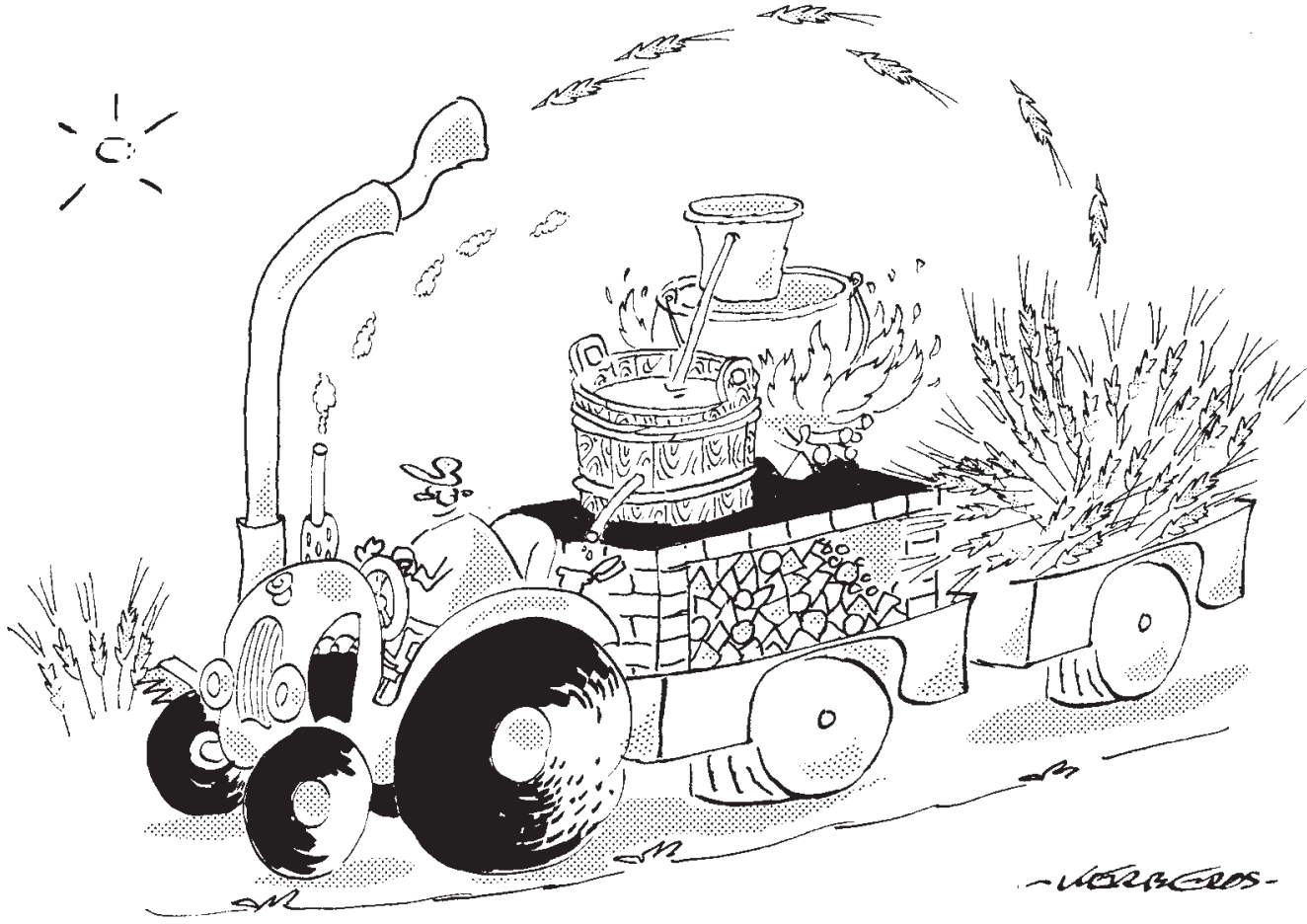


PELTOBIOENERGIAN TUOTANTO SUOMESSA

Potentiaali, energiasuhteet ja nettoenergia

HANNU MIKKOLA

10

MAATALOUSTIETEIDEN LAITOS **JULKAISUJA**

HELSINGIN YLIOPISTO
MAATALOUS-METSÄTIETEELLINEN TIEDEKUNTA

PELTOBIOENERGIAN TUOTANTO SUOMESSA

Potentiaali, energiasuhteet ja nettoenergia

Hannu Mikkola

Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden laitos
Agroteknologian oppiaine

VÄITÖSKIRJA

Esitetään Helsingin yliopiston maatalous-metsätieteellisen tiedekunnan suostumuksella julkisesti tarkastettavaksi 27. kesäkuuta 2012 klo12, Helsingin yliopiston Metsätieteiden talon luentosalissa B2, Latokartanonkaari 7, Helsinki.

Helsinki 2012

Ohjaaja: **Professori Jukka Ahokas**
Maataloustieteiden laitos
Helsingin yliopisto
FI-00014 Helsingin yliopisto

Esitarkastajat: **Professori Jukka Rintala**
Kemian ja biotekniikan laitos
Tampereen teknillinen yliopisto
PL 541
FI-33101 Tampere

Dosentti Risto Lauhanen
Maa- ja metsätalouden yksikkö
Seinäjoen ammattikorkeakoulu
Ilmajoentie 525
FI-60800 Ilmajoki

Opponentti: **Professori Pekka Ahtila**
Energiatekniikan laitos
Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulu
PL 14100
FI- 00076 Aalto

Kansi: **Mielipidepiirtäjä Kalevi Laalo**
Viestintätoimisto Piirros & Viestintä Oy
Pekkalantie 2
FI-15550 Nastola

Englanninkielen oikoluku: **FT Berit Mannfors**
Metropolia Ammattikorkeakoulu
Vanha maantie 6
FI-02650 Espoo

ISBN 978-952-10-4316-1 (Print)
ISBN 978-952-10-4317-8 (Online)
ISSN 1798-7407 (Print)
ISSN 1798-744X (Online)
ISSN-L 1798-7407

Elektronisessa muodossa oleva julkaisu on luettavissa osoitteessa:
http://ethesis.helsinki.fi
© 2012 Hannu Mikkola, Helsinki
Unigrafia
Helsinki 2012

SISÄLLYSLUETTELO

Osajulkaisuluettelo 6

Selvitys väittelijän osuudesta osajulkaisuissa 7

Tiivistelmä 8

Summary in English 10

Esipuhe 12

1 Johdanto 14

2 Agrobiomassa energianlähteenä Suomessa 17

2.1 Tärkeimmät agrobiomassan lähteet 18

2.1.1 Olki 18

2.1.2 Ruokohelpi 21

2.1.3 Lanta 22

2.1.4 Ohra ja rypsi 23

2.2 Peltobioenergian energiapotentiaali verrattuna muihin kotimaisiin biopolttoaineisiin 23

2.2.1 Puu 23

2.2.2 Turve 25

2.3 Yhteenveto biomassaresursseista 26

3 Energia-analyysimenetelmät ja niiden soveltaminen peltobioenergian tuotantoon 28

3.1 Bottom-up- ja top-down-tekniikat peltobioenergiaketjujen analysoinnissa 29

3.2 eMergy-analyysi 32

3.3 Elinkaariarviointi 33

3.4 Systeemin määrittely ja rajaaminen 33

3.5 Suora ja epäsuora energiapanos 34

3.5.1 Peltobioenergian tuotantoon käytettyjen koneiden ja rakennusten epäsuoran energiapanoksen määrittäminen 36

3.5.2 Infrastruktuurista aiheutuva epäsuora energiapanos 38
3.6 Primääri- ja sekundäärienergia 39
3.7 Peltoenergiakasvien sadon lämpöarvon määrittäminen 39
4 Peltobioenergiatuotannon epäsuorat energiapanokset 40
4.1 Agrokemikaalit: lannoitteet, kalkki, kasvinsuojelu- ja säilöntäaineet 41
4.2 Siemenet 42
4.3 Koneet 43
4.4 Muut panokset 46
4.5 Analyysistä pois rajatut energiapanokset 47
5 Peltobioenergiatuotannon energiasuhteet ja nettoenergia 48
5.1 Syitä kasvikohtaisiin eroihin 50
5.2 Viljelykasvien energiasuhteet ja nettoenergiat verrattuna muissa maissa saatuihin tuloksiin 51
5.3 Tuotantomenetelmän ja viljelyintensiteetin vaikutus energiatalouteen 54
5.4 Pellon metsittäminen vaihtoehtona peltobioenergialle 55
5.5 Nettoenergia ja maan käyttö 58
5.6 Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivin 2009/28/EY (RES-direktiivi) vaikutukset peltobioenergian tuotantoon 59
6 Peltokasvituotannon energiatalouden parantaminen 60
6.1 Biomassan tuotannon tavoite 61
6.2 Viljelyintensiteetti 62
6.3 Viljan kuivausta korvaavat menetelmät 64
6.4 Viljelykierrot ja palkokasvit 65
6.5 Olki ja lanta käyttöön 65
6.6 Hyvästä energiasuhteesta palkitseminen 66
7 Energia-analyysimenetelmien kehittämistarve 67
7.1 Systeemin rajaus 68

7.2 Inventaariovaihe 69
7.3 Epäsuorat energiapanokset 70
7.4 Tuotokset 70
7.5 Top-down- ja bottom-up-analyysimenetelmien erot 71
7.6 Tulosten toistettavuus ja läpinäkyvyys 71
8 Johtopäätökset 72
Lähteet 75

OSAJULKAISULUETTELO

Tämä väitöskirja perustuu seuraaviin julkaisuihin:

I Mikkola, H., Pahkala, K. & Ahokas, J. 2011. Energy consumption in barley and turnip rape cultivation for bioethanol and biodiesel (RME) production. Biomass and Bioenergy 35: 505 – 515.

II Mikkola, H. J. & Ahokas, J. 2010. Indirect energy input of agricultural machinery in bioenergy production. Renewable Energy 35: 23 – 28.

III Mikkola, H. J. & Ahokas, J. 2009. Energy ratios in Finnish agricultural production. Agriculture and Food Science 18: 332 – 346.

IV Mikkola, H. & Ahokas, J. 2010. Energy management of future farms. Agronomy Research 8: 165 – 176.

V Mikkola, H. & Ahokas, J. 2011. Renewable energy from agro biomass. Agronomy Research 9: 159 – 164.

Julkaisuihin on viitattu tekstissä julkaisun edessä olevalla roomalaisella numerolla.

SELVITYS VÄITTELIJÄN OSUUDESTA OSAJULKAISUISSA

I
Hannu Mikkola on julkaisun vastaava kirjoittaja. Katri Pahkala ja Hannu Mikkola ovat yhdessä kuvanneet julkaisussa esitetyt ohran ja rypsin tuotantoketjut. Hannu Mikkola on analysoinut ketjujen energiapanokset ja kirjoittanut julkaisun käsikirjoituksen. Hän on myös korjannut käsikirjoituksen julkaisukuntoon Jukka Ahokkaan ja Katri Pahkalan antamien kommenttien ja korjausehdotusten pohjalta.

II
Hannu Mikkola on julkaisun vastaava kirjoittaja. Hän on tehnyt julkaisun kirjallisuuskatsauksen. Jukka Ahokkaan ajatus oli sisällyttää koneiden valmistuksesta ja kunnossapidosta aiheutuva energiapanos koneiden polttoaineenkulutukseen niin, ettei sitä tarvitse aina laskea erikseen. Hannu Mikkola sovelsi ajatusta tyypillisiin peltoviljelytöihin. Hän kirjoitti julkaisun käsikirjoituksen ja viimeisteli sen julkaisukuntoon.

III
Hannu Mikkola on julkaisun vastaava kirjoittaja. Hän on analysoinut viljelykasvien energiasuheet ja nettoenergiat sekä kirjoittanut kappaleet, jotka liittyvät kasvintuotantoon. Jukka Ahokas on analysoinut ja kirjoittanut kotieläintuotannon energiankulutusta käsittelevät kappaleet. Hannu Mikkola viimeisteli käsikirjoituksen julkaisukuntoon.

IV
Jukka Ahokas on julkaisun vastaava kirjoittaja. Hannu Mikkola kirjoitti abstraktin sekä kappaleet ”Energy saving in agricultural production” ja ”Discussion”. Hannu Mikkola viimeisteli käsikirjoituksen julkaisukuntoon.

V
Hannu Mikkola on julkaisun vastaava kirjoittaja. Hän on tehnyt julkaisun kirjallisuuskatsauksen ja kirjoittanut käsikirjoituksen. Hän myös viimeisteli käsikirjoituksen julkaisukuntoon.

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä tutkittiin suomalaisen peltokasvituotannon energiapotentiaalia, energiasuhteita ja nettoenergian määrää. Energia-analyyseissä kiinnitettiin erityistä huomiota epäsuoriin energiapanoksiin ja niiden käsittelyyn energia-analyysissä. Epäsuoria energiapanoksia ovat esimerkiksi koneiden ja maatalouskemikaalien valmistus sekä siemenen tuottaminen. Työn tavoitteena oli arvioida peltokasvituotannon bioenergiapotentiaali Suomessa sekä tutkia eri viljelykasvien energiasuhteita ja nettoenergian määriä.

Suomessa voitaisiin tuottaa peltobioenergiaa 12 – 22 TWh, joka vastaa 3 – 5 % Suomen energiankulutuksesta vuonna 2008. Suurin osa peltobioenergiasta olisi olkea (8 TWh) ja energiakäyttöön viljeltyä biomassaa kuten ruokohelpeä (12 TWh). Potentiaalista on nyt käytössä 0,5 TWh. Käyttämätön peltobioenergiapotentiaali on yhtä suuri kuin tämän hetkinen käyttämätön metsäenergiapotentiaali.

Tutkittujen peltokasvien energiasuhteet (output/input) vaihtelivat välillä 3 – 18. Ruokohelven energiasuhde oli korkein (18) ja säilörehunurmen ja sokerijuurikkaan energiasuhde (7) oli toiseksi korkein. Viljojen ja öljykasvien energiasuhde oli kolmesta viiteen, kun otettiin huomioon pelkästään siemensato. Jos olisi otettu huomioon näiden kasvien olki- tai varsisato, energiasuhteet olisivat olleet lähes kaksinkertaisia. Viljelemällä peltokasveja voidaan siis saada energiaa talteen moninkertaisesti tuotantoon käytettyihin energiapanoksiin verrattuna.

Vehnän energiasuhde oli Suomessa yhtä korkea, kuin se oli Italiassa, ja ohran energiasuhde yhtä korkea, kuin Espanjassa tehdyissä tutkimuksissa. Maissin, elefanttiheinän tai jättiruo'on energiasuhde oli Keski- ja Etelä-Euroopassa jopa yli 50. Suuria biomassasatoja tuottavat C4-kasvit viihtyvät lämpimissä ja aurinkoisissa kasvuoloissa. Ne käyttävät typpeä ja vettä säästeliäämmin kuin lauhkean vyöhykkeen viileämmillä alueilla viihtyvät C3-kasvit.

Peltokasvien energiasuhteita arvioitaessa on otettava huomioon, että sadon kuiva-aineen lämpöarvo pellon reunassa on energiasadon suurin mahdollinen määrä. Sadon kuljettaminen käyttökohteeseensa kuluttaa energiaa, ja jos peltobiomassasta tuotetaan polttonesteitä, sähköä tai muuta kuin suoraan polttoon soveltuvaa energiaa, energiasuhde laskee.

Peltoenergiakasvien vertailu pellon metsittämiseen antoi viitteitä siitä, että kasvattamalla nopeakasvuisia puita, kuten hybridihaapaa ja rauduskoivua, saataisiin biomassaenergiaa lähes yhtä hyvällä energiasuhteella (47 – 53) kuin C4-kasveista lämpimämmissä maissa. Pellolla kasvatetun puubiomassan nettoenergia olisi yhtä suuri (51 – 85 GJ ha^{-1}) kuin suomalaisten peltoenergiakasvien.

Peltobioenergiatuotannon energiasuhdetta tutkittiin kasvikohtaisten energia-analyysien avulla. Analyysituloksia voidaan verrata muiden tekemiin tutkimuksiin varauksin, koska analyysien lähtöoletukset ja rajaukset

poikkeavat toisistaan lähes poikkeuksetta ja koska suorat ja epäsuorat energiapanokset otetaan huomioon analyyseissä vaihtelevasti. Suorat energiapanokset, kuten nestemäiset polttoaineet ja sähkö, otetaan yleensä hyvin huomioon ja ne ymmärretään selkeästi energiapanoksina. Monet epäsuorat energiapanokset, kuten esimerkiksi peltojen, teiden ja salaojien rakentamiseen käytetyt energiapanokset, rajataan sen sijaan usein tarkastelun ulkopuolelle. Niiden käsittely on useimmiten työlästä ja tarkastelun tuloksena saadaan pääsääntöisesti epätarkempaa tietoa kuin suorasta energian kulutuksesta. Mahdollisesti joudutaan toteamaan, että tietoa ei ole lainkaan saatavissa tai että tieto on liian epätarkkaa käytettäväksi. Epäsuorien energiapanosten osuus oli kuitenkin viljan tuotannossa 70 % ja säilörehun tuotannossa 85 % tuotantoon tarvittavasta kokonaisenergiapanoksesta. Epäsuorat energiapanokset ovat siis merkittävä osa energiapanoksesta, ja ne pitäisi ottaa analyysiin mukaan vaikeuksista huolimatta.

Epäsuorien energiapanosten käsittelyä energia-analyysissä edistäisi kansainvälinen, avoin tietokanta, johon hyväksyttäisiin läpinäkyvästi ja huolellisesti dokumentoitujen tutkimusten tuloksia tuotteiden ja palveluiden energiapanoksista. Tietokanta yhtenäistäisi analysointimenetelmiä, nopeuttaisi analyysien tekoa, parantaisi niiden laatua ja helpottaisi tulosten tulkintaa.

SUMMARY IN ENGLISH

Energy potential, energy ratios, and amount of net energy in Finnish field crop production were studied in this thesis. Special attention was paid on indirect energy input and how to treat it in energy analysis. Manufacturing of machines and agrochemicals and production of seeds are examples of indirect energy inputs. The objective of this study was to evaluate the bio energy potential of field crops in Finland as well as to study the energy ratios and net energy of various field crops.

The bio energy potential of the Finnish field crop production could be as large as 12 – 22 TWh, or 3 – 5% of the total energy consumption in Finland in 2008. The major part of this energy would originate from straw and biomass like reed canary grass cultivated for energy use. However, only 0.5 TWh of the potential is utilized. The present unused potential of field biomass equals to that of unused forest bio mass.

The output/input energy ratios of the studied field crops varied from 3 to 18, being highest (18) for reed canary grass and second highest (7) for sugar beet and grass cultivated for silage. The energy ratio of cereals and oil seed crops varied from 3 to 5 if only the yield of seeds was considered. If the yield of straw and stems was also taken into account the energy ratios would have been almost twofold. Thus, energy can be produced in multiple amounts in comparison to the energy input.

The energy ratios for Finnish wheat and barley were as high as those gained in Italian and Spanish conditions, respectively. However, the energy ratios of maize, elephant grass and giant reed were even over 50 in Central and Southern Europe. Plants that use the C4 photosynthesis pathway and produce high biomass yields thrive best in warm and sunny climate conditions. They use nitrogen and water more sparingly than C3 plants typically thriving in the cooler part of the temperate zone.

A few factors in evaluation of energy ratios for field crops need to be kept in mind. First, the maximal energy potential of the energy crop is the heating value of the dry matter at the field gate. Second, transportation of the crop consumes energy, and production of liquid fuels and electricity from biomass lowers the energy ratio from that of heat production at the field gate.

A comparison of field energy crops to a reforested field suggested that fast growing trees, as hybrid aspen and silver birch, would yield almost as high energy ratio (47 – 53) as obtained from the C4 plants cultivated in warmer regions. The net energy yield of trees would also be competitive with those of the Finnish field energy crops (51 – 85 GJ ha^{-1}).

The energy ratios in field energy production were studied with the aid of plant specific energy analyses. Results between various analyses cannot be compared directly because postulates and outlines as well as treatment of direct and indirect energy inputs differ almost without exception from one

analysis to another. In general, direct energy inputs such as liquid fuels and electricity are well accounted for and clearly understood as energy inputs. Many indirect energy inputs such as energy used to clear fields or energy needed to construct roads or subsurface drains are often outlined outside the survey. Treatment of indirect energy inputs is not straightforward and yields mainly less accurate data than that obtained from direct energy inputs. The final conclusion may be that no data is available or data is too inaccurate to be utilized. However, the indirect energy inputs in total energy input were found to be 70% in cereal production and 85% in silage production. Thus, indirect energy inputs constitute a significant portion of the total energy input and should be included in the analyses despite the difficulties.

Analyses of indirect energy inputs could be improved by establishing an open, international data base that would contain results from only transparent and well-documented studies. Such a data base would standardize analysis methods but it would also speed up analysing, improve the quality of the results and ease the interpretation.

ESIPUHE

Uusiutuva energia on aiheena yliopiston opinnäytetyössäni nyt toistamiseen. Valmistuessani agronomiksi 1982 laudaturtyöni aihe oli Aurinkoenergian hyväksikäyttö koneellisessa kylmäilmakuivauksessa. Tutkimuksessa todettiin yksinkertaisen tasokerääjän lisäävän merkittävästi kuivausilman kuivauskykyä, kunhan kerääjän pinta-ala oli vähintään kaksinkertainen tasokuivurin laaripinta-alaan verrattuna. Tuolloin elettiin ensimmäisen öljykriisin jälkeistä aikaa, rakennettiin omatekoisia etupesiä ja aurinkokeräimiä, parannettiin lämmöneristystä niin asuinrakennuksissa kuin viljankuivureissa sekä tutkittiin puukaasun ja rypsiöljyn käyttöä traktoreiden polttoaineena. Agronomi Matti Kares Helsingin yliopistosta sytytti minuun kiinnostuksen energia-asioihin. Rakensin kotitilalleni etupesän Koneviestilehdessä olleiden Kareksen ohjeiden mukaan ja sahanpurulla lämmitettiin harvaa, vanhaa maatilan päärakennusta yli kymmenen vuoden ajan.

Valmistuttuani yliopistosta muut aiheet kuin energian käyttö olivat päällimmäisenä opettajan, tarkastajan ja tutkijan tehtävissäni yli kahden vuosikymmenen ajan. Liekö sattumaa, että tuona aikana olin kolmesti selvittämässä suomalaisen viljantuotannon energiasuhdetta. Vuosina 1991 ja 2005 oli kyseessä polttoaine-etanolin tuotanto kotimaisesta ohrasta ja vuosina 1998 – 1999 tarkasteltiin rehuohran elinkaarisia ympäristövaikutuksia. Väitöskirjatyöni käynnistyi keväällä 2007. Osallistuin Helsingin yliopiston järjestämälle Bioenergiaketjut-kurssille. Sen aikana professori Jukka Ahokas soitti ja kysyi, olenko vakavamminkin kiinnostunut energia-asioista ja bioenergian tuotannosta. Tällä hän tarkoitti väitöskirjan tekemistä aiheesta. Vaikka en ollut koskaan vakavissani harkinnut väitöskirjan tekemistä, minun ei tarvinnut nukkua yön yli vastatakseni, että olen kiinnostunut. Minulla onkin ollut ilo tutkia itselleni mieluista aihetta.

Suuri ansio tämän väitöskirjan toteutumisesta kuuluu professori Jukka Ahokkaalle. Sen lisäksi, että hän teki aloitteen työn tekemisestä, hän on aktiivisesti tukenut kirjoitustyötäni ja hoitanut suvereenisti työni rahoituksen. Olen voinut täysipainoisesti keskittyä työn tekemiseen ilman huolta palkan maksusta. Tiedän, että se on harvinaista tutkijamaailmassa, ja annan sille suuren arvon. Tärkeää minulle on ollut Agroteknologian laitoksen ja nyttemmin samannimisen oppiaineen luova ja kannustava ilmapiiri. Työn ohjaajana Jukka Ahokas on antanut vapautta toteuttaa omia ajatuksia, mutta hän on huolehtinut toisaalta siitä, että työ pysyy aiheessa eikä lähde rönsyilemään. Aikataulustakin hän ajoittain muistutti, mutta ei painostanut. Ohjauksen kannalta oli hienoa, että hänellä ei ollut vastaanottoaikoja, vaan ovi oli aina raollaan ja aina voi mennä kysymään, kun tuli ongelmia. Arvostan myös sitä, että olen voinut osallistua työni aikana bioenergiakursseille Ruotsissa, Itävallassa ja Saksassa.

Hyvän pohjan tälle väitöstutkimukselle antoi yli kahden vuosikymmenen kokemus peltoviljelytutkimuksissa Maa- ja elintarviketalouden tutki-

muskeskuksessa ja aivan erityisesti tutkimus ”Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian käytön kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit”. Vuosina 2005 – 2006 VTT ja MTT toteuttivat tämän Climbus-teknologiaohjelmaan kuuluneen tutkimuksen, jossa vertailtiin Suomen oloihin sopivimpia, laajamittaiseen tuotantoon soveltuvia biopolttoaineita ja niiden tuotantoketjuja. Olen kovin iloinen, että erikoistutkija Katri Pahkala MTT:sta pyysi juuri minua laskemaan viljelyketjujen energiapanoksia. Tutkimuksen aikana opin paljon peltobiomassan tuotantoketjujen energiapanosten ja kasvihuonekaasupäästöjen analysoinnista. Hyvinä yhteistyökumppaneina olivat erikoistutkija Katri Pahkalan lisäksi teknologiapäällikkö Tuula Mäkinen sekä erikoistutkijat Sampo Soimakallio ja Teuvo Paappanen VTT:stä. MTT:sta haluan erityisesti mainita tutkija Timo Lötjösen sekä erikoistutkija Winfried Schäferin. Timo Lötjönen on useasti vastannut ruokohelpikysymyksiini ja arvostan hänen käytännönläheisiä ja realistisia näkökantojaan. Winfried Schäferin kanssa olemme useaan otteeseen vaihtaneet ajatuksia bioenergiatuotannon ekologisista vaikutuksista sekä eMergy-analyysin soveltamiseen liittyvistä kysymyksistä.

Professori Jukka Rintala Tampereen teknillisestä yliopistosta ja dosentti Risto Lauhanen Seinäjoen ammattikorkeakoulusta esitarkastivat väitöskirjani käsikirjoituksen. He tekivät suuren työn esittämällä väitöskirjan tieteellistä tasoa kohottavia ja luettavuutta parantavia korjausehdotuksia. Siitä esitän heille parhaan kiitokseni.

Marjatta ja Eino Kollin säätiön merkittävä taloudellinen tuki on mahdollistanut keskittymisen tutkimustyön tekemiseen. Olen saanut taloudellista tukea myös Helsingin yliopistolta ja Agronomiliitolta. Kiitän kaikkia työni rahoittajia.

Kotona minua ovat varauksetta kannustaneet vaimo Marja ja jo aikuiset tyttäret Leena ja Eeva. Viiden vuoden rupeaman aikana he eivät ole sanoneet poikittaista sanaa väitöskirjan tekemisestä, vaikka ajatukseni ovat ajoittain kotonakin pyörineet kilowattien ja joulejen ympärillä. Heistä oli peräti hienoa, että isä – kesästä 2011 lähtien myös pienen Akseli-pojan vaari – opiskeli ja puursi väitöskirjaa. Parhaimmillaan kolme perheemme neljästä jäsenestä opiskeli Helsingin yliopistossa. Myös kuusivuotias Wilma-koira heiluttaa minulle edelleen häntäänsä, vaikka aamu- ja iltalenkit ovat joskus jääneet lyhyiksi.

1 JOHDANTO

Maapallon väestömäärän lisääntyminen ja elintason nousu kasvattavat energian kysyntää. Myös ruuan kysyntä lisääntyy. Sen tuotantoa on kyetty lisäämään viljelyä tehostamalla. Maapallon peltoala on pysynyt ennallaan 40 vuotta (IV) ja samana aikana, kun väestömäärä on yli kaksinkertaistunut, sadot ovat enemmän kuin kaksinkertaistuneet. Tuotantoa on tehostettu erityisesti typpilannoitteilla, joiden käyttö on kuusinkertaistunut (IV). Lannoitetyppi tuotetaan pääsääntöisesti maakaasulla, joka on prosessissa sekä energian että vedyn lähde. Lisääntynyt maataloustuotanto nojaa siis vahvasti fossiiliseen energiaan.

Huoli fossiilisten polttoainevarojen ehtymisestä sekä tavoitteet ilmaston lämpenemisen ehkäisemiseksi ovat lisänneet kiinnostusta uusiutuviin energialähteisiin (United Nations Framework Convention on Climate Change 1992, Kyoto Protocol to The United Nations Framework Convention on Climate Change 1998, Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi 2009/28/EY). Uusiutuvan energian käyttö ei lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta, jos sen tuottamiseen ei käytetä fossiilista energiaa. Ihmiskunta on suuren haasteen edessä, koska energian kysyntä vuoteen 2030 näyttäisi kasvavan 1,5 % vuodessa ja toisaalta mahdollisuudet lisätä energian tuotantoa totutuilla tavoilla pienenevät (World Energy Outlook 2009). Energian hinnan nousu hidastanee taloudellista kasvua, mutta toisaalta se kannustaa säästämään, lisää biopolttoaineiden kilpailukykyä ja lienee tehokkain kannustin kehittää puhtaampia energiantuotantomuotoja.

