on markkinoilla (Räisänen ym. 2015), myös isojen toimijoiden mallistoissa (Finlayson 2021). Pajusta värjäykseen käytetään lehtiä, kuorta ja juuria. Kuoren tanniinit tuottavat ruskeaa sävyä ja toimivat myös peittäusaineena. Lehdistä saadaan keltaista väriä ja juurista mustaa (Räisänen ym. 2015). Räisänen ym. (2020) ovat tutkineet kiiltopajun (*S. phyllicifolia*) kuoriuutteen sytotoksisuutta hiiren hepatoomasoluilla (hepa-1) sekä uutteenä että väriaineena villakankaalla. Kiiltopajun kuoriuutteella ei havaittu sytotoksista aktiivisuutta ja kuoriute tuotti intensiivisen värin villakankaalle. Väri säilyi hyvin ilman peittäusainetta, mutta hieman paremmin väri säilyi, kun metallisuoloja käytettiin puretteena. Värjätty kangas aiheutti lieviä muutoksia hepatoomasoluille, mutta värjätyn kankaan sytotoksisuus ei eronnut tilastollisesti merkittävästi värjäämättömästä kankaasta. Kuoriute oli yleisesti turvallinen värjäysaine, tosin kuoren salisinoideit saattavat aiheuttaa allergiaoireita herkille yksilöille. (Räisänen ym. 2020).

Nahan parkitseminen. Kasvivärjäämisen tavoin myös parkitseminen perinteisillä kasvitanniineilla on ekologinen vaihtoehto metallisuolojen avulla tehdyille teolliselle nahan parkitsemiselle (Auad ym. 2020). Pajun kuorta on perinteisesti käytetty nahan parkitsemiseen Itä-Euroopassa, Venäjällä ja Skandinaviassa (Falcão & Araújo 2018). Pajun kuoren tanniinien pitoisuus ei kuitenkaan yllä kasviparkitsemisessa yleisemmin käytettyjen kasvien, kuten akaasia- ja quebrachopuiden tanniinipitoisuuksiin.

Kosmetiikka. Bioaktiivisuuksien vuoksi pajun kuori- ja lehtiutteita käytetään myös osana kosmetiikkaa. Piątczak ym. (2020) tutkivat valkosalavan (*S. alba*) lehti- ja kuoriuutteen soveltuvuutta kosmetiikkaan. Valkosalavauutteet eivät olleet ihon keratinosyyttisoluille myrkyllisiä testattaessa uutteita pitoisuuksina, jotka osoittivat korkeaa antioksidatiivista aktiivisuutta (5–200 µg/ml). Ihon fibroblastisolut olivat herkempiä erityisesti kuoriuuttelelle ja tutkijat päätyivät suosittamaan kuoriuutteille alhaisempaa konsentraatiota kuin lehtiuille, kun uutteita käytetään osana kosmetiikkaa, joka imeytyy syvemmälle ihoon (Piątczak ym. 2020).

Muita käyttökohteita

Perinteisten ja nk. luonnonmukaisten käyttötapojen lisäksi teknologian kehitys mahdollistaa uusien tuotteiden kehityksen pajun kemiallisista yhdisteistä. Tällaisia voivat olla esimerkiksi funktionaaliset ominaisuudet, joita voidaan liittää mm. pakkausmateriaaleihin. Funktionaalinen ominaisuus voi olla esimerkiksi UV- ja happisuojaus tai antimikrobinen pinnoite (Dou ym. 2021c, Tienaho ym. 2021).

Uusia tutkimuksia 6: Pajunkuoresta bioväriksi

Tia Lohtander

Pajun kuori sisältää paljon arvokkaita molekyylejä, joista osalla on myös bioaktiivisia ominaisuuksia. Tunnetuin bioaktiivisista molekyyleistä on salisiini, jota on käytetty pitkään lääkeaineena hoitamaan kipua ja tulehdusta (Schmid ym. 2001). Pajunkuoren sisältämät yhdisteet riippuvat paljolti pajulajikkeesta ja määrät vaihtelevat myös saman lajikkeen sisällä riippuen kasvuolosuhteista (Sulima ym. 2017). Yhdisteitä voidaan eristää kuoresta erilaisin uuttomenetelmin ja pajunkuoresta saatavan uutteen kiintoainepitoisuus sekä koostumus riippuvat uutun olosuhteista, kuten liuottimesta, lämpötilasta, sekoituksesta ja ajasta. Kuumavesiuutto yksinkertaisuudessaan on hyvä ja liuotinvapaa menetelmä erotella vesiliukoiset molekyylit puunkuoresta.

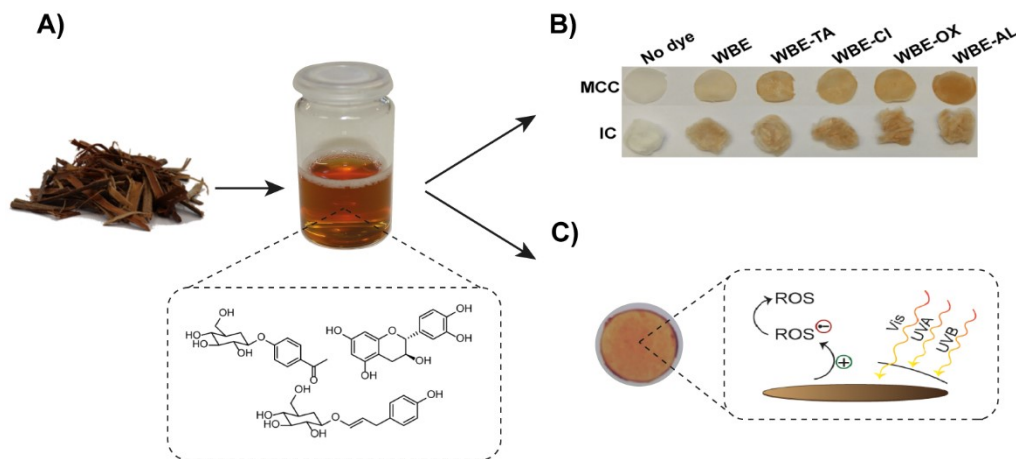
Pajunkuoriuutetta on perinteisesti käytetty lääkintätarkoituksiin sen sisältämän salisiinin takia. Uutetta on kuitenkin mahdollista hyödyntää myös muissa sovelluksissa, kuten biopohjaisena väriaineena selluloosapohjaisille kuiduille (Kuva 30 A ja B). Nykyisin suurin osa materiaaleista värjätään syntetisoiduilla väriaineilla ja pigmenteillä, ja suurin yksittäinen väriaineita käyttävä teollisuudenala on tekstiiliteollisuus (Grand View Research 2021). Värjäyksen ja muiden viimeistelyprosessien jätevesien on havaittu olevan yksi suurimmista tekstiiliteollisuuden saastutuksen lähteistä väriaineiden ja muiden viimeistelykemikaalien haitallisuuden takia (Khan & Malik 2014). Synteettisten värien syrjäyttämät biovärit, tai luonnonvärit, ovat herättäneet huomiota viime vuosikymmeninä yhtenä vaihtoehtona synteettisten värien luomalle ongelmalle. Näiden uusiutuvista lähteistä saatavien värien uskotaan olevan myös ympäristöystävällisempiä kuin synteettisten väriaineiden (Shahid ym. 2013). Väriaineita saadaan erotettua muun muassa kasvien eri osista, levistä ja mikrobeista (Spolaore 2006, Vankar 2000).

Pajunkuorista saatava vesiuute on ruskeanoranssi liuos, joka absorboi sekä näkyvän valon että ultraviolettin valon aallonpituuksilla. Siinä missä synteettiset väriaineet sisältävät pääasiassa vain kyseistä väriyhdistettä, biovärit kuten pajunkuoriuute ovat koostumukseltaan paljon

moninaisempia. Dou ym. (2018b) karakterisoinnin perusteella tiedetään, että Karin hybridilajikkeesta saatava kuumavesiuutos sisältää pääasiassa kolmea fenolista molekyyliä sekä monosokereita. Pajunkuoriuutteen saanto on suhteellisen matala (16–24 %) (Dou ym. 2018b) ja lisäksi sen koostumus on herkkä valolle, ilmalle ja mikrobeille, joten uute on usein kuivattava ja suojattava säilyvyyden turvaamiseksi. Vaihtelevamman koostumuksen lisäksi biovärille on tyypillistä, että niiden pesun- ja valonkesto-ominaisuudet ovat heikommät kuin synteettisillä vastavilla, mikä johtuu sekä väriaineen ominaisuuksista että värin ja kuidun välille muodostuneen sidoksen luonteesta. Esimerkiksi selluloosakuituja värjätessä biovärimolekyylien ja selluloosan välille ei muodostu vahvoja kovalenttisia sidoksia, kuten tapahtuu kun värjätään yleisesti käytössä olevilla synteettisillä reaktiiviväreillä (Khatri ym. 2015). Monet biovärit ovat negatiivisesti varautuneita vesiliuoksessa ja selluloosan ollessa myös negatiivisesti varautunut, vuorovaikutus ja sitoutuminen on heikompaa kuin positiivisesti varautuneiden proteiinikuitujen, kuten villan ja silkin, kanssa.

Biovärin kiinnittymistä ja värjäystuloksen kestävyyttä pyritään usein parantamaan puretteilla tai muokkaamalla selluloosan pintavarausta esimerkiksi kationisoinnilla (Manian ym. 2016, Guesmi ym. 2013). Positiivisesti varautuneet metallipohjaiset pureteaineet kykenevät sitoutumaan selluloosakuituun ja muodostamaan vahvoja koordinaatiokomplekseja väriaineiden kanssa. Valittavasti monet metallipuretteet, kuten esimerkiksi kromi, ovat ympäristölle haitallisia ja niiden käyttöä on rajattu. Erilaisia biopohjaisia pureteaineita, kuten tanniineja ja metalleja hyperakkumuloiivia kasveja, on myös mahdollista käyttää puretuksessa (Cunningham ym. 2011, Rather ym. 2016). Aikaisemmassa tutkimuksessamme havaitsimme, että pajunkuoriuutelle sopi oksaali- ja sitruunahappo biopohjaiseksi puretteeksi paremmin kuin tanniinihappo värjättäessä mikrokiteistä selluloosaa ja regeneroituja loncell-kuituja. Lisäksi huomasimme, että väriaineen kiinnittymistä arvioitaessa bioväri on tärkeää ottaa huomioon kokonaisuutena monipuolisen koostumuksen takia. Pajunkuoriuute sisältää sekä värillisiä että värittömiä komponentteja, joiden adsorptio kuituun voi olla kilpailevaa. Tällöin kvantitoimalla saatu kuituun kiinnittynyt väriainemäärä ei välttämättä vastaa täysin silmin havaittavaa värjäystulosta, sillä värittömien komponenttien kiinnittyminen on voinut viedä tilaa värillisiltä komponenteilta. (Lohtander ym. 2020).

Värin lisäksi myös pajunkuoriuutteen bioaktiivisuutta voidaan hyödyntää sovelluksissa. Bioväreillä on usein erinäisiä bioaktiivia ominaisuuksia, kuten antimikrobiaalisia (Singh ym. 2005), antioksidanttisia (Rather ym. 2017) ja/tai ultraviolettisäteilyltä (Feng ym. 2007) suojaavia ominaisuuksia, sillä ne ovat usein kasvien sekundaarisia aineenvaihduntatuotteita, joiden tehtävänä on suojata kasvia ulkoisilta uhkilta mukaan lukien haitallinen auringonsäteily, hyönteiset ja reaktiiviset happiradikaalit. Selluloosananokuidut ovat lupaava materiaali moniin erilaisiin sovelluksiin, kuten esimerkiksi matriiseina lääketieteellisiin sovelluksiin (Drury & Mooney 2003), aerogeeleihin (Olsson ym. 2010) ja biopolymeerikomposiittikalvoihin (Farooq ym. 2018). Nanoselluloosakalvoilla on tiiviin nanofibrilliverkostorakenteen ansiosta luonnostaan hyvät happi-barrier-ominaisuudet, mikä on tärkeä suojaominaisuus esimerkiksi herkkien elintarvikkeiden pakkausmateriaaleille (Syverud & Stenius 2009). Pajunkuoriuutetta ja nanoselluloosaa yhdistämällä on mahdollista tehdä kaksoisverkkorakenteen omaavaa geeliä. Materiaalista voidaan tehdä ohuita, esimerkiksi pakkausmateriaaleihin soveltuvia, kalvoja, joilla on hyvien happi-barrier-ominaisuuksien lisäksi antioksidanttisia sekä UV-valolta suojaavia ominaisuuksia (Kuva 30 C). Pajunkuoriuutteen fenolisia komponentteja voidaan ristosilloittaa muun muassa UV-valolla ja entsyymaattisesti, millä voidaan vaikuttaa puolestaan kalvon optisiin ja bioaktiivisiin ominaisuuksiin sekä värin pysyvyyteen. (Lohtander ym. 2021)



Kuva 30. A) Pajunkuoresta kuumavesiuutolla valmistettu uute ja sen kolme fenolista pääkomponenttia. B) Pajunkuoriuute (WBE) biovärinä mikrokiteiselle selluloosalle (MCC) ja regeneroidulle Ioncell-F selluloosakuidulle (IC) eri puretteiden (TA tanniinihappo, CI sitruunahappo, OX oksaalihappo, AL aluna) kanssa (Lohtander ym. 2020). C) Pajunkuoriuutetta ja nanoselluloosaa yhdistämällä voi valmistaa biokomposiittikalvoja, joilla on antioksidanttisia ja UV-valolta suojaavia ominaisuuksia (Lohtander ym. 2021).

Uusia tutkimuksia 7: Pajunkuoriuutteiden toiminnallisten ominaisuuksien hyödyntäminen pakkausmateriaaleissa

Jenni Tienaho

Pajunkuoriuutteilla on runsaasti erilaisten tuotteiden säilymisaikaa lisääviä biologisesti aktiivisia ominaisuuksia. Näitä bioaktiivisuuksia on raportoitu yleisesti eri pajulajeilla esimerkiksi viruksia ja bakteereita vastaan (Pop ym. 2013, Quosdorf ym. 2017, Ramos ym. 2019, Tienaho ym. 2021). Luonnonvarakeskuksen ja Jyväskylän yliopiston yhteistutkimuksessa 16 suomalaisen pajulajin ja -kloonin kuoriuutteita seulottiin niiden antioksidanttisten, antiviraalisten, antibakteeristen ja antifungaalisten ominaisuuksien suhteen. Tutkitut pajuvalmisteet olivat erittäin tehokkaita vai-pattomia enteroviruksia vastaan, jotka aiheuttavat akuutteja ja kroonisia infektioita (Tienaho ym. 2021). Kaikki kloonit osoittivat myös antibakteerista aktiivisuutta *Staphylococcus aureusta* ja *Escherichia colia* vastaan. Paju-uutteet tiedetään myös vahvoina antioksidanteina ja niiden käyttöä pidetään turvallisena, sillä edes suuret määrät eivät aiheuta vahvaa solutoksisuutta (Dura-k & Gawlik-Dziki 2014, Bounaama ym. 2016, Ramos ym. 2019, Tienaho et al. 2021). Näistä syistä olemme Luonnonvarakeskuksen soveltavassa tutkimushankkeessa selvittämässä paju-uutteiden mahdollisia käyttökohteita elintarvikepakkaamisen osana. Tutkimushankkeen tarkoitus on kehittää toiminnallisia ja ympäristöystävällisiä tuotteita ruoka- ja metsäteollisuuden sekä maatalouden sivuvirroista bio- ja kiertotalousaatteen mukaisesti. Yksi esimerkki tällaisista hankkeesta tutkittavista tuotteista on muovia korvaavat ratkaisut pakkausteollisuuden käyttöön. Hankkeessa paju-uutteet ovat yhtenä toiminnallisuutta lisäävänä osana muovisia suoja-kalvoja sekä jopa styroksia korvaavassa materiaalissa (Kuva 31).



Kuva 31. Muovia korvaava biohajoava kalvo, johon saadaan toiminnallista aktiivisuutta lisäämällä paju-uutetta. Kuvat: Jaakko Hiidenhovi ja Jenni Tienaho

Idea muovia korvaavasta kalvomateriaaliratkaisusta elintarvikekäyttöön ei ole täysin uusi, vaan esimerkiksi Aalto yliopistossa on opiskelijoiden toimesta kehitetty karnaubavahasta ja leväpohjaisesta agarista suojaava kalvo kurkkujen pakkaamiseen (Tolonen 2021). Myös maissitärkkelystä ja lineaarista pienitiheyksistä polyeteeniä yhdistämällä on tehty lihanpakkaamiseen sopivia hajoavia kalvoja, joihin on mahdollista saada antimikrobista ja antioksidanttista aktiivisuutta sitruunahappolisäyksellä (Júnior ym. 2015). Sen sijaan Chang ym. (2021) tutkimusryhmineen valmisti UV säteilyltä suojaavan ja biohajoavan soijaproteiinipohjaisen kalvon, jolla ei myöskään todettu kuin heikkoa solutoksisuutta. UV-suojaavia ja antioksidatiivisia ominaisuuksia on todettu myös puupohjaisissa nanoselluloosamateriaaleissa, joihin on lisätty pajunkuoriuutetta toiminnallisuutta tuomaan (Lohtander ym. 2021, Dou ym. 2021c). Näiden lisäksi esimerkiksi kalagelatiini, joka on kollageenin hydrolyysituotteena syntyvä biopolymeeri (Välimaa ym. 2019), on ollut erilaisten kalvomateriaalien lähtömateriaalina. Kalagelatiinimateriaaliin on saatu funktionaalisuutta lisäämällä esimerkiksi aromaattisia happoja (Araghi ym. 2015), nanokapseloituja aktiivisia yhdisteitä valkosipuliöljystä ja E-vitamiinista (α - tokoferoli) (Pérez-Córdoba ym. 2018), sitruunahappoa ja kitosaania (Uranga ym. 2019), granaattiomenan kuorijauhetta (Hanani ym. 2019) sekä kitosaania ja kondensoitunutta tanniinia prosyanidiinia (Ramziia ym. 2018).

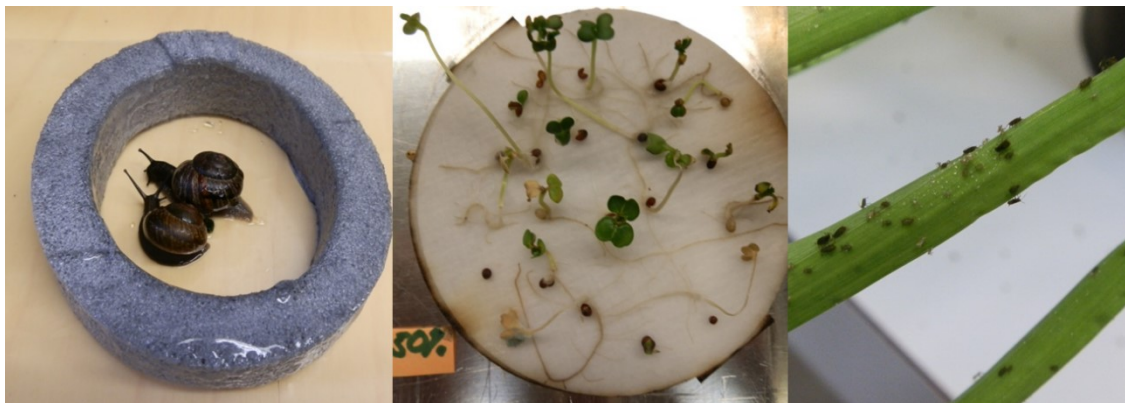
Luonnonvarakeskuksen hanke on parhaillaan käynnissä ja olemme saaneet mielenkiintoisia tuloksia biohajoavilla paju-uutetta sisältävillä kalvoilla. Hankkeen aikana myös varmistetaan esimerkiksi paju-uutelisäyksen tuoma vaikutus bakteereja vastaan sekä selvitetään mahdollisia yrityskumppaneita jatkotutkimuksia ja -tuotantoa varten. Hankkeesta antavat lisätietoja erikoistutkija Jaakko Hiidenhovi (jaakko.hiidenhovi@luke.fi) ja tutkija Jenni Tienaho (jenni.tienaho@luke.fi).

Uusia tutkimuksia 8: Pyrolyysinesteen kasvinsuojelusovellukset

Marleena Hagner

Kun pajusta valmistetaan hidaspYROLYYSILLÄ biohiiltä (ks. kappale 6.1.1 biohiili), syntyy prosessissa myös kaasuja, jotka voidaan kondensoida nestefraktioksi. Pyrolyysinesteen vesiliukoista jaetta on käytetty pitkään kasvinsuojelusovelluksissa mm. Aasissa ja Australiassa, mutta tieteellistä tutkimusta niiden tehosta on vain vähän. Luonnonvarakeskuksen MobileFlip –tutkimushankkeessa tutkittiin eri raaka-aineista tuotettujen pyrolyysinesteiden tehoa kasvinsuojelunesteso- velluksissa: käyttöä nilviäiskarkotteena, kirvatorjunnassa ja rikkakasvihävitteenä. Nestefraktiosta hyödynnettiin vain vesiliukoinen osa, joka ei sisällä PAH-yhdisteitä. Pajusta tuotetun pyrolyysinesteen tehoa verrattiin mm. männynkuoresta, metsäharvennushakkeesta ja vehnän oljista samalla menetelmällä tuotettuihin nesteisiin. Sekä kotilokarkotteena, rikkakasvihävitteenä että kirvatorjunnassa (Kuva 32) pajupohjainen pyrolyysineste oli merkittävästi tehokkaampi kuin muut testatut tuotteet. Rikkakasvihävitteenä 30 % pajupyrolyysineste oli yhtä

tehokas kuin kaupallinen etikkahappopohjainen herbisidi, samoin kirvojen torjunnassa 15 % pajupyrolyysineste oli kaupallisen tuotteen veroinen (Hagner ym. 2020). Testatuissa kasvinsuojelusovelluksissa tuotteiden happopitoisuus (mm. etikka-, maito- ja muurahaishappo) oli merkittävin tehoa selittävä tekijä, mutta aineen vaikutus ei kuitenkaan selity kokonaan happovahvuudella vaan on ennemminkin monen yhdisteen yhteisvaikutus (Hagner ym. 2015). Tällä hetkellä pyrolyysinesteiden käyttö kasvinsuojeluainesovelluksissa ei ole sallittua Euroopassa, sillä tehoaine ei ole käynyt läpi kasvinsuojeluaineasetuksen mukaista hyväksymisprosessia.



Kuva 32. Pajuperäinen pyrolyysineste osoittautui tehokkaaksi sekä kotiloiden karkotuksessa että rikkakasvien ja kirvojen torjunnassa.

6.3. Pajun käyttö biojalostuksessa

Petri Kilpeläinen ja Jyri Maunuksela

6.3.1. Biojalostamo

Biojalostus voidaan määritellä ympäristöystävälliseksi tavaksi muokata ja jakaa biomassaa energijakeisiin, kemikaaleihin ja materiaaleihin (Alen 2011). International Energy Agency:n (IEA) raportti määrittelee biojalostuksen (IEA, Task 42 Biorefinery) kestäväksi biomassan prosessoinniksi, joka tuottaa kirjon kaupallisia tuotteita, kuten ruokaa, rehua, materiaaleja sekä energiaa polttoaineina, sähkönä ja lämpönä.

Tuotannossaan biojalostamot käyttävät fysikaalisia, kemiallisia, lämpökemiallisia ja bioteknisiä prosesseja (Solarte-Toro ym. 2021). Biojalostus tarjoaa hyvin monenlaisia mahdollisuuksia tuottaa uusia tuotteita (Usmani ym. 2021).