Uusiutuvaa energiaa saadaan auringon säteilystä, tuulesta, virtaavasta vedestä sekä polttamalla, mädättämällä tai muulla tavoin prosessoimalla biomassaa. Metsistä saadaan harvennuspuuta, hakkuutähteitä, kantoja ja juurakoita, jotka ovat ainespuun tuotannon sivutuotteita. Pelloilta saadaan samalla tavoin olkia ja muita kasvinosia ruuan- ja rehuntuotannon sivutuotteena. Peltokasveja myös viljellään energiantuotannon raaka-aineeksi. Peltobiomassan suunnitelmallinen hyödyntäminen edellyttää, että biomassan tuotannon energiataloudelliset panos-tuotos-suhteet tunnetaan. Suomen energiahuollon kehittämiseksi on hyvä tietää saatavilla olevan peltobioenergian laatu ja määrä.

Peltoviljelyyn tarvitaan suoria ja epäsuoria energiapanoksia. Suorat energiapanokset tunnetaan paremmin kuin epäsuorat, koska niitä on tutkittu siitä lähtien, kun työt on tehty koneellisesti. Energiankulutuksen ja tehontarpeen mittaaminen ovat kuuluneet olennaisena osana koneiden suorituskykymittauksiin. Tästä kertovat koneenkoetuslaitosten raportit jo yli sadan vuoden ajalta. Moottoripolttoaineet ja sähkö ovat kuitenkin vain osa koko tuotantoketjun energiankulutusta. Koneiden rakentamiseen, lannoitteiden, kalkin, torjunta-aineiden ja siementen tuottamiseen tarvitaan energiaa. Nämä epäsuorat energiapanokset ovat energia-analyysien aluetta, johon ei ole osattu tai haluttu syventyä. Esimerkiksi tuotteen tai palvelun aikaan-

saamiseen tarvittavan energiapanoksen määrittäminen on työläämpää kuin suoran energiankulutuksen mittaaminen. Usein epäsuorien energiapanosten osuus kokonaisenergiapanoksesta on jopa suurempi kuin suorien energiapanosten. Siksi on tärkeää analysoida kokonaisia tuotantoketjuja, eikä vain niiden helpoimmin mitattavia osia.

Energia-analyysi on työkalu, jota käyttämällä saadaan selville tuotantoon käytetyt energiapanokset. Energia-analyysin avulla voidaan vertailla tuotantomenetelmiä ja tuotteita. Sen avulla löydetään kohteet, joissa on parhaat mahdollisuudet säästää energiaa. Systeemejä ja prosesseja pystytään kehittämään, kun niiden toiminta ja vaatimukset ymmärretään. Mittaaminen on keskeinen tapa hankkia tietoa prosesseista ja energian kulutus pitäisi aina kuulua mitattavien suureiden joukkoon. Jos kyseessä on paljon energiaa kuluttava, monivaiheinen prosessi, mittaus pitäisi tehdä vaiheittain.

Peltoviljelyn energiankulutustutkimuksen tärkeä kulmakivi oli artikkeli Food Production and The Energy Crisis, jonka amerikkalainen ekologi David Pimentel julkaisi tutkijakollegoidensa kanssa Science-lehdessä marraskuussa 1973 (Pimentel ym. 1973). Vaikka artikkeli käsitteli energian kulutusta ruuan tuotannossa, se kosketti myös bioenergian tuotantoa, koska elintarvikkeet ja peltobioenergia kilpailevat samoista peltoresursseista. Ruokaa ja energiaa tuotetaan samoin periaattein ja kummassakin käytetään runsaasti fossiilista energiaa. Artikkeli herätti kiinnostuksen tutkia energian käyttöä maataloudessa.

Biopolttoaineista kiinnostuttiin ensimmäisen kerran 1973 öljykriisin jälkeen ja 2000-luvulla uudelleen, kun raakaöljyn hinta oli yli kolminkertaistunut ajanjaksolla 2002 – 2008 (British Petroleum 2011). Maataloustuotannon energiantarpeen selvittämistä ovat edesauttaneet myös elinkaariarviointien (Life Cycle Assessment - LCA) yleistyminen 1990-luvun loppupuolelta lähtien. Elinkaariarviointi kattaa tuotteen tai palvelun elinkaariset ympäristövaikutukset kehdosta hautaan -ajattelutapaa noudattaen (from the gradel to the grave). Energian käyttö on arvioinnin yksi osa-alue.

Peltobioenergiaketjujen energiasuhteille asetetaan samat vaatimukset kuin muillekin energiantuotantoketjuille. Niistä pitäisi saada ulos moninkertainen määrä energiaa suhteessa tuotantoon käytettyihin energiapanoksiin. Ajatus on ristiriidassa lämpöopin ensimmäisen pääväittämän kanssa, koska energiaa ei voi luoda tyhjästä. Energia vain muuttaa muotoaan. Ristiriidan selittää se, että biomassan tuotannon energiasuhdetarkasteluissa jätetään auringon energia huomioon ottamatta ja se on tuotannon suurin energiapanos. Ympäristöpalveluihin luettavan aurinkoenergian huomioon ottamista energia-analyysissä on pohtinut mm. Cleveland (2010) esittelemänsä nettoenergia-analyysin (Net energy analysis) yhteydessä.

Energian käytön analysointi on tarpeellista kansallisesti, koska Suomi on peltoviljelyn pohjoista äärialuetta. Suomessa kulutetaan paljon energiaa asukasta kohden (Earth Trends 2011). Suureen kulutukseen vaikuttavat kuitenkin maataloutta enemmän energiaa kuluttava teollisuus, pitkä lämmityskausi ja harva asutus.

Kasvien kasvuolot ja viljelykäytännöt voivat muuttua paljon jo muutamien kymmenien kilometrien matkalla. Siksi kasvien energiasuhteita tulee tarkastella pienemmällä kuin maanosan tarkkuudella. Samansuuruisilla energiapanoksilla saadaan erisuuruisia satoja, ja sen vuoksi tuotannon energiasuhde vaihtelee. Sade, kasvukauden lämpötila ja pituus vaikuttavat sadon määrään enemmän kuin ihmisen säädeltävissä olevat tuotantopanokset.

Suomessa on julkaistu vain muutamia tutkimuksia, joissa on tarkasteltu koko peltoviljelyketjun energian käyttöä (Katajajuuri ym. 2000, Mäkinen ym. 2006). Ruokohelpi on Suomen tärkein peltoenergiakasvi, jota on viljelty 2000-luvun alkuvuosista lähtien, mutta vasta Mäkinen ym. (2006) esittivät ensimmäisen laskelman sen tuotannon energiasuhteesta.

Tässä väitöskirjassa tarkastellaan suomalaisen peltokasvituotannon energiapotentiaalia ja yksittäisten kasvilajien energiasuhteita. Energia-analyyseissä on kiinnitetty erityistä huomiota epäsuoriin energiapanoksiin ja niiden käsittelyyn. Epäsuoria energiapanoksia ovat esimerkiksi koneiden ja maatalouskemikaalien valmistus sekä siemenen tuottaminen. Työn tavoitteena oli vastata kysymyksiin, kuinka suuri osuus peltobioenergialla voi enimmillään olla suomalaisessa energiahuollossa ja ovatko peltoenergian energiasuhteet riittävän korkeita energiantuotannon perustaksi.

Bioenergian tuotannon talous rajattiin tarkastelun ulkopuolelle, vaikka se on yksi kestävän kehityksen osa-alue. Jo ennen tämän työn aloittamista ja erityisesti sen aikana vahvistui ajatus, että bioenergian tuotantoa pitää tutkia ensin energiatalouden ja ympäristövaikutusten näkökulmasta. Kun tiedetään, mitkä bioenergiamuodot ovat energiataloudellisesti ja ympäristön kannalta kestäviä, voidaan tarkastelua jatkaa talouden kriteerein. Uusiutuva bioenergia olisi jo laajasti käytössä, jos se olisi taloudellisesti kilpailukykyistä. Bioenergian kilpailukykyä voidaan haluttaessa lisätä verotuksen, päästömaksujen tai syöttötariffien avulla. Energiatehokkaimmat ja ympäristön kannalta haitattomimmat tuotantotavat on kuitenkin ensin tunnistettava.

Talouden ohella päästöt liittyvät läheisesti energian tuotantoon. Lämmön ja sähkön tuotanto yhdessä kuljetussektorin kanssa aiheuttivat vuonna 2008 2/3 maailman hiilidioksidipäästöistä (IEA Statistics 2010). Koska peltobioenergia on uusiutuvaa energiaa, sen käytön hiilidioksidipäästöjä ei lasketa kasvihuonekaasupäästöksi. Viljelyssä ja panosten tuotannossa aiheutuu kuitenkin päästöjä maahan, veteen ja ilmakehään. Päästöjen syntymekanismit ja päästöjen määrä ovat intensiivisen tutkimuksen alla. Maaperän laatu ja topografia, maan käsittelytavat, viljelykasvit ja -kierrot sekä kasvukauden sää näyttäisivät olevan tekijöitä, joilla on vaikutus päästöjen syntymiseen ja niiden suuruuteen. Päästöt on kuitenkin rajattu tämän väitöskirjan ulkopuolelle, koska niitä on syytä tarkastella omana kokonaisuutenaan. Uutta tietoa päästöistä tuotetaan koko ajan ja mahdollisuudet objektiivisen ja kattavan yhteenvedon tekemiseen paranevat.

2 AGROBIOMASSA ENERGIANLÄHTEENÄ SUOMESSA

Tässä luvussa arvioidaan omiin laskelmiin ja kirjallisuustietoihin perustuen energiantuotantoon käytettävissä oleva agrobiomassan suurin määrä. Sitä verrataan vielä käyttämättömään puun ja turpeen energiapotentiaaliin. Luvun tarkoituksena on antaa käsitys agrobiomassan energiapotentiaalista suhteessa muihin kotimaisiin polttoaineisiin.

Agrobiomassa on yleisnimi maataloudesta peräisin oleville biomassoille. Sanaa peltobiomassa käytetään usein samassa tarkoituksessa, mutta peltobiomassa on agrobiomassan osajae. Muita agrobiomassoja ovat lanta, pilaantunut rehu, naatit sekä elintarviketeollisuuden sivutuotteet kuten esimerkiksi teurasjätteet, rankki ja hera.

Peltobiomassa tarkoittaa pelloilla tai turvetuotannosta vapautuneilla alueilla kasvatettuja energiakasveja (esim. ruokohelpi, öljykasvit) ja viljantuotannon sivutuotteita (olki), joita voidaan käyttää polttoaineena tai joista voidaan jalostaa kiinteitä tai nestemäisiä polttoaineita (Vapo 2011). Myös järviruo'on katsotaan kuuluvan ominaisuuksiensa puolesta peltobiomassoihin (Vapo 2011). Pellolla viljeltävistä energiakasveista ruokohelpi on tällä hetkellä eniten viljelty (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2012a).

Suomen pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategiassa todetaan Suomessa olevan 500 000 ha peltoa, joka voitaisiin käyttää muuhun kuin ruuantuotantoon. Energiakasvien viljely on yksi tapa käyttää peltoa (Työvoima- ja elinkeinoministeriö 2008).

Peltobioenergiakasvien sadon koostumus ja tekniset käsittelyominaisuudet vaihtelevat viljeltävän kasvin ja korjuuvaiheen mukaan. Koostumusta ja käsittelyominaisuuksia voidaan optimoida viljelytoimenpitein energiantuotantoprosessiin sopivaksi. Esimerkiksi lannoituksen vaikutusta biomassan poltto-ominaisuuksiin on tutkittu (Sander 1997, Lewandowski & Kauter 2003). Kuivat biomassat sopivat poltettavaksi. Ruokohelpeä ja olkea poltetaan usein yhdessä turpeen kanssa, koska turpeen sisältämä rikki reagoi helpi- tai olkimassan sisältämän kaliumin kanssa kaliumsulfaatiksi estäen kaliumkloridin muodostumista ja vähentäen korroosiota (Alakangas 2000, Lötjönen & Knuutila 2009). Sokerit ja tärkkelys soveltuvat etanolin raaka-aineiksi ja kasviöljyistä voidaan valmistaa biodieseliä (Sørensen 2004, da Rosa 2005). Hiilihydraatteja ja rasvoja sisältävät lietteet sopivat biokaasun tuotantoon. Biokaasua tuotetaan myös erityisesti sitä varten viljelyistä kasveista kuten maissista (Steffen ym. 1998, Sørensen 2004, da Rosa 2005).

Pellolla viljeltäviä energiakasveja sekä kasvi- ja eläintuotannon sivutuotteita arvioidaan energialähteinä energiatehokkuuden, ympäristövaikutusten, huoltovarmuuden ja talouden kriteerein, kuten muitakin energianlähteitä. Näiden seikkojen lisäksi joudutaan pohtimaan kilpailua energian ja

ruuantuotannon välillä. Pellot on raivattu tuottamaan ruokaa ja rehua ja bioenergiakasvit kilpailevat ruuan kanssa samasta peltoresurssista (Harvey & Pilgrim 2011).

Peltobioenergian tuotannon taloudellinen kannattavuus poikkeaa arviointikriteerinä energiatehokkuudesta tai ympäristövaikutuksista. Kannattavuutta voidaan säätää yhteiskunnan tuki- ja veropäätöksillä, mutta energiatehokkuuteen ja ympäristöystävällisyyteen vaikuttavat fysiikan, kemian ja biologian lainalaisuudet.

Peltobioenergian vertailu metsäbioenergiaan on perusteltua, koska puu on Suomen tärkein bioenergiaresurssi (Suomen virallinen tilasto 2012a). Samalla maa-alalla voidaan tuottaa joko pelto- tai metsäbioenergiaa. Peltobioenergiaa voidaan verrata myös turpeeseen, koska se on nykyään tärkeä kotimainen energialähde (Suomen virallinen tilasto 2012a).

Suomen maapinta-alasta on metsämaata 21,9 milj. ha (Metsäntutkimuslaitos, Metinfo 2011a) ja peltoa on 2,3 milj. ha (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2010). Suota ja turvemaata on 8,9 milj. ha, josta suurin osa on metsätalouskäytössä (Maa- ja metsätalousministeriö 2011a). Turve on kotimainen energianlähde (Suomen virallinen tilasto 2012a), mutta se ei ole uusiutuvaa biopolttoainetta, vaan turve luokitellaan fossiiliseksi tai hitaasti uusiutuvaksi polttoaineeksi (UNFCCC 2004, European Union 2006). Puu, turve ja peltobiomassa ovat kaikki energianlähteitä, joilla on Suomessa taloudellista merkitystä.

2.1 TÄRKEIMMÄT AGROBIOMASSAN LÄHTEET

Suomen määrällisesti kolme suurinta agrobiomassan lähdettä ovat olki, lanta ja pellolla kasvatettavat energiakasvit (Ahokas ym. 1983a, Maa- ja metsätalousministeriö 2005, Maa- ja metsätalousministeriö 2007). Ruokohelpi on ollut yleisin energiakasvi 2000-luvun alusta lähtien (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2012a). Viljaa poltetaan satunnaisesti, rypsistä valmistetaan biodieseliä ja rehukasvien viljelyä biokaasun raaka-aineeksi on kokeiltu. Energiakasvien viljelyalat ovat kuitenkin olleet ruokohelpeä lukuun ottamatta vaatimattomia (< 100 ha a^{-1}) ja siksi olki ja lanta ovat tärkeimmät agrobiomassan lähteet (Maa- ja metsätalousministeriö 2007, Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2012a). Energiakasvien viljelyn yleistymistä ohjaa ensisijaisesti taloudellinen kannattavuus, koska maataloudessa tehdään tuotantopäätöksiä taloudellisin perustein kuten muussakin yritystoiminnassa.

2.1.1 Olki

Olki on viljantuotannon sivutuote, joka pääsääntöisesti silputaan sadonkorjuun yhteydessä peltoon (Maa- ja metsätalousministeriö 2004). Ensimmäisen öljykriisin jälkeen Ahokas ym. (1983a) arvioivat, että 2/3 olkisadosta

voitaisiin korjata energiaksi. Olkisadon laskennalliseksi lämpöarvoksi saatiin 7,6 TWh, kun oljen kosteudeksi oletettiin 25 % ja lämpöarvoksi 12,4 MJ kg^{-1} (Ahokas ym. 1983a). Viljakasvien viljelyala oli tuolloin 1,2 milj. ha, kuten se on nykyäänkin (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2012a). Tietoa oljen käytöstä kuivikkeeksi ja energiaksi on vain vähän, mutta vuoden 2004 tiedon perusteella (Maa- ja metsätalousministeriö 2004) oljesta kerättiin 20 % kuivikkeeksi ja 6 milj. kg (noin 2 400 hehtaarin olkisato) käytettiin energiaksi.

Öljykriisin jälkeen kiinnostus oljen energiakäyttöön ilmeni tutkimustoimintana (Ahokas ym. 1983a, 1983b, Mäkelä ym. 1983) ja muutamia olkea polttoaineena käyttäviä kattilalaitoksia rakennettiin. Raakaöljyn hinta kuitenkin laski vuoden 1973 jälkeen (British Petroleum 2011) ja kiinnostus olkea kohtaan väheni. Olki nousi uudelleen esille, kun Maa- ja metsätalousministeriön nimittämä asiantuntijaryhmä selvitti mahdollisuuksia edistää uusiutuvan energian tuotantoa (Maa- ja metsätalousministeriö 2007). Asiantuntijaryhmä ei asettanut oljen energiakäytölle määrällistä tavoitetta, vaan suositteli selvittämään oljen, hampun ja pellavan potentiaalin ja käyttökelpoisuuden energian tuotannossa. Samaan aikaan Kauppa- ja teollisuusministeriön nimittämä asiantuntijaryhmä pohti keinoja lisätä bioenergian osuutta vuoteen 2015 mennessä (Kauppa- ja teollisuusministeriö 2007a). Tämä asiantuntijaryhmä arvioi oljen potentiaaliksi 10 TWh. Kun siitä vähennetään kuivikkeeksi käytettävä 20 %, jäljelle jää 8 TWh, kuten Ahokas ym. (1983a) arvioivat.

Suomen bioenergiayhdistys (Finbio) on laatinut strategian, jossa esitetään agrobiomassan energiakäytön pinta-ala- ja energiatavoitteet sekä aikataulu agrobiomassan käyttöönottamiseksi. Strategiaan sisältyvät ruokohelpi, olki, viljaetanoli, rypsi ja rapsi sekä biokaasu, jonka raaka-aineena on lanta ja peltobiomassa, taulukko 1.

Strategiassa poltto-oljelle esitetty 1 TWh:n energiamäärää vastaava korjuutavoite on 14 % Ahokkaan ym. (1983) esittämästä oljen energiapotentiaalista (taulukko 1). Pieni osuus johtuu siitä, että olki on haastava polttoaine korkeiden kalsium-, kalium- ja klooripitoisuuksien sekä tuhkan alhaisen sulamispisteen vuoksi (Alakangas 2000). Olki on kevyt materiaali ja sen energiatiheys on alhainen (Alakangas 2000). Kuljetusvälineissä ja varastoissa tarvitaan paljon tilaa (Paappanen ym. 2008). Lisäksi Suomessa on haastavaa korjata olkea, jonka vesipitoisuus on alle 25 % (Ahokas ym. 1983a). Tanskassa käytetään olkea energiantuotantoon eniten maailmassa ja kaukolämpölaitokset ottavat vastaan olkea, jonka vesipitoisuus on enintään 20 % (Straw for Energy Production 1998). Alhaisen kosteuden ohella lämpölaitokset suosivat ”harmaata olkea”, jolla tarkoitetaan pellolla sateessa lionnutta olkea. Liotus alentaa kalsium-, kalium- ja klooripitoisuuksia (Sander 1997). Harmaan oljen lämpöarvo on vasta puitua, keltaista olkea korkeampi alhaisemman tuhkapitoisuuden ansiosta (Straw for Energy Production 1998). Ruokohelpi korjataan keväällä, ja siksi sen haitallisten aineiden pitoisuudet ja vesipitoisuus ovat alhaisia (Alakangas 2000, Lötjönen & Knuutila 2009). Jos olki korjattaisiin keväällä, se saatai-

siin korjuun kuivempana ja se sisältäisi vähemmän haitallisia aineita. Eräs keino edistää polttotarkoitukseen sopivan oljen korjuuta voisi olla viljan korjuu riipimällä leikkaavan pöydän sijasta. Riipiminen jättäisi oljen pystyyn ja olki kuivuisi korjuukuntoon paremmin kuin karheella oleva olki (Lundin 1993). Riipijätekniikka tehostaisi myös viljan korjuuta (Lundin 1993).

Taulukko 1 Suomen bioenergiayhdistyksen (2007) esittämät peltoenergiastrategian mukaiset energiakasvien tuotantopinta-alatavoitteet vuosina 2010, 2015 ja 2020 sekä energiatavoite vuonna 2020.

Energian lähde	**2010**	**2015**	**2020**	
	ha	**ha**	**ha**	**TWh**
Ruokohelpi	50 000	100 000	150 000	4,5
Olki[1)]	40 000	70 000	100 000	1,0
Viljaetanoli	70 000	70 000	70 000	1,1
Rypsi ja rapsi	5 000	15 000	30 000	0,4
Biokaasu, raaka-aineena lanta ja biomassa				1,0
Yhteensä	**125 000**	**185 000**	**250 000**	**8,0**

1) Olki on viljantuotannon sivutuote. Oljen korjuualaa ei ole sisällytetty energiakasvien kokonaisalaan.

Finbion strategian oletuksia:

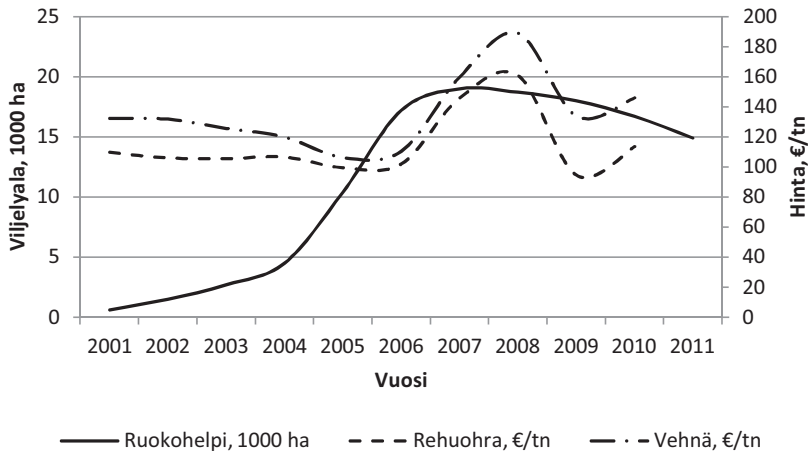
- Ruokohelven sato on vuonna 2020 vähintään 30 MWh ha^{-1} (7 Mg kuiva-ainetta hehtaarilta), kun se on nyt 15 – 20 MWh ha^{-1}. Lisäys on paremman korjuuteknologian ja lajikejalostuksen ansiota.
- Ruokohelpeä käytetään sadassa päästökaupan piiriin kuuluvassa laitoksessa, ja ruokohelven osuus kokonaisenergiasta on 10 %.
- Olkisato on 2 Mg ha^{-1} ja oljen kosteus 20 %, jolloin energiasato on 10 MWh ha^{-1}.
- Oljen huonojen poltto-ominaisuuksien vuoksi sitä poltetaan yhdessä kivihiilen kanssa. Oljen osuus kokonaisenergiasta on enintään 30 %.
- Laskettaessa etanolin energiasisältöä on ohrasta oletettu saatavan 3,5 Mg:n kuiva-ainesatoja hehtaarilta, jolloin ohrasadon energiasisältö on 16 MWh ha^{-1}.
- Rypsin siemensato on 1,6 Mg ha^{-1}. Öljysaanto on 0,32 Mg ha^{-1} ja varsisato 2 Mg ka. ha^{-1}, yhteensä 13 MWh ha^{-1} (Öljyn lämpöarvo on 38 MJ kg^{-1} ja varsien energiasisältö 10 MWh ha^{-1}).
- Biokaasua tuotetaan sadassa pienessä laitoksessa (1 MW).

Oljen energiasuhde oli yli 30, kun oljentuotannon energiapanokseksi laskettiin korjuu, kuljetus, varastointi ja murskaus käyttöpaikalla (Mäkinen ym. 2006). Energiasuhde oli korkeampi kuin minkään energiatarkoituksiin viljellyn kasvin energiasuhde (III). Korkea energiasuhde johtui siitä, että kaikki viljelyn energiapanokset oli allokoitu päätuotteena pidetylle viljalle (Mäkinen ym. 2006). Esitetty allokaatio on perusteltu siinä tapauksessa, että oljelle ei ole muuta käyttöä kuin energiantuotanto. Muita tapoja viljelyn energiapanosten allokoimiseksi pää- ja sivutuotteiden kesken olisivat jako tuotteiden markkina-arvon tai energiasisällön mukaan (Mäkinen ym. 2006).

2.1.2 Ruokohelpi

Suomessa on perinteisesti viljelty rehua eläimille ja ravintokasveja ihmisille. Viljely tekstiilien tai teollisuuden raaka-aineeksi on ollut vähäistä pellavaa lukuun ottamatta. Ruokohelven viljely energiakäyttöön lisääntyi kuitenkin nopeasti 2000-luvun alussa (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2007) ja ruokohelpi on tällä hetkellä ainoa bioenergiakasvi, jota viljellään tuhansien hehtaarien alalla.

Kuva 1 esittää ruokohelven viljelyalan aikajaksolla 2001 – 2011. Nopea kasvu taantui 2007, ja viljelyala kääntyi laskuun (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2012a, 2012b). Viljelyalan laajentumisesta huolimatta ala on ollut enimmilläänkin alle prosentin Suomen peltopinta-alasta. Viljelyala kasvoi aikana, jolloin viljan hinta oli alhainen (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2012a). Helpialan kasvun taittumiseen ovat saattaneet vaikuttaa viljan hintaa enemmän päästöoikeuksien alhaiset hinnat, tekniset vaikeudet poltossa sekä helpeä polttavien laitosten pieni määrä (Mustonen 2012). Helpeä tuotettiin ylimäärin käyttöön nähden ja sen seurauksena tuotannon kasvu taittui.



Kuva 1 Ruokohelven viljelyalan kehitys 2001 – 2011 sekä rehuohran ja vehnän hintakehitys 2001 - 2010. (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2007, 2012a, 2012b).

Ruokohelven energiasuhde todettiin tässä tutkimuksessa korkeimmaksi Suomessa energiakäyttöön viljeltävistä kasveista ja helpi tuotti yhtä suuren määrän nettoenergiaa hehtaarilta kuin sokerijuurikas (III). Ruokohelpi on vaivaton ja viljelyvarma kasvi (Pahkala ym. 2005, Lötjönen & Knuutila 2009). Sadonkorjuuseen voidaan käyttää samaa kalustoa kuin säilörehun ja heinän korjuuseen (Lötjönen & Knuutila 2009). Ruokohelven sadot olivat koeoloissa jopa yli 10 Mg ka. ha^{-1} (Sankari & Mela 1998, Sai-

jonkari-Pahkala 2001), mutta myöhemmin Pahkala ym. (2009) arvioivat ruokohelven keskisadoksi 3,0 – 3,6 Mg ka ha^{-1} käytännön viljelyssä. Ongelmana ovat olleet erityisesti suuret korjuutappiot. Ruokohelven maanpäällisestä kasvustosta on saatu talteen vain 50 – 60 % (Lötjönen 2008). Sadon odotetaan kuitenkin nousevan viljelytekniikan kehittämisen (Lötjönen 2008) ja lajikejalostuksen (Sahramaa & Hömmö 2000) myötä.

Ruokohelven viljelyä tutkittiin laajasti 1990-luvulla Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen johtamissa hankkeissa Agrokuidun tuotanto ja käyttö Suomessa sekä Biomassan tuotanto kuidun ja energian raaka-aineeksi (Hemming ym. 1996, Pahkala ym. 1996, Salo 1998, Salo 2000a, b). Ruokohelven todettiin tuottavan suuria kuiva-ainesatoja ja soveltuvan muutenkin hyvin Suomen viljelyoloihin (Saijonkari-Pahkala 2001).

Kun ruokohelven viljelyala oli suurimmillaan vuonna 2007, sen laskennallinen sato oli energiaksi muutettuna 0,5 TWh. Energian määrä laskettiin olettaen sadoksi 5,0 Mg ka ha^{-1} (Lötjönen 2009) ja kuiva-aineen lämpöarvoksi 17,6 MJ kg^{-1} (Alakangas 2000). Jos kaikki ylijäämäpelto, yhteensä 500 000 ha (Työvoima- ja elinkeinoministeriö 2008), käytettäisiin ruokohelven viljelyyn, sadon lämpöarvo olisi 12,2 TWh.

2.1.3 Lanta

Lanta on kasviperäistä kotieläintuotannon sivutuotetta, johon on usein sekoittunut kuivikkeita ja vähäisessä määrin rehua (Kemppainen & Heimo 1981). Lannan sisältämää energiaa voidaan parhaiten hyödyntää biokaasun tuotannossa (Maa- ja metsätalousministeriö 2007). Lannan kompostointi ja lämmön talteenotto tai polttaminen olisivat muita tapoja hyödyntää lannan energiaa, mutta ne eivät ole edenneet kaupallisiksi sovellutuksiksi (Sørensen 2004, da Rosa 2005). Märkämädätykseen soveltuvat yleensä lietelannat, joiden kuiva-ainepitoisuus on alle 12 %, ja kuivamädätykseen lannat, joiden kuiva-ainepitoisuus on 20 – 35 % (Lemmer 2008). Märkämädätyksen edellytyksenä on, että liete on pumpattavaa. Kuivamädätyksessä lannan pitää pysyä keossa (Lemmer 2008). Mainittujen kuiva-ainepitoisuuksien väliin jäävä lanta pitäisi laimentaa vedellä märkämädätykseen sopivaksi tai kuivittaa kuivamädätykseen sopivaksi.

Kauppa- ja teollisuusministeriön asettama asiantuntijaryhmä arvioi lannan energiapotentiaaliksi 1,5 TWh (Kauppa- ja teollisuusministeriö 2007b). Taloudelliset ja käytännölliset rajoitteet huomioon ottaen siitä voitaisiin hyödyntää 0,4 TWh. Valtioneuvoston antama asetus uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta koskee biokaasulaitoksia ja sen toivotaan edistävän lannan käyttöä energiantuotannossa (Valtioneuvoston asetus 1397/2010).

2.1.4 Ohra ja rypsi

Suomessa on esitetty suunnitelmia polttoaine-etanolin tuottamiseksi, mutta ne eivät ole edenneet toteutusvaiheeseen. Etanolin raaka-aineeksi käytettäisiin ohraa tai vehnää. Tuotannon esteenä ovat taloudellinen kannattamattomuus (Korpi 2011) sekä se, että Suomessa tuotetun etanolin ei ole todettu vähentävän CO_2-päästöjä siten, kuin direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä (Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi 2009/28/EY) edellyttää (Sinkko ym. 2010).

Biodieselin tuottaminen rypsistä käynnistyi vuosina 2005 - 2006, mutta kiinnostus tuotantoon väheni, kun liikennekäyttöön tarkoitettua biodieseliä alettiin verottaa samalla tavoin kuin runsaasti rikkiä sisältävää fossiilista dieselöljyä (Laki 1472/1994). Valmisteverolakia on tältä osin muutettu vuoden 2007 lopussa, mutta edelleenkin biodieselistä peritään valmisteveroa kuten rikittömästä dieselöljystä (Laki 1305/2007). Biodiesel on vapaa valmisteverosta muussa kuin liikennekäytössä.

2.2 PELTOBIOENERGIAN ENERGIAPOTENTIAALI VERRATTUNA MUIHIN KOTIMAISIIN BIOPOLTTOAINEISIIN

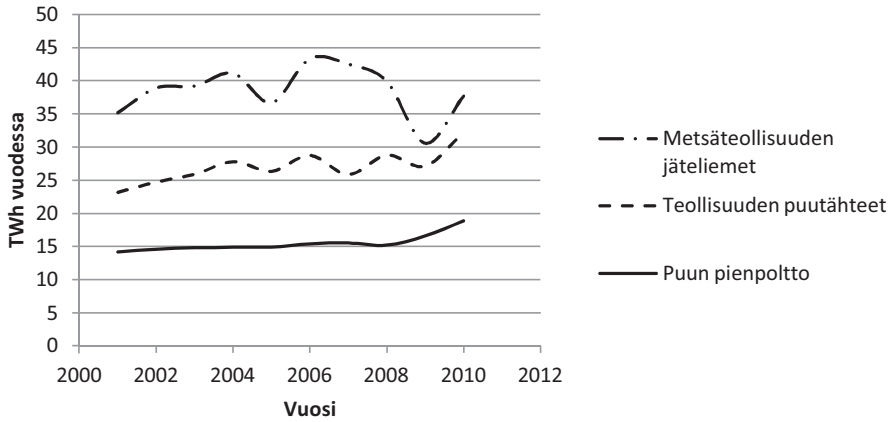
Agrobiomassa ja puu ovat kotimaisia biopolttoaineita ja niitä käytetään usein turpeeseen sekoitettuna lämmön ja sähkön tuotannossa (VTT, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus 2004). Puun ja turpeen energiakäytöstä on vuosikymmenien kokemus ja menetelmät ja tekniikka niiden tuottamiseen ovat olemassa (VTT, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus 2004), joskin kehitystyötä tehdään edelleen. Puulle ja turpeelle on markkinat sekä markkinahinta, joka seuraa fossiilisten polttoaineiden hintaa (Suomen virallinen tilasto 2012b). Agrobiomassa on uusi tulokas energiamarkkinoilla, ja sen pitäisi vakiinnuttaa asemansa energianlähteenä. Biomassan tuottajien haaste on tarjota agrobiomassaa markkinoille rationaalisen energiantuotannon mahdollistavia määriä. Saatavuus, käyttöominaisuudet, polttoaineen ja päästöoikeuksien hinnat sekä energian tuotannon ympäristövaikutukset ratkaisevat, tuleeko agrobiomassasta Suomessa merkittävä energianlähde.

2.2.1 Puu

Suomen metsien puureservi oli 2206 milj. kiinto-m^3 kuorellista runkopuuta vuonna 2008 ja vuotuinen kasvu oli 100 milj. m^3 (Metsäntutkimuslaitos, Metinfo 2011b). Kun puumäärä muunnetaan energiaksi muuntosuhteella 2 MWh/kiinto-m^3 (Metsäntutkimuslaitos, Metinfo 2011c), runkopuureservin lämpöarvoksi saadaan 4412 TWh. Vuotuinen kasvu vastaa 200 TWh:n energiamäärää. Vertailun vuoksi todettakoon, että Suomen energiankulu-

tus oli 408 TWh vuonna 2007 (Suomen virallinen tilasto 2012a). Suomen puuvarat ovat kasvussa, koska keskimääräinen vuotuinen poistuma hakkuiden ja metsätuhojen kautta on ollut kaudella 2004 - 2008 68 % keskimääräisestä vuotuisesta kasvusta (Suomen virallinen tilasto 2010).

Järeä runkopuu on ensisijaisesti sahojen, selluloosa- ja paperitehtaiden sekä vaneritehtaiden raaka-ainetta. Jotta puuta riittäisi puunjalostusteollisuuden käyttöön, energian tuottamiseen on alettu enenevässä määrin käyttää hakkuutähteitä, pieniläpimittaista runkopuuta ja kantoja. Jo nyt hyödynnetään metsäteollisuudessa syntyvät sivujakeet (mustalipeä, kuori, sahanpuru ja hake) kokonaan tai osittain energiaksi (VTT, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus 2004, Suomen virallinen tilasto 2012a). Parhaillaan tutkitaan mahdollisuuksia tuottaa puusta liikennepolttoainetta. Metsäteollisuusyhtiöt Metsäliitto, Stora-Enso ja UPM suunnittelevat yhteistyössä muiden yritysten kanssa esimerkiksi biodieselin tuottamista puusta (Raunio 2010).



Kuva 2 Puun käyttö energianlähteenä Suomessa vuosina 2001 – 2010 (Suomen virallinen tilasto 2012a).

Kaudella 2001 – 2010 käytettiin Suomessa puuta energianlähteenä kuvan 2 mukaisesti (Suomen virallinen tilasto 2012a). Sulfaattiselluloosatehtaat tuottivat 31 - 43 TWh energiaa vuodessa polttamalla jäteliemiä, joista mustalipeä oli tärkein. Mustalipeä on runsaasti ligniiniä sisältävän aineksen ja keittokemikaalien seos. Mustalipeä poltetaan soodakattilassa kemikaalien regeneroimiseksi ja energian tuottamiseksi. Polttamalla kuorta, metsähaketta ja sahanpurua tuotettiin 23 - 32 TWh energiaa. Metsähake on yleisnimitys, joka tarkoittaa rangoista, kokopuusta ja hakkuutähteistä tehtyä haketta. Edellisten lisäksi yksityistalouksissa käytettiin vuosittain polttopuuta määrä, joka vastaa 14 – 19 TWh:n energiamäärää. Metsäteollisuuden jätelienten käyttö väheni vuoden 2008 taloudellisen taantuman

seurauksena lähes kolmanneksen, mutta käyttö on vuonna 2010 kääntynyt kasvuun. Teollisuuden puutähteiden käyttö lisääntyy vakaasti ja myös polttopuun käyttö lisääntyy (Kuva 2).

Suomessa on tehty useita arvioita käyttämättömän puubiomassaresurssin suuruudesta (Laitila ym. 2008, Maidell ym. 2008, Kärhä ym. 2009). Arvioissa lähdetään siitä, että runkopuu käytetään edelleenkin pääosin sahoilla sekä sellu- ja vaneriteollisuudessa. Käyttämätöntä puubiomassaa ovat hakkuutähteet, kannot ja pieniläpimittainen harvennuspuu. Teknis-taloudellisissa käyttöarvioissa otetaan huomioon, että osa harvennuksista on taloudellisesti kannattamattomia vaikeiden korjuuolojen tai pienen hakkuukertymän vuoksi. Näillä oletuksilla käyttämätön puubiomassapotentiaali on 23 – 25 TWh. Kun puuenergian käyttö vuonna 2007 oli 82 TWh (20 % Suomen primäärienergiankulutuksesta) (Suomen virallinen tilasto 2012a), se voisi maksimissaan olla 105 – 107 TWh a^{-1}.

Lyhytkiertopajun viljely on puubiomassan tuotantoa pellolla. Pajun viljely ei ole kuitenkaan yleistynyt, vaikka pajun tuotantoa on tutkittu sekä Suomessa että erityisesti Ruotsissa (Heino & Hytönen 2005, Swedish National Energy Agency 2004). Ruotsissa on lanseerattu lyhytkiertopajun tuotantoketju pajun jalostuksesta pajuhakkeen käyttöön voimalaitoksella. Pajun viljelyala oli Ruotsissa 13 700 ha vuonna 2009. Viljelyala ei ole kasvussa, vaan vuonna 2010 se pieneni 3 % edellisen vuoden viljelyalasta (Swedish Board of Agriculture – SJV 2010). Päätös pienentää pajun istutustukea pysäytti viljelyalan kasvun ja saman suuntaan on vaikuttanut viljan hinnan nousu. Suomessa pajua viljellään koeluonteisesti 10 – 15 hehtaarin alalla (Pohjonen 2010).

Vaikka paju on Skandinaviassa yleinen luonnonkasvi, sen viljelyssä on ongelmia. Ensimmäiset energiapajulajikkeet olivat hallanarkoja. Rikkakasvien torjunta on tärkeää pajukasvuston perustamisvaiheessa. Lehtikuoriaiset, lehtiruoste ja villieläimet ovat myös aiheuttaneet tuhoja (Gustafsson ym. 2010). Edellä mainituista syistä pajun tuotannon taloudellinen kilpailukyky on ollut huono, eikä paju ole saavuttanut laajempaa suosiota energiakasvina.

2.2.2 Turve

Suomen maapinta-alasta on yksi kolmasosa suota (Korhonen ym. 2008). Jyrsinturvetta käytetään energiantuotantoon voimalaitoksilla ja palaturvetta lämmittämiseen omakotitaloissa ja maatiloilla (VTT, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus 2004). Turvetta käytetään myös kasvualustana puutarhaviljelyssä, kuivitukseen kotieläintaloudessa ja imetysturpeena ympäristönsuojelussa (Leinonen 2010). Metsäliitto ja Vapo suunnittelevat dieselöljytuotannon aloittamista turpeesta ja puusta (Raunio 2010). Tehtaan sijoituspaikaksi on valittu Kemin Ajos (Myllylä 2012). Hankkeen esitetään toteutuvan, jos sille myönnetään Euroopan komission NER 300 investointituki (Myllylä 2012).

Virtanen ym. (2003) ovat arvioineet teknisesti käyttökelpoiseksi turveresurssien määräksi 12 800 TWh. Se on 31-kertainen energiamäärä verrattuna Suomen primäärienergian kulutukseen vuonna 2007 (408 TWh) (Suomen virallinen tilasto 2012a). Turpeen vuotuinen kasvu on 37 TWh (Selin 1999) ja energiaturpeen kulutus on vaihdellut vuosina 2001 – 2010 välillä 17 - 28 TWh (Suomen virallinen tilasto 2012a).

2.3 YHTEENVETO BIOMASSARESURSSEISTA

Yhteenveto Suomen biomassaresursseista on esitetty taulukossa 2. Puusta tuotetaan tällä hetkellä eniten energiaa ja seuraavaksi eniten turpeesta. Agrobiomassan osuus on näihin verrattuna vähäinen. Puu- ja turveresurssit ovat suurelta osin jo käytössä, kun kriteerinä on kestävä käyttö, eli resurssia käytetään enintään sen verran, kuin se uusiutuu. Peltobiomassa ja lanta ovat lähes käyttämättömiä energiaresursseja. Peltobiomassan potentiaaliin vaikuttavat energiakasvien viljelyala ja olkisadon käyttö energiantuotantoon. Lannalla on lähinnä yksityistaloudellista merkitystä energiantuotannossa. Arvioitaessa taulukon 2 potentiaaleja tulee muistaa, että ne perustuvat biomassan lämpöarvoon tuotantopaikalla. Potentiaalista saadaan suurin osa hyötykäyttöön lämmöntuotannossa lähellä tuotantopaikkaa, koska biomassan kuljettaminen ja prosessointi muiksi energiamuodoiksi kuluttaa energiaa.

Taulukko 2 Puun, turpeen ja agrobiomassan energiapotentiaali, niiden vuotuinen käyttö ja käyttämätön energiapotentiaali.

	Puun, turpeen ja agrobiomassojen maksimaalinen vuotuinen energiapotentiaali, TWh	**Käytössä, TWh a^{-1}**	**Käyttämätön potentiaali**	
			TWh a^{-1}	**Prosenttia kokonaispotentiaalista**
Puu [1)]	105	82	23	22
Turve	37	17 - 28	9 -20	24 - 76
Agrobiomassa				
- ruokohelpi [2)]	2 - 12	0,5	1,5 – 11,5	75 – 96
- olki	8	0,0	8,0	100
- lanta	1,5	0,0	1,5	100
Yhteensä	**11,5 – 21,5**	**0,5**	**11 - 21**	

[1)] Potentiaalilla tarkoitetaan hakkuutähteitä, kantoja ja harvennuksilta saatavaa pienpuuta, jota ei voida käyttää sellun valmistukseen tai sahatavaran raaka-aineeksi.
[2)] Arviot ruokohelven potentiaalisesta viljelyalasta vaihtelevat 100 000 – 500 000 hehtaariin.

Suomen peltobiomassapotentiaalia ovat arvioineet Suomen Bioenergiayhdistyksen (Finbio) lisäksi mm. Lampinen ja Jokinen (2006), jotka esit-

tivät Suomen maatilojen maatalousteknisiksi energiapotentiaaliksi 472 TWh. Arvio käsitti Suomen koko peltoalan eikä vain bioenergiakäyttöön liikenevää osaa. Arvio perustui yhteen Ahvenanmaalla koeoloissa saatuun sokerijuurikassatoon sekä koeoloissa saatuihin ruokohelpisatoihin. Potentiaali kuvastaa pellon maksimaalista tuottokykyä ja asettaa teoreettisen enimmäismäärän, jonka lähelle tuskin päästään.

Tuomisto (2010) on tutkinut pelto-, lanta- ja jäteperäisen energian alueellisia potentiaaleja Suomessa. Hänen tutkimukseensa sisältyivät energiantuotantoa varten viljeltävät kasvit sekä elintarvikkeiden ja rehujen viljelyssä syntyvät sivujakeet kuten olki, naatit ja jäteperunat. Pelto-, lanta- ja jäteperäisen energian maksimaalinen kokonaispotentiaali oli 25 TWh, josta peltoenergian osuus oli 20,5 TWh (Tuomisto 2010). Teknistaloudellinen potentiaali oli 79 % edellisestä eli 16,2 TWh. Tuomisto tutki myös viljelijöiden halukkuutta tuottaa energiaa kasveista ja lannasta. Peltoenergian tarjontahalukkuus oli 8 % maksimipotentiaalista ja lannan tarjontahalukkuus 1 %. Silvennoinen ym. (2008) sekä Simola & Kola (2009) ovat myös tutkineet viljelijöiden kiinnostusta bioenergian tuotantoon. Energian tuottaminen puusta kiinnosti viljelijöitä eniten (20 % viljelijöistä), alle 12 % oli kiinnostunut peltoenergian tuottamisesta ja alle 4 % lantaenergian tuottamisesta.

Peuran ja Hyttisen (2011) tutkimuksessa tarkasteltiin bioenergiapotentiaalia ja energian kysyntää Pohjanmaalla sekä muilla maatalousvaltaisilla alueilla Suomessa. Potentiaalia oli pääsääntöisesti enemmän kuin kysyntää. Maatalousvaltaiset alueet voisivat olla energiaomavaraisia ja tuottaa energiaa suuriin asutuskeskuksiin ja tehdaspaikkakunnille. Itä- ja Pohjois-Suomessa puu oli tärkein bioenergian lähde, kun taas Etelä- ja Länsi-Suomen potentiaali koostui pääsääntöisesti maatalouden biomassoista. Vaikka suuri osa Suomesta voisi olla maantieteellisesti energiaomavaraista, suuret asutuskeskukset ja tehdaspaikkakunnat olisivat energian alituotantoaluetta.

Edellä esitetyn tarkastelun perusteella agrobiomassan teknistaloudellinen energiapotentiaali oli enimmillään samaa suuruusluokkaa (20 TWh) kuin käyttämätön, kestävä puuenergiapotentiaali. Agrobiomassan energiapotentiaalin toteutuminen edellyttäisi energiakasvien viljelyä 500 000 ha:n alalla. Viljelijöiden kiinnostus peltobioenergian ja lantaenergian tuottamiseen on vähäisempää kuin kiinnostus puuenergian tuottamiseen ja viljelijät haluavat käyttää peltoresurssia ensisijaisesti ruuan ja rehun tuotantoon. Jatkossa pitäisi tutkia tekijöitä, jotka estävät todettujen potentiaalien hyödyntämistä sekä mahdollisuuksia esteiden poistamiseen. Bioenergiasta saatava hinta vaikuttaa epäilemättä tarjontahalukkuuteen, mutta myös veropäätöksillä voidaan vaikuttaa bioenergian tuotantoon. Riippumattomuus ulkopuolisen energian saatavuudesta ja hinnasta voi olla yksi kannuste bioenergian tuottamiseen.

Tarkastelu peltobioenergian käytön kehittymisestä suhteessa sille asetettuihin tavoitteisiin osoittaa, että ainakin toistaiseksi tavoitteista on jääty selvästi (Maa- ja metsätalousministeriö 2005, Suomen bioenergiayh-

distys 2007). Maatalouden ulkopuolelta ei ole ilmaantunut kysyntää, joka kannustaisi agrobiomassan tuottamiseen, eikä yhteiskunnassa ole energiapulaa, joka ohjaisi viljelijät huolehtimaan omasta tai muiden energian saannista. Maataloudessa käytettävistä suorista energiapanoksista huomattava osa on nestemäisiä polttoaineita tai sähköä (I, III, IV ja V), joiden korvaamiseksi biomassaa olisi jalostettava huomattavasti. Biomassan tuottaminen ja jalostus edellyttäisivät osaamista ja investointeja. Maataloustuotannon erikoistuminen vaatii samoja resursseja ja viljelijät joutuvat valitsemaan, suuntautuvatko he entistä enemmän maatalouteen vai sivuelinkeinoihin, joista bioenergian tuotanto on yksi vaihtoehto.

3 ENERGIA-ANALYYSIMENETELMÄT JA NIIDEN SOVELTAMINEN PELTOBIOENERGIAN TUOTANTOON

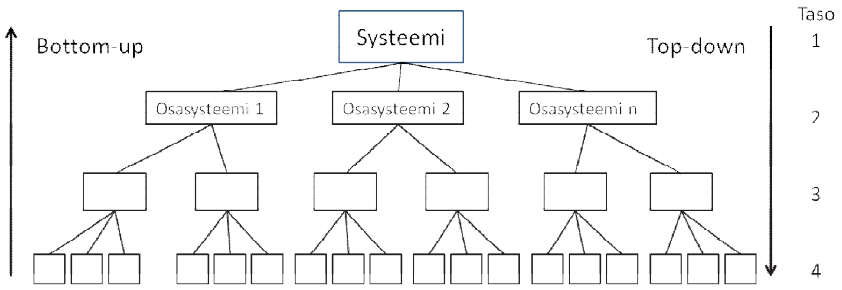
Energia-analyysille ei ole olemassa yhtä yleisesti hyväksyttyä määritelmää. Energia-analyysi voidaan tehdä minkä tahansa tuotteen tai palvelun tuottamiseen tarvittavan energiamäärän tutkimiseksi, mutta analyysin tavoitteena voi myös olla laajempi ymmärrys energiapolitiikan, markkinoiden, resurssien, teknologioiden, ympäristön ja infrastruktuurin vuorovaikutuksista (National Renewable Energy Laboratory 2011). Energia-analyysin tavoitteet ja suoritustapa voivat siis vaihdella laajasti. Analyysejä käytetään edistämään energiatehokkaita ja uusiutuvaa energiaa hyödyntäviä ratkaisuja kaupallisiksi sovellutuksiksi. Tuotteen tai palvelun tuottamiseen tarvittavalla energiamäärällä tarkoitetaan niiden valmistuksen suoraa ja epäsuoraa energiankulutusta. Siihen lisätään materiaalien kuten esimerkiksi rakennuspuun lämpöarvo (Slesser 1974). Puuhun sitoutunut kemiallinen energia säilyy rakennuksen eliniän ajan, mutta se menetetään, jos puuta ei käytetä energiantuotantoon rakennuksen purkamisen jälkeen.

Peltobioenergiaan liittyvien energia-analyysien tavoitteena on usein tutkia, kuinka paljon tuotantoon käytetyillä energiapanoksilla tuotetaan käyttökelpoista energiaa (Börjesson 1996, Boehmel ym. 2007, Angelini ym. 2009, Alluvione ym. 2011). Tutkimuksissa saadaan selville myös tuotantoon tarvittavat energiamuodot (sähkö, kiinteät, nestemäiset ja kaasumaiset polttoaineet) sekä niiden jakauma. Peltobiomassan tuotantoketjut ovat tyypillisesti monimutkaisia biologisia systeemejä, jotka sisältävät suuren määrän komponentteja. Tuotantoketjussa on mukana eläviä organismeja, joiden käyttäytymistä ei voida aina ennustaa (Gustafsson ym. 1982). Peltobiomassan tuotantoketjut ovat lisäksi alttiita sään vaikutukselle ja sää on merkittävä satunnaistekijä (Rosenzweig ym. 2001).

Energia-analyysi tehdään usein ympäristövaikutusten arvioinnin yhteydessä. Ympäristövaikutusten arviointia ohjeistavissa standardeissa (SFS-EN ISO 14040 2006, SFS-EN ISO 14044 2006) todetaan, että epä-

varmuus on arvioinnille luontaista ja että arvio ei ole ennuste todellisista tai tarkoista ympäristövaikutuksista. Epävarmuus koskee myös energian käyttöä, joka on merkittävä ympäristövaikutusten aiheuttaja. Epävarmuutta hallitaan herkkyys- ja epävarmuusanalyysien avulla. Herkkyysanalyysissä arvioidaan lähtötietojen valinnan vaikutuksia tuloksiin. Epävarmuusanalyysi ilmaisee lähtötiedon epävarmuuden vaikutuksen tulosten epävarmuuteen (SFS-EN ISO 14040 2006).

Energia-analyysimenetelmät voidaan jakaa lähestymistapansa perusteeella bottom-up- ja top-down-tekniikoihin. Bottom-up-tekniikassa lasketaan yhteen systeemin perusprosessien tai komponenttien energiankulutus ylempien tasojen ja lopulta koko systeemin energian kulutukseksi (SFS-EN ISO 14040 2006, SFS-EN ISO 14044 2006). Top-down-tekniikassa lähdetään liikkeelle koko systeemin energiankulutuksesta, joka saadaan esimerkiksi energiatilastoista (Bullard ym. 1978). Systeemi jaetaan osasysteemeihin (tasot 2,3,4 kuvassa 3) ja niiden energiankäyttö todetaan tai päätellään tilastoista. Jos tilastotietoa ei ole saatavissa, käytetään sopivaksi katsottavaa allokointimenetelmää ylemmän tason energiankulutuksen jakamiseksi alemmalle tasolle. Kuva 3 havainnollistaa systeemirakennetta ja bottom-up- ja top-down-analyysien etenemissuunnat (Gustafsson ym. 1982).



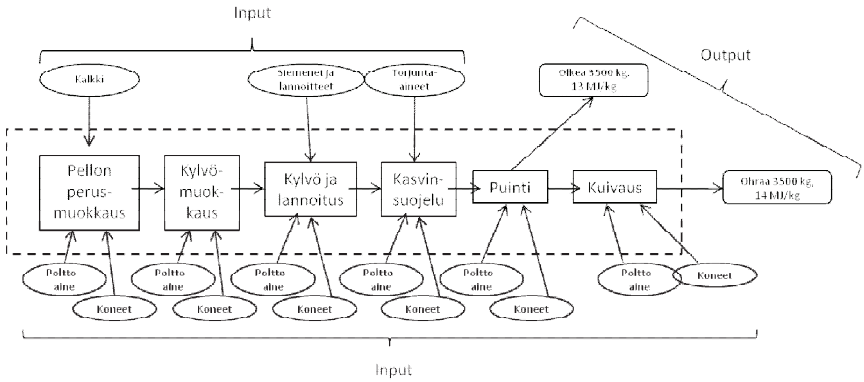
Kuva 3 Energia-analyysin etenemissuunnat sovellettuna Gustafssonin ym. (1982) esittämään systeemirakenteeseen.

3.1 BOTTOM-UP- JA TOP-DOWN-TEKNIIKAT PELTOBIOENERGIAKETJUJEN ANALYSOINNISSA

Peltobioenergiaa tuotetaan viljelemällä energiakasveja (V). Viljely koostuu monista työvaiheista ja viljelyyn tarvitaan lukuisia materiaalisia tuotantopanoksia kuten siemeniä, lannoitteita ja koneita (I, II, III). Viljelyä tarkastellaan useimmiten rajattuna systeeminä, johon menee sisään panoksia (input) ja josta tulee ulos tuotoksia (output) (II), (Kuva 4). Kun halutaan tietää tuotannon energiasuhde (output/input), ei ole välttämätöntä ymmärtää, mitä systeemin sisällä tapahtuu (black box –tarkastelu). Peltobioenergiaketjuja analysoitaessa ymmärtäminen on kuitenkin eduksi, jotta analyysin tekijä osaa päätellä tuotannon aikaansaamiseen tarvittavat panokset ja

niiden määrät. Prosessin tunteminen mahdollistaa myös sen kehittämisen ja ohjaamisen.

Biokaasuprosessi on esimerkki black box -prosessista, jonka kaikkia yksityiskohtia ei tunneta (Fischer & Krieg 2001). Kokemuksen perusteella osataan arvioida kaasun saanto ja laatu, kun reaktoriin syötetään tietynlaista massaa ja kun lämpötila pidetään sopivissa rajoissa. Biokaasun tuotanto on yksityiskohdiltaan monimutkainen mikrobiologinen prosessi, joka osataan toistaiseksi kuvata vain karkealla tasolla.



Kuva 4 Peltobiomassan tuotantoketjun systeemin määrittely ja rajaus, esimerkkinä ohran tuotantoketju (I, III).

Kuvan 4 mukainen peltobiomassan tuotantoketjun energia-analyysi on top-down- ja bottom-up-tekniikoiden yhdistelmä. Se on myös osittain black box -tarkastelu, koska kasvien kasvuun ja ympäristötekijöihin liittyvät ilmiöt ymmärretään vasta osittain. Tästä on osoituksena se, että jokin tuotantopanosten ja ympäristöolojen yhdistelmä voi tuottaa joskus odotettua suuremman sadon esimerkiksi kasvitautien ja tuholaisten vähäisyydestä johtuen. Useimmiten sato on odotetun mukainen, mutta se voi olla myös odotettua pienempi, vaikka kaikki työt on tehty ajallaan ja parhaan tietämyksen mukaan (Mukula & Rantanen 1987).

Kun peltobioenergian tuotannon energia-analyysi sijoitetaan kuvaan 3, se asettuu tasolle kaksi tai kolme. Peltobioenergia on osa suurempaa energiahuoltojärjestelmää, mutta toisaalta peltobioenergian tuottamiseen käytetään runsaasti panoksia, jotka tulevat muista järjestelmistä. Tasolta kaksi tai kolme liikutaan pääsääntöisesti ylöspäin, mutta jonkin tietyn energiapanoksen selvittämiseksi on joskus tarpeen liikkua myös alaspäin. Vaikka kuvan 3 energia-analyysi on eri tekniikoiden yhdistelmä, se on ensisijaisesti bottom-up-tekniikkaa noudattava prosessianalyysi.