6.3.2. Pajun biojalostuspotentiaali

Kuten muukin lignoselluloosapohjainen materiaali, paju koostuu pääasiassa selluloosasta, ligniinistä, hemiselluloosasta ja uuteaineista. Näitä kaikkia raaka-aineina toimivia jakeita voidaan jalostaa biojalostamoissa. Pajun puuaineessa on holoselluloosaa 60 %, johon sisältyy selluloosa ja hemiselluloosan ksylaani, jota on noin 15 % (Dou ym. 2016). Ligniiniä puuaineessa on 20–25 %. Kuoressa holoselluloosan osuus on 35–40 %, josta noin 5 % on ksylaania. Kuoressa on ligniiniä 15–20 %. Kuoressa on myös runsaasti uuteaineita, lähes 20 %. Seuraavissa kappaleissa kerrotaan selluloosan, ligniinin ja hemiselluloosan käytöstä biojalostuksessa.

Selluloosa

Lehti- ja havupuista saatua selluloosaa on käytetty perinteisesti kartongin ja paperin valmistuksessa. Selluloosasta on myös valmistettu erilaisia johdoksia, joita käytetään runsaasti teollisuudessa. Selluloosan käytön tutkimus on kasvanut huomattavasti viime vuosina. Selluloosalle on etsitty uusia käyttökohteita tekstiileissä ja nanoselluloosana korvaamaan fossiilista muovia (Li ym. 2021). Selluloosan muita mahdollisia käyttökohteita tulevaisuudessa ovat mm. kalvot, geelit, vaahdot, ruokatuotteet, pinnoitteet, kosmetiikka ja maalit. Selluloosaa voidaan pilkkoa sokereiksi ja käyttää sokereita polttoaineiden ja kemikaalien tuottamiseen.

Ligniini

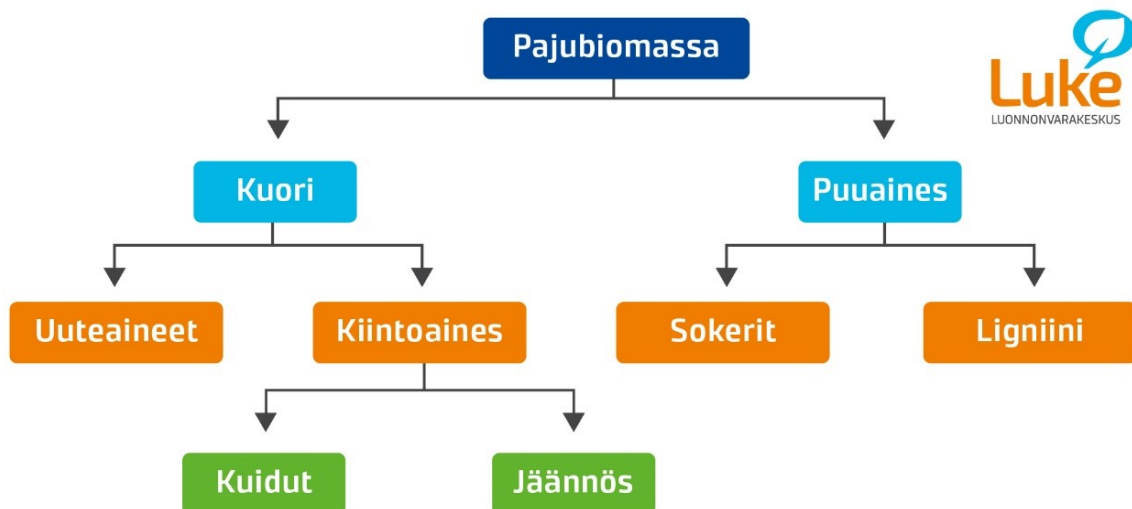
Erilaisilla teknisillä ligniinilaaduilla on myös monia potentiaalisia käyttökohteita (Balakshin ym. 2021). Arvokkaimpia ligniinistä saatavia tuotteita voidaan käyttää UV-suojaukseen, emulgattoreina, antioksidanteina, hiilikuiduissa ja erikoisfenoleina. Niiden markkinoiden arvioidaan olevan alle 200 kt vuodessa. Suuremman volyymin kestumuovien, polyolien ja hartsien tuoton arvioidaan nousevan yli 1500 €/ligniinitonni. Suuren volyymien (1–10 Gt) tuotteiden biopolttaineiden, BTX:n ja ligniinin energiakäytön tuottojen arvioidaan olevan pienempiä.

Hemiselluloosa

Myös hemiselluloosalla on monia mahdollisia käyttökohteita mm. ruuissa kuituina, emulgattoreina ja prebiootteina, sekä pakkauksissa ja maaleissa (Qaseem ym. 2021). Myös hemiselluloosaa voidaan pilkkoa yksittäisiksi sokereiksi, joista voidaan valmistaa esimerkiksi ksylitolia tai furfuraalia. Sokereita voidaan muokata bioteknisesti ja niistä voidaan valmistaa, kuten selluloosasta, polttoaineita sekä muita arvokemikaaleja.

Pajun kokonaisvaltainen hyödyntäminen biojalostuskonseptissa

Pajun biojalostusmahdollisuuksia Suomessa kasvatetuille pajuille on tutkittu ja luotu biojalostuskonsepti ja malli pajun hyödyntämiseen (Dou 2018). Suoraviivaisin tapa on jakaa paju puu- ja kuoriainekseen ja alkaa käsitellä niitä eri jakeina (Kuva 33).



Kuva 33. Pajun biojalostusmalli Doun (2018) mukaan.

6.3.3. Pajun prosessointi biojalostamossa

Pajun käsittely

Pajun käsittely tehtaalla alkaa sen vastaanotosta ja laaduntarkastuksesta. Mukana ei saa olla prosessia vahingoittavaa kivimateriaalia, lahonnutta puuainesta tai muita vierasaineita kuten öljyä korjuukoneista. Tarkastuksessa todetaan prosessia ja laskutusta varten pajun kuiva-aine ja laatuluokka. Elintarvike-, lääke-, tai kosmetiikkateollisuuteen päätyvän pajun täytyy olla hyvälaatuisia, tuoretta ja vapaata pieneliöistä. Tarvittaessa vastaanotetulle pajulle tehdään pesut tai ilmalajittelu.

Tarkastettu paju siirtyy välivarastoon, josta se voidaan hakettaa, ellei sitä ole tehty jo korjuun yhteydessä. Valmiiksi haketetusta pajusta kuidun irrotus pajun kuivuttua on vaikeampaa ja osa arvokomponenteista kuten uuteaineista on ehtinyt haihtua jo pois. Välivarastointi voi toimia esikäsitteilynä, jolloin pajun kosteutta säädetään tai se upotetaan esikäsitteilyliuokseen, jollainen voi olla esimerkiksi 70 °C vesi, joka voi toimia myös esiuuttoliuoksena helpottamassa myöhempiä prosessivaiheita. Kuivuneen kuoren irrottamista varten esikäsitteilyaltaassa voidaan käyttää kuorta pehmentäviä aineita kuten lipeää.

Fraktiointi

Varsinainen kuoren tai puuaineksen fraktiointiprosessi voidaan aloittaa uutolla. Perinteisesti on käytetty kuumavesiuuttoa, mutta Luke on kehittänyt nopeamman ja puun kemialle hellävaraisemman patentoidun (WO2021181009A1) höyryuuton, joka toimii tarvittaessa myös biomassan kuivausprosessina. Tämä helpottaa seuraavan vaiheen kemikaalien imeytymistä.

Uuttoprosessissa saadaan ensimmäisenä pajun uuteaineet, vahat, rasvat, terpeenit, hemiselluloosa, osa mineraaleista ja ligniinistä. Erityisesti höyryuutossa nämä komponentit voidaan osittain fraktioida toisistaan eri ulosottoajoilla. Uutot voidaan tehdä vedellä tai liuottimilla kuten OrganoSolv-keitot.

Uutoissa hemiselluloosa poistuu lähes kokonaan ja selluloosa jää kiintoaineeseen. Ligniinin irtoamista voidaan helpottaa erityisen korkeilla yli 200 °C uuttolämpötiloilla. Tällöin myös osa selluloosasta alkaa hydrolysoitua ja irrota osittain. Tämä on suotavaa, jos jatkoprosessi etenee selluloosan sokeroinnin suuntaan. Yleensä tällaisissa prosesseissa käytetään höyryräjäytystä, joka hajottaa selluloosasta lähes kolmasosan. Haluttaessa erotella C-5 ja C-6 sokerit, uutto kannattaa tehdä ennen höyryräjäytystä tai osana yhteisesikäsitteilyprosessia.

Mentäessä kuidunjalostuksessa tekstiilikuitujen ja liukosellun suuntaan, uuton sijasta voidaan suorittaa esihydrolyysi, jolloin korkeassa 170 °C lämpötilassa keitettäessä puun aineosasten sidokset löystyvät ja ne irtoavat helpommin myöhemmissä keittoprosesseissa. Korkealaatuinen kuitu vaatii kuidutuksen ja valkaisun, mutta esimerkiksi pakkausteollisuuteen tai kuivikkeena voidaan käyttää vähemmän käsiteltyä kuitua. Hyvälaatuisen paperin valmistuksessa kuituihin on lujuuden vuoksi jätettävä hieman hemiselluloosaa sidosaineeksi. Pehmokuituja tehtäessä on tärkeää tehdä mahdollisimman puhdasta selluloosaa.

Entsymaattiset käsittelyt

Kemikaalien valmistusta varten selluloosan ja hemiselluloosan hydrolysointia jatketaan entsyymaattisesti sellulaaseilla. Nämä ovat hitaasti toimivia entsyymejä ja niitä tarvitaan puuaineksen hydrolyysiin runsaasti, joten esikäsitteilyn tehokkuudella voidaan säästää entsyymaattisia hydrolyysikuluja. Entsyymaattinen hydrolyysi voi kestää useamman vuorokauden, ja sitä hidastavat

puun ligniini, mahdollisesti muodostunut etikkahappo ja uuteainekomponentit. Pajun käsitte-lyä varten voidaan kehittää omat entsyymisekoitukset optimaalisen saannon varmistamiseksi.

Sellulaasientsyymit toimivat tyypillisesti pH 5:n molemmin puolin ja niiden kaupalliset liuokset sisältävät useita eri entsyymiaktiivisuuksia. Entsyymaattisella hydrolyysillä sokeroidaan selluloosasta yli 2/3. Jäljelle jäävä selluloosa on enemmän mikrokiteistä selluloosaa, joka voidaan tuot- teistaa sellaisenaan. Kaiken selluloosan pilkkominen ei ole taloudellisesti kannattavaa, koska entsyymimäärät ja hydrolyysiaika kasvavat.

Hydrolysoidut sokerit voidaan fermentoida moniksi tuotteiksi kuten maitohapoksi tai eta- noliksi. Vaihtoehtoisesti sokereita voidaan kemiallisesti syntetisoida moniksi eri tuotteiksi. Fer- mentoinnissa etanolin tuotto on helpoin prosessi. Puusokereiden fermentointi onnistuu kirkas- fermentointina, jolloin kiintoaine erotetaan fermentoitavasta liuoksesta tai mäskifermentoin- tina, jolloin hydrolyysia voidaan osittain jatkaa fermentoinnin ajan.

Monien prosessivaiheiden jälkeen tehdään erilaisia suodatuksia kiintoaineksen poistamiseksi. Mikro- ja ultrasuodatuksella saadaan erotettua suurimolekyylisimpiä yhdisteitä kuten prote- iineja ja pitkäketjuisia sokeri- ja ligniiniyhdistä. Nanosuodatuksilla pystytään erottamaan jo osittain sokereita toisistaan, happoja ja mineraaleja sekä pienimolekyylisiä oligosakkarideja ja monomeerisiä ligniiniyhdisteitä.

Fermentoinnin hygienia on tärkeätä, koska prosessiin ilmestyy helposti ajan myötä maitohap- pokontaminaatio, joka vähentää etanolisaantoa ja fermentointi pysähtyy liian aikaisin. Yleensä hyvässäkin fermentoinnissa jäännössokereita jää miltei yhden prosentin verran. Fermentointi- saantoa kasvattaa suurempi sokeripitoisuus.

Puuhydrolyysit jäävät helposti vajaiksi, joten sokereita saattaa joutua konsentroimaan välihah- dutuksella, jolla voidaan myös poistaa etikkahappoa. Etanolifermentoinnin etanoli erotetaan fermentointiliuoksesta tislamalla. Tislaus kuluttaa paljon energiaa ja on sitä tehokkaampi mitä korkeampi on etanolipitoisuus. Tislausta energiatehokkaampi tapa on tehdä etanolin haihdu- tus, mikä kuitenkin voi helposti jättää pienen osan etanolista haihtumatta.

Etanolin valmistus

Paju sopii pehmeänä puuaineksena hyvin etanolin valmistukseen. Etanolia voi suoraan käyttää toisen sukupolven liikennepolttoaineena tai sitä voidaan käyttää alustakemikaalina syntetisoi- taessa arvokkaampia kemikaaleja. Toisen sukupolven etanolin arvo (800 €/t) on huomattavasti korkeampi kuin perinteisen ensimmäisen sukupolven bioetanolin tai synteettisen maakaasusta tehdyn etanolin.

Toisen sukupolven etanolin arvo perustuu sen kaksoislaskettavuuteen, jolloin energiayhtiöt biovelvoitetta täyttäessään tarvitsevat toisen sukupolven biopolttoaineita puolet vähemmän sekoitevelvoitteen täyttämiseen.

Etanolista voidaan tehdä etyleeniä ja polymeroimalla sitä saadaan biopohjaista polyeteeniä, joka on ominaisuuksiltaan täysin identtistä fossiilisperäisen polyeteenin kanssa. Polyeteeniä voidaan tehdä myös hiilidioksidista syntetisoimalla etanolin kautta. Tämä on mielenkiintoinen mahdollisuus nostaa puun fraktiointisaantoa ja tehdä hiilinegatiivisia tuotteita samassa proses- sissa.

Fraktiointi ja tislaus vaatii runsaasti energiaa ja sen tuottama hiilidioksidi voidaan hiilimonoksi- din kautta syntetisoida etanoliksi ja jatkokäsitellä samassa prosessissa kuin fraktiointiproses- seista ja fermentointiprosesseista tuleva etanoli. Hiilidioksidin muuntaminen hiilimonoksidiksi

vaatii vetyä tai energiaa. Vety voidaan tuottaa biomassasta kaasutusprosesseilla ja käyttää samanaikaisesti kuivakaasutuksessa, joka muuntaa hiilidioksidin hiilimonoksidiksi.

Kustannusrakenne ja logistiikka

Kustannustasoltaan erilaiset yksikköprosessit, kuten uutto, hydrolyysi, fermentointi, suodatus, tislaukset ja kuivaus ovat kukin kustannuksiltaan noin 100 €/tn. Samaa luokkaa voisi olla hyvälaatuisen haketetun pajun sopimustehdashinta. Tällainen porttihinta on mahdollinen 500 kt raaka-ainevirrälle (kuivapaino). Tämänkokoinen tehdasinvestointi on suuruusluokkaa 300 milj. €, johon nykyisin tukialueille sijoitettuna voi saada 30 % investointituen. Tuotteiden arvo edellä mainittujen prosessien mukaisesti valmistettuna on 0,5–1 €/kg.

Suomessa pajubiojalostamoiden rakentaminen on mahdollista, jos saadaan koottua biojalostamon lähialueelta 100 000 hehtaaria sopimusviljelyyn yli 10 vuoden sopimuksilla, jolloin siitä voidaan maksaa viljelijöille kohtuullinen korvaus. Ilman maataloustukia liikevaihto maataloilta olisi pajunviljelystä vain 500–600 €/ha vuodessa niinkin hyvällä ehdotetulla sopimushinnalla kuin yllä mainittu 100 €/tn. Tämä lähestyy peltoviljelyn tuottoa ja on parempi kuin metsäntuotto. Ongelma teollisessa pitkälle viedyssä biojalostamossa ei kuitenkaan ole ainoastaan raaka-ainepäässä vaan myös uusien tuotteiden luomisessa.

Monet biopohjaiset tuotteet voivat korvata useita kemikaalikomponentteja. Royal Society of Chemistryn teknisen raportin (2021) mukaan vesiliukoisten polymeerien maailmanmarkkinoiden arvo on 44,1 miljardia dollaria (5,6 \$/kg) ja markkinoiden koko on 8,0 miljoonaa tonnia vuodessa. Esimerkiksi pajusta saatavista luonnonpolymeereistä hemiselluloosaa ja selluloosaa voitaisiin kehittää ja käyttää korvaamaan fossiilisista raaka-aineista valmistettuja polymeerejä. Vesiliukoisia polymeerejä käytetään mm. pesuaineissa, kosmetiikassa, maatalouskemikaaleissa ja vedenpuhdistuksessa. Biojalostamossa prosessoidut tuotteet eivät ole täysin valmiita, vaan niihin tarvitaan teollista jatkoprosessointia, jollaista ei tällä hetkellä ole kovinkaan hyvin olemassa. Tuotteiden arvo muodostuu raaka-aineen laadusta, prosessin puhtaudesta, lopputuotteiden puhdistuksesta ja hyväksynnöistä.

Tekninen kypsyysaste

Prosessien ja konseptien sekä kaupallisten ratkaisujen loppuun kehittäminen vie optimistisenkin asiantuntija-arvion mukaan vielä 5–10 vuotta edellyttäen, että teollista mielenkiintoa löytyy pajua kohtaan. Tällä ajalla pitäisi aloittaa sopimuskeskustelut ja kokeilut maatalousalueilla tai marginaalimailla. Biojalostamoprosessin suunnittelu, rakentaminen ja käynnistys vie muutaman vuoden ja aikaisintaan Suomessa voisi olla tehdasmittakaavainen pajuntuotantolaitos 2030, jolloin markkinat olisivat myös rakennettu valmiiksi ja ostosopimukset olisivat yli 500 kt:lle paju-tuotteita.

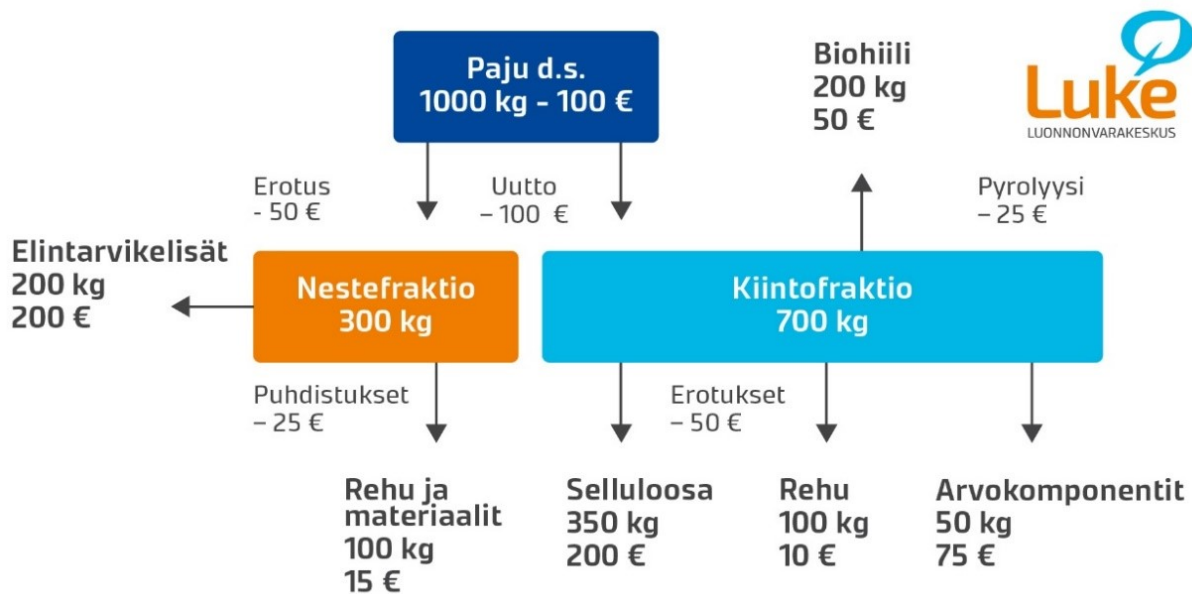
Helpompi oikotie pajun käyttöön on sen suora prosessointi furfuraaliksi, pyrolyysi, kaasutus tai poltto. Suorassa energiakäytössä pajulla ei kuitenkaan ole kilpailukykyä metsäteollisuuden sivutuotteiden kanssa, ellei sitä tehdä maataloustukien varassa (ks. luku 4.6.). Viljan viljelyn kanssa kilpailukykyistä tuotetta pajusta on kuitenkin vielä vaikeampi saada. Rehuviljan tuotannon mahdollisesti laskiessa paju on hyvä vaihtoehto ja verrattavissa ruokohelpeen, kuituhamppuun tai energiamaisiin. Tämä edellyttäisi parempaan kannattavuuteen kuitenkin jonkinlaista esiprosessointia jo maataloilla tai maatalousyhtymissä, ja konsentraatit jatkojalostettaisiin mahdollisesti keskitetympin. Tällä ajattelulla lähestyttäisiin alle 1 kt esibiojalostamoita, jolloin tuotepuolta voisi varioida laajemminkin.

7. Visio pajubiojalostamosta

Jyri Maunuksela ja Petri Kilpeläinen

Pajun tuottaminen teollisesti edellyttäisi uudenlaista biojalostamokonseptia (ks. liite 4). Arvo-pajutuotteiden teollisuusmittakaavaiseen tuotantoon ei Suomessa tällä hetkellä ole olemassa olevia markkinoita, prosessia tai raaka-ainepohjaa. **Esitetyt luvut perustuvat Luken asiantuntijoiden yleisarvioon erilaisista biomassan käsittelyyn soveltuvista prosesseista. Potentiaalisia tuotteita on esitetty aiemmissa luvuissa.** Arviot perustuvat myös oletuksiin positiivisesta lainsäädännöllisestä ja biomassatuotteiden markkina-arvon kehityksestä. **Pajubiojalostamon toimintaedellytysten selvittämiseksi tarvitaan lisää tutkimusta ja tuotekehitystä.**

Pajun teollisen mittakaavan kasvatusta ja taloudellisesti kannattava prosessointi arvotuotteiksi biojalostamokonsepteissa saattaa edellyttää nykyisellä tekniikalla lähes sellutehtaan kokoluokkaa. Tämä puolestaan edellyttää sitä, että kasvatuksen mittaluokka olisi noin 100 000 hehtaaria. Tällöin vuosittainen jalostukseen ohjautuva määrä kuivaraaka-ainetta voisi olla noin 500 kt/v, mahdollistaen kannattavan kokoluokan biojalostamoinvestoinnin ja täyttämisen biojalostamon raaka-ainetarpeet. Tämä viljelyalue tuottaisi yhden laitoksen verran raaka-ainetta teollisuudelle, ja antaisi edellytyksiä kehittää logistiikkaa ja korjuulaitteistoja. Pajubiomassan logistiikka ei ole muita puulajeja edullisempaa ja kannattavan pajunviljelyn edellytys on viljely- ja logistiikkakustannuksia vastaavan tehdashinnan saanti. Mikäli pajun viljely- ja korjuutekniikat jatkossa kehittyisivät ja pajulajikkeiden mahdollinen jalostus kasvattaisi pajujen hehtaari tuotosta, viljelypinta-alan tarve voisi pienentyä. Tähän tuotantotason nostoon tarvitaan lisätutkimusta ja yhteistyötä eri toimijoiden ja teollisuuden kanssa. Lyhytkiertoisuus on pajun etu moniin valtapuulajeihin nähden, ja tämän ominaisuutensa ansiosta pajun viljelyllä saadaan tasainen materiaalivirta varsin pieneltä alueelta. Käytännössä pajubiojalostamo kilpailee kuitenkin huonosti isojen sellutehtaiden kanssa, ja tasalaatuisen raaka-aineen saaminen keskitetysti yhteen kohteeseen Suomessa edellä kuvatussa mittakaavassa on lähes mahdotonta.