Systeemiin sisään menevät suorat ja epäsuorat energiapanokset inventoidaan yleensä kirjallisuustietojen perusteella (I, III). Kirjallisuudessa ei aina esitetä läpinäkyvästi energiapanoksiin liittyviä oletuksia, minkä vuoksi niiden vastaavuutta tutkittavan systeemin kanssa ei voida varmistaa. Käy-

tännössä on vain harvoin mahdollista tutkia yksityiskohtaisesti tuotantopanoksen valmistamiseen käytettyä energiamäärää tai tietyn työvaiheen tekemiseen tarvittavaa energiamäärää. Epävarmuus on siis analyysille luontaista ja epävarmuutta on pyrittävä hallitsemaan (SFS-EN ISO 14040 2006, SFS-EN ISO 14044 2006).

Standardissa SFS-EN ISO 14040 (2006) kuvattu prosessianalyysi inventaariovaiheineen on työläs ja osa energiapanoksista jää huomioon ottamatta, koska kaikkien tuotantopanosten tuottamiseen tarvittavia energiapanoksia ei voida aina selvittää loppuun saakka. Selvittäminen edellyttäisi, että palataan tuotantoketjussa askel askeleelta taaksepäin ottaen huomioon jokaisen tuotteen ja palvelun aikaansaamiseen tarvittavat pienetkin energiapanokset. Käytännössä selvitystyö lopetetaan, kun energiapanos alittaa rajauskriteeriksi kutsutun raja-arvon. Rajauskriteeri tarkoittaa energiavirran määrää, joka määritellään jätettäväksi pois selvityksestä (SFS-EN ISO 14044 2006).

Top-down-tekniikkaa käytettäessä lasketaan tuotantosektorin energiaintensiteetti jakamalla tuotantosektorin energiankulutus tuotannon arvolla (Tilastokeskus 2012). Tiedot energiankulutuksesta ja tuotannon arvosta saadaan kansantalouden tilastoista. Energiaintensiteetin yksikkö on J/€. Tuotantosektori jakautuu edelleen tuotesegmentteihin, joiden energiankulutus lasketaan kertomalla niiden tuotannon arvo energiaintensiteetillä. Menettely soveltuu parhaiten yleisluonteisiin talouden ja energiankulutuksen tarkasteluihin. Sillä ei saada tietoa yksittäisten tuotteiden valmistukseen käytettävistä energiapanoksista tai tuotantoprosessien energian käytössä tapahtuneista muutoksista. Top-down-tekniikkaa voidaan käyttää sitä tehokkaammin, mitä yksityiskohtaisemmin energian käyttö ja tuotannon arvo on tilastoitu. Rahan arvon muuttuminen pitää ottaa huomioon, jos verrataan eri aikoina tehtyjä analyysejä. Top-down-menettelyn hyviä puolia ovat sen nopeus ja se, että kaikki tuotantoon kohdistuva energiankulutus tulee yleensä otettua huomioon. (Bullard ym. 1978, Böhringer & Rutherford 2006.)

Teoriassa bottom-up- ja top-down-tekniikoilla tulisi saada energian käytöstä sama lopputulos. Näin ei kuitenkaan ole asian laita. Nässen ym. (2007) vertasivat 11 tutkimusta, joissa oli selvitetty energian käyttöä rakentamisessa. Tutkimuksista seitsemän oli elinkaariarviointeja, joissa oli käytetty prosessianalyyttistä bottom-up-tekniikkaa. Neljässä tutkimuksessa oli käytetty top-down-tekniikkaa tai bottom-up- ja top-down-tekniikoiden yhdistelmää. Nässen ym. (2007) mukaan bottom-up-tekniikalla saatu energiapanos (GJ/m^2) oli keskimäärin 53 % top-down-tekniikalla saadusta energiapanoksesta. Tutkijat päättelivät prosessianalyysin aliarvioivan erityisesti kuljetusten, rakennustöiden, rakentamiseen käytettävien koneiden sekä palveluiden tuottamisen energiapanosta. Johtopäätös koski myös kasvihuonekaasupäästöjä, jotka arvioidaan usein yhdessä energiapanosten kanssa.

Edellisestä huolimatta prosessianalyysi on käytössä olevista menetelmistä käyttökelpoisin, kun tutkitaan energiankulutuksen suhteellisia ero-

ja, yksittäisen tuotteen tai palvelun tuotantoon tarvittavaa energiapanosta, energiapanosten määrällistä tai laadullista jakaumaa, tai kehitetään prosessin energiatehokkuutta (Bullard ym. 1978, Gustafsson ym. 1982, Böhringer & Rutherford 2006). Top-down-tekniikka näyttäisi sen sijaan antavan luotettavamman arvion absoluuttisesta energiankulutuksesta (Nässen ym. 2007). Se soveltuu myös saman tuotannonalan energiatehokkuuden vertailuun maiden tai alueiden välillä.

3.2 EMERGY-ANALYYSI

eMergy-analyysi on energia-analyysimenetelmä, jonka periaatteet alkoivat muotoutua 1970-luvun alkupuolella ekologian, systeemiteorian ja taloustieteen pohjalta (Leontief 1966, von Bertalanffy 1968, Hannon 1973, Martinez-Alier & Schlüpmann 1987, Tennenbaum 1988, Odum 1996). eMergy-analyysi on kattava analyysitekniikka, koska siinä ei rajata energiapanoksia tarkastelun ulkopuolelle ja koska siinä otetaan huomioon myös energian laatu (Odum 1996). Energian laatu jää muissa analyyseissä vähälle huomiolle tai kokonaan huomiotta. Energian laatu on kuitenkin tärkeä tekijä, koska energiantuotantoketjussa voidaan tuottaa sähköä, kiinteää, nestemäistä tai kaasumaista polttoainetta tai lämpöä, joiden energiasisältö on sama. Wall (1990) on esittänyt energian laatuasteikon, jossa korkein laatukerroin annetaan mekaaniselle ja kemialliselle energialle sekä sähkölle. Lämpöenergian kerroin on edellisiä alempi ja se laskee, kun lämpötila laskee. Maan lämpösäteilyn kerroin on nolla.

eMergy-analyysissä kaikkien tuotteiden ja palveluiden tuottamiseen tarvittava energiamäärä ilmaistaan aurinkoenergiaekvivalentteina, joista käytetään nimitystä eMergy (solar energy Joule = seJ) (Scienceman 1987). Tuotteiden ja palveluiden energiapanosten lisäksi analyysissä voidaan ottaa huomioon tekijöitä, joita ei muihin analyysimenetelmiin yleensä sisällytetä. Näitä ovat esimerkiksi informaation, rahan tai ympäristöpalvelujen energiapanokset. Ympäristöpalveluja ovat sade, tuuli ja auringonpaiste. (Odum 1996.)

eMergy-analyysin tuloksena saadut tuotteiden ja palveluiden energiapanokset ovat kertaluokkia suurempia kuin prosessi- tai input-output-analyyseillä lasketut panokset. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että analysoidun tuotteen tai palvelun tuottamiseen tarvitaan vettä ja fossiilista polttoainetta. Luonnossa veden kiertokulun aikaansaamiseen ja fossiilisten polttoaineen syntyyn tarvitaan runsaasti auringon säteilyenergiaa (Odum 1996), joka eMergy-analyysissä kohdistetaan analysoitavalle tuotteelle ja palvelulle. Koska ympäristöpalveluiden energiankulutus on usein suuri, saattaa olla vaikea havaita prosessin kehittämisen avulla saatuja suoran energian kulutuksen säästöjä, tai ne näyttävät mitättömiltä.

eMergy-analyysiä on toistaiseksi käytetty vähän ja sitä on myös kritisoitu (Brown & Herendeen 1996, Hau & Bakshi 2004, Herendeen 2004). Analyysin perusidea on yksinkertainen ja kaikkien luonnon energiapanos-

ten huomioon ottaminen eliminoi systeemin rajausten aiheuttamia spekulaatioita. Tulosten tulkinta voi sen sijaan olla vaikeaa, koska luonnon kiertokulun aikaansaamiseen tarvittavat energiapanokset ovat suuria suhteessa tavaroiden ja palveluiden tuottamiseen tarvittaviin suoriin energiapanoksiin. Prosessianalyysin tai input-output-analyysin tulokset on tästä syystä helpompi ymmärtää.

3.3 ELINKAARIARVIOINTI

Elinkaariarviointia käytetään tuotteiden ympäristösuorituskyvyn parantamismahdollisuuksien tunnistamiseen. Elinkaariarvioinnin tekemistä ohjaavissa standardeissa kuvattu menettely inventaarioanalyyseineen pitää sisällään myös prosessianalyyttisen energia-analyysin. Energia-analyysi on yksi osa elinkaariarviointia, ja se voidaan tehdä erikseen tai yhdessä ympäristövaikutusten arvioinnin kanssa. Energia-analyysin vaiheet on kuvattu täsmällisesti standardeissa, mikä on ehkä yksi syy prosessianalyysin suosioon. Analyysissä tunnistetaan tuotteen tai palvelun tuottamiseen tarvittavat oleelliset energiapanokset ja ne lasketaan yhteen. (SFS-EN ISO 14040, SFS-EN ISO 14044.)

Standardien olemassa olo ei kuitenkaan takaa, että kaksi analysoijaa päätyisi energia-analyysissä samanlaisesta tehtävänasettelusta samaan tulokseen. Analyysin lähtötiedot ovat todennäköisesti peräisin eri lähteistä ja tarkasteltava systeemi on eri tavoin rajattu. Tämä voidaan todeta tarkastelemalla vaikkapa peltokasvituotannon energia-analyysejä (I, III, Börjesson 1996, Lewandowski & Shcmidt 2005, Mäkinen ym. 2006, Boehmel ym. 2007, Angelini ym. 2009, Alluvione ym. 2011). Analyysin aikana joudutaan usein tekemään oletuksia, jotka vaikuttavat lopputulokseen. Luvuissa 3.4 - 3.7 käsitellään energia-analyysin vaiheita, joissa tekijän tekemillä päätöksillä voi olla vaikutusta analyysin tulokseen.

3.4 SYSTEEMIN MÄÄRITTELY JA RAJAAMINEN

Energia-analyysi aloitetaan määrittelemällä tarkasteltava systeemi. Määrittely helpottaa sekä analyysin tekoa että tulosten tulkintaa. Systeemi voidaan määritellä sanallisesti tai piirtämällä kaavio. Mitä paremmin systeemiin sisältyvä tuotantoprosessi tunnetaan, sitä yksityiskohtaisemmin siihen tarvittavat panokset osataan ottaa mukaan.

Kuvassa 4 esitettiin esimerkki ohran tuotantoketjun rajauksesta. Kuvasta voidaan päätellä, että analyysistä on rajattu pois ihmistyö, rakennukset sekä infrastruktuuri käsittäen pellot, tiet, rakennukset, sähkölinjat, tietoverkot ym. Myös ympäristöpalvelut on rajattu pois. Rajaus on tyypillinen prosessianalyyttinen viljan tuotantoketjun rajaus (Hernánz ym. 1995, Börjesson 1996, Hülsbergen 2001, Mäkinen 2006, I, III). Usein myös torjunta-

aineet ja koneet rajataan pois. Torjunta-aineiden käyttömäärät ovat Suomessa pieniä ja niiden energiapanos on pieni esimerkiksi lannoitteiden energiapanoksiin verrattuna (Kaltschmitt & Reinhardt 1997). Koneista aiheutuvan energiapanoksen määrittämisestä on puolestaan vähän tutkimustietoa ja energiapanoksen laskeminen on työlästä (II). Jos verrataan esimerkiksi viljalajien viljelyyn tarvittavia suhteellisia energiapanoksia, koneet ja torjunta-aineet voidaan rajata pois, koska pois jätettävät energiapanokset ovat viljalajista riippumatta hyvin samansuuruisia. Jos sen sijaan verrataan ohran ja sokerijuurikkaan viljelyä, niin koneet ja torjunta-aineet olisi syytä ottaa mukaan, koska viljelytekniikka ja kasvinsuojelu poikkeavat paljon toisistaan (III). Jos halutaan tietää viljelyn absoluuttinen energiapanos, rajauksia on syytä välttää ja niiden vaikutus lopputulokseen pitää arvioida. Syitä rajausten tekemiseen voivat olla esimerkiksi energiapanoksen vähäinen merkitys, tai tiedon puuttuminen tai tiedon epätarkkuus verrattuna muuhun lähtötietoon. (SFS-EN ISO 14044.)

3.5 SUORA JA EPÄSUORA ENERGIAPANOS

Energia-analyysissä energian käyttö jaetaan suoraan ja epäsuoraan energian kulutukseen. Suora energian kulutus tarkoittaa tuotteiden tai palveluiden tuottamiseen käytettyä kiinteää, nestemäistä tai kaasumaista polttoainetta tai sähköä. Myös ihmisen tekemä työ on suora energiapanos, joka kuitenkin yleensä rajataan pois. Perusteena on useimmiten se, että ihmistyö on energiapanoksena niin pieni (Suomalaiset ravitsemussuositukset 2012), että se ei vaikuta lopputulokseen. Näin varmasti onkin, jos analyysissä otetaan huomioon vain tietyn työn edellyttämät työtunnit ja ihmisen energian kulutus sinä aikana. Ihmistyön energiapanos kasvaa, jos ihmisen vuoden aikana kuluttama energiamäärä jyvitetään vuoden aikana tehdyille töille (Top-down-menettely). Tällöin myös vapaa-aikana kulutettu energia otetaan huomioon ja jaetaan energiapanoksena työtunneille. Vielä suuremmaksi energiapanos muodostuu, jos otetaan huomioon ihmisen koko elinkaari mukaan lukien ihmisen työtään varten saama koulutus. Perinteisesti ihmistyö kuitenkin rajataan pois prosessi- ja input-out-analyyseissä, mutta eMergy-analyysissä se otetaan huomioon.

Jos peltobioenergian tuotantoketjussa työhön käytetään vetoeläimiä, joudutaan pohtimaan vastaavia asioita kuin ihmistyön osalta tehtiin edellä. Hevonen on ensin kasvatettava ja sitä ylläpidetään muunakin aikana kuin peltotöitä tehtäessä. Rydbergin ja Jansénin (2002) tekemän eMergy-analyysin mukaan traktori oli energiataloudellisesti hevosta edullisempi vetovoiman lähde. Toisaalta hevosen käyttämästä energiasta 60 % oli uusiutuvaa ja traktorivetovoimasta vain 9 %.

Epäsuora energiapanos tarkoittaa energiaa, joka käytetään raaka-aineiden hankintaan, jalostukseen, kuljetuksiin, palveluihin ja muuhun vastaavaan (II). Jos kyseessä on materiaali, jota voidaan käyttää myös energian tuotannossa (puu, vilja), tuotteen alempi lämpöarvo (LHV) voidaan

laskea tuotannon energiapanokseksi (Slesser 1974). Käytäntö lämpöarvon huomioon ottamisessa tai sen pois jättämisessä voi kuitenkin vaihdella kuten esimerkki siemenen energiapanoksen huomioon ottamisesta luvun lopussa osoittaa. Puu on materiaali, jota käytetään yleisesti energian tuottamiseen ja rakennusmateriaalina. Kun puu käytetään rakentamiseen, puun lämpöarvo ei rakennuksen käyttöiän aikana häviä ja puu voidaan käyttää energiaksi rakennuksen purkamisen jälkeen. Lämpöarvo voidaan ottaa huomioon rakentamisen energiapanoksena, mutta rakennusta pitää hyvittää samalla lämpömäärällä, mikäli puu käytetään lämmön tuottamiseen rakennuksen purkamisen jälkeen. Jos purettu puu viedään kaatopaikalle, lämpöarvo menetetään, eikä hyvitystä pidä tehdä.

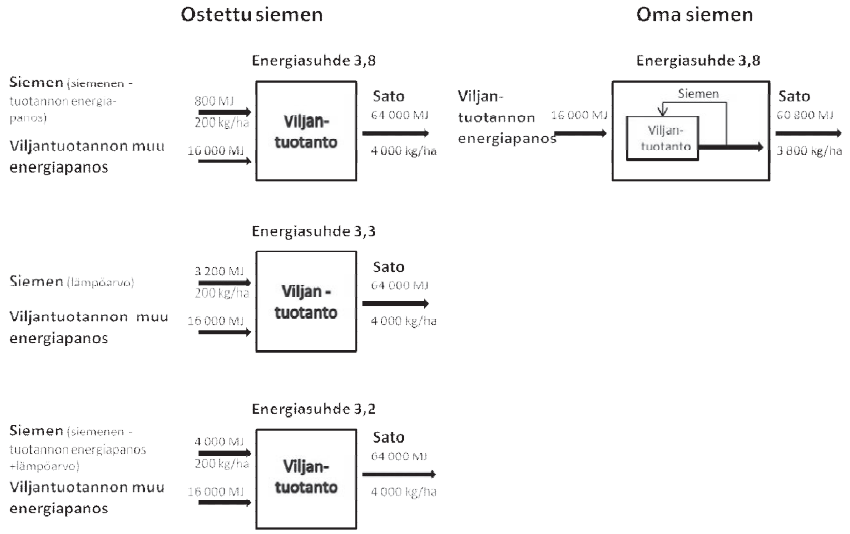
Vaikka puun lämpöarvo voi säilyä vielä käytön jälkeenkin, niin viljan lämpöarvo menetetään, kun sitä käytetään siemenenä. Peltobioenergian tuotantoketjussa siemenen energiapanoksena voidaan käyttää joko sen tuotantoon käytettyä energiamäärää tai tuotantoon käytetyn energiamäärän ja viljan lämpöarvon summaa (Slesser 1974, Börjesson 1996, Hülsbergen 2001, Mäkinen 2006, I, III). Molempia tapoja on käytetty, eikä julkaisuissa aina kerrota, kumpaa tapaa on käytetty (Ozkan ym. 2004). Yleensä tapa voidaan päätellä siemenen energiapanoksen suuruudesta (Hülsbergen 2001).

Kuvassa 5 on kuvitteellinen esimerkki siemenen energiapanoksen laskentatavan vaikutuksesta viljantuotannon energiasuhteeseen (M. Rajaniemi 2011, julkaisematonta aineistoa). Kuvan laskelmissa on oletettu, että viljantuotannon energiapanos (myös siemenen) on 4 MJ kg^{-1} ja viljan lämpöarvo on 16 MJ kg^{-1}. Omalle siemenelle ei ole laskettu vaihtoehtoa, jossa siemenen lämpöarvo laskettaisiin tuotannon energiapanokseksi, koska siemenen lämpöarvo vähennetään sadon lämpöarvosta. Siemenen lämpöarvon huomioon ottaminen tuotannon energiapanoksena pienentää erityisesti sellaisten kasvien energiasuhdetta, joiden siementen kuiva-ainemäärä on suuri (herne, härkäpapu, peruna ja myös vilja, jos sen itävyys on huono) (Peltonen 2012a). Vastaavasti sokerijuurikkaan, öljy- ja nurmikasvien energiasuhteeseen siemenen lämpöarvo vaikuttaa vain vähän pienen siemenmäärän vuoksi (Hülsbergen 2001, Peltonen 2012a).

Kuvan 5 mukaisesti ostettua tai omaa siementä käytettäessä energiasuhde on (likimain) sama, kun ostosiemenelle lasketaan pelkästään siemenen tuotannon energiapanos. Jos tavoitteena on verrata oman siemenen ja ostosiemenen vaikutusta energiasuhteeseen, oikeampi tapa on käyttää ostosiemenelle tuotannon energiapanoksen ja lämpöarvon summaa. Jos sen sijaan verrataan tilan viljelytoimenpiteiden energiatehokkuutta eri kasvien viljelyssä, tulee kaikkien kasvien siementen energiapanokset laskea samalla tavalla. Siemenen energiapanosten laskutapa vaikuttaa vertailun tulokseen erityisesti silloin, jos siemenmäärät ovat hyvin erilaisia.

Siemenen energiapanosten määrittämistä vaikeuttaa myös se, että kaikkia siemeniä ei voida tuottaa tilalla tai että kaikkia siemenistä viljeltäviä kasveja ei viljellä kasveista saatavien siementen vuoksi (sokerijuurikas, heinäkasvit, rehu- ja biomassakasvit). Siemenen tuotanto on silloin oma

prosessinsa, jolloin kasvista ei välttämättä saada lainkaan sellaista satoa, kuin normaalisti saadaan.



Kuva 5 Vaihtoehtoja viljan siemenen energiapanoksen laskemiseksi ja laskentatavan vaikutus viljantuotannon energiasuhteeseen (M. Rajaniemi 2011, julkaisematonta aineistoa).

3.5.1 Peltobioenergian tuotantoon käytettyjen koneiden ja rakennusten epäsuoran energiapanoksen määrittäminen

Peltobioenergian tuotantoon tarvitaan koneita ja rakennuksia, joiden valmistukseen ja käyttöön tarvitaan epäsuoria energiapanoksia (II). Epäsuoria energiapanoksia ei voida mitata samalla tavoin kuin polttoaineen kulutus mitataan, vaan epäsuorat energiapanokset on määritettävä laskemalla. Sen jälkeen ne on allokoitava pellolla tehtäville työsuoritteille ja edelleen viljeltäville kasveille (II).

Tässä työssä todettiin koneiden epäsuoran energiapanoksen suuruutta määritettäessä, ettei ole olemassa tutkimustuloksia, joista voitaisiin todeta koneiden käyttöikä tai elinikäinen käyttömäärä (II). Tutkimustiedon puuttuessa valmistuksen energiapanos jaettiin ASAE-standardin D497.5 mukaiselle traktoreiden ja peltoviljelykoneiden tekniselle käyttöiälle (ASAE D497.5 FEB2006). Työkoneille jakoperusteena oli työsuorite, jolla tarkoitetaan sopivaa pinta-alan tai massan yksikköä (hehtaari tai kilogramma) (II).

Koneen ikä ja käyttömäärä vaikuttavat koneen ylläpidon tarpeeseen ja siten myös koneen energiapanokseen. Koneen elinkaaren alkupäässä selvitään normaaleilla huoltotoimenpiteillä, mutta koneen ikääntyessä korjauksia tarvitaan enenevästi (Lönnemark 1971, Laine 1998). Peltokasvien energia-analyyseissä (I, III) käytetyt ASAE-standardin D497.5 mukaiset elinikäiset käyttömäärät olivat suuria (traktorit 12 000 – 16 000 h, työkoneet

1 500 – 4 000 h) verrattuna kirjanpitotilojen todellisiin vuotuisiin käyttömääriin Suomessa ja Tanskassa (traktorit 200 h a^{-1}) (II). USA:ssa ja Kanadassa tehdyissä traktoreiden käyttökustannuslaskelmissa oletetaan traktoreiden vuotuiseksi käyttömääräksi 300 – 400 h (II), mikä viittaa siihen, että ASAE D497.5 käyttömäärät olisivat liian pitkiä myös Pohjois-Amerikan oloissa. Standardissa ilmoitetun traktorin elinikäisen, teoreettisen käyttömäärän saavuttaminen veisi kymmeniä vuosia ja useimmat koneet olisivat teknisesti vanhentuneita jo paljon aiemmin. Siksi traktorin valmistuksen energiapanos tulisikin jakaa taloudellista käyttöikää vastaavalle käyttömäärälle, joka on teknistä käyttöikää lyhyempi. Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty Lönnemarkin (1971) ehdottamat poistoajat traktoreille ja puimureille. Koneen käyttöikä on sitä pitempi, mitä vähemmän konetta käytetään, mutta toisaalta koneet eivät koskaan saavuta teoreettista, teknistä käyttöikäänsä.

Taulukko 3 Vuotuisen käyttömäärän vaikutus traktorin poistoikään ja elinkaariseen käyttömäärään (Lönnemark 1971).

Vuotuinen käyttömäärä, h	Poistoikä	
	Vuotta	Tuntia
300	18	5 400
400	17	6 800
500	16	8 000
600	15	9 000
700	14	9 800
800	13	10 400
900	12	11 000
1000	11	11 500
1200	10	12 000
1400	9	12 500
1600	8	12 800
1800	7	13 000

Taulukko 4 Työkoneiden vuotuisen käyttömäärän vaikutus poistoikään (Lönnemark 1971).

Kone	Poistoikä vuosina, kun vuotuinen käyttömäärä on		
	50 h	100 h	150 h
Maanmuokkaus			
- aura, äes, kultivaattori	18	15	12
- jyrsin	15	12	10
Kuormaus, kylvö, levitys, istutus, ruiskutus			
- etu- tai takakuormain	15	12	10
- kuivalannan levitin	15	12	10
- väkilannan levitin	12	10	9
- kylvökone	18	15	12
- kylvö-lannoituskone	10	7	5
- perunanistutuskone	18	15	13
- kasvinsuojeluruisku	12	10	8
Sadonkorjuu			
- lautasniittokone, niittomurskain	15	12	10
- pöyhin, harava	20	15	12
- tarkkuussilppuri	12	10	9
- leikkuupuimuri	15	13	11
- paalain	18	15	12
- perunankorjuukone	14	10	8
- juurikkaankorjuukone	-	10	8
Kuljetuskalusto			
- kippivaunu	12	10	8
- lietteenlevitysvainu	12	10	8

3.5.2 Infrastruktuurista aiheutuva epäsuora energiapanos

Infrastruktuurilla tarkoitetaan yhteiskunnan perusrakenteita, jotka mahdollistavat yhteiskunnan toiminnan. Infrastruktuurin teknisiä rakenteita ovat liikennejärjestelyt, vesi-, jäte- ja energiahuolto. Koulutus, terveydenhoito, kulttuuri, matkailu ja viihde ovat vastaavia sosiaalisia ja henkisiä rakenteita. Kaikkien näiden rakenteiden aikaansaamiseen ja ylläpitoon tarvitaan energiaa. Peltoviljelyn infrastruktuuria ovat pellot, jotka on pitänyt raivata, ojittaa ja peruskalkita. Perinteisessä energia-analyysissä nämä energiapanokset ohitetaan, koska infrastruktuurin tekemiseen käytetty energiamäärä ei ole tiedossa, tai ei tiedetä, miten energia allokoitaisiin käyttäjien kesken. eMergy-analyysissä nämä tekijät otetaan huomioon. Ehkä siinä on osaselitys eMergy-analyysiä kohtaan esitettyyn kritiikkiin, koska eMergy-analyysin tekijöillä voi tuskin olla muita energia-analyytikkoja parempaa tietoa infra-

struktuurin aikaansaamiseen ja ylläpitoon tarvittavasta energiapanoksesta tai sen allokoinnista käyttäjien kesken.

3.6 PRIMÄÄRI- JA SEKUNDÄÄRIENERGIA

Energia-analyysissä otetaan huomioon myös energian tuotantoon käytetty energia. Esimerkiksi auton kuluttama bensiini on sekundäärienergiaa. Kun sen lämpöarvoon lisätään energia, joka on käytetty raakaöljyn hankintaan ja jalostukseen bensiiniksi, saadaan auton liikuttamiseen tarvittava primäärienergia (Mäkinen ym. 2006). Energia-analyysissä pyritään yleensä määrittämään primäärienergia, koska se on todellinen tuotteen tai palvelun aikaansaamiseen käytetty energiamäärä. Sähkön tuotantoa voidaan käyttää esimerkkinä sekundääri- ja primäärienergian erosta. Jos sähköä tuotetaan lauhdevoimalla, 40 – 50 % polttoaine-energiasta saadaan sähköksi. Mikäli lauhdevettä ei käytetä mitenkään hyödyksi, 50 – 60 % energiasta menee hukkaan (VTT, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus 2004). Kun sähköä käytetään yksi kilowattitunti, kulutetaan 2,0 – 2,5 kWh primäärienergiaa. Vesi- ja tuulivoimalla sekä aurinkokennoilla tuotetun sähkön primäärienergia otetaan huomioon vain eMergy-analyysissä (Odum 1996). Muissa analyyseissä se jätetään huomioon ottamatta vedoten siihen, että aurinko paistaa, vesi virtaa ja tuuli puhaltaa, hyödynnettiinpä niitä tai ei. Edellisestä johtuen sähköntuotannon primäärienergiapanos vaihtelee maittain ja vuosittain muun muassa sademäärän vaihtelun vuoksi (Mäkinen 2006). Sateisena vuonna voidaan käyttää enemmän vesivoimaa ja tarvitaan vähemmän hiilivoimaloita. Tällöin primäärienergian kulutus on pienempi kuin kuivana vuonna.

3.7 PELTOENERGIAKASVIEN SADON LÄMPÖARVON MÄÄRITTÄMINEN

Peltoenergiakasvin sadon lämpöarvo lasketaan yleensä kertomalla kuiva-aineen massa kuiva-aineen alemmalla lämpöarvolla (LHV) (Alakangas 2000). Sadon lämpöarvoa laskettaessa tulee ottaa huomioon korjuuta seuraava käsittely sekä sadon varastointitapa. Suomessa peltokasvin sato voidaan vain poikkeustapauksissa korjata sellaisena, että se säilyy käsittelemättä varastossa pilaantumattomana useita kuukausia. Täten esimerkiksi kuivatun viljan ja tuoreen nurmirehun lämpöarvoa ei voida verrata ottamatta huomioon sadon olomuotoa ja sijaintia energia-analyysin päättyessä. Viljan kuivaamiseen tarvitaan energiaa, mikä suurentaa sen tuotannon energiapanosta, mutta toisaalta kuivattu vilja säilyy siilossa vuosia (Kosmina 1956). Tuore nurmirehu sen sijaan pilaantuu muutamassa tunnissa (Schroeder 2004). Jos peltokasvin sato käytetään energiaksi, siltä voitaisiin edellyttää, että se säilyy varastoituna vähintään 12 kuukautta lämpöarvon

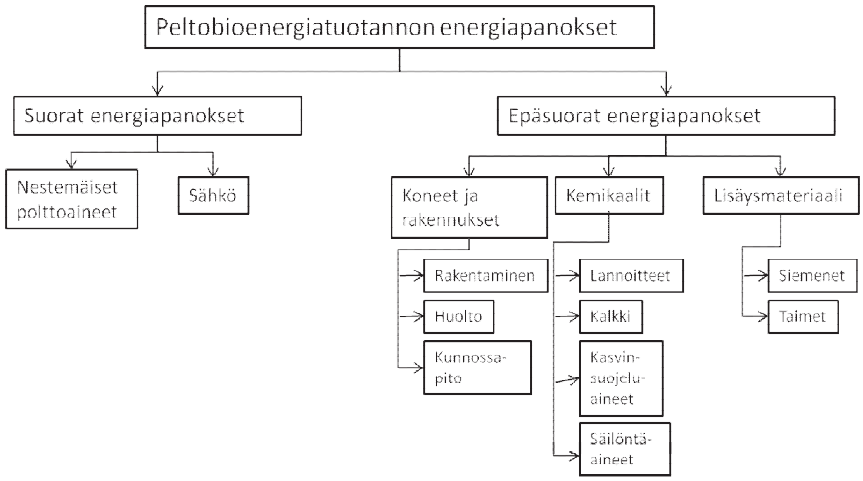
ja käsittelyominaisuuksien olennaisesti huononematta. Myös varastojen laatuvaatimukset vaihtelevat. Ruokohelpipaalit säilyvät ulkosalla kuormapeitteen alla (Yrjölä 2009), kun perunoille tarvitaan varastorakennus, jonka lämpötila on ympäri vuoden 3 – 4 °C (Seppänen 1992).

Tuotoksen lämpöarvoon vaikuttaa myös sadon tuotannossa käytetyn siemenen energiapanoksen laskentatapa. Kappaleessa 3.5 oli yhtenä vaihtoehtona vähentää siemenen lämpöarvo sadon lämpöarvosta (oma siemen vaihtoehto). Tällöin tuotoksen lämpöarvo on pienempi kuin muiden vaihtoehtojen.

4 PELTOBIOENERGIATUOTANNON EPÄSUORAT ENERGIAPANOKSET

Peltobioenergiatuotannon energia-analyyseissä otetaan huomioon sekä suorat että epäsuorat energiapanokset (Mikkola & Ahokas 2009, I, III). Tässä luvussa käsitellään yksityiskohtaisesti epäsuoria energiapanoksia, koska niiden huomioon ottaminen energia-analyysissä tuottaa eniten vaikeuksia (Mikkola & Ahokas 2009, II).

Peltobioenergiatuotannon tuotantopanokset ovat suurelta osin kemikaaleja, siemeniä, koneita ja materiaaleja (II, III). Ne kaikki luetaan energia-analyysissä epäsuoriin energiapanoksiin (II). Tuotantopanokset voidaan ryhmitellä esimerkiksi käyttötarkoituksen mukaan (Kuva 6). Agrokemikaaleja ovat lannoitteet, kalkki, torjunta-aineet ja rehujen säilöntäaineet (III). Niillä varmistetaan kasvien ravinteiden saanti, suojataan viljelykasveja rikkakasveilta, taudeilta ja tuholaisilta sekä varmistetaan korjatun sadon säilyminen. Lisäysmateriaaleja ovat siemenet, taimet, mukulat ja muut kasvien osat, joiden avulla saadaan aikaan uusi kasvusto. Koneet ovat tuotantopanoksia, joilla ihminen tehostaa ja helpottaa työtään. Koneita käytetään sekä pellolla että sadon käsittelyssä. Niiden käyttövoimaksi tarvitaan nestemäistä polttoainetta, kaasua tai sähköä. Käyttövoima on siis suora energiapanos ja koneet ovat epäsuoria energiapanoksia (II). Edellisten summa on koneiden käytöstä aiheutuva energiapanos (II). Koneiden kanssa samaan ryhmään voidaan lukea rakennukset (Mikkola & Ahokas 2009), joita peltokasvituotannossa käytetään lähinnä sadon varastointiin sekä koneiden säilytykseen ja huoltoon. Lisäksi tarvitaan satunnaisesti muita tuotantotarvikkeita ja mahdollisesti palveluja, jotka käsitellään energia-analyysissä tapauskohtaisesti.



Kuva 6 Peltobioenergiatuotannon suorat ja epäsuorat energiapanokset.

4.1 AGROKEMIKAALIT: LANNOITTEET, KALKKI, KASVINSUOJELU- JA SÄILÖNTÄAINEET

Agrokemikaaleja ovat lannoitteet, kalkki, torjunta-aineet ja rehujen säilöntäaineet (III). Typpilannoitus on eniten sadon määrään vaikuttava tuotantopanos (Mengel & Kirkby 2001). Ammoniakki on lannoitteiden sisältämien typpiyhdisteiden tärkein raaka-aine, ja sen valmistamiseen kuluu energiaa 32 – 35 MJ kg^{-1} (United Nations 1998). Typpilannoitteen valmistuksen suuri energiankulutus johtuu siitä, että maakaasu on ammoniakin valmistuksen energianlähde ja raaka-aine (United Nations 1998). Maakaasusta kaksi kolmasosaa käytetään ammoniakin vedyn lähteenä ja yksi kolmasosa prosessilämmön tuotannossa (United Nations 1998).

Peltokasvituotannon energiapanoksista (ohra, kevätvehnä, rypsi, säilörehunurmi, ruokohelpi, sokerijuurikas, peruna) maatalouskemikaalien eli lannoitteiden, kalkin ja torjunta-aineiden valmistuksen yhteenlaskettu osuus oli 54 - 73 % (I, III Fig. 2). Näistä typpilannoitteen osuus oli enimmillään 57 % säilörehunurmen viljelyssä (III). Tämä johtui siitä, että säilörehun viljelyssä käytetään enemmän lannoitetyppeä kuin muiden tutkittujen kasvin viljelyssä. Pieniä energiapanoksia olivat typpilannoitteeseen verrattuna esimerkiksi rehun säilöntään käytetyn muurahaishapon osuus (2 %) sekä fosforin ja kaliumin yhteenlaskettu osuus (3 %) säilörehun tuotannon kokonaisenergiapanoksesta (15,5 GJ) (III).

Tässä tutkimuksessa ei otettu peltojen peruskalkitusta huomioon energiapanoksena (I, III). Se on perusparannus, josta on hyötyä niin kauan, kun maata käytetään peltona, ja hyöty jakautuu tuntemattomalle ajanjaksolle tulevaisuuteen. Ylläpitokalkitus sen sijaan otettiin huomioon (I, III), koska se on tarpeen typpilannoitteiden happamoittavan vaikutuksen ja

happaman laskeuman neutraloimiseksi (Sinkko ym. 2010). Ylläpitokalkituksen määrään vaikuttavat viljeltävät kasvit ja typpilannoituksen määrä. Suositukset ylläpitokalkituksen määristä vaihtelevat (Sinkko ym. 2010), mutta jos kalkin määräksi oletetaan yleisesti suositeltu 800 kg ha^{-1} a^{-1}, ylläpitokalkituksen energiapanos on 7 – 10 % koko ketjun energiapanoksesta. Se on lähes yhtä suuri kuin hehtaarin kyntöön tai viljasadon kuivaukseen tarvittava energiapanos (I, III).

4.2 SIEMENET

Luvussa 3.5 esitettiin tapoja siemenen energiapanoksen huomioon ottamiseksi energia-analyysissä. Energiapanos on joko siementen tuottamiseen käytetty energiapanos tai se lisättynä siementen lämpöarvolla. Energia-analyyseissä on käytetty vaihtelevasti molempia tapoja, mutta tämän työn energia-analyyseissä käytettiin pelkästään siementen tuottamiseen tarvittua energiamäärää (I, III). Tällöin siemenen energiapanos oli esimerkiksi ohran viljelyssä samaa suuruusluokkaa kuin sadon puintiin tarvittava energiapanos. Jos sen sijaan käytetäisiin siemenen tuotantoon tarvittavan energiapanoksen ja lämpöarvon summaa, siemenen energiapanos olisi viljojen ja perunan tuotannossa suurin yksittäinen energiapanos – jopa suurempi kuin typpilannoitteen valmistukseen käytetty energiapanos (I, III). Jos siemenen lämpöarvo lasketaan energiapanokseksi, analyysi noudattaa lämpöopin ensimmäistä pääsääntöä ja tällöin kaikkia panoksia käsiteltäisiin tasavertaisesti (Slesser 1974). Esimerkiksi polttoaineiden energiapanokseksi lasketaan energiamäärä, joka on niiden lämpöarvon ja polttoaineen tuotantoon tarvittavan energiamäärän summa (Mäkinen 2006). Jos viljaa ei käytetä siemenenä, se voidaan käyttää polttoaineena lämmön tuottamiseen. Tällöin lämpöarvo saadaan talteen, mutta siemeneksi käytetyn viljan lämpöarvo menetetään aina.

Lämpöarvon poisjättäminen peltokasvin energia-analyysistä on perusteltua, koska viljaa tai perunaa viljellään pääsääntöisesti muuhun tarkoitukseen kuin polttoaineeksi (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2012a). Kolmas tapa käsitellä siemenen energiapanosta analyysissä on vähentää siemenen määrä sadosta, jolloin sen lämpöarvo vähentää systeemistä ulos tulevan energian määrää. Laskutapa vaikuttaa huomattavasti kasvien energiasuhteisiin ja nettoenergian määrään kuten luvun 3.5 kuva 5 osoittaa.

Edellä esitetyillä laskentatavoilla on vahvuutensa ja heikkoutensa, eikä mitään tapaa voi nimetä muita paremmaksi. Siemenen energiapanos tulee laskea siten, että tutkimuskysymyksiin saadaan objektiiviset vastaukset. Tärkeää on myös kertoa, miten siemenen energiapanos on laskettu. Suositeltavinta on laskea energiapanos useammalla tavalla, jolloin laskentatavan vaikutus olisi nähtävissä tuloksista. Usean laskentatavan käyttö muissakin energia-analyysin valintatilanteissa vastaa useampiin tulosten tulkitsijan kysymyksiin kuin yhdellä tavalla lasketut luvut.

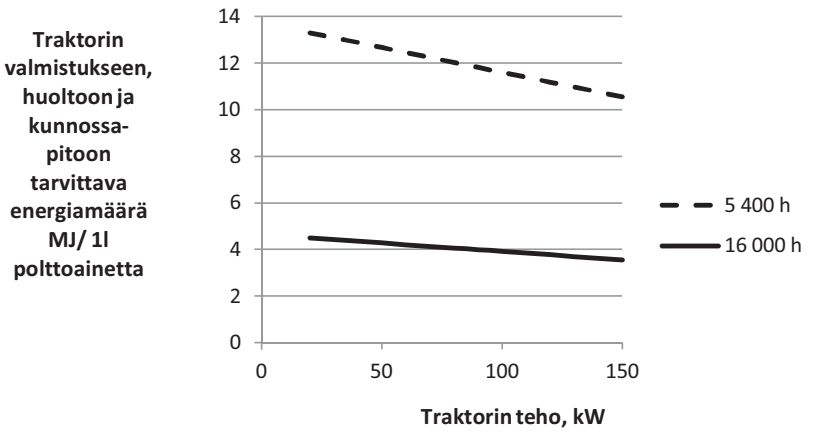
4.3 KONEET

Koneista aiheutuva energiapanos koostuu niiden valmistuksesta ja käytöstä (II). Valmistuksessa tulee ottaa huomioon raaka-aineiden hankinta, raaka-aineiden työstäminen materiaaleiksi ja edelleen koneen osiksi sekä koneen kokoaminen ja kuljetus käyttöpaikalleen (II). Käytön aikana kone kuluttaa energiaa, sitä huolletaan ja korjataan (II). Kaikki nämä energiapanokset on sisällytetty konetyön energiapanokseen (II, III). Elinkaarensa lopussa koneet menevät kierrätykseen ja sen vuoksi energian tarve teräksen valmistukseen on vähentynyt (II). Esimerkit autoteollisuudesta osoittavat kuitenkin, että energian käytön väheneminen teräksen valmistuksessa ei ole vähentänyt energian tarvetta auton valmistuksessa (II). Tämä johtunee autojen monimutkaistumisesta ja siitä, että terästä on korvattu mm. alumiinilla, jonka valmistukseen tarvitaan enemmän energiaa kuin teräksen valmistukseen. Maatalouskoneiden valmistuksen energiankulutuksesta ei ole tutkimustuloksia ja siksi peltokasvien energia-analyyseissä yleisesti käytetään autoteollisuudesta peräisin olevia vanhoja kulutuslukuja (II).

Energia-analyysissä olisi työlästä laskea jokaiselle työsuoritukselle erikseen koneiden valmistuksesta, huollosta ja korjaamisesta aiheutuva energiapanos (II). Siksi on esitetty (II) menetelmä näiden energiapanosten sisällyttämiseksi traktorin tai muun itse kulkevan koneen polttoaineenkulutukseen. Kuva 7 esittää traktorin valmistuksen, huollon ja korjaamisen energiapanoksen suhteessa traktorin moottoritehoon. Energiapanos pienenee traktorin koon kasvaessa, koska suurten traktoreiden paino/teho-suhde on pienempi (II) kuin pienten traktoreiden. Laskelmaa tehtäessä on oletettu, että paino/teho-suhde ei vaikuta traktorin huollon ja korjaamiseen tarpeeseen. Kuvassa 7 on esitetty myös traktorin oletetun elinikäisen käyttömäärän vaikutus polttoainelitraa kohden lasketun valmistuksen, huollon ja kunnossapidon energiapanokseen. Niiden osuus voi olla jopa kolmannes pienen ja vähässä käytössä olevan traktorin kuluttaman polttoaineen energiasisällöstä.

Suomessa yleisessä 81 – 100 kW teholuokassa (II) traktorin valmistukseen, huoltoon ja korjaamiseen tarvittava energiapanos oli 11 % traktorin käyttämän polttoaineen energiasisällöstä. Leikkuupuimurin vastaava energiapanos oli 60 %. Suuri ero johtui ensisijaisesti siitä, että traktorin oletettu elinikäinen käyttömäärä oli 16 000 tuntia ja puimurin 3 000 tuntia. Eroon vaikutti myös se, että puimurin oletettu keskiteho oli 40 % ja traktorin 30 %. Perusteluna puimurin suuremmalle keskiteholle oli, että puinnissa moottorin kuormitus on lähempänä moottorin nimellistehoa kuin sekalaisissa traktoritöissä. Keskitehon ollessa suurempi ominaiskulutus on pienempi (II). Puimurin valmistusenergia sekä huoltoon ja kunnossapitoon käytetty energiamäärä jakautui siis pienemmälle polttoainemäärälle kuin traktorin. Suuri ero osoittaa myös koneen oletetun käyttömäärän vaikutuksen valmistuksesta aiheutuvan energiapanoksen suuruuteen. Tämän väitöskirjan energia-analyyseissä (I, III) on käytetty ASAE D497.5-standardissa annettuja koneiden oletettuja käyttömääriä (ASAE D497.5 FEB2006). Luvussa

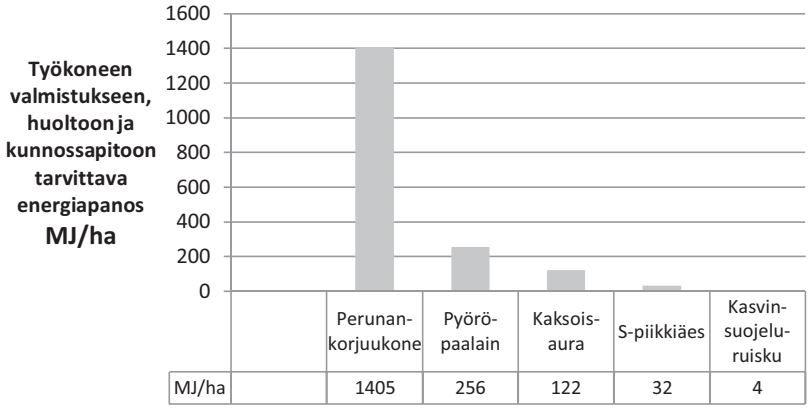
3.5.1 on kuitenkin ehdotettu Lönnemarkin (1971) esittämien koneiden poistoaikojen käyttämistä energia-analyyseissa jatkossa, koska kirjanpitotiedot suomalaisilta ja tanskalaisilta maatiloilta (Bak ym. 2003, Agrifood Research of Finland – MTT 2005) antavat viitteitä siitä, että todellinen käyttömäärä olisi paljon teoreettista pienempi (todellinen käyttömäärä 200 h a^{-1}, teoreettinen käyttömäärä 800 – 1000 h a^{-1}). Käytetty laskentatapa on voinut aliarvioida valmistuksesta aiheutuvaa energiapanosta. Jos käyttömääriä oleellisesti alennetaan, samalla tulisi ehkä huollon ja korjaamisen energiapanosta pienentää. Kun kone on vähässä käytössä, se ei likimainkaan saavuta teoreettista elinikäistä käyttömääräänsä (II) eikä huoltoa tarvita samassa määrin (Lönnemark 1971, Laine 1998). Poistoajan lyhentäminen lisäisi valmistuksen energiapanoksen osuutta, mutta huollon ja korjaamistarpeen vähentyminen pienentäisi niiden osuutta. Muutokset kompensoisivat siis osittain toisiaan.



Kuva 7 Traktorin valmistukseen, huoltoon ja korjaamiseen tarvittava energiapanos suhteessa traktorin moottoritehoon. Energiapanos on laskettu kahdelle elinikäiselle käyttömäärälle.

Traktorityökoneille laadittiin vastaava laskentamalli kuin itse kulkeville koneille, mutta siinä valmistuksen, huollon ja kunnossapidon energiapanos allokoitiin hehtaaria kohden (II). Energiapanoksen suuruuteen vaikuttavia muuttujia olivat koneen paino, kapasiteetti, elinikä sekä kerroin, jolla lasketaan elinikäisen huollon ja kunnossapidon energiapanos prosentteina koneen valmistukseen käytetystä energiamäärästä (Kepner 1978, Bowers 1992, II). Kuvassa 8 on esitetty työkoneen valmistuksen, huollon ja kunnossapidon energiapanokset (MJ ha^{-1}) esimerkinomaisesti muutamille työkoneille. Energiapanokset on laskettu tätä yhteenvetoa varten vastaavalla tavalla kuin julkaisussa II. Energiapanos on suuri, kun kone on painava ja sen elinikäinen hehtaarikapasiteetti on pieni (juurikasvien korjuukoneet).

Energiapanos on pieni, kun kone on kevyt ja sen kapasiteetti on suuri. Perunankorjuukone on esimerkki ensimmäisestä koneesta ja nostolaitekiinnitteinen kasvinsuojeluruisku toisesta.



Kuva 8 Eräiden peltotyökoneiden valmistuksesta, huollosta ja kunnossapidosta aiheutuva energiapanos (MJ ha^{-1}).

Kun otettiin huomioon koneiden valmistus, kunnossapito, huolto sekä koneen käyttämä suora energiapanos, eniten energiaa kuluttavia peltotyövaiheita olivat kyntö, kylvömuokkaus ja puinti (I, III). Työvaiheissa, joissa tarvittiin sekä traktoria että työkonetta, molempien energiapanos otettiin huomioon. Esimerkiksi ohran tuotantoketjussa kynnön, kylvömuokkauksen ja puinnin osuudet ketjun kokonaisenergiankulutuksesta olivat 11 %, 5 % ja 7 %. Vaikka pellolla tehtävä konetyö on näkyvä osa peltokasvin tuotantoa, sen osuus tuotantoketjujen kokonaisenergiapanoksesta oli vain 14 – 31 % (III). Konetyön osuus energiapanoksesta oli suurin sokerijuurikkaan viljelyssä. Osuus voi kuitenkin olla esitettyä suurempi, jos koneiden todellinen elinikäinen käyttömäärä on paljon teknistä käyttömäärää pienempi (II).

Koneiden elinikänen käyttömäärä on yksi konetyön energiankulutuksen määrittämiseen liittyvä epävarmuustekijä (II). Toinen epävarmuustekijä on koneiden valmistuksen, kunnossapidon ja huollon energiankulutus (II). Maatalouskoneiden valmistuksen energiapanosta käsittelevissä artikkeleissa viitataan useimmiten Yhdysvalloissa julkaistuun tutkimukseen autonvalmistuksen energiankulutuksesta (Berry & Fulton Fells 1972). Siinä todetaan, että vuonna 1967 tarvittiin energiaa auton valmistukseen 81,2 MJ kg^{-1}. Myöhemmät tutkimukset autoteollisuudesta (MacLean & Lave 1998, Schweimer & Levin 2002) viittaavat siihen, että energiakulutus olisi pysynyt likimain ennallaan (II). Traktoreiden tai muiden maatalouskoneiden valmistuksen energiankulutuksesta ei ole julkaistu tutkimuksia, ja siksi tässä työssä ja peltokasvituotannon energia-analyyseissä yleisemminkin

käytetään lähinnä vastaavan koneen eli auton valmistuksessa käytettyä energiamäärää (II).

Kolmas epävarmuustekijä on maatalouskoneiden kunnossapidon ja huollon energiankulutus. Aiheesta on julkaistu vain yksi tutkimus ja sekin jo 1980 (Fluck & Baird 1980, Fluck 1985). Fluck konstruoi kaksi mallia koneiden huoltoon ja kunnossapitoon tarvittavan energiamäärän laskemiseksi. Ensimmäisen mallin (Industry costs) mukaan keskimäärin 55 % koneiden valmistukseen käytetystä energiasta tarvittiin niiden elinikäiseen huoltoon ja kunnossapitoon. Toisen mallin (Lifetime machine repair costs) mukaan energiamäärä oli 138 %. Fluck piti jälkimmäisen mallin antamaa energiapanosta liian suurena ja päätteli, että maatalouskoneiden huoltoon ja kunnossapitoon tarvitaan vähintään 55 % niiden valmistukseen käytetystä energiamäärästä. Industry costs -malli oli menetelmällisesti bottom-up-tarkastelu ja jälkimmäinen Lifetime repair costs –malli noudatti top-down-tekniikkaa. Nässenin ym. (2007) tutkimusten perusteella top-down-tekniikalla saatu suurempi energiankulutus voi kuitenkin olla oikeampi, mikäli bottom-up-tekniikka aliarvioi energiapanoksia koneiden korjaamisessa ja huollossa samaan tapaan kuin rakentamisessa.

Pimentel (1980) on tutkinut maataloustuotannon energiankulutusta ja esittänyt laskentakaavan, jossa lasketaan yhteen koneiden valmistukseen käytettävien materiaalien valmistukseen käytetty energiapanos, koneen valmistukseen käytetty energiapanos sekä varaosien valmistukseen käytetty energiapanos. Börjesson (1996) on päivittänyt Pimentelin (1980) esittämät energiakulutukset ottaen huomioon energiatehokkuuden lisääntymisen raaka-aineiden valmistuksessa ja koneteollisuudessa. Börjesson (1996) ei ole julkaissut päivittämiään energiapanoksia yksityiskohtaisemmin, joten niitä ei voida verrata esimerkiksi julkaisussa II esitettyihin energiapanoksiin.

4.4 MUUT PANOKSET

Agrokemikaalien, siementen, koneiden ja polttoaineen lisäksi tarvitaan peltokasvien tuotantoon vain vähän muita materiaalisia tuotantopanoksia (I, II, III). Joissakin tapauksissa kasveja kasvatetaan katteen alla. Kate voi olla biomassaa, paperia tai muovia, jolle voidaan laskea energiapanos. Kuivina kausina kasvustoja saatetaan kastella. Tällöin energiapanoksina ovat kasteluun käytettävät koneet ja polttoaine. Vesi lasketaan energiapanokseksi vain eMergy-analyysissä (Odum 1996).

Esimerkkejä energia-analyysin tekijän tekemien päätösten vaikutuksesta analyysin tulokseen ovat sadon sijainti analyysin päättyessä, sadon fyysinen olotila (siemenet ja korret yhdessä tai erikseen, kosteus, partikkelikoko) sekä varastointitapa. Sijainnilla on pieni merkitys energia-analyysissä, vaikka loppusijoitus olisi kaukanakin pellosta (Mäkinen 2006). Varastointitapa on tärkeämpi valinta (Mäkinen 2006). Esimerkiksi vilja voidaan kuivata (Peltola & Kallioniemi 1988), säilöä ilmatiiviiseen siiloon, säi-

löä avovarastoon hapotettuna (Siljander-Rasi ym. 2000) tai se voidaan pakastaa (Ahokas & Koivisto 1983c). Säilöntätavasta riippuen energiaa kuluu kiinteisiin rakenteisiin, suoriin energiapanoksiin ja säilöntäaineisiin.

Säilörehua voidaan myös säilöä monin tavoin. Suomessa yleisessä paalisäilönnässä tarvittavan kiedontamuovin osuus oli 12 % säilörehun tuotantoketjun energiankulutuksesta (III). Koska muita säilörehun korjuuketjuja ei tutkittu, paalimenetelmän energiankulutusta ei voida verrata tornisiilo- ja laakasiilomenetelmiin. Korjattaessa säilörehu torniin tai laakasiiloon muovia kulutetaan vähemmän, mutta toisaalta myös siilojen rakentamiseen tarvitaan energiaa. Jos käytetty muovi voidaan hyödyntää säilönnän jälkeen uusioraaka-aineena muovin valmistuksessa tai energiantuotannossa, muovin merkitys energiapanoksena pienenee.

Viljan ja säilörehun varastointi ovat esimerkkejä siitä, että varastointitapa voi vaikuttaa tuotantoketjun energiankulutukseen. Käytännössä säilöntätapa valitaan taloudellisuuden, tuotteen markkinoitavuuden (vilja), joustavuuden (säilörehu) ja ehkä myös perinteiden perusteella (vilja). Jos energian hinta nousee paljon, säilöntäketjujen suosituimmuusjärjestys voi muuttua.

4.5 ANALYYSISTÄ POIS RAJATUT ENERGIAPANOKSET

Tähän työhön liittyvät peltokasvien energia-analyysit (I, II) on rajattu kuvan 4 mukaisesti eli ympäristöpalveluihin luettavat auringon säteilyenergia ja sade eivät sisältyneet tarkasteluun. Rajauksen perusteena on se, että näiden panosten määrään ei voida vaikuttaa.

Ihmistyö rajattiin pois, koska se on energiapanoksena pieni, vertaa luku 3.5. Näin on useimmiten menetelty myös muissa vastaavissa analyyseissä (Börjesson 1996, Lewandowski & Schmidt 2005, Boehmel ym. 2008, Angelini ym. 2009, Alluvione ym. 2011, Moreno ym. 2011). Työikäisen miehen energiantarve on 13,5 MJ vuorokaudessa (Suomalaiset ravitsemussuositukset 2012). Traktori kuluttaa kevyessä työssä dieselöljyä 3 - 6 l h^{-1} (Ahokas & Mikkola 1986). Polttoaineen energiapanos (108 - 216 MJ) on siis tunnissa 8 – 16 –kertainen verrattuna työmiehen kuluttamaan energiamäärään vuorokaudessa. Kun otetaan huomioon, että työkoneiden polttoaineenkulutus on noin 20 % koko viljelyketjun energiankulutuksesta, voidaan todeta, että miehen päivän energiantarve on noin promille siitä energiamäärästä, mikä tarvitaan hehtaarin ohra- tai rypsialan viljelyyn (I).

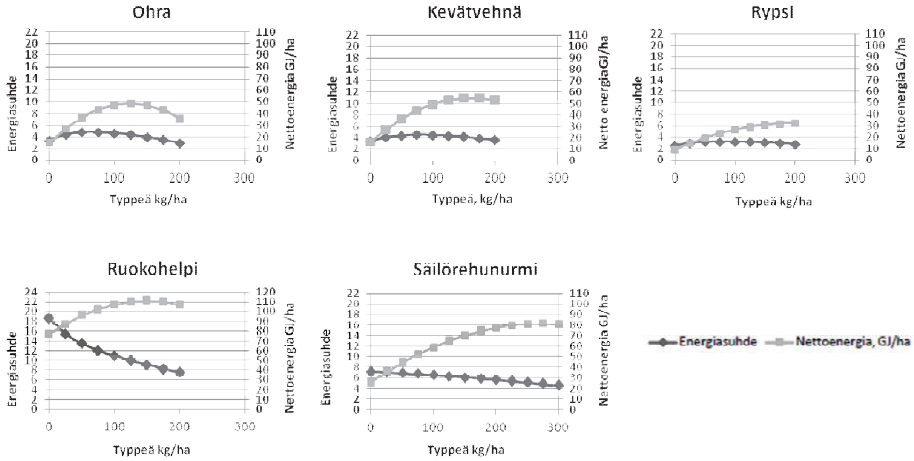
Viljelyyn tarvittavat pellot, tiet, ojitus sekä muut infrastruktuuriin kuuluvat rakenteet rajattiin pois, koska niiden rakentamiseen tarvittavat energiapanokset tunnetaan huonosti (I, III). Vaikka energiapanokset tunnettaisiin, niiden allokointi sadoille olisi hankalaa, koska näille tuotantopanoksille ei ole määritelty käyttöikää, eikä myöskään tiedetä maatalouden osuutta teiden käytöstä tai sähköverkon kuormituksesta. Jos infrastruktuuri otettaisiin tarkasteluun energiapanoksena, olisi energia-analyyseissä aiheellista laskea useampia vaihtoehtoja eri oletuksin infrastruktuurin käytöstä (useita

käyttöaikoja ja useita oletuksia kapasiteetin käytöstä). Tällöin voitaisiin arvioida energiapanosten allokointien ja infrastruktuurin käyttöikäoletusten vaikutusta tuloksiin.