Kuva 34. Pajusta saatavia jakeita ja niistä saatavia tuotteita Luken kehittämällä höyryuuttotekniikalla. Kuvassa on negatiivisina esitetty kokonaiskustannukset ja positiivisina kokonaistuotot

Pajun puuaine on helposti muokattavaa. Etuna muihin metsäbiomassoihin nähden paju on helpommin prosessoitavaa ja se sisältää enemmän arvokomponentteja. Suurin kilpailija pajulle on koivuhake, jos ajatellaan vain kuidun tuotantoa ja sen jatkojalostusta. Pajulla on merkitystä hiilensidonnassa, jos pajusta valmistetaan pitkäkäyttöikäisiä tuotteita, kuten kestopuoveja tai rakennustarvikkeita. Pajun jalostuksessa tuotteiksi olisi tähdättävä ns. perinteisiä sellupohjaisia tuotteita täydentäviin tuotteisiin ja pyrittävä hyödyntämään raaka-aine täysimääräisesti. Kuvassa 34 on esitetty Lukessa kehitetyn uuden prosessointitekniikan tuomat mahdollisuudet pajun tehokkaaseen fraktiointiin ja sitä kautta arvokomponenttien talteenottoon, ilman että arvokomponentit täysin tuhoutuvat termisissä tai kemiallisissa prosesseissa.

Pajusta saatava tuotto kiintoainetonna kohden voisi olla 100–200 €/t, huomioiden investointi- ja käyttökulut. Tällöin tuotteiden myyntihinnan olisi oltava, jopa yli 1 €/kg. Pajutehtaan tavoiteltava liikevoitto olisi luokkaa 50–100 M€/v, edellyttäen teknistä ja lainsäädännöllistä kehitystä sekä kehitystä fraktioinnissa ja tuotepuolella ja myös päästökaupan hyödyntämistä. Tähän tarvitaan huomattavia investointitukia ja verohelpotuksia sekä kilpailevien fossiilipohjaisten tuotteiden rajoittamista. Yksistään täysmittaisen pajubiojalostamon tehdasinvestointi on luokkaa 300 M€. Liikevaihto tehtäisiin pääosin esimerkiksi selluloosalla ja hemiselluloosan uudella hyödyntämisellä elintarvike- tai rehusovelluksissa. Muiden arvokomponenttien osuudet paju-biomassassa ovat melko pieniä, ettei niillä ole merkittävää vaikutusta tehtaan kannattavuuteen. Parhaassa tapauksessa pajubiojalostamo pystyisi maksamaan itsensä takaisin 10 vuodessa, mutta alustava uusi tuotantokonsepti kuitenkin sisältää vielä paljon epävarmuustekijöitä raaka-aineista tuotteisiin asti.

Kannattavuuteen vaikuttavat pajun logistiikkakustannukset, jotka sisältyvät raaka-aineen porttihintaan. Tehtaan toiminnan kannalta elintärkeää on raaka-aineen jatkuva saatavuus, jotta tehtaan operointiaste pysyy korkealla. Pajuraaka-aineen saatavuuden varmistamiseksi viljelijöiden kanssa olisi tehtävä ainakin 10 vuoden sopimukset ja paljon tiivistä tutkimusyhteistyötä. Biojalostamon raaka-ainetarpeen varmistamiseksi samassa prosessissa voitaisiin käyttää myös muita nopeasti kasvavia puulajeja kuten hybridihaapaa. Pajunviljelyn tuottavuuden parantamista olisi tutkittava lisää: keinoja tuottavuuden lisäämiseen voisivat olla mm. kierrätyslannoitevalmisteiden käyttö ja pajulajikkeiden jatkokehitys Suomen ilmastoon paremmin sopiviksi. Ero Ruotsissa saatuihin kasvunopeuksiin on suuri, joten ilmaston muuttuessa ja mahdollisten tutkimuksen edetessä tämä voi tasaantua. Tällä hetkellä käytössä olevien lajikkeiden viljely jo Keski-Suomessa ja etenkin sitä pohjoisempana on riskialtista.

Kannattavuudelle kriittisintä on löytää kaikille prosessoiduille pajutuotteille tai raaka-aineille markkinat kohtalaiseen noin 1 €/kg hintaan. Pajua prosessoitaessa syntyy kymmenkunta erilaista tuotetta tai tuotekombinaatiota, joista osa on vasta raaka-aineita valmistusteollisuudelle. Pajun prosessoinnin kannattavuutta parantaisi, jos kaikki erilaiset komponentit – kuoret ja puuaines ja jopa lehtimassa – saadaan prosessoitua arvotuotteiksi. Pajubiomassan hyödyntämistä kehitettäessä painopisteeksi tulevaisuudessa ehdotetaan tässä raportissa erilaisten pajutuotteiden käyttöä elintarviketeollisuudessa ja kuluttajatuotteissa. Tällöin päästään hinnanmuodotukseen, jonka myötä pajun prosessoinnista voi tulla kannattavaa. Kuluttajatuotepuolella paju-uutteet voisivat jatkossa korvata dispersioaineita, emulgaattoreita, puhdistusaineita, väriaineita, mauste- ja hajusteaineita, antioksidantteja, antimikrobisia ja antiviraalisia yhdisteitä (ks. kappale 6.2).

Paju eroaa muista puulajeista edukseen nopean kasvunsa ja arvokkaan kuoriaineksensa vuoksi; kuoresta voidaan uuttaa arvokomponentteja ja tehdä kestäviä kuituja. Puuaines on vaaleaa ja helposti hydrolysoituvaa, koska elävien solujen osuus on suuri. Pajulla on korkea kuori/puuaine (eli selluloosakuitu) -suhde, joten sekä kuori- että puufraktioille on löydettävä arvokäyttöä.

Pajujen kuoriaineksessa on suhteessa muihin puulajeihin paljon arvokkaampaa kuitumateriaalia. Paju on myös ainoita Suomessa menestyviä puulajeja, jota voidaan korjata puimalla ja se uusiutuu itsestään vesomalla. Lyhytkiertopajusta ei saada sahatavaraa, mutta siitä voidaan tehdä puutuotteita hyödyntäen sen komponentteja kuitu- ja kemianteollisuuden tarpeisiin. Selvittämättä on ainoastaan pajuligniinin mahdolliset erikoisominaisuudet, sen prosessointi ja tuotteistaminen korkean arvon tuotteiksi. Nämä voivat löytyä esimerkiksi elintarvike- tai kosmetiikkateollisuuden alalta.

Pajun tuoreen ja pehmeän puuaineen kuidut sopivat hyvin kuiduttavaan prosessointiin ja selluloosakuitupohjaisten tuotteiden sekä polttoaineiden valmistukseen. Puuaineksen kuitukomponentit ovat huokoisia ja helpommin pilkottavissa kuin muiden puiden (koivu, mänty, kuusi) puuaines. Koska kuorimateriaali on erilaista kuin puumateriaali, on kuori- ja puujakeen käsittely tehtävä kahdessa linjassa. Kuoren komponentit voivat värjätä tuotteita tai inhiboida fermentointiprosesseja. Kuoren erotus voidaan tehdä ennen esikäsitteilyä, jolloin kuorikuitujen ja uuteiden käsittely on tasalaatuisempaa. Kuoressa on uuton kannalta mielenkiintoisimmat arvokomponentit. Myös puujakeesta voidaan uuttaa hemiselluloosaa ja pienimolekyylisiä ligniiniä. Esikäsitteilymenetelmiä säätämällä voidaan vaikuttaa ligniiniketjun pituuksiin ja arvonmuodotuksiin.

Paju ei sisällä hartseja eikä uuteaineita haitallisessa määrin ja siten pajun soveltuvuus elintarvike-, kosmetiikka- ja rehuteollisuuteen on hyvä. Paju sisältää runsaasti antioksidanttisia yhdisteitä ja elintarvikekuiduksi prosessoitavia ainesosia.

Kaikki pajun sisältämät komponentit voidaan jalostaa arvokomponenteiksi, kuten tekstiilikuiduiksi, toisen sukupolven biopolttoaineiksi, ligniinihartseiksi ja pitkäketjuiseksi hemiselluloosaksi. Pitkällinen puhdistusprosessi ei kuitenkaan ole aina kannattavin tuotantomuoto ja hyviä käyttömuotoja voidaan löytää myös kombinaatiofraktioille.

Jalostusprosessissa sivutuotteet jäävät tuotantomääriltään helposti liian pieniksi, jolloin prosessointi kannattaa lopettaa ja siirtyä ennemmin virtojen hävitykseen hyödyllisellä tavalla. Myös markkinoiden löytäminen uusille pajutuotteille voi luoda haasteen, koska pitkälle fraktioidusta ja prosessoidusta pajusta löytyy satoja eri kemikaaleja. Näiden yhteiskäyttö erilaisina terveysvaikutteisina, antioksidanttisina ja antibakteerisina uutteina voi parantaa biojalostamotaloutta, mutta tuotteiden kehittäminen, hyväksyttäminen ja markkinoille saattaminen vievät aikaa ja energiaa. Pajua ei voida ajatella hyödynnettäväksi pelkkänä kuituna, ellei se ole jalostettu pitkälle esimerkiksi tekstiilikuiduksi tai erilaisiksi mikro- tai nanokomponenteiksi. Tällöin on kysyttävä, miksi juuri paju ja katsottava, saako pajusta jotain lisäarvoa esimerkiksi rohdosmaineensa vuoksi. Avainasemassa on teollisuuden kiinnostuminen pajusta uutena raaka-aine- ja tuotemahdollisuutena. Tämän suuntaisen teollisuusalan kehittyminen vaatii vielä paljon yhteiskehittämistä, uusia toimijoita ja sijoittajia.

Paju korjataan etupäässä lehdettömänä, sillä lehdellisenä korjuu alentaisi seuraavien vuosien biomassatuotosta ja näin ollen lehtibiomassan hyödyntäminen ei ole kovinkaan todennäköistä. Pajubiomassan rehukäyttöä voitaisiin kuitenkin tutkia: lehdellisenä tuorekorjatusta pajusta voitaisiin mahdollisesti saada lisäarvoa sekä energia-arvona että lehti- ja kuorimassan tehoaineiden kautta, joilla saattaa olla rehun ravintoarvoa ja säilyvyyttä parantavia ominaisuuksia. Myös kotieläinten suolistobakteerikannan suotuisat muutokset ovat mahdollisia, ja tällä on vaikutusta ravinnon imeytymiseen, eläinten hyvinvointiin, lääkkeiden käyttöön ja lannan sekä suolistokaasujen koostumukseen. Talvikorjatun pajun biomassassa on kokonaisuudessaan ravintoarvoltaan köyhempää ja kuivempää kuin kesäkorjatun pajun biomassassa (vrt. tuoreheinä / kuivaheinä) (Eisenbies ym. 2020, Lira ym. 2008, Kendall ym. 2021, Raminez-Restrepo ym. 2010).

SWOT-analyysi

Pajun, kuten muidenkin uusien lignoselluloosapohjaisten raaka-aineiden jalostuksen kilpailukykyyn vaikuttaa monia asioita. (Usmani ym. 2021). Näistä tulevaisuuden biojalostukseen vaikuttavia tekijöitä on koottu SWOT-analyysiin (strengths, weaknesses, opportunities and threats), joka on kuvassa 35.



Kuva 35. Lignoselluloosapohjaisten biojalostamojen haasteiden ja kaupallistamisen mahdollisuuksia, heikkouksia, vahvuuksia ja uhkia SWOT-analyysissä (Usmani ym. 2021).

Suomessa kasvatetun pajun biojalostuspotentiaalia voidaan verrata Usmanin ym. SWOT-analyysin vahvuuksiin. Suomen vahvuutena on suuri määrä turvetuotantoalueita ja peltoja, jossa maataloustuottajat voisivat tuottaa pajua, jota käytettäisiin biojalostukseen tuottamaan biopohjaisia tuotteita.

Pajun kasvatus voisi tuottaa ilmastollisia ympäristöhyötyjä sitomalla hiiltä pitkäkestoiisiin tuotteisiin. Jatkotutkimuksessa voidaan selvittää pajun potentiaalia hiilen sitomisessa maaperään ja myös mahdollisuuksia kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämiseen kosteikkokasvattamalla pajua suonpohjilla.

Uusien biojalostuskonseptien kehittäminen pajulla toisi uutta osaamista biojalostukseen. Perinteisten prosessointimenetelmien, kuten selluloosan, valmistuksessa käytetyn sulfaattikeiton periaatteet on kehitetty jo yli vuosisata sitten, jonka jälkeen niitä on optimoitu jatkuvasti.

Vakiintuneiden prosessien olosuhteet pyritään pitämään mahdollisimman stabiileina tuotannon aikana eikä se kannusta uusien kokeiluiden tekemiseen. Vastaavasti uusien biojalostusprosessien kehittäminen loisi uusia toimintamalleja, innovaatioita ja tuotteita, joita voidaan hyödyntää muillakin teollisuuden aloilla.

Heikkoutena pajun hyötykäytössä on, että siihen liittyvä biojalostusteknologia on vielä laboratorio- ja pilottikoossa. Uudet prosessit ja teknologiat vaativat kalliita investointeja, jotka puolestaan vaativat suurempaa tuotantoa. Suuremman tuotannon rajoituksena on tarvittavan raaka-aineen saanti. Pajua varten ei ole luotu suuren mittakaavan prosessointia eikä infrastruktuuria.

Uhkana pajulle ja muillekin uusille biojalostamoille on nykyisten jalostamojen skaalaetu. Nykyiset jalostamot, kuten sellutehtaat ja öljynjalostamot, ovat kokoluokaltaan hyvin suuria, jolloin niiden kustannukset biomassayksikköä kohti ovat pieniä. Teollisuuden skaalaedun vuoksi uusien biojalostusmenetelmien on vaikea kilpailla hinnalla. Nykyiset biotuotetehtaat käyttävät puumateriaaleina mäntyä, kuusta ja koivua selluloosan valmistukseen: ne ovat siis vahvasti optimoitu näiden pääpuulajien prosessointiin. Uuden rajallisen raaka-aineen, kuten pajun, integroiminen tehtaiden prosessiin toisi riskejä tehtaiden perustuotantoon. Sen myötä pajun biojalostuksen tulisi luoda korkean lisäarvon tuotteita, jotta teollisuudella olisi kannuste hyödyntää tätä uutta raaka-ainetta. Alla on esitetty pajulle keskeisiä toimenpide/tutkimustarpeita.

- Biojalostusprosessien jatkokehittäminen pajulle ja prosessien ylöskaalaus pajun selluloosalle, ligniinille, hemiselluloosalle ja uuteaineille
- Voidaanko pajusta saatavat jakeet yhdistää nykyiseen tuotantoon vai luodaanko kokonaan uusi arvoketju?
- Pajusta saatavien jakeiden käyttö nestemäisissä polymeerivalmisteissa, jotka hyödyntävät pajun uuteaineiden antiviraalisia, antibakteerisia ja antioksidatiivisia ominaisuuksia
- Pajujakeiden käyttö (mitä jo tutkitaankin) käsittelemättömänä tai käsittelyjen jälkeen eläinten kuivikkeina, kasvatusalustoissa korvaamassa turvetta, komposiiteissa ja muissa hiiltä pitkään sitovissa materiaaleissa
- Maanviljelijöiden, kuluttajien ja teollisuuden asenteet ja valmius pajun viljelyyn ja sen biojalostukseen
- Pajun kyky sitoa hiiltä maaperään esim. kosteikkokasvatuksessa ja erityisesti pajun käyttö pitkäikäisinä hiiltä sitovina tuotteina
- Pajuekosysteemi tai tiekartta
- Ekonomiset, elinkaari - ja sosiaaliset selvitykset pajun käytön vaikutuksesta

8. Päätelmiä

Monissa Euroopan maissa energiapajua on viljelty laajamittaisesti, mutta Suomessa viljelypinta-alat ovat tähän asti pysyneet melko pieninä. Tämänhetkiselällä polttohakkeen hintatasolla ja käytännön viljelmiltä mitatulla tuotostasolla pajun kasvatusta energiaksi on kannattamatonta nykyisillä viljelytuilla. Kilpailevien raaka-aineiden hinnat ja biojalostusprosessien maksukyky määrittelevät pajun kilpailukyvyn muussa käytössä. Viljelyn kannattavuus paranisi biomassatuotosta kasvattamalla, korkeammilla tuotteiden hinnoilla, alhaisemmilla tuotantokustannuksilla ja tukimuotoja kehittämällä. Myös pajunviljelystä maksettava hiilikompensaatio voisi parantaa kannattavuutta.

Pajuviljelmien koon kasvattaminen ja laajempien keskittymien perustaminen erityisesti lähelle raaka-aineen käyttöpaikkoja alentaisi tuotantokustannuksia. Tällöin voitaisiin käyttää tehokkaita istutus- ja korjuukoneita ja kehittää korjuuketjuja. Pajusta saatavat arvokkaat komponentit ja biomassan käyttö korkeamman lisäarvon tuotteisiin nostaisivat todennäköisesti biomassasta maksettavaa hintaa. Kannattavuuden paranemisen lisäksi varmuus kysynnästä, esimerkiksi sopimusviljelyn muodossa, voisi lisätä viljelijöiden kiinnostusta.

Korkean biomassatuotoksen saavuttaminen edellyttää kestäviä ja nopeakasvuisia pajulajikkeita, hyvää kasvupaikkaa sekä viljelmän hyvää hoitoa. Intensiivisesti hoidetuilta koeruuduilta saadut ennätystuotokset eivät toteudu käytännön viljelmillä, ja syynä on usein sopimaton kasvupaikka tai esimerkiksi pintakasvillisuuden torjunnan tai lannoituksen laiminlyönti. Ruotsissa jalostetut pajulajikkeet soveltuvat viljeltäväksi Etelä-Suomessa, mutta pohjoisemmille alueille tarvittaisiin viljelyvarmoja, ilmastonkestäviä ja tuottoisia pajuklooneja. Pohjoisempaan Suomessa olisi runsaasti sopivia kasvupaikkoja; turvepeltoja ja turpeennostosta vapautuneita turvesuonpohjia. Nykyisin käytössä olevat pajulajikkeet olisi testattava kyseisillä alueilla ennen laajamittaisen viljelyn aloittamista. Lisäksi olisi aloitettava kotimaisten lajikkeiden jalostaminen. Monissa pajun ominaisuuksissa on suurta lajien ja kloonien välistä vaihtelua, jonka parempi tunteminen ja hyödyntäminen parantaisi myös pajun käyttömahdollisuuksia raaka-aineena tai ympäristöhyötyjen tuottajana.

Pajuilla on monia rakenteellisia ja kemiallisia ominaisuuksia, kuten huokoinen ja helposti prosessoitava puuaine, kuoren kuidut sekä antimikrobiset ja antioksidatiiviset uuteaineet, jotka mahdollistaisivat uudenlaisten tuotteiden ja sovellusten kehittämisen biokierrotalouden periaatteiden mukaisesti. Lisää tutkimusta ja tuotteistamista kuitenkin tarvitaan, ennen kuin yritykset ovat valmiita investoimaan tuotantolaitoksiin. Lisäksi pajusta saatavien tuotteiden markkinapotentiaalia ja kustannuskilpailukykyä on tarkasteltava suhteessa muista raaka-aineista valmistettaviin vastaaviin tuotteisiin.

Biojalostamojen kannattavuus perustuu biomassan kaskadikäyttöön, jossa pääkomponenttien lisäksi hyödynnetään myös sivuvirrat, joista voidaan mm. jalostaa arvokkaita uuteaineita. Ainoastaan arvokomponenttien erotus ei kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa. Jalostamojen raaka-aineen saatavuus voidaan turvata vain laajoilla viljelykeskittymillä jalostamon läheisyydessä, jolloin myös viljely-, kasvatusta-, korjuu- ja kuljetuslogistiikan kannattavuus paranee. Viljelijöiden on saatava riittävä korvaus pajunviljelystä, jotta korkealaatuisen pajuraaka-aineen tuotantoon sitoudutaan. Tämä mahdollistaisi häiriöttömän tuotannon ja korkealaatuiset lopputuotteet eri sektoreilla.

Lyhytkiertopajuviljelmien perustamisen, hoidon ja korjuun menetelmät tunnetaan hyvin. Elinkeinojen ympäristö- ja ilmastovaikutusten selvittämiseksi tarvitaan tutkimusta pajun koko kasvatusta- ja arvoketjun matkalta viljelmän perustamisesta aina lopputuotteiden käyttöön ja

kierrätykseen asti. Pajun soveltuvuutta kosteikkokasviksi suopeltojen ja turvesoiden haitallisten ilmastovaikutusten vähentämisessä tulee selvittää. Samoin tulisi kehittää pajunviljelyn kokonaiskestävyyttä, mahdollisuutta ravinteiden kierrätykseen pajun avulla sekä pajun luomutuotantoa, sillä nykytilanteessa pajuvielmillä käytettävät torjunta-aineet rajoittavat pajun arvoainesten käyttöä esimerkiksi lääke-, kosmetiikka- ja elintarvikesovelluksissa. Käsityö- tai lääkepajun kasvatusta osana kosteikkoviljelyä ja mahdollisena lisätulon lähteenä viljelijälle tulisi selvittää. Rakennetussa ympäristössä pajut tarjoavat mahdollisuuksia hulevesien luonnonmukaiseen hallintaan ja monimuotoisuuden lisäämiseen.