5 PELTOBIOENERGIATUOTANNON ENERGIASUHTEET JA NETTO-ENERGIA

Energiantuotannon tehokkuutta kuvaavina tunnuslukuina käytetään yleisesti energiasuhdetta ja nettoenergiaa (Börjesson 1996, Hülsbergen ym. 2001, Rosenberger ym. 2001, Venturi & Venturi 2003, Angelini ym. 2009, Alluvione ym. 2011, III). Nettoenergia saadaan vähentämällä tuotoksesta panokset (output – input). Energiasuhde tarkoittaa sadon lämpöarvoa jaettuna sadon tuottamiseen käytettyjen energiapanosten summalla (output/input) (III). Myös edellisen luvun käänteislukua eli input/output -suhdetta käytetään esim. Masami & Tetsuo (1999), (I). Näistä output/input –suhde on yleisemmin käytetty.

Kuvassa 9 on esitetty ohran, kevätvehnän, rypsin, ruokohelven ja säilörehunurmen energiasuhteet ja nettoenergiat typpilannoituksen funktiona (III). Esitystavan perusteena on se, että typpilannoite on energiakasvien viljelyn suurin yksittäinen energiapanos (I, III) ja että typpilannoite on keskeisesti sadon määrään vaikuttava tekijä (Hilden ym. 2007). Ohran, vehnän ja rypsin energiasuhde vaihteli kolmesta viiteen (III). Typpivastekuvaajista on nähtävissä optimikohta, jota suurempia lannoitusmääriä käytettäessä energiasuhde laskee. Energiasuhteen optimi oli typpilannoituksella 50 – 100 kg ha^{-1} ja nettoenergia oli suurin typpilannoituksella 100 – 200 kg ha^{-1}.



Kuva 9 Ohran, kevätvehnän, rypsin, ruokohelven ja säilörehunurmen energiasuhteet ja nettoenergia typpilannoituksen funktiona (III).

Ohran ja vehnän nettoenergia oli enimmillään 48 – 55 GJ ha^{-1} (Kuva 9). Rypsin suurin nettoenergia oli tätä alempi eli 33 GJ ha^{-1}. Rypsin viljoja pienempi energiasuhde ja nettoenergia johtuivat rypsin pienestä sadosta. Rypsin siementen viljoja korkeampi lämpöarvo (Alakangas 2000, Hadders ym. 2001) kompensoi vain osittain sadon pienempää massaa (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2012a).

Ruokohelven energiasuhde oli enimmillään 18 ja se oli tutkituista kasveista kaikkein korkein (Kuva 9). Se oli kaksi kertaa korkeampi kuin säilörehun ja sokerijuurikkaan (III), joiden energiasuhteet olivat seuraavaksi korkeimmat. Ruokohelpi ja säilörehu poikkesivat viljoista ja rypsistä siinä, että niiden energiasuhde oli korkein ilman typpilannoitusta (Kuva 9). Näiden kasvien energiasuhde laski, kun niitä alettiin lannoittaa. Saman havainnon lannoituksen vaikutuksesta energiasuhteeseen ovat tehneet Lewandowski & Schmidt (2005) elefanttiheinän, ruokohelven ja ruisvehnän energiatehokkuutta koskevassa tutkimuksessaan.

Typpilannoitteen käytön 0-taso merkitsi sitä, että myöskään fosforia tai kaliumia ei käytetty, koska oletettu lannoite oli seoslannoitetta (Kuva 9). Ruokohelven lannoitteen NPK-suhteet olivat 20-2,5-7,5, säilörehun kevätlannoituksen 20-3-5 ja kesälannoituksen 20-0-7 (III). Usean vuoden jaksolla lannoittamattomuus johtaisi maan köyhtymiseen ja satojen pienenemiseen. Fosfori ja kalium ovat energiapanoksina niin pieniä (I, III), että vaikka niitä käytettäisiin, vaikutus energiasuhteeseen olisi vähäinen. Jos ruokohelvelle tai nurmelle annettaisiin vain fosforia ja kaliumia lannoitteena, ne saisivat typen maan orgaanisesta aineksesta vapautuvasta typestä (Mattson 1999) sekä sadeveden mukana tulevasta typpilaskeumasta (Anttila & Tähtinen 1992). Nämä määrät ovat kuitenkin pieniä verrattuna suositeltui-

hin typpilannoitusmääriin (Peltonen 2012b). Ottaen huomioon lannoitetyppen vaikutuksen ruokohelven energiasuhteeseen ja nettoenergian määrään (III) 50 – 75 kg ha^{-1} lannoitus on perusteltu.

Säilörehun tuotannon energiasuhde laski loivemmin kuin ruokohelven (Kuva 9) (III). Tarkasteltava nurmi oli heinäkasvien seos, mutta jos kyseessä olisi ollut apilaa sisältävä nurmiseos, Börjessonin (1996) tutkimusten perusteella voidaan olettaa, että energiasuhde ja nettoenergia olisivat olleet 0-lannoituksella korkeampia, energiasuhde olisi laskenut jyrkemmin ja nettoenergia olisi noussut loivemmin kuin kuvassa 9. Börjessonin (1996) tutkimuksessa sinimailasnurmi viljeltiin ilman typpilannoitusta ja apilanurmen typpilannoitus oli vain 64 kg N ha^{-1}. Silti näiden kasvien sadon lämpöarvo oli suurempi kuin esimerkiksi vehnän, josta korjattiin sekä siemenet että olki (Börjesson 1996). Apiloiden typensidonta korvaa mineraalilannoitteen typen ja sen lisäksi apilanurmesta jää jälkivaikutuksena huomattava typpimäärä (Väisänen 2000) seuraavalle viljelykasville.

Ruokohelven nettoenergia oli yhtä suuri kuin sokerijuurikkaan (III). Parhaimmillaan hehtaarilta saatava 110 GJ:n nettoenergia vastasi 3000 litraa kevyttä polttoöljyä. Ruokohelven suurimman nettoenergian tavoittelu edellyttäisi, että typpilannoitus olisi 150 – 175 kg ha^{-1}. Koska lannoituksella 75 kg N ha^{-1} nettoenergia oli yli 100 GJ, edellä mainittu lannoitus 50 – 75 kg N ha^{-1} on kompromissi suuren nettoenergian ja korkean energiasuhteen välillä.

5.1 SYITÄ KASVIKOHTAISIIN EROIHIN

Tässä luvussa tarkastellaan syitä viljelykasvien energiasuhteen ja nettoenergian eroihin. Syyt liittyvät kasvien kasvutapaan (yksi- ja monivuotiset), korjuumenetelmiin, siementen tarpeeseen, kasvinsuojelutarpeeseen sekä sadon käsittelyyn ja varastointiin.

Yksivuotisten kasvien suurimpia energiapanoksia olivat typpilannoite, maanmuokkaustoimenpiteet, sadon kuivaus ja siemen (I, III). Ohran ja vehnän energiasuhteet ja nettoenergia poikkesivat toisistaan vain vähän (Kuva 9). Rypsi poikkesi viljoista siinä, että kuivattava siemensato oli alle puolet viljasadosta ja siemenen aiheuttama energiapanos oli vain noin kymmenesosa viljojen siemenen energiapanoksesta (III). Rypsin viljely oli lannoitusta lukuun ottamatta vähemmän energiaintensiivistä kuin viljan viljely, mutta myös sadon lämpöarvo oli alempi johtuen sadon pienestä määrästä (III).

Monivuotisten kasvien etuna yksivuotisiin kasveihin verrattuna on, että muokkauksen, siemenen ja kylvön energiapanos jakautuu useammalle satovuodelle. Nurmikasvien ja ruokohelven viljelyssä käytetään vain vähän torjunta-aineita (III).

Viljoista ja öljykasveista oletetaan usein korjattavan vain siemenet, joiden osuus maanpäällisestä biomassasta on noin puolet (Pahkala ym. 2009). Viljan oljet ja öljykasvien varret ovat kuitenkin lämpöarvoltaan lähes

siementen veroisia (Alakangas 2000), joten korjaamalla koko kasvusto energiasuhde ja nettoenergia kaksinkertaistuisivat. Tällöin viljojen ja öljykasvien energiasuhde ja nettoenergia olisivat suurempia kuin säilörehuksi korjattavan nurmen. Mäkinen ym. (2006) ovat esittäneet, että etanoliohran oljet koottaisiin ja niillä tuotettaisiin etanolin tislaukseen tarvittava lämpö. Tällöin polttoaine-etanolin valmistusprosessin eniten energiaa vaativa tislausvaihe (Virtanen ym. 2009) korvautuisi uusiutuvalla energialla ja bioetanolin tuotannon tehdasvaiheen kasvihuonekaasupäästöt alenisivat 70 – 80 % (Mäkinen ym. 2006).

Perunan ja sokerijuurikkaan viljelyn energiapanokset poikkesivat viljojen ja monivuotisten nurmikasvien energiapanoksista seuraavasti (III). Perunan siemen oli suurempi energiapanos (2,6 GJ) kuin minkään muun tutkitun viljelykasvin siemenen. Sokerijuurikkaan siemen oli puolestaan yksi pienimpiä (0,2 GJ) energiapanoksia. Perunan viljelyssä tarvitaan runsaasti torjunta-ainetta ruton torjuntaan ja sokerijuurikkaan viljelyssä rikkakasvien torjuntaan. Vaikka kasvinsuojeluaineiden energiapanos oli yleensä 5 – 8 % tuotannon energiapanoksesta, perunan viljelyssä kasvinsuojeluaineiden osuus oli 14 % ja sokerijuurikkaan viljelyssä 22 % tuotantoketjun kokonaisenergiapanoksesta. (III).

Mikäli peruna ja sokerijuurikas käytetään käsittelemättömänä energian tuotantoon, sato pitäisi varastoida rakennukseen, jossa lämpötila ja kosteus voidaan pitää säilymisen kannalta sopivana. Toinen vaihtoehto olisi käyttää sokerijuurikasta ja perunaa vain osan vuotta energian tuotantoon, tai sato voidaan myös prosessoida korjuun jälkeen välituotteeksi (tärkkelys, melassi), jonka varastointi vie vähemmän tilaa kuin tuoreen sadon varastointi eikä vaadi niin tarkkaan säädeltyjä oloja. Osajulkaisun III energiaanalyyseissä ei ole otettu huomioon perunan ja sokerijuurikkaan varastointia tai mahdollista prosessointia, joten tarkastelutapa on näiden kasvien kannalta edullinen (III). Kuivattu vilja, keväällä korjattu ruokohelpi ja säilörehuksi valmistettu nurmi ovat tuotteita, jotka säilyvät varastoituina vähintään vuoden. Niitä voidaan tarvittaessa käyttää energiantuotantoon ympäri vuoden.

5.2 VILJELYKASVIEN ENERGIASUHTEET JA NETTOENERGIAT VERRATTUNA MUISSA MAISSA SAATUIHIN TULOKSIIN

Suomi on maataloustuotannon pohjoista äärialuetta ja siksi on nähty tarpeelliseksi edistää oloihimme sopivien kasvilajikkeiden jalostusta laeilla (Suomen laki 1977, 2000). Ulkomaiset jalosteet eivät aina sovellu lyhyen kasvukauden ja alhaisen lämpösumman kasvuoloihin. Tämän vuoksi on verrattu Suomen kasvintuotantoa muiden maiden – lähinnä Euroopan maiden kasvintuotantoon. Eri ilmasto-oloissa tuotettujen energiakasvien energiasuheiden vertailu on luotettavinta, kun verrataan samaa kasvilajia sa-

malla tai lähes samalla tavalla viljeltyyn kasviin muualla. Suuresta vaihtelusta kasvien ja viljelyalueiden välillä kertoo se, että seuraavassa vertailussa energiasuhteen vaihtelualue on 1 – 54 ja nettoenergian 5 – 540 GJ ha^{-1}.

Lewandowski ja Schmidt (2005) ovat verranneet elefanttiheinää (*Miscanthus giganteus*), ruisvehnää (*x Triticosecale*) ja ruokohelpeä (*Phalaris arundinaceae*) energiakasveina Etelä-Saksan oloissa. Ruokohelven energiasuhde oli 13 ja nettoenergia 129 GJ ha^{-1}, kun typpilannoitus oli 140 kg ha^{-1}. Suomessa ruokohelven energiasuhde oli 13 ja nettoenergia 96 GJ ha^{-1}, kun typpilannoitus oli 50 kg ha^{-1} (III). Typpimäärällä 140 kg ha^{-1} energiasuhde oli Suomessa 9,4 ja nettoenergia 110 GJ/ha (III). Suomessa ruokohelpi tuotti siis samalla energiasuhteella 74 % Saksassa tuotetusta nettoenergiasta, kun typpilannoitus oli 36 % saksalaisesta typpilannoituksesta (III). Ruokohelven energiatehokkuus oli Saksassa tutkituista kolmesta kasvista alhaisin ja elefanttiheinän korkein. Elefanttiheinän energiasuhde oli enimmillään 54 ja nettoenergia 540 GJ ha^{-1}. Elefanttiheinän energiantuottokyky on siis ruokohelpeen verrattuna moninkertainen. Viljelyintensiteetin lisääminen typpilannoitusta lisäämällä heikensi Saksassa kaikkien kolmen kasvin energiasuhdetta (Lewandowski & Schmidt 2005).

Börjesson (1996) on tutkinut biomassan tuotannon ja kuljettamisen tehokkuutta Ruotsissa. Hän on myös arvioinut energian käytön tehostumisen ja lajikejalostuksen vaikutusta tuotannon tehokkuuteen (taulukko 5). Biomassan tuotannon energiapanokseen sisältyi kuljetus kuorma-autolla 50 kilometrin etäisyydelle tuotantopaikasta. Kuljetuksen osuus sinimailasen tuotannon energiapanoksesta oli 31 %, energiapajun ja oljen 23 % sekä hakkuutähteiden 19 %. Muiden kasvien osalta kuljetuksen osuus oli selvästi pienempi. Börjessonin (1996) on laskenut kuljetuksen energiapanoksen sekä siementen lämpöarvon mukaan tuotannon energiapanoksiin. Siemenen lämpöarvon mukaan otto lisäsi vehnän ja erityisesti perunan tuotannon energiapanosta. Toisaalta Börjesson (1996) ei ottanut huomioon kuivausta vehnän ja rypsin tuotannon energiapanoksena. Kun eroavuudet laskentatavoissa otetaan huomioon, Börjessonin (1996) tutkimuksessa vehnän ja rypsin nettoenergiat ja energiasuhteet ovat korkeampia kuin Suomessa (I, lll). Ero johtuu lähinnä Ruotsin suuremmista sadoista. Hakkuutähteiden, oljen ja energiapajun energiasuhteet olivat korkeimmat, mutta silti ne olivat vain 39 – 49 % C4-kasvien energiasuhteista Saksassa tai Italiassa (Lewandowski & Schmidt 2005, Angelini ym. 2009). C4-kasvit tarvitsevat fotosynteesissä vähemmän energiaa hiilidioksidin sitomiseen, eivätkä ne tuhlaa energiaa fotorespiraatioon kuten C3-kasvit tekevät (Sage & Monson 1999). Parhaiden biomassakasvien nettoenergiat ovat Ruotsissakin energiapajua lukuun ottamatta 300 – 400 GJ ha^{-1} pienempiä kuin esimerkiksi elefanttiheinän Saksan oloissa (Lewandowski & Schmidt 2005). C4-kasvien fotosynteesistä on etua C3-kasveihin nähden kuivissa, lämpimissä oloissa, kun auringonpaistetta on runsaasti (Sage & Monson 1999).

Taulukko 5 Biomassakasvien (peltokasvien, metsäbiomassan ja oljen) tuotannon energiapanokset, energiasadot, nettoenergiat ja energiasuhteet Ruotsissa 1996 sekä ennuste vuoteen 2015 (Börjesson 1996).

Biomassaresurssi	Tuotannon energiapanokset, GJ ha^{-1}		Nettoenergia, GJ ha^{-1}		Energiasuhde (output/input)	
	1996	2015	1996	2015	1996	2015
Vehnä, siemenet	18,0	14,8	76,0	125	5,2	9,4
Vehnä, siemenet ja oljet	19,5	16,0	111	160	6,7	11
Rypsi, siemenet	15,8	12,1	54,2	73,9	4,4	7,1
Rypsi, siemenet ja varret	17,2	13,2	88,8	109	6,2	9,2
Peruna	43,4	39,2	86,6	141	3,0	4,6
Sokerijuurikas	27,0	23,5	163	217	7,0	10
Apilanurmi	13,2	13,1	127	187	11	15
Sinimailanen	10,5	12,5	140	258	14	22
Ruokohelpi	10,6	11,2	109	209	11	20
Energiapaju	8,4	9,1	172	321	21	36
Päätehakkuun hakkuutähteet	0,21	0,21	5,19	7,69	26	38
Harvennushakkuun hakkuutähteet	0,47	0,42	9,53	12,6	21	31
Olki	1,47	1,13	34,5	34,9	25	32

Alluvione ym. (2011) vertasivat vehnän (*Triticum aestivum*) , maissin (*Zea mays L. ssp. mays*) ja soijapavun (*Glycine max, syn. Soja hispida*) energiasuhteita ja nettoenergian määriä Italiassa. Kasvilajien lisäksi verrattiin intensiteetiltään kolmea viljelysysteemiä, joista kahdessa pyrittiin säästämään tuotantopanoksia ja vähentämään viljelyn ympäristöhaittoja. Kolmas viljelyjärjestelmä oli perinteinen (Conventional) italialainen järjestelmä, jossa maata muokattiin kyntämällä ja lannoitteita käytettiin suomalaisittain runsaasti ((N 140 kg, P 37 kg ja K 134 kg) ha^{-1}). Ekstensiiviset viljelyjärjestelmät olivat perinteistä energiatehokkaampia, mikä kertoo tarpeesta tarkentaa tuotantopanosten – erityisesti typen käyttöä. Vehnän energiasuhde vaihteli kuudesta yhdeksään ja nettoenergian vaihtelualue oli 81 – 89 GJ ha^{-1}. Suurimmat erot suomalaisiin käytäntöihin (I, III) olivat siinä, että Italiassa viljaa ei kuivata eikä peltoja kalkita, tai ainakaan sitä ei ole otettu huomioon. Italiassa analyysi oli tehty syysvehnälle ja Suomessa kevätvehnälle. Lisäksi Italiassa vehnä oli sadetettu ja sadetuksen energiapanos oli vain 151 MJ ha^{-1}. Kun nämä erot otetaan huomioon, vehnän viljelyn energiatehokkuus on Suomessa ja Italiassa samaa tasoa.

Toisessa italialaisessa tutkimuksessa (Angelini ym. 2009) tutkittiin jättiruo'on (*Arundo donax*) ja elefanttiheinän (*Miscanthus giganteus*) ominaisuuksia bioenergian tuottajina. Tämä sekä Lewandowskin ja Schmidtin (2005) tutkimus antavat käsityksen C4-kasvien tehokkuudesta biomassan tuottajina C3-kasveihin verrattuna. Angelini ym. (2009) totesivat 12 vuoden kenttäkokeiden perusteella jättiruo'on energiasuhteen keskiarvoksi 53 ja

elefanttiheinän 39. Jättiruo'on keskimääräinen kuiva-ainesato oli 37,7 Mg ha-1 ja elefanttiheinän 28,7 Mg ha^{-1}. Suomessa ruokohelpi on peltoviljelykasveista tehokkaimpia kuiva-aineen tuottajia ja sen kuiva-ainesadot olivat koeoloissa kolmen vuoden keskiarvona parhaimmillaan 9 – 10 Mg ha^{-1} (Saijonkari-Pahkala 2001).

Espanjassa Moreno ym. (2011) ovat tutkineet 15 vuotta kestäneessä kokeessa perinteisen muokkaukseen perustuvan viljelyn, suorakylvön ja luonnonmukaisen viljelyn sekä erilaisten viljelykiertojen vaikutusta ohran, virnan ja auringonkukan energiasuhteisiin semiaridilla (puolikuiva) alueella. Ohran energiasuhde oli perinteisessä viljelyssä ja suorakylvössä 1,4 – 2,8 ja luonnonmukaisessa viljelyssä 3,2 -7,4. Korkein energiasuhde (4,2) saavutettiin viljelykierrossa, jossa oli mukana virna. Ohran monokulttuurin energiasuhde oli puolestaan viljelykierroista alin (2,0). Moreno ym. (2011) mukaan luonnonmukainen viljely sekä palkokasveja sisältävät viljelykierrot olivat energiatehokkaimpia viljelymenetelmiä semiaridilla alueella.

5.3 TUOTANTOMENETELMÄN JA VILJELYINTENSITEETIN VAIKUTUS ENERGIATALOUTEEN

Peltokasveja voidaan viljellä monilla tavoilla ja yksi paljon käytetty viljelymenetelmien luokitteluperuste on maanmuokkauksen määrä (conventional, reduced tillage, no-tillage). Muokkaus on myös energia-analyysin kannalta kiinnostava tuotantopanos, koska muokkauksen määrä vaikuttaa viljelyketjujen suoraan energiankulutukseen (I, III). Toinen viljelymenetelmien luokitteluperuste on jakaa viljely perinteiseen (teho-) ja luonnonmukaiseen viljelyyn (conventional, organic). Myös tämä luokittelu on energia-analyysin kannalta mielenkiintoinen, koska kasvien lannoitus ja kasvinsuojelu poikkeavat toisistaan. Luonnonmukaisessa viljelyssä ei käytetä lainkaan synteettistä lannoitetyppeä, joka on perinteisen viljelyn suurin yksittäinen energiapanos (I, III).

Lannoitetypen käyttö on myös keskeinen viljelyintensiteetin ilmentäjä. Intensiivisen viljelyn tuotantopanoksia ovat runsaan lannoituksen ohella runsas kalkitus, monipuolinen kasvinsuojelu, kastelu sekä satoisien ja samalla pitkää kasvuaikaa edellyttävien lajikkeiden viljely. Luonnonlaidun on esimerkki matalan intensiteetin viljelystä. Viljeltävien kasvien monivuotisuus (perennial) tai yksivuotisuus (annual) ei ole sidoksissa viljelymenetelmiin eikä viljelyintensiteettiin.

Yksivuotisten kasvien viljelyssä paras energiasuhde saavutettiin käyttämällä maatalouden ympäristötuen 2007 – 2013 ehtojen (Maaseutuvirasto 2011) sallimia suurimpia (rypsi, ohra) tai niitä 30 – 50 kg ha^{-1} pienempiä typpimääriä (vehnä) (III). Monivuotisten kasvien viljelyssä energiasuhde pieneni, kun kasvia lannoitettiin typpilannoitteella (III). Boehmel ym. (2007) ovat tehneet saman havainnon Saksassa. Italiassa lannoitusintensiteetin pienentäminen vehnän, maissin ja soijapavun viljelyssä paransi energia-

suhdetta (Alluvione ym. 2009). Havainto yksivuotisten viljelykasvien viljelyintensiteetin vaikutuksesta energiasuhteeseen Suomessa ei ole kuitenkaan ristiriidassa italialaisten tulosten kanssa, koska vertailukohtana oli Italiassa voimaperäinen viljely.

Maanmuokkaus on paljon energiaa kuluttava työvaihe (Danfors 1988). Siksi energian kulutusta on pyritty vähentämään keventämällä muokkausta ja siirtymällä suorakylvöön (no-tillage tai zero-tillage). Siirtyminen perus- ja kylvömuokkauksesta suorakylvöön vähensi viljelytöiden dieselpolttoaineen kulutusta Ruotsissa 35 litrasta 5 litraan hehtaarilla (Danfors 1988). Suorakylvöön siirtyminen vähentää myös tarvittavien koneiden määrää ja koneista aiheutuvaa epäsuoraa energiapanosta (I, III). Dieselöljyn ja koneiden osuus tuotantoketjun kokonaisenergianpanoksesta oli alle 30 % (I) ja muutos perinteisestä muokkauksesta suorakylvöön paransi ohran ja rypsin energiasuhdetta, jos sato pysyi ennallaan (I, III). Jos sato pieneni viljelymenetelmän muutoksen seurauksena yli 10 %, suorakylvön energiasuhde pieneni alle perinteisen muokkaus- ja kylvöketjun (I, III). Ensimmäisissä suorakylvökokeissa satotappiot olivat joinain vuosina jopa 50 % ja satovaihtelut vuosien välillä suuria (Pehkonen ym. 1996). Kahdeksan vuotta myöhemmin Känkänen (2004) arvioi suorakylvetyn viljan sadon 10 % perinteistä pienemmäksi ja viimeisimpien kokeiden perusteella (Levomäki 2010, Koneviestin Tietolaari 2012) suorakylvetty vilja- tai rypsisato on ollut samansuuruinen tai jopa suurempi kuin perinteisesti kylvetty tai sänkimuokattuun peltoon kylvetyn viljan sato. Viljelyn energiasuhde nousee, jos energiapanoksia voidaan säästää sadon määrän alentumatta.

5.4 PELLON METSITTÄMINEN VAIHTOEHTONA PELTOBIOENERGIALLE

Tässä kappaleessa verrataan Suomen oloissa peltokasvien energiantuottokykyä metsitettyyn peltoon, jossa kasvaa nopeakasvuisia puulajeja. Tarkastelussa ei oteta kantaa metsittämisen taloudelliseen kannattavuuteen tai sen vaikutukseen maisemaan tai pellon immateriaaliarvoihin.

Metsitys nähdään usein viimeisimpänä mahdollisuutena, kun pellolle ei ole muuta käyttöä. Jos peltoa halutaan käyttää energiantuotantoon, vaihtoehdoiksi tarjotaan enimmäkseen tavallisia peltokasveja tai kasveja, joita viljellään kuin peltokasveja. Ruotsissa on edistetty pajun viljelyä, mutta sen viljelyala kääntyi laskuun, kun istutuksen tukea pienennettiin (Heino & Hytönen 2005, Swedish National Energy Agency 2004). Suomessa ruokohelven viljelyala on myös kääntynyt laskuun (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2007, 2012a, 2012b, V). Päästöoikeuksien alhainen hinta on heikentänyt biomassapolttoaineiden kilpailukykyä ja energiantuottajat kokevat ruokohelven hankalana polttoaineena (Mustonen 2012). Viljelijät ovat tyytymättömiä ruokohelvestä saamaansa hintaan (Mustonen 2012). Puu on sen sijaan yleisesti käytetty energianlähde Suomessa ja

puun käytöstä polttoaineena on vuosikymmenien kokemus (VTT, Valtion teknillinen tutkimuskeskus 2004). Päästöoikeuksien alhainen hinta ei ole vähentänyt puun energiakäyttöä ruokohelven tapaan (Kuva 2), joten päästöoikeuksien hinta ei voi olla ainoa syy ruokohelven käytön vähenemiseen.

Luonnontilaisella maalla kasvaa Suomessa metsää (Raunio ym. 2008) ja pellon metsittäminen on askel kohti maan alkuperäistä olotilaa. Metsityksen tavoitteena voi olla energian tai ainespuun tuottaminen (Leikola 1976) tai metsitetty pelto voidaan jättää luonnontilaan. Metsittämisvaihtoehtoa tulisi tutkia myös ympäristönäkökulmasta, koska maata ei istutuksen jälkeen muokata eikä lannoitteita ja torjunta-aineita käytetään hyvin vähän peltokasveihin verrattuna (Leikola 1976). Siksi on mielenkiintoista verrata, miten puut tuottavat pellolla energiaa suhteessa peltokasveihin.

Energiapuun tuottajina tulevat kyseeseen nopeakasvuiset puulajit, jotka viihtyvät peltomaalajeilla. Hybridihaapa on Suomen nopeakasvuisin puulaji. Pellolle perustettujen haavikoiden puuntuotto on ollut 25 vuoden aikana 30 % suurempi kuin rauduskoivun ja puolitoistakertainen tavalliseen haapaan verrattuna. Rauduskoivu on toiseksi nopeakasvuisin puulaji. Haapa ja rauduskoivu viihtyvät viettävillä, ilmavilla hieta- tai moreenirinteillä. Veden vaivaamille, hienojakoisille kivennäismaille tai turvemaille sopii paremmin kuusi tai mänty. Taulukossa 6 on esitetty viiden Suomessa kasvavan puulajin puu- ja energiatuotos pelloille perustetuilta koeviljelmiltä. Hybridihaapa tuotti eniten puubiomassaa, mutta rauduskoivun energiantuotto oli yhtä suuri kuin hybridihaavan puuaineen suuremman kuiva-tuoretiheyden ja lämpöarvon ansiosta. (Hynynen ym. 2004.)