Viitteet

- Adler, A., Verwijst, T. & Aronsson, P. 2005. Estimation and relevance of bark proportion in a willow stand. *Biomass and Bioenergy* 29(2): 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.04.003>.
- Agnihotri, A. & Seth, C.S. 2019. Transgenic Brassicaceae: A Promising approach for phytoremediation of heavy metals. In: Narasimha, M. & Prasad, V. (eds.). *Transgenic Plant Technology for Remediation of Toxic Metals and Metalloids*. pp. 239–255.
- Agostini, F., Gregory, A. & Richter, G. 2015. Carbon sequestration by perennial energy crops: Is the jury still out? *Bioenergy Research* 8: 1057–1080. <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-014-9571-0>
- Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. *VTT Technology* 258. 229 s. + liitteet 30 s.
- Albertsson, J., Hansson, D., Bertholdsson, N-O. & Åhman, I. 2014a. Site-related set-back by weeds on the establishment of 12 biomass willow clones. *Weed Research* 54: 398–407.
- Albertsson, J., Verwijst, T., Hansson, D., Bertholdsson, N-O. & Åhman, I. 2014b. Effects of competition between short-rotation willow and weeds on performance of different clones and associated weed flora during the first harvest cycle. *Biomass and Bioenergy* 70: 364–372. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.003>
- Albertsson, J., Verwijst, T., Rosenqvist, H., Hansson, D., Bertholdsson, N.O. & Åhman, I. 2016. Effects of mechanical weed control or cover crop on the growth and economic viability of two short-rotation willow cultivars. *Biomass and Bioenergy* 91: 296–305. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.05.030>
- Alen, R. (ed.). 2011. *Biorefining of forest resources. Puunjalostusinsinöörit, Paperi ja puu*. ISBN 978-952-5216-39-4
- Algreen, M., Trapp, S. & Rein, A. 2014. Phytoscreening and phytoextraction of heavy metals at Danish polluted sites using willow and poplar trees. *Environmental Science and Pollution Research* 21: 8992–9001. DOI 10.1007/s11356-013-2085-z
- Antoniadou, K., Herz, C., Le, N.P.K., Mittermeier-Kleßinger, V.K., Förster, N., Zander, M., Ulrichs, C., Mewis, I., Hofmann, T., Dawid, C. & Lamy, E. 2021. Identification of salicylates in willow bark (*Salix cortex*) for targeting peripheral inflammation. *International Journal of Molecular Sciences* 22(20): 11138. <https://doi.org/10.3390/ijms222011138>
- Araghi, M., Moslehi, Z., Mohammadi Nafchi, A., Mostahsan, A., Salamat, N., & Daraei Garmakhany, A. 2015. Cold water fish gelatin modification by a natural phenolic cross-linker (ferulic acid and caffeic acid). *Food Science & Nutrition* 3(5): 370–375. DOI: 10.1002/fsn3.230
- Aro, L., Kaunisto, S. & Saarinen M. 1997. *Suopohjien metsitys. Hankeraportti 1986–1995. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 634. 51 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1558-4>
- Aronsson, P. & Perttu, K. 1994. A complete system for wastewater treatment using vegetation filters. In: Aronsson, P. & Perttu, K. (eds.). *Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system. Proceedings of a study tour*,

- conference and workshop in Sweden, 5-10 June 1994. Sveriges Lantbruksuniversitetet, Institutionen för ekologi och miljövård, Rapport 50: 211–215.
- Aronsson, P., Rosenqvist, H. & Dimitriou, I. 2014. Impact of nitrogen fertilization to short-rotation willow coppice plantations grown in Sweden on yield and economy. *Bioenergy Research* 7: 993–1001.
- Asikainen, A. & Nuuja, J. 1999. Palstahaketuksen ja hakkeen kaukokuljetuksen simulointi. *Met-sätieteen aikakauskirja vuosikerta 1999 numero 3 artikkeli id 6849*. <https://doi.org/10.14214/ma.6849>.
- Auad, P., Spier, F. & Gutterres, M. 2020. Vegetable tannin composition and its association with the leather tanning effect. *Chemical Engineering Communications* 207(5): 722–732. <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1618843>
- Balakshin, M.Y., Capanema, E.A., Sulaeva, I., Schlee, P., Huang, Z., Feng, M., Borghei, M., Rojas, O.J., Potthast, A. & Rosenau, T. 2021. New opportunities in the valorization of technical lignins. *ChemSusChem* 14(4): 1016.
- Bartoli, M., Giorcelli, M., Jagdale, P., Rovere, M. & Tagliaferro, A. 2020. A review of non-soil biochar applications. *Material* 13: 261. <https://doi.org/10.3390/ma13020261>.
- Barton-Pudlik, J. & Czaja, K. 2018. Fast-growing willow (*Salix viminalis*) as a filler in polyethylene composites. *Composites Part B* 143: 68–74.
- Baum, C., Amm, T., Kahle, P. & Weihc, M. 2020. Fertilization effects on soil ecology strongly depend on the genotype in a willow (*Salix* spp.) plantation. *Forest Ecology and Management* 466: 118–126.
- Bergström, D., Di Fulvio, F., Kons, K. & Nordfjell, T. 2011. Skörd av övergrov *Salix* med skogsbrukets maskiner. SLU Arbetsrapport 334. 136 s.
- Berninger, K., Lehtonen, H., Kekkonen, H., Regina, K., Saarnio, S. & Mäkipää, R. Policy brief. Maatalouden tukijärjestelmä kehitettävä tukemaan viljeltyjen turvemaiden ilmastokes-tävää käyttöä. Luonnonvarakeskus, 2020.
- Bezie, Y., Taye, M. & Kumar, A. 2021. Recent advancement in phytoremediation for removal of toxic compounds. In: Kumar, A. & Ram, C. (eds.). *Nanobiotechnology for Green Environment 2021*. Chapter 8, 34 p. Imprint CRC Press. eBook ISBN 9780367461362
- Boeckler, G.A., Gershenzon, J. & Unsicker, S.B. 2011. Phenolic glycosides of the Salicaceae and their role as anti-herbivore defenses. *Phytochemistry* 72(13): 1497–1509. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.01.038>
- Bounaama, A., Enayat, S., Ceyhan, M.S., Moulahoum, H., Djerdjouri, B. & Banerjee, S. 2016. Eth-anolic extract of bark from *Salix aegyptiaca* Ameliorates 1, 2-dimethylhydrazine-induced colon carcinogenesis in mice by reducing oxidative stress. *Nutrition and Cancer* 68(3): 495–506. DOI: 10.1080/01635581.2016.1152379
- Brassard, P., Godbout, S. & Raghavan, V. 2016. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: key parameters and mechanisms involved. *Journal of Environmental Management*. 181: 484–497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.063>.

- Brereton, N.J., Berthod, N., Lafleur, B., Pedneault, K., Pitre, F.E. & Labrecque, M. 2017. Extractable phenolic yield variation in five cultivars of mature short rotation coppice willow from four plantations in Quebec. *Industrial Crops and Products*, 97: 525–535. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.049>
- Bridle, P., Stott, K. & Timberlake, C.F. 1973. Anthocyanins in *Salix* species: A new anthocyanin in *Salix purpurea* bark. *Phytochemistry* 12: 1103–1106.
- Budde, K.B., Gallo, L., Marchelli, P., Mosner, E., Liepelt, S., Ziegenhagen, B. & Leyer, I. 2011. Widespread invasion without sexual reproduction? A case study on European willows in Patagonia, Argentina. *Biological Invasions* 13(21): 45–54.
- Caguiat, J.N., Yanchus, D.S., Gabhi, R.S., Kirk, D.W. & Jia, C.Q. 2018. Identifying the structures retained when transforming wood in biocarbon. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 136: 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.10.020>
- Caslin, B., Finnan, J., Johnston, C., McCracken, A. & Walsh, L. (eds.) 2015. Short rotation coppice willow. Best practice guidelines. Teagasc. 128 p. https://www.teagasc.ie/media/website/publications/2011/Short_Rotation_Coppice_Best_Practice_Guidelines.pdf.
- Cerrillo, T., Grande, J., Lúquez, V., Monteoliva, S., Fernández P., Thomas, E., Fosco, I., Raúl, V., Araceli, G. & Loval, S. 2018. Three decades of breeding research on willow trees in Argentina. Seventh International Poplar Symposium, 28th October – 4th November 2018, Buenos Aires, Argentina. Abstracts, p. 7.
- Chang, T.C., You, S.J., Yu, B.S., Chen, C.M. & Chiu, Y.C. 2009. Treating high-mercury-containing lamps using fullscale thermal desorption technology. *Journal of Hazardous Materials* 162: 967–972.
- Chang, Z., Zhang, S., Li, F., Wang, Z., Li, J., Xia, C., Yu, Y., Cai, L. & Huang, Z. 2021. Self-healable and biodegradable soy protein-based protective functional film with low cytotoxicity and high mechanical strength. *Chemical Engineering Journal* 404: 126505. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126505
- Che D., Meagher R.B., Heaton A.C.P. & Lima A. 2003. Expression of mercuric ion reductase in eastern cottonwood (*Populus deltoides*) confers mercuric ion reduction and resistance. *Plant Biotechnology Journal* 1: 311–319.
- Christenhusz, M.J.M., Fay, M.F. & Chase, M.W. 2017. *Plants of the world*. Kew Publishing Royal Botanic Gardens, Kew, The University of Chicago Press, China.
- Cobas, A.C., Felissia, F.E., Monteoliva, S. & Area, M.C. 2013. Optimization of the properties of poplar and willow chemimechanical pulps by a mixture design of juvenile and mature wood. *BioResources* 8(2): 1646–1656.
- Copeland, T.E. & Weston, J.F. 1988. *Financial Theory and Corporate Policy*. Addison-Wesley Publishing Company. 3. print. 946 p.
- Cunniff, J., Purdy, S.J., Barraclough, T.J.P., Castle, M., Maddison, A.L., Jones, L.E., Shield, I.F., Gregory, A.S. & Karp, A. 2015. High yielding biomass genotypes of willow (*Salix* spp.) show differences in below ground biomass allocation. *Biomass and Bioenergy* 80: 114–127. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.020>

- Cunningham, A.B., Maduarta, I. M., Howe, J., Ingram, W. & Jansen, S. 2011. Hanging by a thread: natural metallic mordant processes in traditional Indonesian textiles. *Economic Botany* 65: 241–259. <https://doi.org/10.1007/s12231-011-9161-4>.
- Danfors, B. & Nordén, B. 1995. Sammanfattande utvärdering av teknik och logistik vid salix-skörd. Slutrapport över analys av hanterings- och transportsystem vid skörd av *Salix*. JTI-rapport 210, Jordbrukstekniska institutet, Uppsala. 1995.
- Danfors, B., Ledin, S. & Rosenqvist, H. 1997. Energiskogsodling.Handledning för odlare. Swedish Institute of Agricultural Engineering, 41 p. ISSN 1402-5183
- Davison J. 2005. Risk mitigation of genetically modified bacteria and plants designed for bioremediation. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 32: 639–650.
- Desborough, M. & Keeling, D.M. 2017. The aspirin story - from willow to wonder drug. *British Journal of Haematology* 177(5): 674–683. <https://doi.org/10.1111/bjh.14520>
- Di Fulvio, F., Bergström, D., Kons, K. & Nordfjell, T. 2012. Productivity and profitability of forest machines in the harvesting of normal and overgrown willow plantations. *Croatian Journal of Forest Engineering* 33(1): 25–37.
- Dickinson, N.M. & Pulford, I.D. 2004 Cadmium phytoextraction using short-rotation coppice *Salix*: the evidence trail. *Environment International* 31: 609–613.
- Dimitriou, I., Mola-Yudego, B. & Aronsson, P. 2012a. Impact of willow short rotation coppice on water quality. *Bioenergy Research* 5 (3): 537–545.
- Dimitriou, I., Mola-Yudego, B., Aronsson, P. & Eriksson, J. 2012b. Changes in organic carbon and trace elements in the soil of willow short-rotation coppice plantations. *Bioenergy Research* 5: 563–572. DOI 10.1007/s12155-012-9215-1
- Dimitriou, I. & Mola-Yudego, B. 2017. Poplar and willow plantations on agricultural land in Sweden: Area, yield, groundwater quality and soil organic carbon. *Forest Ecology and Management* 383: 99–107.
- Djomo, S.N., Kasmoui, O.E. & Ceulemans, R. 2011. Energy and greenhouse gas balance of bioenergy production from poplar and willow: a review. *Global Change Biology*. *Bioenergy* 3: 181–197. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01073.x>
- Dos Santos Utmazian, M.N., deWieshammer, G., Vega, R. & Wenzel, W.W. 2007. Hydroponic screening for metal resistance and accumulation of cadmium and zinc in twenty clones of willows and poplars. *Environmental Pollution* 148: 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.10.045>
- Dou, J. 2015. Willow inner bark as a potential source of fibres and chemicals. Maisterin tutkielma. Aalto yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201506303491>
- Dou, J. 2018. Fractionation of willow bark for combined production of extracts and fiber bundles. Väitöskirja. Aalto Yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201812045879>
- Dou, J., Bian, H., Yelle, D. J., Ago, M., Vajanto, K., Vuorinen, T. & Zhu, J. J. 2019a. Lignin containing cellulose nanofibril production from willow bark at 80 °C using a highly recyclable acid hydrotrope. *Industrial Crops and Products* 129: 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.033>

- Dou, J., Evtuguin, D. V. & Vuorinen, T. 2021a. Structural elucidation of suberin from the bark of cultivated willow (*Salix* sp.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 69(37): 10848–10855. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c04112>
- Dou, J., Galvis, L., Holopainen-Mantila, U., Reza, M., Tamminen, T. & Vuorinen, T. 2016. Morphology and overall chemical characterization of willow (*Salix* sp.) inner bark and wood: toward controlled deconstruction of willow biomass. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 4(7): 3871–3876. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00641>
- Dou, J., Kim, H., Li, Y., Padmakshan, D., Yue, F., Ralph, J. & Vuorinen, T. 2018a. Structural characterization of lignins from willow bark and wood. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 66(28): 7294–7300. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b02014>
- Dou, J., Paltakari, J., Johansson, L. S. & Vuorinen, T. 2019b. Novel insight into the separation and composite utilization of sclerenchyma fiber bundles of willow bark. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 7(3): 2964–2970. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04001>
- Dou, J., Rissanen, M., Iilina, P., Mäkkylä, H., Tammela, P., Haslinger, S. & Vuorinen, T. 2021b. Separation of fiber bundles from willow bark using sodium bicarbonate and their novel use in yarns for superior UV protection and antibacterial performance. *Industrial Crops and Products* 164: 113387. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113387>
- Dou, J., Vuorinen, T., Koivula, H., Forsman, N., Sipponen, M. & Hietala, S. 2021c. Self-standing lignin-containing willow bark nanocellulose films for oxygen blocking and UV shielding. *ACS Applied Nano Materials* 4(3): 2921–2929. <https://doi.org/10.1021/acsanm.1c00071>
- Dou, J., Xu, W., Koivisto, J. J., Mobley, J. K., Padmakshan, D., Kögler, M., Xu, C., Willför, S., Ralph, J. & Vuorinen, T. 2018b. Characteristics of hot water extracts from the bark of cultivated willow (*Salix* sp.). *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 6: 5566–5573. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00498>
- Drury, J. L. & Mooney, D. J. 2003. Hydrogels for tissue engineering: Scaffold design variables and applications. *Biomaterials* 24: 4337–4351. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(03\)00340-5](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00340-5)
- Dupraz, C., Bliz-Frayeret C., Lecomte, I., Molto, Q., Reyes, F. & Gosme, M. 2018. Agroforestry Systems 92: 1019–1033.
- Durak, A. & Gawlik-Dziki, U. 2014. The study of interactions between active compounds of coffee and willow (*Salix* sp.) bark water extract. *BioMed Research International* 386953. DOI: 10.1155/2014/386953
- Eisenbies, M.H., Volk, T.A., de Souza, D. P. & Hallen, K.W. 2020. Cut-and-chip harvester material capacity and fuel performance on commercial-scale willow fields for varying ground and crop conditions. *GCB Bioenergy*, 12(6): 380-395.
- El Kasmioui, O. & Ceulemans, R. 2012. Financial analysis of the cultivation of poplar and willow for bioenergy. *Biomass and Bioenergy* 43: 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.04.006>.
- EMA. 2016a. European Union herbal monograph on *Salix* [various species including *S. purpurea* L., *S. daphnoides* Vill., *S. fragilis* L.], cortex. EMA/HMPC/80630/2016.

- EMA. 2016b. Assessment report on *Salix* [various species including *S. purpurea* L., *S. daphnoides* Vill., *S. fragilis* L.], cortex. EMA/HMPC/80628/2016.
- EN 1534. 2010. Wood flooring. Determination of resistance to indentation. Test method. European Committee for Standardization. Brussels.
- Enescu, C.M., Houston Durrant, T., de Rigo, D. & Caudullo, G. 2016. *Salix caprea* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, D. & Mauri, A. (eds.). European Atlas of Forest Tree Species. Publ. Off EU. Luxembourg., p. 171–172.
- Ericsson, K., Rosenqvist, H. & Nilsson, L.J. 2009. Energy crop production costs in the EU. Biomass and Bioenergy 33(11): 1577–1586. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.08.002>.
- Eskola, R. & Tahvonen, O. 2010. Hulevedet rakennetussa viherympäristössä. HAMKin julkaisuja 7/2010. 150 s. ISBN 978-951-784-522-9. ISSN 1795-4231.
- Eurofins. 2021. Yhteenvetotilasto, julkaisematon.
- Fagerstedt, K., Pellinen, K., Saranpää, P. & Timonen, T. 2016. Tunnista puu ja puuaine. Metsäkustannus. 180 s. ISBN 978-952-6612-81-2
- Falcão, L. & Araújo, M. 2018. Vegetable tannins used in the manufacture of historic leathers. Molecules 23(5): 1081. <https://doi.org/10.3390/molecules23051081>
- Farooq, M., Zou, T., Riviere, G., Sipponen, M. H. & Österberg, M. 2018. Strong, ductile, and waterproof cellulose nanofibril composite films with colloidal lignin particles. Biomacromolecules 20: 693–704. <https://doi.org/10.1021/ACS.BIOMAC.8B01364>
- Felix, H. 1999. Field trials for in situ decontamination of heavy metal polluted soils using crops of metal-accumulating plants. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 160: 525–529.
- Feng, X.X., Zhang, L.L., Chen, J.Y. & Zhang, J.C. 2007. New insights into solar UV-protective properties of natural dye. Journal of Cleaner Production 15: 366–372. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2005.11.003>
- Ferm, A. 1985. Jätevedellä kasteltujen lehtipuiden alkukehitys ja biomassatuotos kaatopaikalla. Folia Forestalia 641. 35 s.
- Finlayson. 2021. Kasvivärjätty hamppumallisto Vegi. <https://www.finlayson.fi/blogs/finlayson/kasvivarjattu-hamppumallisto-vegi>, haettu 11.8.2021.
- Von Fircks, H.A. 1992. Frost hardiness of dormant *Salix* shoots. Scandinavian Journal of Forest Research 7: 317–323.
- Flinta, G. 1882. Neuvoja kopan kutomisessa käsityökouluja ja yksityisiä warden sekä lyhyitä ohjeita piilipuun wiljelykseen. 37 s.
- Frédette, C., Labrecque, M., Comeau, Y. & Brisson, J. 2019. Willows for environmental projects: A literature review of results on evapotranspiration rate and its driving factors across the genus *Salix*. Journal of Environmental Management 246: 526–537. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.06.010. Epub 2019 Jun 12. PMID: 31202017.

- Galambosi, B. & Jokela, K. 2009. Viljellyn kalmojuuren (*Acorus calamus*) ja mustuvapajun (*Salix myrsinifolia*) sadot suonpohjalla. Summary: The crops of the cultivated common sweet flag (*Acorus calamus*) and dark leaved willow (*Salix myrsinifolia*) on peat. Suo 60(1–2): 45–57. <http://www.suo.fi/pdf/article9867.pdf>
- Glenz, C., Schlaepfer, R., Iorgulescu, I. & Kienast, F. 2006. Flooding tolerance of Central European tree and shrub species. Forest Ecology and Management 235: 1–13.
- Gonzalez-Garcia, S., Mola-Yudego, B., Dimitriou, I., Aronsson, P. & Murphy, R. 2012. Environmental assessment of energy production based on long term commercial willow plantations in Sweden. Science of the Total Environment 421–422: 210–219.
- Grand View Research 2021. Global dyes & pigments market size report, 2021–2028. Saatavissa: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/dyes-and-pigments-market> (10.11.2021)
- Gray, M., Johnson, M.G., Dragila, M.I., & Kleber, M. 2014. Water uptake in biochars: the roles of porosity and hydrophobicity. Biomass and Bioenergy 61: 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.010>.
- Greger, M. & Landberg, T. 1999. Use of willow in phytoextraction. International Journal of Phytoremediation 1(2): 115–123. <https://doi.org/10.1080/15226519908500010>
- Guesmi, A., Ladhari, N. & Sakli, F. 2013. Ultrasonic preparation of cationic cotton and its application in ultrasonic natural dyeing. Ultrasonics Sonochemistry 20: 571–579. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2012.04.012>
- Guidi, W., Pitre, F.E. & Labrecque, M. 2013. Short-rotation coppice of willows for production of biomass in Eastern Canada. In: Matovic, M.D. (ed.). Biomass now – Sustainable growth and use. pp. 421–448. <https://www.intechopen.com/books/biomass-now-sustainable-growth-and-use/short-rotation-coppice-of-willows-for-the-production-of-biomass-in-eastern-canada>; DOI: 10.5772/51111
- Gullberg, U. 1988. Breeding of *Salix* as an energy crop, state of the Swedish program 1987. International Energy Agency, Proceedings from Willow Breeding Symposium, Uppsala August 31–September 1, 1987. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Genetics, Research Notes 41: 7–15.
- Gupta, A., Singh, N.B., Choudhary, P., Sharma, J.P. & Sankhayan, H.P. 2014. Estimation of genetic variability, heritability and genetic gain for wood density and fibre length in 36 clones of white willow (*Salix alba* L.). International Journal of Agriculture Environment and Biotechnology 7: 299–304. DOI:10.5958/2230-732X.2014.00247.2
- Gurunathan, T., Mohanty, S. & Nayak, S.K. 2015. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 77: 1–25. ISSN 1359-835X, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.06.007>.
- Haahtela, T., Alenius, H., Lehtimäki, J., Sinkkonen, A., Fyhrquist, N., Hyöty, H., Ruokolainen, L. & Mäkelä, M. 2021. Immunological resilience and biodiversity for prevention of allergic diseases and asthma. Allergy, in print. DOI: 10.1111/all.14895

- Hacke, U.G. & Sperry, J.S. 2001. Functional and ecological xylem anatomy. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 4: 97–115. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00017>.
- Hagman, M. 1976. Eräitä tietoja *Salix* cv. *Aquatica* N:o 56:sta. *Moniste*. 3 s.
- Hagner, M., Kuoppala, E., Fagnäs, L., Tiilikkala, K. & Setälä, H. 2015. Using the copse snail *Arianta arbustorum* (Linnaeus) to detect repellent compounds and the quality of wood vinegar. *International Journal of Environmental Research*. 9: 53–60
- Hagner, M., Tiilikkala, K., Lindqvist, I., Niemelä, K., Wikberg, H., Källi, A. & Rasa, K. 2020. Performance of liquids from slow pyrolysis and hydrothermal carbonization in plant protection. *Waste and Biomass Valorization* 11: 1005–1016 <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00545-1>
- Hakkila, P., Leikola, M. & Salakari, M. 1978. Pienpuuston kasvatusta, talteenotto ja käyttö. Lyhytkiertopuun kasvatusta- ja käyttöprojektin loppuraportti. SITRA, sarja B46. 159 s.
- Hakkila, P. (toim.). 1985. Metsäenergian mahdollisuudet Suomessa. PERA-projektin väliraportti. *Folia Forestalia* 624. 86 s.
- Hamelin, L., Jørgensen, U., Petersen, B.M., Olesen, J.E. & Wenzel, H. 2012. Modelling the carbon and nitrogen balances of direct land use changes from energy crops in Denmark: a consequential life cycle inventory. *Global change biology*. *Bioenergy* 4: 889–907. <https://DOI.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01174.x>
- Han, S.-H. & Shin S.-J. 2014. Investigation of solid energy potential of wood and bark obtained from four clones of a 2-year-old goat willow. *Frontiers in Energy Research*. 2: 5. doi:10.3389/fenrg.2014.00005
- Hanani, Z.N., Yee, F.C. & Nor-Khaizura, M.A.R. 2019. Effect of pomegranate (*Punica granatum* L.) peel powder on the antioxidant and antimicrobial properties of fish gelatin films as active packaging. *Food hydrocolloids* 89: 253–259. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.10.007
- Handler, F. & Blumauer, E. 2010. Logistics for harvesting short rotation forestry with a special equipped forage harvester. FORMEC 2010, Forest Engineering: Meeting the Needs of the Society and the Environment, July 11–14, 2010, Padova, Italy. Saatavissa: <http://www.tesaf.unipd.it/formec2010/Proceedings/Ab/ab052.pdf> [Viitattu 8.6.2021]
- Hanley, S.J., Pei, M.H., Powers, S.J., Ruiz, C., Mallott, M.D., Barker, J.H.A. & Karp, A. 2011. Genetic mapping of rust resistance loci in biomass willow. *Tree Genetics & Genomes* 7: 597–608. DOI 10.1007/s11295-010-0359-x.
- Hasegawa, H., Rahman, M.A., Matsuda, T., Kitahara, T., Maki, T. & Ueda, K. 2009. Effect of eutrophication on the distribution of arsenic species in eutrophic and mesotrophic lakes. *Science of the Total Environment* 407: 1418–1425.
- Hauk, S., Knoke, T. & Wittkopf, S. 2014. Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29: 435–448. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.103>.
- Heino, E. 1983. Raidan ominaisuuksia. *Sorbifolia* 14(2): 93–96.

- Heino, E. & Hytönen, J. 2016. Pajunviljelyn pinta-ala Suomessa vuonna 2015. *Sorbifolia* 47(1): 12–15.
- Heiska, S., Rousi, M., Turtola, S., Meier, B., Tirkkonen, V. & Julkunen-Tiitto, R. 2005. The effect of genotype and cultivation method on the total salicylate yield of dark-leaved willows (*Salix myrsinifolia*). *Planta Medica* 71(12): 1134–1139. DOI: 10.1055/s-2005-873138
- Heiska, S., Tikkanen, O.-P., Rousi, M. & Julkunen-Tiitto, R. 2008. Bark salicylates and condensed tannins reduce vole browsing amongst cultivated dark-leaved willows (*Salix myrsinifolia*). *Chemoecology* 17: 245–253. <https://doi.org/10.1007/s00049-007-0385-9>
- Helander, M., Saloniemi, I. & Saikkonen, K. 2012. Glyphosate in northern ecosystems. *Trends in Plant Science* 17(10): 569–574.
- Heller, M.C., Keoleian, G.A. & Volk, T.A. 2003. Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass and Bioenergy* 25: 147–165. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00190-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00190-3)
- Hile, M.L., Wheeler, E.F., Patterson, P.H. & Hulet, R.M. 2012. Ammonia emissions from chopped willow versus pine shavings as bedding for broiler chickens. 2012 IX International Livestock Environment Symposium (ILES IX), ILES12–1375. doi:10.13031/2013.41564
- Hobisch, M. A., Phiri, J., Dou, J., Gane, P., Vuorinen, T., Bauer, W., Prehal, C., Maloney, T. & Spirk, S. 2020. Willow bark for sustainable energy storage systems. *Materials* 13(4): 1016. <https://doi.org/10.3390/ma13041016>
- Holkar, C.R., Jadhav, A.J., Pinjari, D.V., Mahamuni, N.M., Pandit, A.B. 2016. A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. *Journal of Environmental Management* 182: 351–366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090>
- Holland, R.A., Eigenbrod, F., Muggeridge, A., Brown, G., Clarke, D. & Taylor, G. 2015. A synthesis of the ecosystem services impact of second-generation bioenergy crop production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 46: 30–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.003>
- Holm, B. & Heinsoo, K. 2013. Municipal wastewater application to short rotation coppice of willows – treatment efficiency and clone response in Estonian case study. *Biomass and Bioenergy* 57: 126–135. doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.001
- Honkanen, A. 1994. Selection of *Salix myrsinifolia* clones for biomass forestry in Finland. *Silva Fennica* 28(3): 189–201.
- Hui, N., Grönroos, M., Roslund, M.I., Parajuli, A., Vari, H.K., Soininen, L., Laitinen, O.-H., Sinkkonen, A. & the ADELE research group. 2019. Diverse environmental microbiota as a tool to augment biodiversity in urban landscaping materials. *Frontiers in Microbiology* 10: 536. DOI: 10.3389/fmicb.2019.00536
- Hulevesiopas. Suomen Kuntaliitto, Helsinki 2012. 297 s. ISBN 978-952-213-896-5.
- Hytönen, J. 1985a. Teollisuuslietteellä lannoitetun vesipajun lehdetön maanpäällinen biomassatuotos. *Folia Forestalia* 614. 16 s.

- Hytönen, J. 1985b. Kaatoajankohdan, kaatotavan ja kannonkorkeuden vaikutus viljeltyjen ja luonnonpajujen sekä hieskoivun vesomiseen. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 206: 40–57.
- Hytönen, J. 1994. Effect of fertilizer application rate on nutrient status and biomass production in short-rotation plantations of willows on cut-away peatland areas. Tiivistelmä: Lannoitemäärän vaikutus lyhytkiertoviljelmien ravinnetilaan ja biomassatuotukseen suonpohjilla. Suo 45(3): 65–77. <http://www.suo.fi/pdf/article9739.pdf>
- 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. <https://doi.org/10.14214/sf.a9195>
- Hytönen J. 1995b. Effect of repeated fertilizer application on the nutrient status and biomass production of *Salix 'Aquatica'* plantations on cut-away peatland areas. *Silva Fennica* 29(2): 107–116. <https://doi.org/10.14214/sf.a9201>
- Hytönen, J. 1995c. 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. 1996. Biomass production and nutrition of short-rotation plantations. The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 586. 61 p. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1494-4>
- Hytönen, J. 2005. Effects of liming on the growth of birch and willow on cut-away peat substrates in greenhouse. *Baltic Forestry* 11(2): 68–74. [https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2005-11 \[2\]/68_74%20Jyrki%20Hytönen.pdf](https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2005-11 [2]/68_74%20Jyrki%20Hytönen.pdf)
- Hytönen, J. 2016. Wood ash fertilisation increases biomass production and improves nutrient concentrations in birches and willows on two cutaway peats. *Baltic Forestry* 22(1): 98–106. https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2016-22%5b1%5d/e-Baltic%20Forestry%202016.1_98-106%20psl.pdf
- Hytönen, J., Aro, L. & Jylhä, P. 2018. Biomass production and carbon sequestration of dense downy birch stands on cutaway peatlands. *Scandinavian Journal of Forest Research* 33(8): 764–771. <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1500636>
- Hytönen, J. & Ferm, A. 1984. Vesipajun vesojen puuteknisiä ominaisuuksia. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 163. 20 s.
- Hytönen, J., Saarsalmi, A., Pelkonen, P. & Rossi, P. 1985. Energiaviljelmien perustaminen ja hoito. Teoksessa: Hakkila, P. (toim.) Metsäenergian mahdollisuudet Suomessa. PERA-projektin väliraportti. *Folia Forestalia* 624: 46–53.
- Hytönen, J., Saarsalmi, A. & Rossi, P. 1995. Biomass production and nutrient uptake of short-rotation plantations. *Silva Fennica* 29(2): 117–139. <https://doi.org/10.14214/sf.a9202>
- 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. <https://doi:10.1016/j.biombioe.2009.05.014>
- Hyvälouma, J., Hannula, M., Arstila, K., Wang, H., Kulju, S. & Rasa, K. 2018a. Effects of pyrolysis temperature on the hydrologically relevant porosity of willow biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 134: 446–453. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.07.011>.

- Hyväluoma, J., Kulju, S., Hannula, M., Wikberg, H., Källi, A. & Rasa, K. 2018b. Quantitative characterization of pore structure of several biochars with 3D imaging. *Environmental Science and Pollution Research* 25: 25648–25658. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8823-x>.
- Ilén, P. 2001. Käsityöpajun tuotannon ja jalostuksen kehittäminen 1.5.1998–31.12.2000. Pohjois-Savon ammattiopisto ja Keski-Suomen maaseutukeskus. 35 s. + liitteet.
- Ilén, P. 2004. Käsityöpajun viljelyn historiaa ja tuoreita kokemuksia. *Sorbifolia* 35(1): 9–15.
- Isebrands, J.G., Aronsson, P., Carlson, M., Ceulemans, R., Coleman, M., Dickinson, N., Dimitriou, J., Doty, S., Gardiner, E., Heinsoo, K., Johnson, J.D., Koo, Y.B., Kort, J., Kuzovkina, J., Licht, L., McCracken, A.R., McIvor, I., Mertens, P., Perttu, K., Riddell-Black, D., Robinson, B., Scarscia-Mugnozza, G., Schroeder, W.R., Stanturf, J., Volk T.A. & Weih, M. 2014. Environmental applications of poplars and willows. In: Isebrands, J.G. & Richardson, J. (eds.). *Poplars and willows: trees for society and the environment*. pp. 258–336.
- ISO 11664-4. 2019. Colorimetry. Part 4: CIE 1976 L*a*b* colour space. International Standards Organisation, Geneva.
- ISO 13061-3. 2014. Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 3: Determination of ultimate strength in static bending. International Standards Organisation, Geneva.
- ISO 13061-4. 2014. Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 4: Determination of modulus of elasticity in static bending. International Standards Organisation, Geneva.
- ISO 13061-6. 2014. Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 6: Determination of ultimate tensile stress parallel to grain. International Standards Organisation, Geneva.
- Istemic, D. & Božić, G. 2021. Short-rotation willows as a wastewater treatment plant: biomass production and the fate of macronutrients and metals. *Forests* 12: 554. doi.org/10.3390/f12050554
- Jabłonska, E., Wisniewska, M., Marcinkowski, P., Grygoruk, M., Walton, C.R., Zak, D., Hoffmann, C.C., Larsen, S.E., Trepel, M. & Kotowski, W. 2020. Catchment-scale analysis reveals high cost-effectiveness of wetland buffer zones as a remedy to non-point nutrient pollution in north-eastern Poland. *Water* 12: 629. [doi:10.3390/w12030629](https://doi.org/10.3390/w12030629)
- Jiang, J., Wang, X., Holm, N., Rajagopalan, K., Chen, K. & Ma, S. 2013. Highly ordered microporous woody biochar with ultra-high carbon content as supercapacitor electrodes. *Electrochimica acta* 113: 481–489.
- Jirjis, R. 2005. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy* 28(2): 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.08.014>.
- Johansson, L. K.-H. & Alström, S. 2000. Field resistance to willow leaf rust *Melampsora epitea* in inter- and intraspecific hybrids of *Salix viminalis* and *S. dasyclados*. *European Journal of Plant Pathology* 106: 763–769.
- Jonsell, B. (ed.). 2000. *Flora Nordica* 1. Stockholm. 344 s. ISBN 91 7190 033 0

- Juhanoja, S. & Tuhkanen, E.-M. (toim.) 2019. Luonnonkasvit ja biohiili hulevesien hallinnassa: Loppuraportti hankkeesta Hulevesialueiden kasvit ja kasvualustat 2015–2019. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 44/2019. Luonnonvarakeskus. 171 s.
- Julkunen-Tiitto, R. 1985. Chemotaxonomical screening of phenolic glycosides in northern willow twigs by capillary gas chromatography. *Journal of Chromatography A* 324: 129–139. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)81312-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)81312-1)
- Julkunen-Tiitto, R. 1986. A chemotaxonomic survey of phenolics in leaves of northern Salicaceae species. *Phytochemistry* 25(3): 663–667.
- Julkunen-Tiitto, R. & Meier, B. 1992. Variation in growth and secondary phenolics among field-cultivated clones of *Salix myrsinifolia*. *Planta medica* 58(1): 77–80. <https://doi.org/10.1055/s-2006-961394>
- Julkunen-Tiitto, R. & Virjamo, V. 2017. Biosynthesis and roles of Salicaceae salicylates. In: Arimura, G. & Maffei, M. (eds.). *Plant specialized metabolism: Genomics, biochemistry, and biological functions*. CRC Press, Boca Raton. pp. 65–83.
- Júnior, A.V., Fronza, N., Foralosso, F.B., Dezen, D., Huber, E., dos Santos, J.H.Z., Machado, R.A.F. & Quadri, M.G.N. 2015. Biodegradable duo-functional active film: antioxidant and antimicrobial actions for the conservation of beef. *Food and Bioprocess Technology* 8(1): 75–87. DOI: 10.1007/s11947-014-1376-9
- Junttila, O. 1976. Apical growth cessation and shoot tip abscission in *Salix*. *Physiologia Plantarum* 38: 278–286.
- Jylhä, P. 2013. Autohakkurin seula-aukon koon vaikutus kokopuun haketuksen tuottavuuteen ja polttoaineen kulutukseen. *Metlan työraportteja* 272. 19 s.
- Jyske, T., Kuroda, K., Suuronen, J.-P., Pranovich, A., Roig Juan, S., Aoki, D. & Fukushima, K. 2016. In planta localization of stilbenes within *Picea abies* phloem. *Plant Physiology* 172: 913–928.
- Jürgenliemk, G., Petereit, F. & Nahrstedt, A. 2007. Flavan-3-ols and procyanidins from the bark of *Salix purpurea* L. *Pharmazie* 62(3): 231–234. <https://doi.org/10.1691/ph.2007.3.6577>
- Kammerer, B., Kahlich, R., Biegert, C., Gleiter, C. H. & Heide, L. 2005. HPLC-MS/MS analysis of willow bark extracts contained in pharmaceutical preparations. *Phytochemical Analysis* 16(6): 470–478. <https://doi.org/10.1002/pca.873>
- Karpachev, S.P. 2020. Simulation of *Salix* harvesting and processing technology using soft containers. *International Conference on Efficient Production and Processing (ICEPP-2020)* 161:01047. 4 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016101047>.
- Kaukonen, E.S. 2017. Housing conditions and broiler and broiler breeder welfare: the effect of litter condition on contact dermatitis in broilers and breeders, and the effect of elevated structures on broiler leg health. Väitöskirja. Helsingin yliopisto. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-51-3235-2>
- Kaukonen, E., Norring, M. & Valros, A. 2017. Evaluating the effects of bedding materials and elevated platforms on contact dermatitis and plumage cleanliness of commercial broilers and on litter condition in broiler houses. *British Poultry Science*, 58(5): 480–489, <https://doi.org/10.1080/00071668.2017.1340588>

- Kauppila, A., Anttila, A., Autio, A., Fagerholm, J., Lehtonen, J., Oksa, E., Raisio, J., Saarinen, J., Uski, K., Viherä-Aarnio, A. & Väre, H. 2021. Vihreät jättiläiset, Suomen suurimmat puut. Dendrologian Seura – Dendrologiska Sällskapet ja Metsäkustannus. 288 s. ISBN 978-952-338-086-8.
- Kekkonen, H. & Ojanen, H., Haakana, M., Latukka, A. & Regina, K. 2019. Mapping of cultivated organic soils for targeting greenhouse gas mitigation. *Carbon Management* 10: 1–12. DOI: 10.1080/17583004.2018.1557990.
- Kelly, M.T. & Curry, J.P. 1991. The influence of phenolic compounds on the suitability of three *Salix* species as hosts for the willow beetle *Phratora vulgatissima*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 61: 25–32. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.1991.tb02392.x>
- Kendall, N. R., Smith, J., Whistance, L. K., Stergiadis, S., Stoate, C., Chesshire, H., & Smith, A. R. 2021. Trace element composition of tree fodder and potential nutritional use for livestock. *Livestock Science*, 104560.
- Kenney, W.A., Sennerby-Forsse, L. & Layton, P.A. 1990. A review of biomass quality research relevant to the use of poplar and willow for energy conversion. *Biomass* 21: 163–188. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(90\)90063-P](https://doi.org/10.1016/0144-4565(90)90063-P)
- Keoleian, G.A. & Volk, T.A. 2005. Renewable energy from willow biomass crops: life cycle energy, environmental and economic performance. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24: 385–406. DOI: 10.1080/07352680500316334
- Keskinen, R., Hyväluoma, J., Wikberg, H., Källi, A., Salo, T. & Rasa K. 2018. Possibilities of using liquids from slow pyrolysis and hydrothermal carbonization in acidification of animal slurry. *Waste and Biomass Valorization* 9: 1429–1433. DOI 10.1007/s12649-017-9910-4.
- Keto-Tokoi, P. & Siitonen, J. 2021. Puiden asukkaat. Suomen puiden seuralaislajit. Gaudeamus, Helsinki, 496 s. ISBN 978-952-345-133-9
- Khan, S. & Malik, A. 2014. Environmental and health effects of textile industry wastewater. In: *Environmental Deterioration and Human Health: Natural and Anthropogenic Determinants*. Dordrecht: Springer. pp. 55–71. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7890-0_4
- Khatri, A., Peerzada, M. H., Mohsin, M. & White, M. 2015. A review on developments in dyeing cotton fabrics with reactive dyes for reducing effluent pollution. *Journal of Cleaner Production* 87: 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.017>
- Kim, C.S., Subedi, L., Park, K.J., Kim, S.Y., Choi, S.U., Kim, K.H. & Lee, K.R. 2015. Salicin derivatives from *Salix glandulosa* and their biological activities. *Fitoterapia* 106: 147–152. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2015.08.013>
- Kiviranta, T. 2021. Lannoitteet ja viljat nousivat ennätyshintoihin vuonna 2021 – uusi vuosi alkaa maataloilla epävarmuudessa. *Maaseudun Tulevaisuus* 31.12.2021 s. 8.
- Kofman, P.D. 2012. Harvesting short rotation coppice willow. *Coford Connects, Harvesting and Transport* No. 29. 4 p.
- Kolodziej, H. 1988. [2',2']-(+)-Catechin-(+)-taxifolin from commercial willow bark: structure, bonding positions and oxidative cleavage. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions I*. pp. 219–226. DOI:10.1039/p19880000219

- Kolodziej, H. 1990. Oligomeric flavan-3-ols from medicinal willow bark. *Phytochemistry* 29(3): 955–960. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(90\)80054-K](https://doi.org/10.1016/0031-9422(90)80054-K)
- Konlechner C., Türktas, M., Langar, I., Vaculík, M., Wenzel, W.W., Puschenreiter, M. & Hauser, M.-T. 2013. Expression of zinc and cadmium responsive genes in leaves of willow (*Salix caprea* L.) genotypes with different accumulation characteristics. *Environmental Pollution* 178: 121–127.
- Korhonen, T., Hirvonen, P., Rämetsä, J. & Karjalainen, S. 2021. Turvetyöryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu 2021:24. 123 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-856-1>.
- Korkalo, P., Korpinen, R., Beuker, E., Sarjala, T., Hellström, J., Kaseva, J., Lassi, U. & Jyske, T. 2022. Clonal variation in the bark chemical properties of hybrid aspen: Potential for added value chemicals. *Molecules* 25: 4403; doi:10.3390/molecules25194403
- Košnář, Z., Mercl, F. & Tlustoš, P. 2020. Long-term willows phytoremediation treatment of soil contaminated by fly ash polycyclic aromatic hydrocarbons from straw combustion. *Environmental pollution* 264: 11478. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114787>
- Kowalczyk, Z. & Kwaśniewski, D. 2021. Environmental impact of the cultivation of energy willow in Poland. *Scientific Reports* 11: 4571. 15 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84120-0>
- Krauze-Baranowska, M., Pobłocka-Olech, L., Głód, D., Wiwart, M., Zieliński, J. & Migas, P. 2013. HPLC of flavanones and chalcones in different species and clones of *Salix*. *Acta Poloniae Pharmaceutica*, 70(1): 27–34.
- Krzyżaniak, M., Stolarski, M.J., Waliszewska, B., Szczukowski, S., Tworkowski, J., Załuski, D. & Śnieg, M. 2014. Willow biomass as feedstock for an integrated multi-product biorefinery *Industrial Crops and Products* 58: 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.033>
- Kubo, S., Hashida, K., Makino, R., Magara, K., Kenzo, T., Kato, A. & Aorigele. 2013. Chemical composition of desert willow (*Salix psammophila*) grown in the Kubuqi Desert, Inner Mongolia, China: bark extracts associated with environmental adaptability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61(50): 12226–12231. <https://doi.org/10.1021/jf4038634>
- Kumar, A., Jyske, T. & Möttönen, V. 2020. Properties of injection molded biocomposites reinforced with wood particles of short-rotation aspen and willow. *Polymers* 12: 257. doi:10.3390/polym12020257
- Kuusinen, M. 1996. Epiphyte flora and diversity on basal trunks of six old-growth forest tree species in southern and middle boreal Finland. *Lichenologist* 28: 443–463.
- Laakso, K. 2017. Perinteisiä parkitusmenetelmiä poronhahalle, turkikselle ja kalannahalle. Saamelaisalueen koulutuskeskus. 31 s.
- Land, M., Granéli, W., Grimvall, A., Hoffmann, C.C., Mitsch, W.J., Tonderski, K.S. & Verhoeven, J.T.A. 2016. How effective are created or restored freshwater wetlands for nitrogen and phosphorus removal? A systematic review. *Environmental Evidence*. 5(9).

- Landberg, T. & Greger, M. 1996. Differences in uptake and tolerance to heavy metals in *Salix* from unpolluted and polluted areas. *Applied Geochemistry* 11(1–2): 175–180. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(95\)00082-8](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00082-8)
- Larsen S.U., Jørgensen U., Kjeldsen, J.B. & Lærkea, P.E. 2016. Effect of fertilisation on biomass yield, ash and element uptake in SRC willow. *Biomass and Bioenergy* 86: 120–128.
- Larsen, S.U., Jørgensen, U. & Lærke, P.E. 2018. Biomass yield, nutrient concentration and nutrient uptake by SRC willow cultivars grown on different sites in Denmark. *Biomass and Bioenergy* 116: 161–170.
- Larsson, G. 1995. Nomenclatural remarks on the *Salix viminalis* group in Norden. *Nordic Journal of Botany* 15: 343–346.
- Larsson, S. (ed.) 2003. Short-rotation willow biomass plantations irrigated and fertilized with wastewaters. Results from a 4-year multidisciplinary field project in Sweden, France, Northern Ireland and Greece supported by the EU-FAIR Programme (FAIR5-CT97-3947). Final report.
- Laurila, M. (toim.) 2018. Kosteikkokasveista uusia elinkeinomahdollisuuksia. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 18/2018. 159 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-560-8>
- Lavola, A., Maukonen, M. & Julkunen-Tiitto, R. 2018. Variability in the composition of phenolic compounds in winter-dormant *Salix pyrolifolia* in relation to plant part and age. *Phytochemistry* 153: 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2018.05.021>
- Ledin, S. 1998. Environmental consequences when growing short rotation forests in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 15(1): 49–55.
- Lehtonen, A., Aro, L., Haakana, M., Haikarainen, S., Heikkinen, J., Huuskonen, S., Härkönen, K., Hökkä, H., Kekkonen, H., Koskela, T., Lehtonen, H., Luoranen, J., Mutanen, A., Nieminen, M., Ollila, P., Palosuo, T., Pohjanmies, T., Repo, A., Rikkinen, P., Rätty, M., Saarnio, S., Smolander, A., Soinne, H., Tolvanen, A., Tuomainen, T., Uotila, K., Viitala, E.-J., Virkajärvi, P., Wall, A. & Mäkipää, R. 2021. Maankäyttösektorin ilmastotoimenpiteet: Arvio päästö- vähennysmahdollisuuksista. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 65/2021. *Luonnonvarakeskus*, Helsinki. 121 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-275-9>
- Lehtonen, I., Pekkala, O. & Uusvaara, O. 1978. Tervalepän (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) ja raidan (*Salix caprea* L.) puu- ja massateknisiä ominaisuuksia. *Folia Forestalia* 344. 19 s.
- Lehtonen, H., Saarnio, S., Rantala, J., Luostarinen, S., Maanavilja, L., Heikkinen, J., Soini, K., Aakula, J., Jallinoja, M., Rasi, S. & Niemi, J. 2020. Maatalouden ilmastotiekartta – Tiekartta kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen Suomen maataloudessa. Maa- ja metsätaloustuottajain Keskusliitto MTK ry. Helsinki. Saatavissa: <https://www.mtk.fi/ilmastotiekartta>
- Lehtonen, E.-M. & Tikkanen, E. 1986. Turvetuhkan vaikutus maahan sekä vesipajun (*Salix cv. aquatica*) ravinnetalouteen ja kasvuun turpeentuotannosta vapautuneella suolla. Summary: Effect of peat ash on soil properties and growth of willow (*Salix cv. aquatica*) at an abandoned peat production area. Oulun yliopisto, Pohjois-Suomen tutkimuslaitos. C 69. 100 s.
- Lemus, R. & Lal, R. 2005. Bioenergy crops and carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24: 1–21. <https://doi.org/10.1080/07352680590910393>

- Lepistö, M. 1978. Pajun kuiva-ainetuotos kolmen vuoden kiertoajalla. Metsänjalostussäätiö. Tiedote 2(1978). 3 s.
- Lepistö, T. 2014. Luonnonkuitukomposiitit. Mikkelin ammattikorkeakoulu, Mikkeli 2014. A: Tutkimuksia ja raportteja – Research reports 89.
- Li, T., Chen, C., Brozena, A.H. et al. 2021. Developing fibrillated cellulose as a sustainable technological material. *Nature* 590: 47–56. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03167-7>
- Lindegaard, K.N., Parfitt, R.I., Donaldson, G., Hunter, T., Dawson, W.M., Forbes, E.G.A., Carter, M.M., Whinney C.C., Whinney J.E. & Larsson, S. 2001. Comparative trials of elite Swedish and UK biomass willow varieties. In: Bullard, M.J., Christian, D.G., Knight, J.D., Lainsbury, M.A. & Parker, S.R. (eds.). *Biomass and Energy Crops II*. 13 p. *Aspects of Applied Biology* 65:183–192.
- Lira, C. D., Barry, T. N., Pomroy, W. E., McWilliam, E. L., & Lopez-Villalobos, N. 2008. Willow (*Salix* spp.) fodder blocks for growth and sustainable management of internal parasites in grazing lambs. *Animal Feed Science and Technology*, 141(1–2): 61–81.
- Lohtander, T., Arola, S. & Laaksonen, P. 2020. Biomordanting willow bark dye on cellulosic materials. *Coloration Technology* 136: 3–14. <https://doi.org/10.1111/cote.12442>
- Lohtander, T., Grande, R., Österberg, M., Laaksonen, P. & Arola, S. 2021. Bioactive films from willow bark extract and nanocellulose double network hydrogels. *Frontiers in Chemical Engineering* 3: 708170. DOI: 10.3389/fceng.2021.708170
- Luke 2021a. Ravintotase 2019 ja ennakko 2020.
- Luke 2021b. Luke tilastotietokanta, kotieläinten määrä ely-keskuksittain.
- Lumme, I. & Kiukaanniemi, E. 1987. Nopeakasvuisten pajujen (*Salix* spp.) lyhytkiertoviljelystä ja rauduskoivun (*Betula pendula*) viljelystä turvetuotannosta poistuneella suolla Limingan Hirvinevalla. Summary: Short-rotation cultivation of fast-growing willows (*Salix* spp.) and plantations of *Betula pendula* in Hirvineva, a mire formerly used for peat production in Liminka, Finland. Oulun yliopisto, Pohjois-Suomen tutkimuslaitos. C 77. 48 s.
- Lumme, I., Tikkanen, E., Huusko, A. & Kiukaanniemi, E. 1984. Pajun lyhytkiertoviljelyn biologiasta ja kannattavuudesta turpeen tuotannosta poistuneella suolla Limingan Hirvinevalla. Oulun yliopisto, Pohjois-Suomen tutkimuslaitos C 54. 79 s.
- Lumme, I. & Törmälä, T. 1988. Selection of fast-growing willow (*Salix* spp.) clones for short-rotation forestry on mined peatlands in northern Finland. *Silva Fennica* 22(1): 67–88.
- Makkonen, O. 1975. Puiden lyhytkiertoviljelyn varhaishistoriaa. *Silva Fennica* 9(3): 233–240.
- Malinen, H., Finel, N., Tiitu, M., Vierikko, K., Tuhkanen, E.-M., Sinkkonen, A., Matila, A. & Lahti, E. 2020. Elämänmittainen lähivihreäpolku – Tietopaketti lähiluonnon hyvinvointivaikutuksista. Ympäristöministeriö ja Suomen ympäristökeskus. 102 s.
- Manian, P.A., Paul, R. & Bechtold, T. 2016. Metal mordanting in dyeing with natural colourants. *Coloration Technology* 132: 107–113. <https://doi.org/10.1111/cote.12199>
- Matthews, R.W. 2001. Modelling of energy and carbon budgets of wood fuel coppice systems. *Biomass and Bioenergy* 21: 1–19.