Taulukossa 6 mainittu kuiva-tuoretiheys tarkoittaa tiheyttä, joka saadaan mittaamalla puukappaleen massa kuivana ja tilavuus tuoreena (Alakangas 2000) ja laskemalla näiden lukujen suhde. Kun puun kuiva-tuoretiheys on suuri, tilavuusyksikössä on paljon poltettavaa kuiva-ainetta ja päinvastoin. Puuntuotantoon tarvittava energiapanos on laskettu keskiarvona Berg'in ja Lindholm'in (2003) esittämistä arvoista. Heidän mukaansa kuorellisen runkopuun tuotannon energiapanos oli Pohjois-Ruotsissa 200 MJ k-m^{-3}, Keski-Ruotsissa 187 MJ k-m^{-3} ja Etelä-Ruotsissa 147 MJ k-m^{-3}. Kyseisessä tutkimuksessa tarkasteltiin energiankulutusta tuotantoketjussa, joka käsitti siemenien ja taimien tuotannon, maan muokkauksen, istutuksen, harvennukset, puun korjuun sekä kuljetuksen sahalle tai sellutehtaalle. Pohjois- ja Keski-Ruotsissa ketjuun kuului myös lannoitus, mutta laskelmaan oli otettu huomioon vain lannoitteen levitys – ei lannoitteen valmistusta. Puun korjuu ja kaukokuljetus olivat selvästi suurimmat energiapanokset. Ne kattoivat yhdessä noin 90 % kaikesta puun tuotantoketjun energiankulutuksesta (Berg & Lindholm 2003).

Taulukko 6 Eräiden Suomessa pellolla kasvavien puulajien puu- ja energiatuotos, nettoenergia ja energiasuhde.

Puulaji	Kuiva-tuore-tiheys, kg m^{-3} [1]	Tehollinen lämpöarvo, MJ kg^{-1} [2]	Kasvu 25 vuoden aikana, m^3 ha^{-1} [3]	Kasvu keskimäärin vuodessa, m^3 ha^{-1}	Energia-tuotos vuodessa, GJ ha^{-1}	Puun-tuotannon energia-panos vuotta kohden, GJ ha^{-1} [4]	Netto-energia vuotta kohden, GJ ha^{-1}	Energia-suhde
Kuusi	378	19,3	130	5,2	37,9	0,9	37,0	41
Haapa	396	18,3	194	7,8	56,3	1,4	54,9	41
Hybridi-haapa	[5]	[5]	297	11,9	86,2	2,1	84,1	41
Mänty	427	19,5	155	6,2	51,7	1,1	50,6	47
Raudus-koivu	495	19,2	227	9,1	86,3	1,6	84,7	53

Taulukossa puun tilavuusyksikkönä käytetty m^3 tarkoittaa metsätaloudessa yleisesti käytettyä kuorellista kiintokuutiometriä.

1) Kärkkäinen 1977
2) Alakangas 2000
3) Hynynen ym. 2004
4) Berg & Lindholm 2003
5) Hybridihaavalle on käytetty haavan kuiva-tuoretiheyttä ja tehollista lämpöarvoa.

Hybridihaavan ja rauduskoivun tuottama nettoenergia on taulukon 6 mukaan 15 – 30 GJ ha^{-1} a^{-1} pienempi kuin parhaiden peltokasvien (ruokohelven ja sokerijuurikkaan) nettoenergia (III). Kaikkien puulajien energiasuhteet ovat moninkertaisia peltokasveihin verrattuna ja erityisesti rauduskoivun energiasuhde on jopa C4-kasveja (Lewandowski & Schmidt 2005, Angelini ym. 2009) parempi. Mänty on kuusta parempi energiantuottaja suuremman kuiva-tuoretiheyden ja paremman kasvun ansiosta.

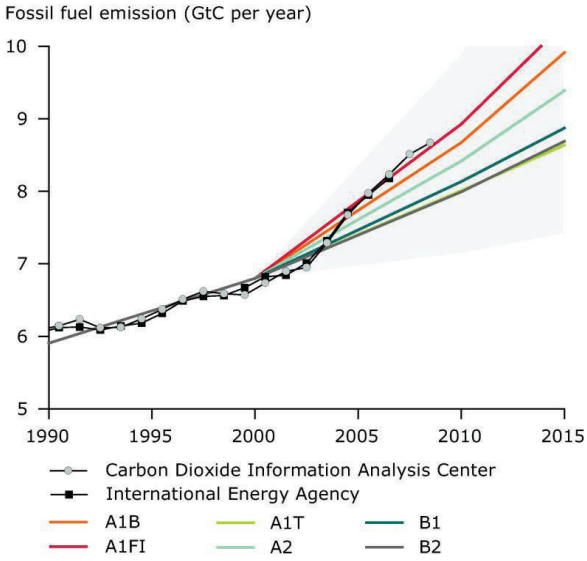
Vaikka metsitetty pelto näyttää energiataloudellisesti varsin kilpailukykyiseltä peltokasveihin verrattuna, pellon metsitys voi olla haasteellinen tehtävä (Hynönen & Hytönen 1997, Metsäntutkimuslaitos, MetInfo 2012). Heinittyminen, myyrät ja hirvet voivat tuhota taimet kerta toisensa jälkeen. Pellon ravinnesuhteet ja –määrät ovat usein puiden kasvun kannalta epäsuotuisat, minkä vuoksi pellolla kasvatettu puu on heikkolaatuista. Rungot ovat lenkoja, oksat suuria ja kasvuhäiriöitä esiintyy enemmän kuin metsämaalla (Hynönen & Hytönen 1997). Salaojiin tunkeutuvat puun juuret tukkivat ojaston. Siksi metsitettävä pelto pitäisikin avo-ojittaa jo ennen puiden istuttamista. Esimerkiksi haapa ja rauduskoivu eivät siedä seisovaa vettä (Hynynen ym. 2004). Jos metsitetty pelto otetaan taas viljelykäyttöön, salaojat on uusittava. Toisaalta metsittäminen olisi sikäli riskitön vaihtoehto, että huonolaatuinenkin puu kelpaa energiaksi ja hyvin onnistuessaan puut kasvavat pellolla tukkipuun mittoihin nopeammin kuin metsässä (Hynynen ym. 2004). Pelto on myös tasainen ja kivetön korjuupaikka. Pellon metsit-

tämisen vaikeudet huomioon ottaenkin metsittäminen on tutkimisen arvoinen vaihtoehto bioenergian tuottamiseksi.

5.5 NETTOENERGIA JA MAAN KÄYTTÖ

Bioenergiakasvien vertailussa nettoenergia on paljon käytetty tunnusluku, josta voidaan päätellä tuotannon tehokkuus pinta-alayksikköä kohden (Börjesson 1996, Hülsbergen ym. 2001, Rosenberger ym. 2001, Venturi & Venturi 2003, Angelini ym. 2009, Alluvione ym. 2011, III). Suuri nettoenergia pinta-alayksikköä kohden merkitsee, että kilpailu peltomaasta on energiantuotannon ja ruuantuotannon välillä vähäisempää kuin siinä tapauksessa, että nettoenergia on pieni. Kilpailutilanne pitää ottaa huomioon, koska maapallon väkiluku lisääntyy, ruuan tarve lisääntyy ja pellon määrä pysyy ennallaan (IV). Lisääntyvän väestön ruokahuolto on ollut tähän asti mahdollista lisäämällä lannoitteiden käyttöä (IV). Energian hinnan nousu vuonna 2008 (Suomen virallinen tilasto 2012b) antoi viitteitä siitä, että lannoitteiden hinnat seuraavat varsin suoraan energian hintaa (Vilja-alan yhteistyöryhmä 2012). Jos viljelijät eivät pysty siirtämään hinnan nousua tuotteiden hintoihin, lannoitteiden käyttöä vähennetään, jolloin sadot vähenevät (IV). Seurauksena voi olla ruuan puute ja elintarvikkeiden hinnan nousu (IV). Kesantoja ja viljelemättömiä peltoja voidaan ottaa käyttöön (Fischer ym. 2002, Freibauer ym. 2011), mutta niidenkään tuotanto ei riitä, jos väestö lisääntyy ja sadot pienenevät (IV). Bioenergian tuotannosta mahdollisesti aiheutuva ruuan hinnannousu kärjistyy maissa, joissa ihmiset käyttävät jo nyt suuren osan tuloistaan ruuan hankkimiseen.

Oikean tai riittävän nettoenergian määritteleminen peltobioenergiantuotannossa pelkästään energeettisin perustein on yhtä mahdotonta kuin riittävän energiasuhteen määritteleminen. Energeettisen tarkastelun rinnalle tarvitaan bioenergian tuotannon ympäristövaikutusten arviointi ja taloudellinen analyysi. Jos kaikki kolme analyysiä puoltavat bioenergian tuottamista, silloin vaatimatonkin energiasuhde tai nettoenergia on hyväksyttävä. Energiapäätöksiä tehtäessä otetaan lisäksi huomioon työllisyys, aluepolitiikka, maanpuolustukselliset asiat, huoltovarmuus ja vastaavat seikat (Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia 2008), jotka ovat huomion arvoisia argumentteja energiatalouden ja ympäristönäkökohtien ohella. Talouden merkitystä energiapoliittisessa päätöksen teossa kuvaavat viimeisimmät tiedot hiilidioksidipäästöjen kasvusta (Kuva 10) (European Environment Agency 2011). Vuosina 2004 – 2008 fossiilisen hiilen päästöt ovat noudattaneet varsin tarkkaan skenaariota, jossa taloudellinen kasvu on nopeaa ja ihmiskunta jatkaa intensiivistä fossiilisten polttoaineiden käyttöä (Kuva 10; skenaario A1F1).



Kuva 10 Fossiilisten polttoaineiden poltosta aiheutuvat hiilipäästöt (European Environment Agency 2011). Värein esitetyt skenaariot A1B, A1T, B1, A1F1, A2 ja B2 on kuvattu kaavion alla ja yksityiskohtaisemmin IPCC:n julkaisussa Emissions Scenarios (Intergovernmental Panel on Climate Change 2000).

A1B, A1F1 ja A1T kuuluvat samaan skenaarioperheeseen. Sen perusolettamuksina on hyvin nopea taloudellinen kasvu, väestön kasvu vuosisadan puoliväliin saakka ja taantuminen sen jälkeen sekä uusien, tehokkaiden teknologioiden nopea käyttöön otto. Taloudellisten ja sosiaalisten erojen oletetaan tasoittuvan, kun kansantulo asukasta kohden tasoittuu. Skenaariot eroavat toisistaan käytettävän energian osalta. Skenaariosa A1F1 oletetaan fossiilisten energiamuotojen intensiivisen käytön jatkuvan. Skenaario A1T perustuu uusiutuvaan energiaan ja skenaario A1B hyödyntää tasapainoisesti kaikkia energiamuotoja.

A2-skenaarioperheen kehitys on voimakkaasti alueellisesti eriytynyt. Väestön määrä kasvaa koko ajan. Talous kasvaa ja teknologia muuttuu hitaammin kuin A1-perheen skenaarioissa.

B1-skenaarioperheen olettamuksena on, että väestön määrä kasvaa vuosisadan puoliväliin saakka ja kasvu taantuu sen jälkeen kuten skenaarioperheessä A1. Talouselämässä suunnataan nopeasti informaatio- ja palvelutalouteen, jossa käytetään vähemmän materiaalia ja käytettävä teknologia on puhdasta ja resurssitehokasta. Tavoitteena on maailmanlaajuinen taloudellinen, sosiaalinen ja ympäristöllinen kestävyys.

B2-skenaarioperheessä väestö kasvaa ja koko ajan ja maailmanlaajuisten ratkaisujen sijasta luotetaan paikallisiin ja alueellisiin ratkaisuihin. Taloudellinen kasvu on keskitasoa ja teknologinen muutos hitaampaa kuin skenaariossa B1.

5.6 EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVIN 2009/28/EY (RES-DIREKTIIVI) VAIKUTUKSET PELTOBIOENERGIAN TUOTANTOON

Euroopan unionin keskeinen peltobioenergian tuotantoa ohjaava säädös on direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä eli niin kutsuttu RES-direktiivi. Se koskee biopolttoaineita ja -nesteitä, joiden raaka-aine on tuotettu pellolla. Etanoli, biodiesel ja biokaasu ovat polttoaineita, joita direktiivi koskee. Artikla 17 asettaa biopolttoaineille ja -nesteille kestävyyskriteerit, jotka ilmaistaan polttoaineiden ja -nesteiden käytöstä saatavina kasvihuonekaasuvähennyksinä. Vähennyk-

sen tulee olla 31.12.2016 asti vähintään 35 % ja sen jälkeen vähintään 50 %. Uusien, 1. tammikuuta 2017 tai sen jälkeen käyttöön otettujen laitosten osalta päästövähennys tulee olla 1. tammikuuta 2018 lähtien vähintään 60 %. Etanolin päästöjä verrataan bensiinin päästöön ja biodieselin päästöjä fossiilisen dieselin päästöön. Näiden päästöinä käytetään arvoa 83,8 g CO_2 ekv. MJ^{-1} tai viimeisimpiä käytettävissä olevia keskiarvoja niiden tietojen perusteella, jotka on toimitettu direktiivin 98/70/EY perusteella. Direktiivi sallii biopolttoaineiden ja bionesteiden valmistukseen tarkoitetun biomassan tuottamisen käytännössä vain sellaisella maalla, joka on ollut peltoa 1.1.2008. Uutta peltoa ei siis saa raivata bioenergian raaka-aineen tuotantoon. (Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi 2009/28/EY.)

Ohjeet biopolttoaineiden ja bionesteiden kasvihuonekaasuvaikutuksen laskemiseksi annettiin RES-direktiivin artiklassa 19 (Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi 2009/28/EY). Jäsenmaiden tuli toimittaa komissiolle 31.3.2010 mennessä kertomus alueista, joilla maatalouden raaka-aineiden viljelystä peräisin olevien tyypillisten kasvihuonekaasupäästöjen voidaan olettaa olevan pienempiä tai samansuuruisia kuin päästöt, jotka on esitetty direktiivin liitteessä V olevan D-osan ”Eritellyt oletusarvot viljelylle” -otsikon alla. Komissiolle tuli toimittaa myös kuvaus luettelon laatimisessa käytetyistä menetelmistä ja tiedoista. Suomen raportissa (Vehnän ja rapsin kasvihuonekaasupäästöt viljeltäessä niitä biopolttoaineiden raaka-aineeksi Suomessa 2010) vehnän tuotanto etanolin raaka-aineeksi tai rapsin viljely biodieselin raaka-aineeksi ei alittanut millään alueella oletusarvoja, jotka olivat vehnälle 23 g CO_2-ekv. MJ^{-1} ja rapsille 29 g CO_2-ekv. MJ^{-1}. Edellisestä huolimatta kestävyyskriteerit täyttävän biopolttoaineen raaka-aineen tuottaminen on Suomessakin mahdollista, jos biopolttoaineen tuottaja pystyy esittämään komissiolle laskelman, jossa raaka-aineen tuotannon todetaan alittavan oletusarvot.

6 PELTOKASVITUOTANNON ENERGIATALOUDEN PARANTAMINEN

Peltokasvituotannon energiatehokkuutta on tutkittu intensiivisesti viime vuosina (Lewandowski & Shcmidt 2005, Boehmel ym. 2007, Angelini ym. 2009, Alluvione ym. 2011, Moreno ym. 2011, I, III). Lisäksi uusiutuville energialähteille on asetettu käyttötavoitteet (Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi 2009/28/EY). Energiakasvien viljely Suomen pelloilla on myös lisääntynyt (Lötjönen 2009b, Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2012a).

Kasveja, viljelytapoja ja -oloja on monia ja niihin pätee, että viljelyn energiasuhde nousee, kun tuotetaan enemmän satoa pienemmillä panoksilla (esim. Alluvione ym. 2011). Suurempiin satoihin päästään jalostamalla suurituottoisempia kasveja ja optimoimalla kasvien kasvuolot. Kasvinjalos-

tuksessa geenitekniikka nousi 1980-luvulla valinta- ja risteytysjalostuksen rinnalle ja sen avulla uskottiin voitavan jalostaa nopeasti kasveja monenlaisiin tarkoituksiin (World Health Organization 2005). On kuitenkin jouduttu toteamaan, että vie aikansa tunnistaa haluttujen ominaisuuksien muodostumista ohjaavat geenit sekä oppia ymmärtämään ominaisuuksien ilmenemisen perusteet (World Health Organization 2005). Aromikas ja varastointia kestävä geenimuunneltu tomaatti tuli ensimmäisenä markkinoille 1994 ja sen jälkeen on otettu viljelyyn monia muita kasveja, joiden viljelyominaisuuksia on parannettu geenitekniikan keinoin. Erityisesti energiantuotantoon suunnattuja geenimuunneltuja kasveja ei ole toistaiseksi saatavilla, mutta jo käytössä olevat kasvit antavat viitteitä siitä, että geenitekniikalla olisi mahdollista yhdistää korkea sadontuotto, viljelyvarmuus sekä pieni tuotantopanosten tarve (World Health Organization 2005). Toisaalta geenimuuntelua myös vastustetaan ja siihen liittyy epäluuloja ja uhkakuvia (World Health Organization 2005).

Kasvinjalostuksen lisäksi viljelyn energiatehokkuutta voidaan parantaa tarkentamalla energiapanosten käyttöä, kun kasvien kasvuvaatimukset opitaan tuntemaan paremmin ja kun panosten kohdentamiseen tarvittava tekniikka kehittyy ja halpenee (Stafford 2000). Panokset voidaan kohdentaa ajallisesti, paikallisesti ja määrällisesti. Panosten käytöstä keskiarvojen mukaan siirrytään vähitellen paikkakohtaiseen täsmäviljelyyn (Stafford 2000).

Energiataloutta optimoitaessa tulee myös tuntea tuotannon intensiteettitason vaikutus energiasuhteeseen ja nettoenergiaan. Korkein energiasuhde ja suurin nettoenergia saavutetaan yleensä eri intensiteettitasoilla (III). Tuotantointensiteetti vaikuttaa energiatalouden ohella tuotantotalouteen ja ympäristövaikutuksiin. Tuotantotaloutta voidaan ennakoida laskelmin (Ryynänen & Pölkki 1978) hyödyntämällä tietoa kasvien sadontuotosta ja tuotantopanoksista. Bioenergiakasvien viljelyn ympäristövaikutuksista on toistaiseksi vähän tietoa (Antikainen ym. 2007, Virtanen ym. 2009) ja niitä pitää tutkia edelleen.

6.1 BIOMASSAN TUOTANNON TAVOITE

Bioenergia tuotetaan biomassan tuhkattomasta kuiva-aineesta ja siksi tavoitteena onkin tuottaa mahdollisimman paljon kuiva-ainetta pinta-alayksiköltä. Bioenergiaksi soveltuvien kasvibiomassojen lämpöarvo vaihtelee välillä 16,7 – 19,3 MJ kg ka $^{-1}$ (Alakangas 2000). Joidenkin kasvinosien kuten lehtipuiden kuoren, havupuiden neulasten, männyn kannon ja öljykasvien siementen lämpöarvot ovat tätä korkeampia (Alakangas 2000). Biomassan sisältämän tuhkan määrä vaihtelee ja se vaikuttaa biomassan lämpöarvoon (Alakangas 2000). Esimerkiksi oljen ja ruokohelven kuiva-aineen lämpöarvo (17,4 – 17,6 MJ kg^{-1}) on alempi kuin puun (18,7 – 19,6 MJ kg^{-1}) korkeamman tuhkapitoisuuden vuoksi (olki ja ruokohelpi 5,0 – 5,5 %, kokopuu 0,4 – 0,6 %).

Kun biomassan lämpöarvo vaihtelee melko kapealla alueella, pinta-alalta tuotetun energiamäärän ratkaisee ensisijaisesti biomassan määrä. Vertailu C3- ja C4-kasvien välillä osoitti C4-kasvien olevan tehokkaampia biomassan tuottajia alueilla, joilla voidaan viljellä molempia kasveja. Esimerkiksi elefanttiheinä ja jättiruoko tuottavat 3 – 10-kertaisen biomassasadon samoilla tai jopa pienemmillä energiapanoksilla kuin tyypilliset viljelykasvit Skandinaviassa (Lewandowski & Schmidt 2005, Angelini ym. 2009, Börjesson 1996, I, III). Runsastuottoiset C4-kasvit viihtyvät kuivilla alueilla, joilla on runsaasti auringonvaloa ja päivälämpötilat ovat korkeita (Sage & Monson 1999). Suomi ei ainakaan toistaiseksi hyödy C4-kasveista, koska maissin talousviljelyn pohjoisraja on Skandinavian eteläosissa (Räisänen 2008), eikä muitakaan C4-kasveja viljellä Suomessa. Ilmaston lämpenemisen myötä kasvien viljelyvyöhykkeet kuitenkin siirtyvät pohjoisemmaksi ja on mahdollista, että esimerkiksi 10 – 30 vuoden kuluttua Etelä-Suomessa voidaan viljellä maissia (Räisänen 2008).

Alhaisella tuotantointensiteetillä voidaan saavuttaa korkea energiasuhde (Lewandowski & Schmidt 2005, III). Toisaalta Boehmel ym. (2007) tulokset osoittavat havainnollisesti, että nettoenergian määrällä on myös merkitystä energiantuotannossa, koska tuotantopinta-alaa on rajallisesti käytettävissä. Tuotantoketjujen energiatehokkuutta kehitettäessä ei pidä luopua tuotantopanoksista, joiden energiapanos on pieni ja joiden vaikutus sadon määrään voi olla huomattava. Esimerkiksi kasvinsuojeluaineet ovat peltoviljelyssä marginaalinen energiapanos (Börjesson 1996, I, III), mutta niiden avulla voidaan saada suuriakin sadonlisäyksiä (Jalli ym. 1999).

Sinkko ym. (2010) ovat esittäneet erityisten vehnä-, ruisvehnä- ja ohralajikkeiden jalostamista suomalaisen viljaetanolin tuotannon energiatehokkuuden lisäämiseksi ja kasvihuonekaasupäästöjen pienentämiseksi. Uudet lajikkeet tuottaisivat runsaasti tärkkelystä ja vähän valkuaista kohtuullisilla tuotantopanoksilla. Vastaavia suunnitelmia on esitetty aiemminkin ja myös muista kuin etanolin valmistukseen tarkoitetuista kasveista (Vermerris 2008).

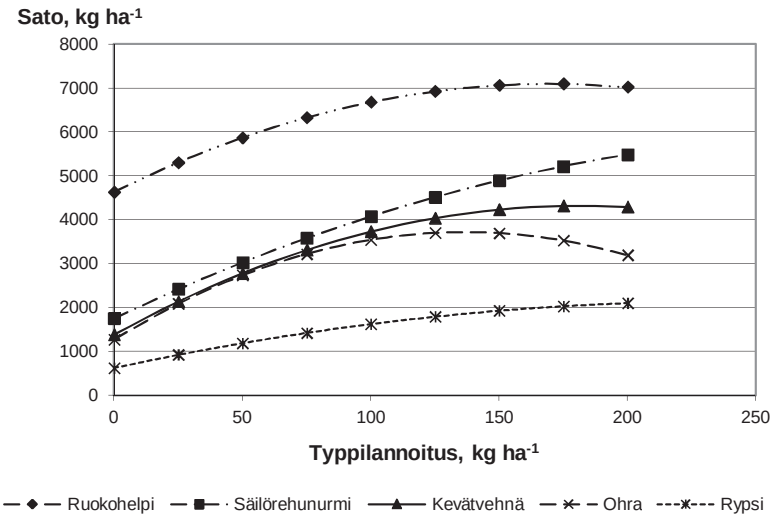
6.2 VILJELYINTENSITEETTI

Viljelyintensiteetin lisääminen merkitsee yleensä lisäpanostuksia lannoitukseen ja kasvinsuojeluun (Yli-Viikari, ym. 2000, Brentrup 2003, Boehmel ym. 2007, III). Vähenevän lisätuoton lain (Ryynänen & Pölkki 1978) seurauksena lisäpanostuksilla saatava sadonlisäys kuitenkin pienenee ja intensiteetillä on optimikohtansa, jonka jälkeen sato kääntyy laskuun. Typpilannoituksen lisääminen suurentaa energiapanosta ja samalla sato suurenee (III). Näin tapahtuu, kun typpilannoitteen määrää lisätään biologisen optimiin (Ryynänen & Pölkki 1978) saakka. Sadon määrän kasvaessa muidenkin tuotantopanosten kuin typen energiapanos jakautuu suuremmalle satomäärälle, jolloin energiapanos tuotettua yksikköä kohden pienenee (III).

Viljelyintensiteetin ja energiasuhteen suhdetta voidaan tarkastella typpivastefunktioiden avulla (Kuva 11) (III). Ruokohelven ja kevätvehnän typpivastefunktiot ovat hyvin samanmuotoisia. Ruokohelven funktio alkaa korkeammalta satotasolta ja lannoitetyppi lisää kummankin kasvin satoa jokseenkin saman verran. Kuvasta 9 nähdään, että ruokohelven energiasuhde laski typpilannoituksen seurauksena. Samassa kuvassa kevätvehnän energiasuhde nousi aluksi, mutta kääntyi 75 kg jälkeen laskuun. Energiasuhde noudattaa kahta seuraavaa periaatetta:

(1) Energiasuhde kasvaa, jos lisälannoituksella saadun sadon lämpöarvon ja lannoitteen energiapanoksen suhde on suurempi kuin energiasuhde 0-lannoituksella.
(2) Energiasuhde pienenee, jos lisälannoituksella saadun sadon lämpöarvon ja lannoitteen energiapanoksen suhde on pienempi kuin energiasuhde 0-lannoituksella.

Ensimmäinen periaate pätee kevätvehnään lannoitemäärän ollessa 0 - 75 kg N ha^{-1} ja toinen periaate ruokohelpeen koko tarkastelualueella 0 – 200 kg N ha^{-1}. Nettoenergia lisääntyy niin kauan, kun sadon lämpöarvon muutoksen ja lisälannoituksen aiheuttaman energiapanoksen erotus on suurempi kuin nolla.



Kuva 11 Ruokohelven, säilörehunurmen, kevätvehnän, ohran ja rypsin typpivastefunktiot (III).

Monivuotisten ruokohelven ja säilörehunurmen energiasuhde oli korkein (Kuva 9), kun niitä ei lannoitettu lainkaan. Lannoituksen seurauksena energiasuhde laski, vaikka molempien kasvien typpivaste oli yhtä hyvä tai parempi kuin kevätvehnän, ohran ja rypsin. Monivuotisten kasvien huomattava etu on, että ne hyödyntävät tehokkaasti kevään aurinkoisia päiviä, jolloin kevätkylvöiset kasvit vasta aloittelevat kasvuaan. Lisäksi kasvuston perustamisesta aiheutuvat muokkauksen ja siemenen energiapanokset jakautuvat usean vuoden sadon kesken (III).

Suurin nettoenergia saavutettiin pääsääntöisesti lannoitusmäärillä, jotka olivat suurempia kuin käytännössä käytettävät lannoitusmäärät (Peltonen 2012b) ja suurempia kuin ympäristötuen ehtojen mukaiset lannoitusmäärät (Maaseutuvirasto 2009, 2011). Käytännön viljelyssä lannoitusmäärän määrää taloudellinen optimi, johon vaikuttavat myytävän tuotteen hinta, lannoitteen hinta sekä lannoitekilolla saatavan lisäsadon suuruus (Ryynänen & Pölkki 1978). Edellisestä voidaan päätellä, että taloudellinen optimi ja energiasuhteen optimi saavutetaan vain sattumalta samalla lannoitusmäärällä, koska tuotantopanosten ja tuotteiden hinnat sekä toisaalta niiden lämpöarvot eivät ole sidottuja toisiinsa. Energiatalouden näkökulmasta suositeltava viljelyintensiteetti on kasvikohtainen (III), eikä voida yleistää, että matala tai korkea intensiteetti olisi pääsääntöisesti energiataloudellisempi.

6.3 VILJAN KUIVAUSTA KORVAAVAT MENETELMÄT

Suomi on peltoviljelyn pohjoista reuna-aluetta (Carter 1998) ja sää viljan korjuuaikaan saattaa olla sateinen. Kuivaus on tunnetuin tapa varmistaa viljan säilyminen ja kuivatulla viljalla voidaan tehdä kauppaa niin kotimaassa kuin ulkomailla. Suomen viljasadosta kuivataan 85 - 90 % (Palva ym. 2005). Kuivauksen osuus viljan tuotantoketjun energiankulutuksesta oli 10 – 15 % (1,1 – 1,9 GJ ha^{-1}), (I, III). Enimmillään kuivaukseen tarvittiin enemmän polttoainetta kuin sitä tarvittiin kaikkien peltotöiden tekemiseen.

Bioenergian tuotannossa sadon kuivaukseen käytetyn fossiilisen energian korvaaminen uusiutuvalla energialla pienentää kasvihuonekaasupäästöjä, mutta se ei pienennä energiankulutusta. Kuivauksen korvaaminen jollain tuoresäilöntämenetelmällä pienentää sekä energiankulutusta että kasvihuonekaasupäästöjä (Mäkinen ym. 2006). Siksi tuoresäilöntämenetelmät ovat erityisen kiinnostavia. Tutkimukset Suomessa viljellystä ohrasta tai vehnästä valmistetun etanolin käytöstä liikennepolttoaineena (Mäkinen ym. 2006, Virtanen ym. 2009, Sinkko ym. 2010) ovat osoittaneet, että saavutettavat energiahyödyt olisivat pieniä eikä kasvihuonekaasupäästöjä onnistuta pienentämään välttämättä lainkaan. Yhtenä syynä tähän on viljan kuivaaminen fossiilista polttoainetta käyttäen. Vain parhaan skenaarion mukaan Ahvenanmaan oloissa tuotettu ohraetanoli täyttäisi RES-direktiivin (Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi 2009/28/EY) kestävyysvaatimuksen, mikäli kuivauksesta ja kalkituksesta aiheutuvat

kasvihuonekaasupäästöt jätettäisiin huomioon ottamatta (Sinkko ym. 2010).