- Mattila, P & Joki-Tokola, E. 2003. Effect of treatment and application technique of cattle slurry on its utilization by ley: I. Slurry properties and ammonia volatilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65: 221–230.
- Meers, E., Vandecasteele, B., Ruttens, A., Vangronsveld, J. & Tack, F.M.G. 2007. Potential of five willow species (*Salix* spp.) for phytoextraction of heavy metals. *Environmental and Experimental Botany* 60: 57–68.
- Mirck J. & Volk, T.A. 2010. Response of three shrub willow varieties (*Salix* spp.) to storm water treatments with different concentrations of salts. *Bioresource Technology*. 101(10): 3484–3492. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.128. Epub 2010 Jan 21. PMID: 20096566.
- Mizuno, M., Kato, M., Hosoi, N., Iinuma, M., Tanaka, T., Kimura, A., Ohashi, H., Sakai, H. & Kajita, T. 1990. Phenolic compounds from *Salix sachalinensis*. *Heterocycles* 31: 1409–1412. DOI: 10.3987/COM-90-5425
- Mohan, D. & Pittman, C.U. Jr. 2007. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents – a critical review. *Journal of Hazardous Materials* 142: 1–53.
- Mohsin, M., Kuittinen, S., Salam, M.M.A., Peräniemi, S., Laine, S., Pulkkinen, P., Kaipainen, E., Vepsäläinen, J. & Pappinen, A. 2019. Chelate-assisted phytoextraction: Growth and eco-physiological responses by *Salix schwerinii* EL Wolf grown in artificially polluted soils. *Journal of Geochemical Exploration* 205, 106335. doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106335
- Mohsin, M., Kaipainen, E., Salam, M.M.A., Evstishenkov, N., Nawrot, N., Villa, A., Wojciechowska, E., Kuittinen, S. & Pappinen, A. 2021. Biomass production potential and phytoremediation of nitrogen and phosphorus by *Salix schwerinii* E.L. Wolf irrigated with processed municipal wastewater: A field trial. *Water*. Submitted.
- Mola-Yudego, P. 2010. Regional potential yields of short rotation willow plantations on agricultural land in Northern Europe. *Silva Fennica* 44(1): 63–76. <https://doi.org/10.14214/sf.163>
- Mola-Yudego, B. 2011. Predicting and mapping productivity of short rotation willow plantations in Sweden based on climatic data using a non-parametric method. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 875–881. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.02.008>.
- Mola-Yudego, P. & Aronsson, P. 2008. Yield models for commercial willow biomass plantations in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 32(9): 829–837. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.01.002>.
- Mola-Yudego, B. & Pelkonen, P. 2008. The effects of policy incentives in the adoption of willow short rotation coppice for bioenergy in Sweden. *Energy Policy* 36(8): 3062–3068. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.03.036>.
- Mola-Yudego, B. & González-Olabarria, J.R. 2010. Mapping the expansion and distribution of willow plantations for bioenergy in Sweden: Lessons to be learned about the spread of energy crops. *Biomass and Bioenergy* 34(4): 442–448. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.12.008>.
- Monteoliva, S., Area, M.C. & Felissia F.E. 2007. CMP pulps of willows for newsprint. I. Pulp evaluation. *Cellulose Chemistry and Technology* 41(4–6): 263–272.

- Mosseler, A., Zsuffa, L., Stoehr, M.U. & Kenney, W.A. 1988. Variation in biomass production, moisture content, and specific gravity in some North American willows (*Salix* L.). Canadian Journal of Forest Research 18: 1535–1540.
- Muola, A., Fuchs, B., Laihonon, M., Rainio, K., Heikkonen, L., Ruuskanen, S., Saikkonen, K. & Helander, M. 2021. Risk in the circular food economy: Glyphosate-based herbicide residues in manure fertilizers decrease crop yield. Science of the Total Environment 750: 141422. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141422>
- Muoviyhdistys ry 2021. Biopohjaiset ja biohajoavat muovit. <https://www.muoviyhdistys.fi/2020/03/03/biopohjaiset-ja-biohajoavat-muovit/> Viitattu 27.8.2021
- Müller, M., Klein, A.-M., Scherer-Lorenze, M., Nock, C.A. & Staab, M. 2018. Tree genetic diversity increases arthropod diversity in willow short rotation coppice. Biomass and Bioenergy 108: 338–344.
- Mäkiranta, P., Hytönen, J., Aro, L., Maljanen, M., Pihlatie, M., Potila, H., Shurpali, N., Laine, J., Lohila, A.-L., Martikainen, P.J. & Minkkinen, K. 2007. Soil greenhouse gas emissions from afforested organic soil croplands and cutaway peatlands. Boreal Environment Research 12: 159–175. <http://www.borenav.net/BER/pdfs/ber12/ber12-159.pdf>
- Naukkarinen, V. 2021. Kosteikkoviljelyn kasviopas. Baltic Sea Action Group. 1. painos.
- Niemi, A. 2014. Energiapajun viljely ja käyttö vesien puhdistuksessa - teknistaloudellinen tarkastelu. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta, Bio- ja ympäristötieteiden laitos. 64 s.
- Niinemets, Ü. & Valladares, F. 2006. Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. Ecological Monographs 76: 521–547. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2006\)076\[0521:TTSDAW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2006)076[0521:TTSDAW]2.0.CO;2)
- Nissen, L.M. & Lepp, N.W. 1997. Baseline concentrations of copper and zinc in shoot tissues of a range of *Salix* species. Biomass and Bioenergy 12: 115–120.
- Noletto-Dias, C., Ward, J.L., Bellisai, A., Lomax, C. & Beale, M.H. 2018. Salicin-7-sulfate: A new salicinoid from willow and implications for herbal medicine. Fitoterapia 127: 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2018.02.009>
- Nord-Larsen, T., Sevel, L. & Raulund-Rasmussen, K. 2015. Commercially grown short rotation coppice willow in Denmark: biomass production and factors affecting production. Bio-Energy Research 8: 325–339. DOI 10.1007/s12155-014-9517-6
- Nordberg, S. 1928. Vertaileva katsaus pajun viljelykseen ja sen edellytyksiin ulkomailla ja Suomessa. Silva Fennica 9: 1–63.
- Nurminen, N., Cerrone, D., Lehtonen, J., Parajuli, A., Roslund, M.I., Lönnrot, M., Ilonen, J., Toppari, J., Veijola, R., Knip, M., Rajaniemi, J., Laitinen, O.-H., Sinkkonen, A. & Hyöty, H. 2021. Land cover of early life environment modulates the risk of Type 1 Diabetes. Diabetes Care 2021 (May): dc201719. DOI: 10.2337/dc20-1719
- Näsi, M. & Pohjonen, V. 1981. Green fodder from energy forest farming. Maataloustieteellinen Aikakauskirja 53: 161–167.

- Olsson, R.T., Azizi Samir, M.A.S., Salazar-Alvarez, G., Belova, L., Ström, V., Berglund, L.A., Ikkala, O., Nogués, J. & Gedde, U. W. 2010. Making flexible magnetic aerogels and stiff magnetic nanopaper using cellulose nanofibrils as templates. *Nature Nanotechnology* 5: 584–588. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.155>
- Onkamo, H. 2016. Pajupuhdistamo kiinteistöjen jätevesiratkaisuna. Tampereen Ammattikorkeakoulu. LVI-tekniikka. 56 s.
- Pacaldo, R.S., Volk, T.A. & Briggs, R.D. 2013. Greenhouse gas potentials of shrub willow biomass crops based on below- and aboveground biomass inventory along a 19-year chronosequence. *BioEnergy Research* 6: 252–262. <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-012-9250-y>
- Palva, R. 2019. Konetyön kustannukset ja tilastolliset urakointihinnat. TTS:n julkaisuja 447. Työteho-seura ry. 16 s.
- Palva, R. 2021. Konetyön kustannukset ja tilastolliset urakointihinnat. TTS:n julkaisuja 457. Työteho-seura ry. 16 s.
- Parajuli, R., Knudsen, M.T., Djomo, S.N., Corona, A., Birkved, M. & Dalgaard, T. 2017. Environmental life cycle assessment of producing willow, alfalfa and straw from spring barley as feedstocks for bioenergy or biorefinery systems. *Science of the Total Environment* 586: 226–240. [10.1016/j.scitotenv.2017.01.207](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.207)
- Parajuli, A., Hui, N., Puhakka, R., Oikarinen, S., Grönroos, M., Selonen, V.A.O., Siter, N., Kramna, N., Roslund, M.I., Vari, H.K., Nurminen, N., Honkanen, H., Hintikka, J., Sarkkinen, H., Romantschuk, M., Kauppi, M., Valve, R., Činek, O., Laitinen, O-H., Rajaniemi, J., Hyöty, H. & Sinkkonen, A. 2020. Yard vegetation is associated with gut microbiota composition. *Science of the Total Environment* 15 Jan 2020: 136707. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.136707](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136707).
- Pat. WO2021181009A1. 2021. Recovery of high-value components from biomass. Luonnonvarakeskus. (Ilvesniemi H., Kitunen V., & Maunuksela J.). <https://patents.google.com/patent/WO2021181009A1/en?q=WO2021181009A1>
- Peacock, L., Herrick, S. & Harris, J. 2002. Interactions between the willow beetle *Phratora vulgatissima* and different genotypes of *Salix viminalis*. *Agricultural and Forest Entomology* 4: 71–79. <https://doi.org/10.1046/j.1461-9555.2001.00128.x>
- Pérez-Córdoba, L.J., Norton, I.T., Batchelor, H.K., Gkatzionis, K., Spyropoulos, F. & Sobral, P.J. 2018. Physico-chemical, antimicrobial and antioxidant properties of gelatin-chitosan based films loaded with nanoemulsions encapsulating active compounds. *Food Hydrocolloids* 79: 544–559. DOI: [10.1016/j.foodhyd.2017.12.012](https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.12.012)
- Perttu, K. 1999. Environmental and hygienic aspects of willow coppice in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 16: 291–297.
- Perttu, K. & Aronsson, P. 2000. Use and treatment of wastewater in vegetation filters of *Salix*. Final report; Utnyttjande och rening av avloppsvatten i vegetationsfilter av *Salix*. Swedish National Energy Administration. STEM-EO-00-8, Technical report, 8 p.
- Pesonen, J., Kuokkanen, T., Kaipainen, E., Koskela, J., Jerkku, I., Pappinen, A. & Villa, A. 2014. Chemical and physical properties of short rotation tree species. *European Journal of Wood and Wood Products* 72: 769–777. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0841-5>

- Piątczak, E., Dybowska, M., Płuciennik, E., Kośła, K., Kolniak-Ostek, J. & Kalinowska-Lis, U. 2020. Identification and accumulation of phenolic compounds in the leaves and bark of *Salix alba* (L.) and their biological potential. *Biomolecules* 10: 1391. <https://doi.org/10.3390/biom10101391>
- Pohjonen, V. 1974. Istutustiheyden vaikutus eräiden lyhytkiertoviljelyn puulajien ensimmäisen vuoden satoon ja pituuskasvuun. *Silva Fennica* 8(2): 115–127.
- Pohjonen, V. 1991. Selection of species and clones for biomass willow forestry in Finland. *Acta Forestalia Fennica* 221. 58 p.
- Pohjonen, V. 1995. Puun lyhytkiertoviljely pelloilla. Teoksessa: Hytönen, J. & Polet, K. (toim.). *Peltojen metsitysmenetelmät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 581: 180–211.
- Pohjonen, V. 2015. Biomassapajun lajit ja lajikkeet Suomessa. AB Arvohiili OY, Abahoy. Moniste 98 s.
- Pop, C., Vodnar, D., Ranga, F. & Socaciu, C. 2013. Comparative antibacterial activity of different plant extracts in relation to their bioactive molecules, as determined by LC-MS analysis. *Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Animal Science & Biotechnologies* 70(1).
- Puhakka, R., Rantala, O., Roslund, M.I., Laitinen, O.-H. & Sinkkonen, A. 2019. Greening daycare yards with biodiverse materials affords well-being, play and environmental relationships. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16 (16): 2948. DOI: 10.3390/ijerph16162948
- Pulford, I.D. & Dickinson, N.M. 2006. Phytoremediation technologies using tree. In: Prasad, M.N.W., Sajwan, K.S. & Naidu, R. (eds.). *Trace elements in Environment*. pp. 393–404.
- Pulford, I.D. & Watson, C. 2003. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees – a review. *Environment International* 29: 529–540.
- Punshon, T. & Dickinson, N. 1999. Heavy metal resistance and accumulation characters in willows. *International Journal of Phytoremediation* 1(4): 361–385.
- Qaseem, M.F., Shaheen, H. & Wu, A.M. 2021. Cell wall hemicellulose for sustainable industrial utilization. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 144: 110996, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110996>
- Quosdorf, S., Schuetz, A. & Kolodziej, H. 2017. Different inhibitory potencies of oseltamivir carboxylate, zanamivir, and several tannins on bacterial and viral neuraminidases as assessed in a cell-free fluorescence-based enzyme inhibition assay. *Molecules* 22(11): 1989. DOI: 10.3390/molecules22111989
- Rajala, T. 1987. Kuoripaju punontamateriaalina. Kuopion koti- ja taideteollisuusoppilaitos. Lopputyö. 93 s.
- Ramírez-Restrepo, C. A., Barry, T. N., Marriner, A., López-Villalobos, N., McWilliam, E. L., Lassey, K. R., & Clark, H. 2010. Effects of grazing willow fodder blocks upon methane production and blood composition in young sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 155(1): 33–43.

- Ramos, P., Moreirinha, C., Silva, S., Costa, E. M., Veiga, M., Coscueta, E., Santos, S., Almeida, A., Pintado, M.M., Freire, C., Silva, A. & Silvestre, A. 2019. The health-promoting potential of *Salix* spp. bark polar extracts: Key insights on phenolic composition and in vitro bioactivity and biocompatibility. *Antioxidants* 8(12): 609. <https://doi.org/10.3390/antiox8120609>
- Ramziia, S., Ma, H., Yao, Y., Wei, K. & Huang, Y. 2018. Enhanced antioxidant activity of fish gelatin–chitosan edible films incorporated with procyanidin. *Journal of Applied Polymer Science* 135(10): 45781. DOI: 10.1002/app.45781
- Rasa, K., Heikkinen, J., Hannula, M., Arstila, K., Kulju, S. & Hyväluoma, J. 2018. How and why does willow biochar increase a clay soil water retention capacity. *Biomass and Bioenergy* 119: 346–353. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.004>
- Rasa, K., Viherä-Aarnio, A., Rytönen, P., Hyväluoma, J., Kaseva, J., Suhonen, H. & Jyske, T. 2021. Quantitative analysis of feedstock structural properties can help to produce willow biochar with homogenous pore system. *Industrial Crops and Products* 166(2021): 113475. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113475>
- Rather, L.J., Akhter, S., Padder, R.A., Hassan, Q.P., Hussain, M., Khan, M.A. & Mohammad, F. 2017. Colorful and semi durable antioxidant finish of woolen yarn with tannin rich extract of *Acacia nilotica* natural dye. *Dyes and Pigments* 139: 812–819. <https://doi.org/10.1016/J.DYEPIG.2017.01.018>
- Rather, L.J., Shahid-UI-Islam, Shabbir, M., Bukhari, M.N., Shahid, M., Khan, M.A. & Mohammad, F. 2016. Ecological dyeing of Woolen yarn with *Adhatoda vasica* natural dye in the presence of biomordants as an alternative copartner to metal mordants. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 4: 3041–3049. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2016.06.019>
- Reeves, R.D., Baker, A.J.M., Jaffre, T., Erskine, P.D., Echevarria, G. & van der Ent, A. 2017. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. *New Phytologist* 218: 407–411.
- Reinikainen, O., Hytönen, J. & Issakainen, J. 2012. Biomass energy production methods on cut-away peatland: two-year results. In: *Bioenergy from forest 2012. Book of Proceedings*, p. 248–253.
- Riddell-Black, D. 1993. A review of the potential for the use of trees in the rehabilitation of contaminated land. WRC Report CO 3467. Water Research Centre, Medmenham.
- Roslund, M.I., Rantala, S., Oikarinen, S., Puhakka, R., Hui, N., Rantalainen, A.-L., Laitinen, O.-H., Hyöty, H. & Sinkkonen, A. 2019. Endocrine disruption and commensal bacteria alteration associated with gaseous and soil PAH contamination among daycare children. *Environment International* 130 (9): 104894. DOI: 10.1016/j.envint.2019.06.004
- Roslund, M.I., Puhakka, R., Grönroos, M., Nurminen, N., Oikarinen, S., Gazali, A.M., Činek, O., Kramná, L., Siter, N., Vari, H.J., Soinen, L., Parajuli, A., Rajaniemi, J., Kinnunen, T., Laitinen, O.-H., Hyöty, H. & Sinkkonen, A. 2020. Biodiversity intervention enhances immune regulation and health-associated commensal microbiota among daycare children. *Science Advances* 6 (42): eaba2578. DOI: 10.1126/sciadv.aba 2578

- Roslund, M.I., Puhakka, R., Soininen, L., Oikarinen, S., Grönroos, M., Nurminen, N., Kramna, L., Činek, O., Jumpponen, A., Rajaniemi, J., Laitinen, O.H., Hyöty, H. & Sinkkonen, A. 2021. Long-term biodiversity intervention shapes health-associated commensal microbiota among urban day-care children. *Environment International* 157 (December 2021): 106811. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106811
- Rossi, P. 1982. Hirvien aiheuttamat satomenetykset pajuviiljelmällä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 76. 12 s.
- Roy, R., Labelle, S. & Mehta, P. 2005. Phytoremediation of heavy metal and PAH-contaminated brownfield sites. *Plant and Soil* 272: 277–290.
- Royal Society of Chemistry. 2021. Polymers in liquid formulations. Technical report: A landscape view of the global PLFs market. <https://www.rsc.org/globalassets/22-new-perspectives/sustainability/liquid-polymers/rsc-polymer-liquid-formulations-technical-report.pdf>
- Ruokavirasto. 2021a. Viljelijätukien hakuopas 2021. https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/viljelijat/opaat/hakuopaat/koko_viljelijatukien_hakuopas_2021.pdf. [Viitattu 9.6.2021].
- Ruokavirasto. 2021b. Täydentävien ehtojen opas 2021.
- Rytter, R.-M. 2001. Biomass production and allocation, including fine-root turnover, and annual N uptake in lysimeter-grown basket willows. *Forest Ecology and Management* 140: 177–192.
- Rytter, R.-M. 2012. The potential of willow and poplar plantations as carbon sinks in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 36: 86–95. doi:10.1016/j.biombioe.2011.10.012
- Rytter, R.-M. & Hansson, A.-C. 1996. Seasonal amount, growth and depth distribution of fine roots in an irrigated and fertilized *Salix viminalis* L. plantation. *Biomass and Bioenergy* 11: 129–137. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(96\)00023-2](https://doi.org/10.1016/0961-9534(96)00023-2)
- Rytter, R.-M., 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.10.009>
- Räisänen, R., Primetta, A. & Niinimäki, K. 2015. Luonnonväriaineet. Helsinki: Maahenki Oy. Toinen, korjattu painos. 288 s. ISBN 978-952-301-128-1.
- Räisänen, R., Primetta, A., Nikunen, S., Honkalampi, U., Nygren, H., Pihlava, J.M., Berghe, I.V. & Wright, A.V. 2020. Examining safety of biocolourants from fungal and plant sources—examples from *Cortinarius* and *Tapinella*, *Salix* and *Tanacetum* spp. and dyed woollen fabrics. *Antibiotics* 9(5): 266. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9050266>
- Saarsalmi, A. 1984. Vesipajun biomassan tuotos sekä ravinteiden ja veden käyttö. *Folia Forestalia* 602. 29 s.

- Salam, M.M.A., Kaipainen, E., Mohsin, M., Villa, A., Kuittinen, S., Pulkkinen, P., Pelkonen, P., Mehtätalo, L. & Pappinen, A. 2016. Effects of contaminated soil on the growth performance of young *Salix* (*Salix schwerinii* EL Wolf) and the potential for phytoremediation of heavy metals. *Journal of Environmental Management* 183: 467–477. doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.082
- Salam, M.M.A., Mohsin, M., Pulkkinen, P., Pelkonen, P. & Pappinen, A. 2019a. Effects of soil amendments on the growth response and phytoextraction capability of a willow variety (*S. viminalis* × *S. schwerinii* × *S. dasyclados*) grown in contaminated soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 171: 753–770.
- Salam M.M.A., Mohsin, M., Kaipainen, E., Villa, A., Kuittinen, S., Pulkkinen, P., Pelkonen, P. & Pappinen, A. 2019b. Biomass growth variation and phytoextraction potential of four *Salix* varieties grown in contaminated soil amended with lime and wood ash. *International Journal of Phytoremediation* 21: 1329–1340. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1633257>
- Salam, M.M.A., Mohsin, M., Rasheed, F., Ramzan, M., Zafar, Z. & Pulkkinen, P. 2020. Assessment of European and hybrid aspen clones efficiency based on height growth and removal percentage of petroleum hydrocarbons – a field trial. *Environmental Science and Pollution Research* 27: 45555–45567.
- Sandberg, D. 2019. Lövträ i snickerier och möbler. In: Thörnqvist, T. (red.) *Quercus – Eken och andra lövträd. Ekfrämjandet 75 år 1944–2019. Ekfrämjandet, 240 s. ISBN: 9789151935539*
- Sander, M.L. & Ericsson, T. 1998. Vertical distributions of plant nutrients and heavy metals in *Salix viminalis* stems and their implications for sampling. *Biomass and Bioenergy* 14: 57–66.
- Saracila, M., Tabuc, C., Panaite, T.D., Papuc, C.P., Olteanu, M. & Criste, R.D. 2018. Effect of the dietary willow bark extract (*Salix alba*) on the caecal microbial population of broilers (14-28 days) reared at 32°C. *Agriculture for Life, Life for Agriculture Conference Proceedings* 1(1): 155–161. <https://doi.org/10.2478/alife-2018-0023>
- Sartori, F., Lal, R., Ebinger, M.H. & Parrish, D.J. 2006. Potential soil carbon sequestration and CO₂ offset by dedicated energy crops in the USA. *Critical Reviews in Plant Sciences* 25(5): 441–472. <https://doi.org/10.1080/07352680600961021>
- Satyanarayana, K.G., Arizaga, G.G.C. & Wypych, F. 2009. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers – an overview. *Progress in Polymer Science* 34: 982–1021. ISSN 0079-6700, <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.12.002>.
- Schmid, B., Kötter, I. & Heide, L. 2001. Pharmacokinetics of salicin after oral administration of a standardised willow bark extract. *European Journal of Clinical Pharmacology* 57: 387–391. <https://doi.org/10.1007/S002280100325>
- Seiskari, P. 1956. Hirven, metsäjäniksen ja riekon suosimista pajulajeista. *Suomen Riista* 10: 7–17.
- Sennerby-Forsse, L. 1985. Clonal variation of wood specific gravity, moisture content and stem bark percentage in 1-year-old shoots of 20 fast-growing *Salix* clones. *Canadian Journal of Forest Research* 15: 531–534.

- Sennerby-Forsse, L. 1989. Wood structure and quality in natural stands of *Salix caprea* L. and *Salix pentandra* L. *Studia Forestalia Suecica* 182. 17 s.
- Sevel, L., Nord-Larsen, T. & Raulund-Rasmussen, K. 2012. Biomass production of four willow clones grown as short rotation coppice on two soil types in Denmark. *Biomass and Bioenergy* 46: 664–672. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.030>
- Sevel, L., Nord-Larsen, T., Ingerslev, M., Jørgensen U. & Raulund-Rasmussen K. 2014a. Fertilization of SRC willow, I: Biomass production response. *BioEnergy Research*. 7: 319–328. <https://doi.org/10.1007/s12155-013-9371-y>
- Sevel, L., Ingerslev, M., Nord-Larsen, T., Jørgensen, U., Holm, P., Schelde, K. Raulund-Rasmussen, K. 2014b. Fertilization of SRC willow, II: Leaching and element balances. *BioEnergy Research* 7: 338–352. <https://doi.org/10.1007/s12155-013-9370-z>
- Shahid, M., Shahid-UI-Islam & Mohammad, F. 2013. Recent advancements in natural dye applications: A review. *Journal of Cleaner Production* 53: 310–331. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.031>
- Shara, M. & Stohs, S.J. 2015. Efficacy and safety of white willow bark (*Salix alba*) extracts. *Phytotherapy Research* 29(8): 1112–1116. doi: 10.1002/ptr.5377.
- Sihvonen, J., Leinonen, A. & Villa, A. 2013. Pajun korjuu, varastointi ja toimitus laitokselle – tehtäväraportti. Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projekti, VTT. 81 s.
- Siipola, V., Tamminen, T., Källi, A., Lahti, R., Romar, H., Rasa, K., Keskinen, R., Hyväluoma, J., Hannula, M. & Wikberg, H. 2018. Effects of biomass type, carbonization process, and activation method on the properties of bio-based activated carbons. *BioResources* 13: 5976–6002. <https://doi.org/10.15376/biores.13.3.5976-6002>.
- Sillanpää, P. 2007. Öljyhiilivedyillä saastuneen maan puhdistaminen puiden avulla. Pirkanmaan Ympäristökeskus. Tampere 2007, 91 s.
- Silvan, N. & Hytönen, J. 2016. Impact of ash-fertilization and soil preparation on soil respiration and vegetation colonization on cutaway peatlands. *American Journal of Climate Change* 5: 178–192. <http://www.scirp.org/journal/ajcc> <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2016.52017>
- Singh, R., Jain, A., Panwar, S., Gupta, D. & Khare, S. K. 2005. Antimicrobial activity of some natural dyes. *Dyes and Pigments* 66: 99–102. <https://doi.org/10.1016/J.DYEPIG.2004.09.005>
- Soimakallio, S., Sankelo, P., Kopsakangas-Savolainen, M., Sederholm, C., Auvinen, K., Heinonen, T., Johansson, A., Judl, J., Karhinen, S., Lehtoranta, S., Räsänen, S. & Savolainen, H. 2020. Tekninen raportti: Turpeen rooli ja sen käytöstä luopumisen vaikutukset Suomessa. Sitra. 182 s. <https://media.sitra.fi/2020/06/31150012/turpeen-rooli-ja-sen-kaytosta-luopumisen-vaikutukset-suomessa-tekninen-raportti.pdf> (haettu 19.8.2021).
- Soinne, H., Keskinen, R., Heikkinen, J., Hyväluoma, J., Uusitalo, R., Peltoniemi, K., Velmala, S., Pennanen, T., Fritze, H., Kaseva, J., Hannula, M. & Rasa, K. 2020. Are there environmental or agricultural benefits in using forest residue biochar in boreal agricultural clay soil? *Science of the Total Environment*. 731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138955>.

- Solarte-Toro, J.C., Rueda-duran, C.A., Ortiz-sanchez, M. & Cardona, C. 2021. A comprehensive review on the economic assessment of biorefineries: The first step towards sustainable biomass conversion. *Bioresource Technology Reports* 15 Article 100776. 10.1016/j.biteb.2021.100776
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E. & Isambert, A. 2006. Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101: 87–96. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.87>
- Stott, K. 1984. Improving the biomass potential of willow by selection and breeding. In: Perttu, K. (ed.) *Ecology and management of forest biomass production systems*. Department of Ecological & Environmental Research, Swedish University of Agricultural Sciences, Reports 15: 233–260 (viitattu julkaisussa: Pohjonen 1991)
- Sulima, P., Krauze-Baranowska, M. & Przyborowski, J. A. 2017. Variations in the chemical composition and content of salicylic glycosides in the bark of *Salix purpurea* from natural locations and their significance for breeding. *Fitoterapia* 118: 118–125. <https://doi.org/10.1016/J.FITOTE.2017.03.005>
- Suomen biotalousstrategia 2014. https://www.biotalous.fi/wp-content/uploads/2015/01/Suomen_biotalousstrategia_2014.pdf
- Suomen metsäkeskus. 2020. Pellonmetsityshankkeiden pinta-alat vuosina 2010–2019. Julkaisematon aineisto.
- Suuronen, J.-P. & Jyske, T. 2019. Noninvasive investigation of phloem structure by 3D synchrotron X-ray microtomography. In: Johannes, Liesche (ed.), *Phloem – Methods and Protocols*. Humana, New York, NY. p. 37–54. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9562-2_4.
- Syverud, K. & Stenius, P. 2009. Strength and barrier properties of MFC films. *Cellulose* 16: 75–85. <https://doi.org/10.1007/s10570-008-9244-2>
- Tahvanainen, L. 1995. Pajun viljelyn perusteet. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta. *Silva Carelica* 30, 86 s. ISBN 951-708-308-4.
- Tahvanainen, J., Helle, E., Julkunen-Tiitto, R. & Lavola, A. 1985. Phenolic compounds of willow bark as deterrents against feeding by mountain hare. *Oecologia* 65: 319–323.
- Tahvanainen, L. & Rytönen, V.-M. 1999. Biomass production of *Salix viminalis* in southern Finland and the effect of soil properties and climate conditions on its production and survival. *Biomass and Bioenergy* 16: 103–117.
- Talbot, R.J., Etherington, J.R. & Bryant, J.A. 1987. Comparative studies of plant growth and distribution in relation to waterlogging. XIL Growth, photosynthetic capacity and metal ion uptake in *Salix caprea* and *S. cinerea* ssp. *oleifolia*. *New Phytologist* 105: 563–574.
- Tampereen kaupunki. 2020. Puulajikokeilla etsitään uusia, ilmastonmuutokseen sopeutuvia kaupunkipuulajeja. Nettisivusto. https://www.tampere.fi/tampereen-kaupunki/ajankoh-taista/tiedotteet/2020/11/24112020_3.html Julkaistu 24.11.2020, viitattu 24.9.2021.
- Tangahu, B.V., Rozaimah, S., Abdullah, S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N. & Mukhlisin, M. 2011. A Review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering* Volume 2011, Article ID 939161, 31 p. doi:10.1155/2011/939161.

- Tapio, E. 1965. Pajunviljely ja sen mahdollisuudet Suomessa. Konekirjoite Helsingin yliopiston kasvinviljelytieteen laitoksella. 109 s.
- Tawfeek, N., Mahmoud, M.F., Hamdan, D.I., Sobeh, M., Farrag, N., Wink, M. & El-Shazly, A.M. 2021. Phytochemistry, pharmacology and medicinal uses of plants of the genus *Salix*: An updated review. *Frontiers in Pharmacology* 12: 593856. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.593856>
- Tienaho, J., Reshamwala, D., Sarjala, T., Kilpeläinen, P., Liimatainen, J., Dou, J., Viherä-Aarnio, A., Linnakoski, R., Marjomäki, V. & Jyske, T. 2021. *Salix* spp. bark hot water extracts show antiviral, antibacterial, and antioxidant activities – the bioactive properties of 16 clones. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.797939>
- Tilastokeskus. 2021a. Rahanarvomuuunnin. <https://www.stat.fi/tup/laskurit/rahanarvonmuunnin.html>.
- Tilastokeskus. 2021b. Energian hinnat [verkkajulkaisu]. ISSN=1799-7984. Helsinki. <http://www.stat.fi/til/ehi/meta.html>. [Viitattu 5.1.2022].
- Tilastokeskus, 2021c. National Inventory report. https://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/fi_nir_un_2019_2021_04_14.pdf
- Toivonen, R. & Tahvanainen, L. 1998. Profitability of willow cultivation for energy production in Finland. *Biomass and Bioenergy* 15(1): 27-37. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)10056-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)10056-3).
- Tolonen, A. 2021. No more plastic wrap? Students create novel biobased packaging for cucumbers. Aalto University News. Viitattu 18.10.2021: <https://www.aalto.fi/en/news/no-more-plastic-wrap-students-create-novel-biobased-packaging-for-cucumbers>
- Toman, R., Karácsonyi, Š. & Kubačková, M. 1975. Studies on the pectin present in the bark of white willow (*Salix alba* L.): Fractionation and acidic depolymerization of the water-soluble pectin. *Carbohydrate Research* 43(1): 111–116. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)83977-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)83977-4)
- Toome, M., Heinsoo, K. & Luik, A. 2006. Abundance of willow rust (*Melampsora* sp.) on different willow clones in Estonian energy forest plantations. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Biology and Ecology* 55(4): 308–317.
- Traunfeld, J.H. & Clement, D.L. 2001. Lead in garden soils. Home and Garden, Maryland Cooperative Extension, University of Maryland. <http://www.hgic.umd.edu/media/documents/hg18.pdf>.
- Tuhkanen, E.-M. 2015. Monimuotoista ja kestävää liikennevihreää. *Tie & Liikenne* 85(3): 4–7.
- Tuhkanen, E.-M. 2016. Matalia, kestäviä pensaita liikenneympäristöön. *Puutarha & kauppa* 20(7): 22–23.
- Turun kaupunki. 2021. Tiedote 18.6.2021. <https://www.epressi.com/tiedotteet/kaupungit-jakunnat/turku-haluaa-olla-suomen-suurin-kaupunkipuuarboretum.html>. Viitattu 20.9.2021.

- Turunen, M., Hyväluoma, J., Heikkinen, J., Keskinen, R., Kaseva, J., Hannula, M. & Rasa, K. 2020. Quantifying the pore structure of different biochars and their impacts on the water retention properties of *Sphagnum* moss growing media. *Biosystems Engineering*. 191: 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.01.006>
- Uranga, J., Puertas, A.I., Etxabide, A., Dueñas, M.T., Guerrero, P. & De La Caba, K. 2019. Citric acid-incorporated fish gelatin/chitosan composite films. *Food Hydrocolloids* 86: 95–103. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.02.018
- Usmani, Z., Sharma, M., Awasthi, A.K., Lukk, T., Tuohy, M.G., Gong, L., Nguyen-Tri, P., Goddard, A.D., Bill, R.M., Nayak, S.C. & Gupta, V.K. 2021. Lignocellulosic biorefineries: the current state of challenges and strategies for efficient commercialization. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 148. Article 111258. 10.1016/j.rser.2021.111258
- Vallinkoski, V.-M., Hassinen, V. & Servomaa, K. 2007. Hybridihaapa metalleilla pilaantuneen alueen kasvikunnostuksessa. Pohjois-Savon Ympäristökeskuksen Raportteja 2/2007.
- Valtioneuvoston asetus 8.1.2015/5 maatalouden tukien tukialueista ja niiden saaristoksi luettavista osa-alueista. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20150005>. [Viitattu 8.9.2021].
- Vanbeveren, S.P.P., Schweier, J., Berhongaray, G. & Ceulemans, R. 2014. Operational short rotation woody crop plantations: Manual or mechanised harvesting? *Biomass and Bioenergy* 72: 8–18.
- Vanbeveren, S.P.P., Spinelli, R., Eisenbies, M., Schweier, J., Mola-Yudego, B., Magagnotti, N., Acuna, M., Dimitriou, I. & Ceulemans, R. 2017. Mechanised harvesting of short-rotation coppices. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 76: 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.059>.
- Vanbeveren, S.P.P. & Ceulemans, R. 2019. Biodiversity in short-rotation coppice. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 111: 34–43.
- Vankar, P.S. 2000. Chemistry of natural dyes. *Resonance* 5: 73–80. <https://doi.org/10.1007/bf02836844>
- Vapo Oy. 2021. Kuiviketurve irtona. <https://kauppa.vapo.fi/tuotteet/irtokuivike/>. Viitattu 8.11.2021.
- Veijalainen, N., Jakkila, J., Nurmi, T., Vehviläinen, B., Marttunen, M. & Aaltonen, J. 2012. Suomen vesivarat ja ilmastonmuutos – vaikutukset ja muutoksiin sopeutuminen. WaterAdapt-projektin loppuraportti (Suomen ympäristökeskus, 2012) Suomen ympäristö 16/2012.
- Vervaeke, P., Luysaert, S., Mertens, J., Meers, E., Tack, F.M.G. & Lust, N. 2003. Phytoremediation prospects of willow stands on contaminated sediment: a field trial. *Environmental Pollution* 126: 275–282. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00189-1)
- Verwijst, T., Elowson, S., Li, X. & Leng, G. 1996. Production losses due to a summer frost in a *Salix viminalis* short-rotation forest in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11(1–4): 104–110. <https://doi.org/10.1080/02827589609382917>
- Viherä-Aarnio, A. 1987. Lyhytkiertoviljelmillä kasvatettavien pajujen (*Salix* spp. L.) risteytysjalostuksen tuloksia. Pro gradu -työ. Helsingin yliopisto, kasvinjalostustieteen laitos. 93 s. + liitteet.

- Viherä-Aarnio, A. 1988. Willow breeding in the Finnish Forest Research Institute. International Energy Agency, Proceedings from Willow Breeding Symposium, Uppsala August 31–September 1, 1987. Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Forest Genetics, Research Notes 41:35–39.
- Viherä-Aarnio, A. 1989. Pajut jalostuksen kohteena. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 328: 77–86.
- Viherä-Aarnio, A. & Saarsalmi, A. 1994. Growth and nutrition of willow clones. *Silva Fennica* 28(3): 177–188.
- Viherä-Aarnio, A. & Hytönen, J. 2020a. Humboldtinpaju Argentiinassa – uhkat ja geneettinen suojele. *Sorbifolia* 51(1): 3–11.
- Viherä-Aarnio, A. & Hytönen, J. 2020b. Pajumetsätaloutta Argentiinassa. *Sorbifolia* 51(2): 78–87.
- Viholainen, I. 2017. Pajun viljely ja salaojitus – katsaus kirjallisuuteen. Luonnonhoidon koulutus LUOKO ry. <https://www.salaojayhdistys.fi/wp-content/uploads/2017/03/Pajun-viljely-ja-salaojitus.pdf>.
- Välimaa, A.L., Mäkinen, S., Mattila, P., Marnila, P., Pihlanto, A., Mäki, M., & Hiidenhovi, J. 2019. Fish and fish side streams are valuable sources of high-value components. *Food Quality and Safety* 3(4): 209–226. DOI: 10.1093/fqsafe/fyz024
- Väre, H. 2022. Vannepajun tieteellisestä nimestä. Käsikirjoitus.
- Väre, H., Saarinen, J., Kurtto, A. & Hämet-Ahti, L. 2021. Suomen puu- ja pensaskasvio. Dendrologian Seura, Helsinki. 552 s. ISBN 978-951-96557-4-1.
- Wang, G., Li, Q., Gao, X. & Wang, X.C. 2019. Sawdust-derived biochar much mitigates VFAs accumulation and improves microbial activities to enhance methane production in thermophilic anaerobic digestion. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 7: 2141–2150. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04789>.
- Wang, G., Zhang, Q., Du, W., Aia, F., Yin, Y., Jia, R. & Guo, H. 2021. Microbial communities in the rhizosphere of different willow genotypes affect phytoremediation potential in Cd contaminated soil. *Science of The Total Environment* 769. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145224>
- Ward, J.L., Wu, Y., Harflett, C., Onafuye, H., Corol, D., Lomax, C., Macalpine, W.J., Cinatl, J., Wass, M., Michaelis, M. & Beale, M.H. 2020. Miyabeacin: A new cyclodimer presents a potential role for willow in cancer therapy. *Scientific Reports* 10: 6477. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63349-1>
- Watson, C., Pulford, I.D. & Riddell-Black, D. 2003. Screening of willow species for resistance to heavy metals: Comparison of performance in a hydroponics system and field trials. *International Journal of Phytoremediation* 5(4): 351–365. DOI: 10.1080/15226510309359042
- Werdin, J., Fletcher, T.D., Rayner, J.P., Williams, N.S.G. & Farrell, C. 2020. Biochar made from low density wood has greater plant available water than biochar from high density wood. *Science of the Total Environment* 705: 135856. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135856>.

- Wiesneth, S., Petereit, F. & Jürgenliemk, G. 2015. *Salix daphnoides*: A Screening for Oligomeric and Polymeric Proanthocyanidins. *Molecules* 20(8): 13764–13779. <https://doi.org/10.3390/molecules200813764>
- Whittaker, C. Yates, N.E., Powers, S.J., Misselbrook, T. & Shield, I. 2018. Dry matter losses and quality changes during short rotation coppice willow storage in chip or rod form. *Biomass and Bioenergy* 112: 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.005>.
- Wilkinson, A.G. 1999. Poplars and willows for soil erosion control in New Zealand. *Biomass and Bioenergy* 16: 263–274.
- Xiong, S. & Finell, M. 2009. Willow and hemp in Sweden. In: Lötjönen, T (ed.). *Energy from field energy crops - a handbook for energy producers*. Jyväskylä Innovation Oy & MTT Agri-food Research Finland. p. 24–28.
- Xiong, X., Yu, I.K.M., Cao, L., Tsang, D.C.W., Zhang, S. & Ok, Y.S. 2017. A review of biochar catalyst for chemical synthesis, biofuel production and pollution control. *Bioresource Technology* 246: 254–270. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.163>.
- Zaiter, A., Becker, L., Petit, J., Zimmer, D., Karam, M.-C., Baudelaire, É., Scher, J. & Dicko, A. 2016. Antioxidant and antiacetylcholinesterase activities of different granulometric classes of *Salix alba* (L.) bark powders. *Powder Technology* 301: 649–656. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.07.014>
- Zouboulis, A. & Tolkou A. 2015. Effect of climate change in wastewater treatment plants: reviewing the problems and solutions. In: Shrestha S., Anal A., Salam P. & van der Valk, M. (eds.). *Managing water resources under climate uncertainty*. Springer Water, Switzerland.
- Åhman, I. & Larsson, S. 1994. Genetic improvement of willow (*Salix*) as a source of bioenergy. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*. Supplement No. 18: 47–56.

Liitteet

Liite 1

Pajuntuotannon kannattavuuslaskelmien oletukset

Pajuntuotannon kannattavuuden mittarina käytettiin investoinnin nettonykyarvoa (NNA), jolla tarkoitetaan tulo- ja menovirtojen nykyarvon erotusta (Copeland & Weston 1988). Tuotantokustannuksiin luettiin viljelmän perustamisen, sen hoidon ja lopettamisen kustannukset sekä polttihakkeen tai tuoreen pajuhakkeen tuotantokustannukset viljelmältä käyttöpaikalle. Lisäksi laskettiin pajuhakkeen mahdollista biojalostamo-, kuivike- ym. käyttöä ajatellen viljelmän elinkaaren (19–20 vuotta) aikaiset keskimääräiset tuotantokustannukset kuivamassatonnia kohti sekä kannattavan tuotannon edellyttämät tuoreen pajuhakkeen vähimmäishinnat käyttöpaikalla.

Pajuntuotannon kannattavuuslaskelmat tehtiin 0–5 %:n korkokannoilla erikseen maatalousmaalle ja turpeennostosta vapautuneille suonpohjille. Kivennäis- ja turvemaapeltojen toimenpiteet ja biomassatuotokset oletettiin samanlaisiksi, koska tutkimusten mukaan hyvään lopputulokseen on mahdollisuus päästä molemmilla kasvupaikoilla. Laskelmissa oletettiin pajuviiljelmän perustamisen lähtötilanteeksi hyväkasvuinen peltomaa, joka ei tarvitse peruskunnostusta. Pajukasvusto korjattiin kolmen vuoden välein yhteensä kuusi kertaa. Vuotuiseksi kuivamassatuotokseksi oletettiin 7–10 tn/ha, vaikka tulokset käytännön pajuviiljelmillä ovat pääsääntöisesti olleet heikompia (esim. Mola-Yudego & Aronsson 2008). Valittu alaraja perustuu Mola-Yudegon (2010) arvioon, jonka mukaan pajun vuotuinen kuivamassatuotos voi Suomessa ihanteellisissa olosuhteissa olla maatalousmaalla keskimäärin 6,8 tn/ha. Pajulohkon pinta-alaksi oletettiin 10 ha, jota pidetään keskitetyn viljelmän vähimmäispinta-alana (Carbons Finland Oy 2021).

Toimenpiteiden ajoitus sekä hehtaarikohtaiset energiapajun tuotantokustannukset on esitetty taulukossa 1. Suurempi kosteus lisäsi tuoreena käytettävän pajuhakkeen kuljetuskustannuksia noin kahdella eurolla kuivatonna kohti. Polttihakkeesta saadut diskonttaamattomat myyntitulot kiertoaikaa (3 v) kohti vaihtelivat välillä 1 863–3993 €/ha pajun biomassatuotoksesta ja hakkeen hinnasta (20, 25 tai 30 €/MWh) riippuen. Myös maataloustuet huomioon otettava esimerkkilaskelma tehtiin C2-tukialueelle (Valtioneuvoston asetus 8.1.2015/5), jossa energiapajun viljelyyn sai perus- ja viherryttämisen sekä yleistä hehtaaritukea yhteensä 180 €/ha vuonna 2021 (Ruokavirasto 2021). Laskelmissa oletettiin, että vuosittain maksettava tuki jatkuu samantasoisena viljelmän koko elinkaaren ajan, eikä tukioikeuksia tarvitse ostaa markkinoilta. Myöskään maanvuokria tai maanhankintaan liittyviä pääomakustannuksia ei otettu huomioon. Pajun viljely lisää salaojien tukkeutumisen riskiä (Viholainen 2017), mutta mahdollisia salaojien huuhtelu- tai uusimiskustannuksia ei sisällytetty laskelmiin.

Pajunkasvatuksen tuotantopanosten hinnat selvitettiin toukokuussa 2021 niitä myyviltiltä yrityksiltä tai julkisista lähteistä, ja tilastoidut kustannukset deflatoitiin saman ajankohdan kustannustasoon kuluttajahintaindeksin avulla (Tilastokeskus 2021a). Maatalousurakoinnin kustannuksiin luettiin tuoreimpien julkaistujen yksikkökustannusten (Palva 2021) lisäksi koneiden siirrot (Palva 2019), joiden oletettiin kestävän kullakin kerralla yhteensä tunnin verran 10 ha:n viljelmää kohti.

Lannoitteeksi valittiin ne tuotteet, joiden ravinesuhteiden ja ravinteiden liukoisuuden katsottiin vastaavan parhaiten pajun vaatimuksia pelloilla ja suonpohjilla (ks. luku 4.3.2). Lisäksi pelloille laskettiin vaihtoehto, jossa kaupallisten lannoitteiden asemesta käytettiin nautatiloilta

saatavaa ilmaista lietelantaa. Tällöin ainoastaan lietteen kuljetuksen ja levityksen kustannukset sisällytettiin laskelmiin. Lietteiden kuljetusmatkaksi oletettiin 10 km, koska pajunviljelyyn ohjautuu todennäköisesti kaukana tilakeskuksesta sijaitsevia peltolohkoja. Nitraattidirektiivi (Valtioneuvoston asetus 1250/2014) rajoittaa viljelmälle vuoden aikana levitettävän, koostumukseltaan tyyppillisen lietelannan (N 2,8 kg/m³, josta liukoinen N 1,7 kg/m³; P 0,5 kg/m³; K 2,8 kg/m³; Eurofins 2021) enimmäismääräksi 61 m³/ha. Tämä lietemäärä ei todennäköisesti riitä täyttämään pajun ravinnetarvetta, mutta vuosittainen koneellinen lannoitus ei ole mahdollista normaaliin tapaan istutetuilla pajuviiljelmillä kasvustoa vaurioittamatta. Siksi lannoitukset oletettiin tehtäväksi ainoastaan kasvuston alasleikkuun sekä kolmen vuoden välein toistuvan korjuun jälkeen viimeistä korjuukertaa lukuun ottamatta. Lannoituksen mahdollisen alimitoituksen ei kuitenkaan oletettu vähentävän biomassatuotosta.

Suomen nykyinen pajunviljelypinta-ala on toistaiseksi pieni, joten tehokkaiksi todettujen, suorahaketukseen perustuvien korjuuketjujen käyttö ei vielä ole perusteltua. Siksi pajuviiljelmät oletettiin hakattavaksi keräilykaatona energiapuun korjuuseen kehitetyllä, kaivinkonesovitteisellä Risupeto-kaatopäällä (Laitila & Väättäinen 2021), jota on kokeiltu myös pajuviiljelmällä (Team Risupeto 2019). Esimerkilaskelmassa alkuvuonna suoritettavan hakkuun tehoajanmenekiksi oletettiin 8 h/ha (Karvanen 2021). Lähikuljetuksen tuottavuus kuormatraktorille 250 m:n matkalle laskettiin Bergströmin ym. (2011) tutkimustulosten perusteella. Energiapaju varastoitettiin kasoihin tienvarseen, jossa se hakettiin saman vuoden loppuun mennessä ja toimitettiin käyttöpaikalle 40 %:n kosteudessa. Tuoreena käyttöpaikalle toimitettavan pajuhakkeen kosteudeksi oletettiin 57 % (Ferm & Hytönen 1984). Pajuhakkeen teholliseksi lämpöarvoksi oletettiin 17,6 MJ/kg kuiva-aineessa (Alakangas ym. 2016) ja kuiva-tuoretiheydeksi 358 kg/m³ (Hytönen & Ferm 1984). Energiapajun varastokasojen peittämisen kustannuksia, varastoinninaikaisten kuivamassatappioiden tai muun materiaalihävikin vaikutuksia ei otettu huomioon laskettaessa hakkeesta saatavia myyntituloja.

Haketukseen käytettiin tehokasta autohakkuria, jonka tuottavuudeksi oletettiin 20 t kuiva-ainetta tehotunnissa (Laitila & Routa 2015, Mihelič ym. 2015). Hake kuljetettiin täysperävaunuautolla, jonka kuormatilan kehystilavuudeksi oletettiin 129 m³, kantavuudeksi 37 tn (Laitila ym. 2016) ja kuorman tiiviydeksi yleisesti käytetty 40 % (esim. Alakangas ym. 2016). Haketuksen tuottavuus määritti hakeauton kuormausajan, ja muut terminaalijat (35 min) saatiin Laitilan ja Väättäisen (2011) tutkimuksesta.

Hakkuun, lähikuljetuksen ja haketuksen tehotuntituottavuudet muunnettiin käyttötuntituottavuuksiksi Laitilan (2008) esittämällä kertoimilla. Käyttötunti (E₁₅-h) sisältää keskeytyksettömän tehoajan lisäksi kaikki viittätoista minuuttia lyhemmät keskeytykset. Hakkuukoneyhdistelmän (86 €/E₁₅-h) ja kuormatraktorin (77 €/E₁₅-h) käyttötuntikustannukset perustuvat Laitilan ja Väättäisen (2021) laskelmaan, joka päivitettiin toukokuun 2021 tasolle puutavarayhdistelmän kustannusindeksillä (Tilastokeskus 2021b). Autohakkurin käyttötuntikustannukseksi oletettiin 230 €/E₁₅-h. Se perustuu Jylhän (2013) laskelmaan, jonka ajantasaisuus tarkistettiin konekustannusindeksin (Tilastokeskus 2021c) avulla. Hakeauton tyhjänä- ja kuormattuna-ajon ajanmenekki laskettiin Nurmisen ja Heinosen (2007) mallilla. Ajo- ja terminaalialaikojen käyttötuntikustannuksiksi oletettiin 84,5 ja 61,9 €/E₁₅-h (Laitila ym. 2016, Tilastokeskus 2021b). Peltovaihtoehtoissa hakkeen kuljetusmatkaksi käyttöpaikalle oletettiin 64 km ja suonpohjavaihtoehtoissa 103 km. Luvut perustuvat vuoden 2016 keskimääräisiin metsähakkeen ja polttoturpeen kuljetusmatkoihin (SVT 2021). Lisäksi laskelmaan sisällytettiin puunhankinnan yleiskustannuksia 8,4 €/tn (3,0 €/m³; Strandström 2021).

Taulukko 1. Energiapajun tuotannon kannattavuuslaskelmien kustannusoletukset ja toimenpiteiden ajoittuminen. Lannoitteiden, kasvinsuojeluaikojen ja konetyön hinnan lisäksi myös koneiden siirtokustannukset (1 h 10 ha:n viljelmää kohti) sisältyvät kustannuksiin.

	PELTOMAA			SUONPOHJA		Kustannusperusteet
	Kustannus, €/ha		Ajoitus (vuosi)	Kustannus, €/ha	Ajoitus (vuosi)	
	Keino-lannoitteet	Lietelannoitus				
VILJELMÄN PERUSTAMINEN						
Kalkitus (6 t/ha)				249	0	Hytönen (1995a,b; Hytönen 2005), Hankkija Oy (2021), Viljelijän Avena Berner Oy (2021a), Palva (2019, 2021).
Tuhkalannoitus (puutuhka 5 t/ha)				370	0	Hytönen (2016), Räsänen (2021)
Maanmuokkaus	127 (kyntö ja äestys)	127 (kyntö ja äestys)	0	44 (äestys)	0	Palva (2019, 2021)
Pintakasvillisuuden torjunta (glyfosaattivalmiste 6–8 l/ha)	59	59	0			Tukes (2021), Suomen kasvinsuojelukauppa (2021), Viljelijän Avena Berner Oy (2021b), Palva (2019, 2021)
Typpilannoitus (YaraBela Suomensalpietari 185 kg/ha)				86	0	Ravinnetarve ks. luku 4.3.2; Palva (2019, 2021), Yara Suomi Oy (2021)
Pistokkaat ja istutus (12 800 kpl/ha)	2 406	2 406	1	2 406	0	Suutari (2021)
VILJELMÄN HOITO						
Kasvuston alasleikkuu	46	46	2	46	1	Palva (2019, 2021)
Typpilannoitus (YaraBela Suomensalpietari 740 kg/ha)				275	1	Ravinnetarve ks. luku 4.3.2; Palva (2019, 2021), Yara Suomi Oy 2021
NPK-lannoitus (Y5 1000 kg/ha)	473		2, 5, 8, 11, 14, 17			Ravinnetarve ks. luku 4.3.2; Palva (2019, 2021), Yara Suomi Oy (2021)
NPK-lannoitus (YaraBela Suomensalpietari 370 kg/ha + YaraMila Y5 500 kg/ha)				391	4, 7, 10, 13, 16	Ravinnetarve ks. luku 4.3.2; Palva (2019, 2021), Yara Suomi Oy (2021)
Lietelannoitus (61 m ³ /ha)		442	2, 5, 8, 11, 14, 17			Valtioneuvoston asetus 1250/2014, Eurofins (2021), Palva (2019, 2021)
KORJU						
Hakkuu, lähikuljetus, kasojen peittely, haketus, hakkeen kuljetus ja yleiskustannukset	2 056–2 569	2 056–2 569	5, 8, 11, 14, 17, 20	2 056–2 569	4, 7, 10, 13, 16, 19	Ks. liitteessä kuvatut oletukset
VILJELMÄN LOPETUS						
Kasvuston kemiallinen tuhoaminen (glyfosaattivalmiste 6–8 l/ha), kantojen jyrsiä	1 164	1 164	20	1 164	19	Tukes (2021), Suomen kasvinsuojelukauppa (2021), Viljelijän Avena Berner Oy (2021b), Palva (2019, 2021)

Kirjallisuus

- Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 258. 229 s. + liitteet 30 s.
- Bergström, D., Di Fulvio, F., Kons, K. & Nordfjell, T. 2011. Skörd av övergrov salix med skogsbrukets maskiner. Arbetsrapport 334, Sveriges landbruksuniversitetet, Institutionen för skoglig resurshushållning. Umeå. 50 s.
- Carbons Finland Oy. 2021. <https://carbons.fi/paju/>. [Viitattu 9.6.2021].
- Copeland, T.E. & Weston, J.F. 1988. Financial theory and corporate policy. Addison-Wesley Publishing Company. 946 s.
- Eurofins. 2021. Yhteenveto naudan lieteanalyseistä 2011–2015. Julkaisematon aineisto.
- Hankkija Oy. 2021. Puhelinkeskustelu 2.6.2021, Kokkolan myymälä.
- Hytönen, J. & Ferm, A. 1984. Vesipajun vesojen puuteknisiä ominaisuuksia. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 163. 20 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. Effect of repeated fertilizer application on the nutrient status and biomass production of *Salix 'Aquatica'* plantations on cut-away peatland areas. *Silva Fennica* 29(2): 107–116.
- Hytönen, J. 2005. Effects of liming on the growth of birch and willow on cut-away peat substrates in greenhouse. *Baltic Forestry* 11(2): 68–74.
- Hytönen, J. 2016. Wood ash fertilisation increases biomass production and improves nutrient concentrations in birches and willows on two cutaway peats. *Baltic Forestry* 22(1): 98–106.
- Jylhä, P. 2013. Autohakkurin seula-aukon koon vaikutus kokopuun haketuksen tuottavuuteen ja polttoaineen kulutukseen. Metlan työraportteja 272. 19 s. <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2013/mwp272.htm>
- Karvanen, J. 2021. Reformet Oy. Suullinen tiedonanto 10.6.2021.
- Laitila, J. 2008. Harvesting technology and the cost of fuel chips from early thinnings. *Silva Fennica* 42(2): 267–283.
- Laitila J. & Routa J. 2015. Performance of a small and a medium sized professional chippers and the impact of storage time on Scots pine (*Pinus sylvestris*) stem wood chips characteristics. *Silva Fennica* vol. 49 no. 5 article id 1382. <https://doi.org/10.14214/sf.1382>.
- Laitila, J. & Väätäinen, K. 2011. Kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketustuottavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2011:107–126. <https://www.metsatieteen aikakauskirja.fi/pdf/article6635.pdf>
- Laitila, J. & Väätäinen, K. 2021. Productivity and cost of harvesting overgrowth brushwood from roadsides and field edges. *International journal of forest engineering* 32(2): 1–15.

- Laitila, J., Asikainen, A. & Ranta, T. 2016. Cost analysis of transporting forest chips and forest industry by-products with large truck-trailers in Finland. *Biomass and Bioenergy* 90(2016): 252–261.
- Mihelič, M., Spinelli, R., Magagnotti, N. & Poje, A. 2015. Performance of a new industrial chipper for rural contractors. *Biomass and Bioenergy* 83:152–158. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.09.010>.
- Mola-Yudego, B. & Aronsson, P. 2008. Yield models for commercial willow biomass plantations in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 32(9):829–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.01.002>.
- Mola-Yudego, P. 2010. Regional Potential Yields of Short Rotation Willow Plantations on Agricultural Land in Northern Europe. *Silva Fennica* 44(1): 63–76.
- Nurminen, T. & Heinonen, J. 2007. Characteristics and time consumption of timber trucking in Finland. *Silva Fennica* 41(3): 471–487.
- Palva, R. 2019. Konetyön kustannukset ja tilastolliset urakointihinnat. TTS:n julkaisu 447. 16 s.
- Palva, R. 2021. Konetyön kustannukset ja tilastolliset urakointihinnat. TTS:n julkaisu 457. Työtehdoseura ry. 16 s.
- Ruokavirasto. 2021. Viljelijätukien hakuopas 2021. https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/viljelijat/opaat/hakuopaat/koko_viljelijatukien_hakuopas_2021.pdf. [Viitattu 9.6.2021].
- Räsänen, M. 2021. Metsätoimisto Tuomioho Oy. Puhelinkeskustelu 22.6.2021.
- Strandström, M. 2019. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2019. Metsätehon tulostietokanta 9/21. 32 s.
- Suomen kasvinsuojelukauppa. 2021. Verkkokauppa. <https://www.kasvinsuojelu.fi/>. [Viitattu 31.5.2021].
- Suutari, M. 2021. Carbons Finland Oy, toimitusjohtaja. Sähköpostiviesti 1.6.2021.
- SVT. 2021. Suomen virallinen tilasto: Tieliikenteen tavarankuljetukset [verkkojulkaisu]. Liitetaulukko 10. Keskimääräinen kuljetusmatka ja kuormausaste kotimaan liikenteessä tavaralajeittain vuonna 2016. Tilastokeskus, Helsinki. http://www.stat.fi/til/kttav/2016/kttav_2016_2017-04-28_tau_010_fi.html [viitattu: 17.6.2021].
- Team Risupeto. 2019. RISUPETO erikoistehtävä. <https://www.youtube.com/watch?v=3fXs3VCrGjl>.
- Tilastokeskus. 2021a. Kuluttajahintaindeksi 2021, kesäkuu. <https://tilastokeskus.fi/til/khi/2021/06/>. [Viitattu 9.6.2021].
- Tilastokeskus. 2021b. Metsäalan kone- ja autokustannusindeksit 2015 = 100.
- Tilastokeskus. 2021c. Metsäalan kone- ja autokustannusindeksi 2015=100 / perusvuosi 2010. Julkaisematon aineisto. Sähköpostiviesti 15.6.2021.
- Tukes. 2021. Kasvinsuojeluinerekisteri. <https://www.kemidigi.fi/kasvinsuojeluinerekisteri/haku>. [Viitattu 31.5.2021].

Valtioneuvoston asetus 1250/2014 eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta. Annettu Helsingissä 18.12.2014. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20141250>. [Viitattu 8.9.2021].

Valtioneuvoston asetus 8.1.2015/5 maatalouden tukien tukialueista ja niiden saaristoksi luettavista osa-alueista. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20150005>. [Viitattu 8.9.2021].

Viholainen, I. 2017. Pajun viljely ja salaojitus – katsaus kirjallisuuteen. Luonnonhoidon koulutus LUOKO ry, Helsinki. 17 s. <https://www.salaojayhdistys.fi/wp-content/uploads/2017/03/Pajun-viljely-ja-salaojitus.pdf>. [Viitattu 8.9.2021].

Viljelijän Avena Berner. 2021a. Puhelinkeskustelu 2.6.2021.

Viljelijän Avena Berner. 2021b. Verkkokauppa. <https://viljelijanberner.fi/>. [Viitattu 31.5.2021].

Yara Suomi Oy. 2020. Lannoitteiden ovh-hinnat EUR/tonni, lannoitusvuosi 2020/2021.

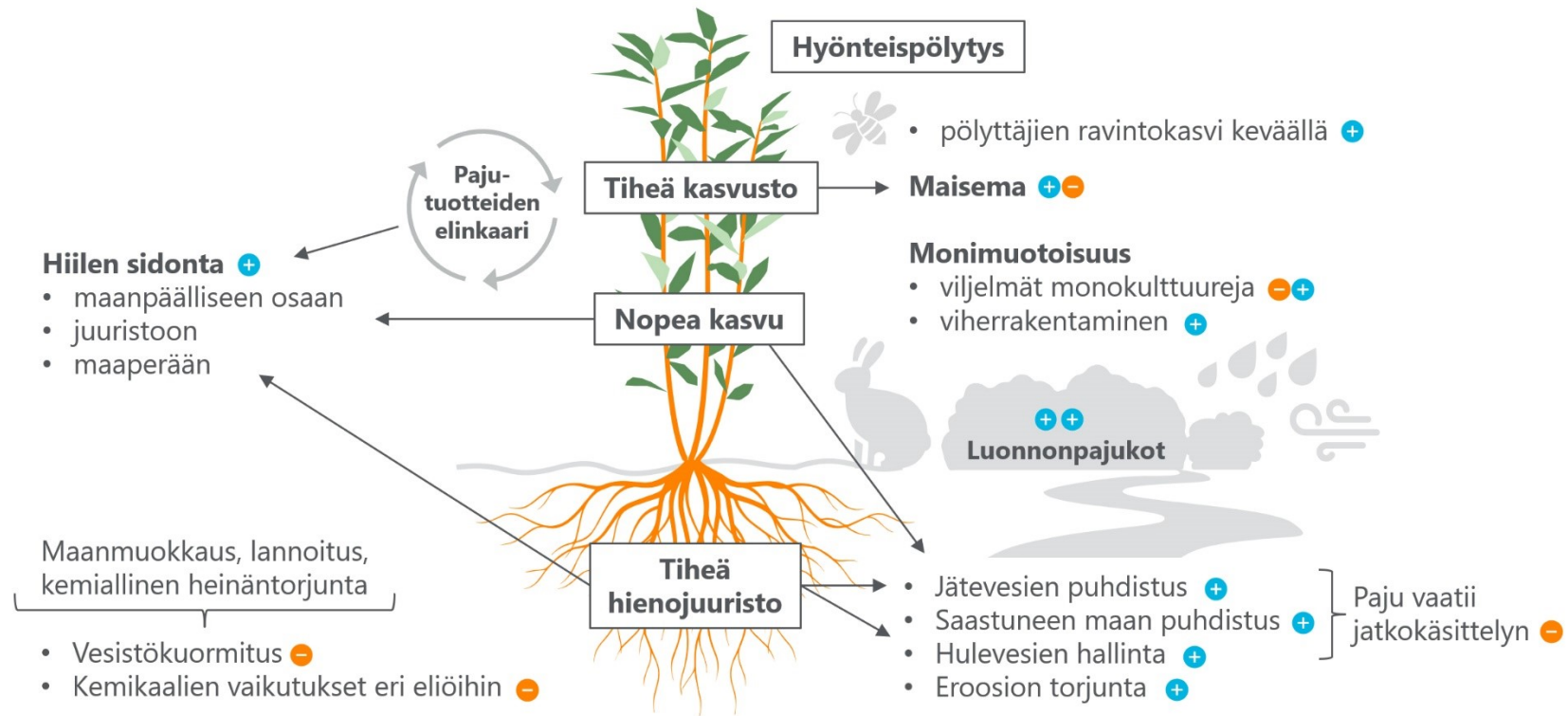
Liite 2

Pajun tuotannon ja biojalostuksen kannattavuustekijät



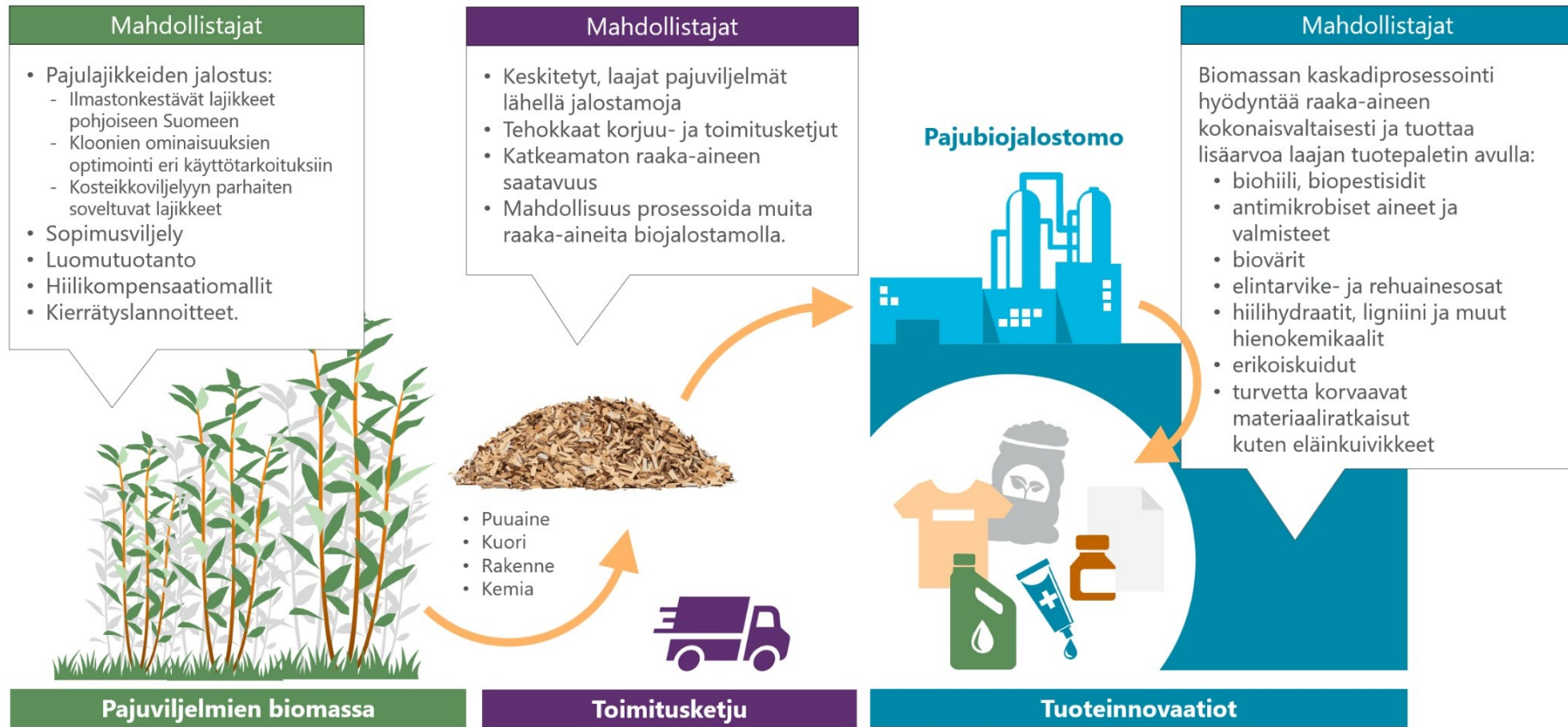
Liite 3

Pajuviljelmän ympäristövaikutukset



Liite 4

Pajubiomassan innovaatiomahdollisuudet





luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000