Polttoaine-etanolin tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöjä voitaisiin siis pienentää kuivaamalla ohra hakkeella tai säilömällä se ilmatiiviiseen siiloon. Ilmatiiviissä säilönnässä säästyisi energiaa (Mäkinen ym. 2006) ja Almgrenin (2010) mukaan ilmatiiviisti säilötystä viljasta saataisiin jopa 10 % enemmän etanolia kuin kuivatusta viljasta.

Tuoresäilöttyä viljaa voitaisiin käyttää etanolin valmistuksen lisäksi myös biokaasun tuotantoon (Steffen ym. 1998). Viljan tuoresäilöntämenetelmät ovat kuitenkin yleistyneet Suomessa hitaasti, vaikka tuoresäilönnän edut on todettu käytännössä ja tutkimuksissa (Palva ym. 2005). Murskesäilöntä ja jyväsäilöntä ovat yleisimmin käytetyt menetelmät (Palva 2008). Jyväsäilötty vilja voidaan varastoida lattiavarastoon eikä siinä tarvita erikoisrakenteita. Happoa annostellaan viljan kosteuden mukaan sitä enemmän, mitä kosteampaa vilja on. Murskevilja säilötään yleensä vastaavanlaiseen laakasiiloon kuin säilörehukin. Ilmatiivis siilo on erityisesti viljan säilöntää varten rakennettu varastosiilo, jonka täyttö- ja tyhjennyslaitteet on suunniteltu toimimaan kostealla viljalla (Palva 2008).

6.4 VILJELYKIERROT JA PALKOKASVIT

Typpilannoitteen valmistukseen tarvittava energiamäärä oli viljelyn suurin yksittäinen energiapanos (I, III). Sitä voitaisiin pienentää viljelemällä nykyistä enemmän typpeä sitovia palkokasveja (Varis ym. 1983). Maatalouden erikoistumisen myötä kasvinviljely on yksipuolistunut ja vain harvoin kyetään noudattamaan viljelykiertoja, joiden tiedetään pitävän yllä maan rakennetta ja kasvukuntoa. Sinkko ym. (2010) ovat arvioineet, että aluskasveja viljelemällä voitaisiin sitoa maahan typpeä 30 – 70 kg ha^{-1}, jolloin voitaisiin käyttää vastaavasti pienempiä lannoitemääriä sadon määrän pienentymättä. Maahan voitaisiin varastoida suurempiakin typpimääriä pitämällä viljelykasvien välissä viherlannoitusvuosia (Känkänen ym. 1998, Känkänen & Eriksson 2007), mutta tällöin myytävää satoa saataisiin vain osalta peltopinta-alaa. Typpivarastoinnin haittana on, että typpi on talven aikana alttiina huuhtoutumiselle (Nykänen ym. 1998). Palkokasvien energiataloutta parantava vaikutus olisi yksi syy edistää palkokasvien viljelyä Suomessa palkokasvien muiden etujen ohella (Varis ym. 1983).

6.5 OLKI JA LANTA KÄYTTÖÖN

Olki on tärkein käyttämättä jäävä peltokasvien sadon osa. Viljojen olkisato on likimain samansuuruinen kuin siemensatokin (Pahkala ym. 2009). Oljen kuiva-aineen lämpöarvo 16,7 – 17,8 MJ kg^{-1} (Alakangas 2000) on vain 0,7 - 2,7 MJ kg^{-1} alempi kuin siementen. Olki ja ruokohelpi ovat polttoaineena

hyvin samanlaisia (Alakangas 2000), mutta olkea syntyy, vaikkei sitä varsinaisesti tuotetakaan. Siksi on energiataloudellisesta näkökulmasta ristiriitaista jättää olki korjaamatta ja viljellä samaan aikaan ruokohelpeä. Oljen käyttöä energialähteenä haittaavat korkea korjuukosteus, alhainen energiatiheys, kuumakorroosiota aiheuttavat palamistuotteet sekä tuhkan alhainen sulamispiste (Ahokas ym. 1983a, Straw for Energy Production 1998). Hehtaarin olkisadon lämpöarvo vastaa 470 litrasta kevyttä polttoöljyä saatavaa energiamäärää seuraavin oletuksin: 1800 kg olkea hehtaarilta, kosteus 20 %, lämpöarvo 13,5 MJ kg^{-1}, polton hyötysuhde 70 %.

Tilakoon kasvun myötä (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2012a) Suomessa yleistyvät tilat, joiden tuottama olkimäärä riittäisi 200 – 300 kW:n lämpökeskuksen polttoaineeksi. Kyseinen lämpökeskus ja sadan hehtaarin olkien lämpömäärä riittäisivät 15 - 20 omakotitalon lämmittämiseen ja olkien lämpöarvo olisi markkinoilla 34 000 €, jos lämpöenergia hinnoitellaan Energiateollisuuden (2011) ilmoittaman kaukolämmön verollisen keskihinnan 1.1.2011 mukaan (rivitalot ja pienkerrostalot 71,00 € MWh^{-1}). Laiteinvestointien edellyttämien poistojen määrästä ja työn tarpeesta riippuen osa summasta jäisi oljen arvoksi. Ahokkaan ym. (1983) mukaan olki sopisi parhaiten polttoaineeksi juuri maatilakokoluokkaa suurempiin lämpökeskuksiin, koska laiteinvestoinnit ovat kilpailevia polttoaineita suuremmat, mutta polttoaine on edullinen.

Biokaasuntuotanto on keino energian tuottamiseksi lannasta tai muusta biomassasta (Steffen ym. 1998, Lehtomäki 2008 ym., Seppälä ym. 2009). Lannan energian talteenotto ei heikennä lannan käyttöarvoa lannoitteena, vaan mädätteen typpi on paremmin kasveille käyttökelpoisessa muodossa kuin käsittelemättömän lannan (Kapuinen ym. 2008). Biokaasu on monipuolinen energianlähde ja se sopii puhdistettuna myös liikkuvan kaluston polttoaineeksi (Maa- ja metsätalousministeriö 2007). Eräs merkittävä etu on, että biokaasun tuotannon yhteydessä voidaan käsitellä orgaanista biojätettä, mikä on ensimmäisiä konkreettisia askelia kohti suljettua ravinnekiertoa (Maa- ja metsätalousministeriö 2011b). Biokaasu ei ehkä kiinnosta pelkästään energianlähteenä, koska asiantuntija-arvioiden mukaan biokaasun osuus Suomen energiahuollosta jää tulevaisuudessakin pieneksi (Kauppa- ja teollisuusministeriö 2007b). Kun energiantuotantoon lisätään lannan ja biojätteen käsittelyn ympäristöhyödyt sekä ravinteiden kierrätys (Maa- ja metsätalousministeriö 2011b), biokaasuteknologian merkitys kasvaa yhdistettynä energia- ja jätteenkäsittelyratkaisuna.

6.6 HYVÄSTÄ ENERGIASUHTEESTA PALKITSEMINEN

Suomalainen maataloustukijärjestelmä (Maaseutuvirasto 2011) ohjaa viljelijöitä noudattamaan ympäristöä säästäviä viljelytapoja. Tavoitteena on hyvä sato ja peltoon annettujen tuotantopanosten täysimääräinen hyödyntäminen. Viljelijä voi seurata kasvinravinteiden käytön tehokkuutta lohkokohtaisin ravinnetaselaskelmin ja hän saa tästä seurannasta ympäristötu-

kena korvauksen (Maaseutuvirasto 2008). Ravinteiden käytön seuranta auttaa tarkentamaan lannoituksen määriä sekä tekemään pellolla ravinnetasetta parantavia toimenpiteitä. Hyvän sadon saaminen edellyttää hyvän maatalouskäytännön noudattamista, mikä tarkoittaa, että pellot on ojitettu ja kalkittu ja että työt tehdään huolella oikeaan aikaan (Maa- ja metsätalousministeriö 2001). Kasvinsuojelusta tulee myös huolehtia. Toimenpiteet hyvän ravinnetaseen ja hyvän energiasuhteen saavuttamiseksi ovat niin yhdensuuntaisia, että viljelijöitä tulisi kannustaa laajemminkin ravinnetaseiden seurantaan. Energiasuhteen tarkempi seuranta ravinnetaseen tapaan auttaisi ymmärtämään, mihin suurimmat energiapanokset käytetään. Se voisi myös kannustaa säästämään energiaa.

7 ENERGIA-ANALYYSIMENETELMIEN KEHITTÄMISTARVE

Tässä työssä on tarkasteltu peltobioenergian tuotannon energiapanoksia prosessianalyysin keinoin (I, III). Prosessianalyysi valittiin analyysityökaluksi, koska tavoitteena oli tutkia peltoenergian tuotantoon tarvittavien energiapanosten laatua ja suuruutta. Peltokasvien nettoenergiapotentiaalien vertailu oli myös analyysin perusteella mahdollista. Jo analyysien alkuvaiheessa oli tehtävä valintoja ja päätöksiä tietämättä tarkkaan niiden vaikutusta tuloksiin ja tulosten käyttökelpoisuuteen. Iteratiivinen lähestymistapa on kuitenkin tyypillinen tapa määritellä elinkaariarvioinnin arviointikriteereitä, joista energian käyttö on yksi (SFS-EN ISO 14040). Menetelmän valinnan jälkeen oli määriteltävä tutkittava systeemi, mutta sitä oli mahdollista laajentaa tai supistaa jälkikäteen, jos alkuperäinen valinta todettiin epätarkoituksenmukaiseksi.

Epäsuorien energiapanosten käsittely inventaariovaiheessa oli työlästä (I, II, III). Useasti oli vaikeaa tietää, onko kaikki oleelliset tietolähteet jo käyty läpi määritettäessä tuotteen, materiaalin tai palvelun energiapanosta. Esimerkiksi tiedot typpilannoitteiden valmistuksen energiapanosten suuruudesta vaihtelivat lähteen iän mukaan (Pimentel ym. 1973, Helzel 1992, Davis & Haglund 1999, International Fertilizer Industry Association 2009). Ainakin yksi syy lannoitteen valmistuksen energiapanoksen suuruuden vaihteluun oli, että energian käyttö on vähentynyt typpilannoitteen tärkeimpänä raaka-aineena käytettävän ammoniakin valmistuksessa puoleen vuodesta 1955 (International Fertilizer Industry Association 2009). Uusin tieto on lannoiteteollisuuden ilmoittama ja viimeisin teollisuudesta riippumaton raportti (Davis & Haglund 1999) on yli kymmenen vuotta vanha. Vaikka lannoiteteollisuus raportoi energiatehokkuuden parantuvan, energia-analyytikon on mahdotonta arvioida energiatehokkaan tekniikan osuutta tämän päivän tuotannossa tai vauhtia, jolla teollisuus korvaa vanhaa tehottomampaa tekniikkaa. Lannoitteen energiapanoksen laskemista vaikeuttaa myös se, että lannoitteet ovat kansainvälistä kauppatavaraa. Viljelijöi-

den käyttämien lannoitteiden alkuperä ei ole tiedossa, koska tiedot markkinaosuuksista ovat liikesalaisuuksia. Typpilannoite on energia-analyysissä keskeinen, koska se on suurin yksittäinen energiapanos kasvintuotannossa (I, III). Maatalouden käyttämät palvelut (huolto, korjaus, neuvonta) ovat puolestaan esimerkkejä epäsuorista energiapanoksista, joista ei ole saatavissa juuri mitään tietoa. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi energia-analyysissä kohdattuja vaikeuksia ja tehdään ehdotuksia analyysityön systematisoimiseksi.

7.1 SYSTEEMIN RAJAUS

Peltobioenergiatarkastelu aloitetaan systeemin rajaamisella. Rajauksessa määritellään tarkasteluun mukaan otettavat ja siitä pois jätettävät energiapanokset. Peltokasvien tuotantoprosessit ovat periaatteessa hyvin samanlaisia. Sadon saamiseksi pitää muokata ja lannoittaa maata, kylvää siemenet, torjua rikkakasvit ja korjata sato (I, III). Tässä työssä rajaamista vaikeuttavat lähinnä epäsuorien energiapanosten suuruuden määrittäminen. Alustavilla laskelmilla ja selvityksillä todettiin, otetaanko energiapanos tarkempaan tarkasteluun vai jätetäänkö se tarkastelun ulkopuolelle. Tärkein ohje systeemin rajaamisessa oli, että analyysin tuli vastata asetettuun tavoitteeseen. Toinen huomionarvoinen ohje systeemin rajauksessa oli tehdä se mahdollisimman pitkälle samoin kuin muutkin. Silloin tulosten vertailuun olisi paremmat mahdollisuudet. Kumpikaan ohje ei kuitenkaan vastannut esimerkiksi kysymyksiin, miten siementen energiapanos määritetään, lopetetaanko tarkastelu korjuun jälkeen pellon veräjäpisteeseen tai missä kunnossa sadon kuuluu olla tarkastelun päättyessä. Nämä päätökset vaikuttavat tuotannon energiapanoksiin, kun verrataan esimerkiksi viljaa, ruokohelpeä ja perunaa keskenään. Esimerkki osoittaa, että tuotantoprosessin selkeydestä ja elinkaariarviointia ohjeistavista standardeista (SFS-EN ISO 14040, SFS-EN ISO 14044) huolimatta monia lopputulokseen vaikuttavia asioita jää analyysin tekijän päätettäväksi.

Tämän ja vastaavien tutkimusten (Börjesson 1996, Lewandowski & Schmidt 2005, Boehmel ym. 2007, Angelini ym. 2009, Alluvione ym. 2011, Moreno ym. 2011) perusteella voidaan päätellä, että yhteisesti sovittujen rajausperiaatteiden puuttuessa tutkijat rajaavat systeemin omalla tavallaan. Siksi tulosten käyttäjän pitää varmistaa rajaukset jokaisesta tutkimuksesta erikseen ja niiden mahdolliset vaikutukset tuloksiin. Kansainvälisesti sovitut rajausperiaatteet helpottaisivat sekä analyytikoiden että tulosten käyttäjien työtä. On toisaalta selvää, että yleiset ohjeet eivät sovi kaikkiin tapauksiin. Siinäkin tapauksessa tutkija voisi yksityiskohtaisen systeemiselvityksen sijasta todeta, missä kohdin hän on poikennut yleisperiaatteista.

Prosessianalyysin systeemirajauksessa määritellään analyysissä huomioon otettavat ja siitä pois jätettävät energiapanokset. eMergy-analyysi pyrkii välttämään rajausongelman tarkastelemalla suuria kokonaisuuksia rajaamatta mitään pois. Tällöin joudutaan arvioimaan esimerkiksi

sateen ja tuulen merkitystä sadon muodostukseen sekä energiantarvetta näiden ympäristöpalveluiden aikaansaamiseen. Ympäristöpalveluiden energiapanokset ovat suuria (Odum 1996) verrattuna peltotöiden energiapanoksiin (I, III) ja niiden rinnalla suureltakin tuntuvat parannukset peltotöiden energiatehokkuudessa voivat näyttää mitättömiltä. Kummallekin analyysimenetelmälle on kuitenkin käyttöä tutkimuksen lähestymistavasta ja tavoitteesta riippuen.

7.2 INVENTAARIOVAIHE

Energiapanosten inventointi on prosessianalyyttisen energia-analyysin työläin vaihe. Vaikka energia-analyysejä on tehty paljonkin, ei ole olemassa avointa tietokantaa, jossa olisi tieto peltobioenergian energia-analyysissä tarvittavien materiaalien, työvaiheiden ja palvelujen energiakulutuksesta. Täsmällisen tarkkoja lukuja ei voi toisaalta ollakaan, koska ympäristö ja työmenetelmät vaikuttavat energian kulutukseen (Danfors 1988, Palonen & Oksanen 1993). Kyntö on tästä hyvä esimerkki (Danfors 1988, Palonen & Oksanen 1993, Rinaldi ym. 2005, Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung 2005, McLaughlin ym. 2008) . Kynnettäessä kevyttä maata 15 – 20 cm:n syvyyteen polttoainetta kuluu 10 – 15 l ha^{-1}. Kynnettäessä jäykkää savea 30 – 40 cm:n syvyyteen polttoaineen kulutus voi olla yli kaksinkertainen. Toinen esimerkki on viljan kuivaus. Suomessa vilja pitää käytännössä aina kuivata (Peltola & Kallioniemi 1988, Palva 2005), mutta on maita, joissa puintia pitää siirtää kosteampaan ajankohtaan, etteivät jyvät rikkoudu sadonkorjuussa liian kuivuuden vuoksi. Kolmas esimerkki on kalkitus. Suomessa pellot on peruskalkittava ja sen lisäksi tarvitaan ylläpitokalkitus (Kalkitusyhdistys 2007). Kalkkipitoisilla alueilla ei välttämättä tarvita kumpaakaan. Analyytikon pitää siis tuntea prosessi ja paikalliset olot, jotta lähtötiedot ovat tilanteen mukaiset.

Peltokasvien energiapanostietokannassa tulisi olla myös päästötiedot, koska niiden etsiminen on yhtä työlästä kuin energiankulutustietojen ja molempia tarvitaan usein samalla kertaa. Olemassa olevissa julkisissa tietokannoissa kuten ELCD (ELCD Database 2012) on tietoa maatalouden tuotantopanoksista satunnaisesti. Tieto saattaa myös olla niin vaikeaselkoisesti eriteltynä, että tiedon tulkitseminen on vaikeaa. Sveitsiläinen SALCA-tietokanta ei ole julkisesti saatavilla ja se on räätälöity Sveitsin oloihin (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment 2012) . BIOGRACE on kasvihuonekaasulaskelmien harmonisointia edistävä hanke (BIOGRACE 2012), jonka Internet-sivuilta on saatavissa muunnoskertoimia myös epäsuorien energiapanosten laskemiseksi. Hankkeen aikana luotua tietokantaa tulisi täydentää, jotta se palvelisi paremmin myös peltokasvien energia-analyysejä ja lisäksi tulisi varmistaa tietojen päivittäminen, kuten esimerkki ammoniakin valmistuksen energiankulutuksesta osoitti. Tietokantaan hyväksyttävä tieto tulisi kulkea puolueettoman ja asiantuntevan kontrollin kautta, jotta sitä voidaan käyttää tieteellisenä lähdeaineistona.

7.3 EPÄSUORAT ENERGIAPANOKSET

Epäsuorien energiapanosten osuus oli peltokasvituotannossa suurempi kuin suorien (I, III). Epäsuorista panoksista oli vaikeampi saada tietoa kuin suorista, eivätkä panosten käsittelytavat analyysissä ole vakiintuneet. Tästä esitettiin esimerkkinä rakentamiseen käytetty puutavara luvussa 3.5. Energia-analyysissä joudutaan pohtimaan, käytetäänkö puutavaran energiapanoksena pelkästään sen hankitaan käytettyä energiamäärää, puun lämpöarvoa vai edellisten summaa? Vastaavia maataloustuotannon energiapanoksia ovat kasvi- ja eläintuotannossa käytettävät lisäysmateriaalit kuten siemenet ja nuoret eläimet.

Tarkasteltavaan systeemiin tuotavat polttoaineet ovat suoria energiapanoksia ja niiden energiapanos on polttoaineiden tuottamiseen käytetyn energian ja lämpöarvon summa (Mäkinen ym. 2006). Polttoaineiksi luetaan nestemäiset, kaasumaiset ja kiinteät polttoaineet sekä sähkö. Käsittelyn kannalta ongelmallisia epäsuoria energiapanoksia ovat siemenviljan kaltaiset materiaalit, joita käytetään ensisijaisesti muuhun kuin energian tuotantoon mutta joilla on myös lämpöarvo. Näiden käsittely tulisi energia-analyysissä harmonisoida.

7.4 TUOTOKSET

Maatalouden tuotantoprosessista ulos lähtevät kasvi- ja eläintuotteet ovat epäsuorien energiapanosten kaltaisia. Niiden käsittelyyn energia-analyysissä ei ole yhtenäistä käytäntöä. Energiatuotosten suuruus määritellään tuotteen kuiva-aineen lämpöarvona (I, III) tai ”saapumistilassa” kuten biopolttoaineen lämpöarvo (Alakangas 2000). Tällä tarkoitetaan polttoaineen alempaa tehollista lämpöarvoa. Mitä kosteampaa tuote on, sitä alempi on lämpöarvo. Tehollinen lämpöarvo soveltuu hyvin kuvaamaan poltettavien tuotteiden arvoa lämmöntuotannossa.

Viljan tuotantoprosessi rajattiin päättymään kuivauksen jälkeen (I, III), koska kuivaus kuuluu olennaisena osana suomalaiseen viljan tuotantoprosessiin (Mäkinen ym. 2006, I, II) ja koska kuivattu vilja on varastointikelpoista (Kosmina 1956). Toisaalta energiaa säästävät tuoresäilöntämenetelmät sopivat rehuviljan säilöntämenetelmiksi (Palva ym. 2005, Mäkinen ym. 2006) ja ilmatiiviiseen siiloon säilötystä ohrasta voidaan valmistaa etanolia (Almgren 2010). Kaikilla tuoresäilöntämenetelmillä säilötty vilja sopii biokaasun tuotantoon kuten myös kuivattu vilja. Mikäli viljan käyttötarkoitus ei ole tiedossa, kaikkien kuivaus- ja tuoresäilöntävaihtoehtojen analysointi sekä kuiva-aineen lämpöarvon laskeminen analyysissä antaisi monipuolisimman kuvan varastointivaihtoehtojen vaikutuksesta energiankulutukseen.

7.5 TOP-DOWN- JA BOTTOM-UP-ANALYYSIMENETELMIEN EROT

Luvuissa 3.2 ja 4.3 todettiin, että top-down-analyysitekniikalla lasketut tuotantoprosessien energiankulutukset ovat olleet jopa yli kaksinkertaisia bottom-up-tekniikalla saatuihin kulutuksiin verrattuna. Ero johtuu siitä, että bottom-up -periaatetta noudattavassa prosessianalyysissä energiapanoksia rajataan tietoisesti pois ja niitä myös rajautuu pois, mikäli tuotannon kannalta välttämättömien palveluiden energiapanosten määrittäminen osoittautuu mahdottomaksi lähtötietojen puutteen vuoksi. Top-down-tekniikalla kaikki energiapanokset saadaan paremmin mukaan, mutta tekniikan tehokas soveltaminen edellyttäisi luotettavaa ja yksityiskohtaista energiatilastointia.

Tärkeintä analysoinnissa on tietää menetelmien heikkoudet ja valita menetelmä tarpeen mukaan. Bullard ym. (1978) esittämän nettoenergia-analyysin tavoitteena on yhdistää top-down- ja bottom-up-tekniikoiden vahvuudet sekä eliminoida niiden heikkoudet, mutta analyysi ei ole yleistynyt käytössä. Nettoenergia-analyysi on perusrakenteeltaan top-down-tarkastelu, jota täydennetään bottom-up-tekniikalla. Tekniikan käyttö edellyttäisi nykyistä yksityiskohtaisempaa energiatilastointia.

7.6 TULOSTEN TOISTETTAVUUS JA LÄPINÄKYVYYS

Peltoenergia-analyysin raportointi toistettavuuden edellyttämällä tarkkuudella voi olla haasteellista tausta-aineiston laajuudesta johtuen. Peltobioenergian tuotannon prosessianalyyttinen laskentamalli on summa tuotantoon tarvittavista energiapanoksista (I, III). Yhteenlaskettavien energiapanosten taustalla on usein muita laskelmia (I,III), joiden lähtötiedot kerätään kirjallisuudesta. Aineiston kuvauksesta tulee laaja, kun laskelmat ja lähtötiedot selitetään niin yksityiskohtaisesti, että tulokset voidaan tarvittaessa tarkistaa.

Sekundääri- ja primäärienergiaa ei aina erotella systemaattisesti. Raporteissa on vain harvoin mainittu, kummasta on kysymys. Usein näitä käytetään sekaisin. Nestemäiset polttoaineet ja sähkö muunnetaan sekundäärienergiasta primäärienergiaksi kertoimien avulla, mutta yleisesti hyväksyttyjä kertoimia ei ole saatavilla. Sähkön primäärienergian laskemista vaikeuttaa se, että sähköntuotannon rakenne pitäisi selvittää maittain ja kalenterivuosittain (Mäkinen ym. 2006). Tuontisähkön tuotantorakenteen selvittäminen voi olla ongelmallista, jos sähköä ostetaan monista maista ja tuontisähkön osuus sähkön käytöstä on suuri.

Jos peltokasvien energia-analyyseissä käytetään koeruuduilta mitattuja satotietoja, ne eivät välttämättä kuvaa satoja käytännön viljelyssä. Esimerkiksi ohran virallisten lajikekokeiden mittarilajikkeena tällä hetkellä olevan Vilde-ohran satoisuudeksi ilmoitetaan 4630 – 5710 kg ha^{-1} (Kangas

ym. 2012), mutta koko maan ohran keskisato oli ajanjaksolla 1990 – 2010 3360 kg ha^{-1} eli 1270 – 2350 kg ha^{-1} alempi kuin mittarilajikkeen sato (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2010). Vaikka toteutunut sato edustaa mennyttä aikaa ja vertailulajikkeena oleva Vilde on uusi lajike, jolta odotetaan vanhoja lajikkeita parempaa satoa, ero toteutuneen sadon ja mittarilajikkeen välillä on suuri. Vastaavasti Saijonkari-Pahkalan (2001) tutkimuksissa ruokohelven kuiva-ainesato oli koeruututulosten perusteella kevätkorjuussa savimaalla 6000 – 7340 kg ha^{-1} ja multamaalla 8090 – 10260 kg ha^{-1}, kun typpilannoitus oli 50 kg ha^{-1}. Myöhemmin Pahkala ym. (2009) arvioivat ruokohelven kuiva-ainesadoksi käytännön viljelyssä 3000 – 3600 kg ha^{-1}. Koeruutusadot ovat siis pääsääntöisesti suurempia kuin keskisadot käytännön viljelyssä. Jos käytetään virallisia satotilastoja, niistä tulee valita vähintään 5 – 10 vuoden tarkastelujakso, etteivät muutamat sääoloiltaan poikkeukselliset satovuodet pääse vääristämään keskiarvoa.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Peltobioenergian potentiaali on Suomessa 12 – 22 TWh. Se on 3 – 5 % Suomen energiankulutuksesta vuonna 2008. Peltobioenergialla voitaisiin korvata 4 – 8 % Suomessa käytettävistä uusiutumattomista energialähteistä. Potentiaalin suuri vaihteluväli johtuu siitä, että arviot peltoenergiakasvien mahdollisista viljelyaloista vaihtelevat 100 000 - 500 000 hehtaariin. Vaikka bioenergiakasveja ei viljeltäisi lainkaan, Suomessa tuotetaan olkea ja lantaa, joita voidaan hyödyntää energian tuotannossa. Oljesta voitaisiin hyödyntää enimmillään kaksi kolmasosaa (8 TWh) ja lannasta neljäsosa (0,4 TWh).

Ruokohelven tai vastaavanlaisen energiakasvin viljeleminen energiakäyttöön ja olkisadon jättäminen korjaamatta on energiataloudellisesta näkökulmasta katsottuna ristiriitaista toimintaa. Keväällä korjattu ruokohelpi ja olki ovat energianlähteenä hyvin samanveroisia, mutta ruokohelpeä pitää viljellä ja olkea muodostuu viljan tuotannon sivutuotteena. Oljen hyödyntäminen nykyistä enemmän parantaisi viljanviljelyn energiasuhdetta. Energiakasvien viljelylle on kuitenkin maatalouspoliittiset perusteensa, koska niitä viljelemällä voidaan pitää peltoa reservissä ruuantuotannon tarpeita silmällä pitäen.

Peltobioenergiapotentiaalista oli vuonna 2011 käytössä 0,5 TWh, ja se oli lähes yksinomaan bioenergiatarkoitukseen viljeltyä ruokohelpeä. Olkea käytetään energian tuotantoon joitakin miljoonia kiloja ja muutama biokaasulaitos hyödyntää lantaa. Niiden osuudet energian tuotannossa ovat kuitenkin pieniä, eikä niillä ole merkitystä valtakunnan tason energiahuollossa. Suurin osa peltobioenergiapotentiaalista on siis käyttämättä. Käyt-

tämätön peltobioenergiapotentiaali on yhtä suuri kuin käyttämätön metsäbioenergiapotentiaali.

Peltobioenergiatuotannon energiasuhteita tutkitaan kasvikohtaisten energia-analyysien avulla ja prosessianalyysi on käytetyin analyysimenetelmä. Systemaattisesti toteutettuna se antaa selkeän ja eritellyn kuvan peltobiomassan tuottamiseen tarvittavasta energiamäärästä. Tutkimustulosten vertailtavuuden kannalta on kuitenkin ongelmana, että tarkasteltavat prosessit rajataan useimmiten eri tavoin. Rajauksissa tehdyt pieneltä tuntuvat erot voivat vaikuttaa tuloksiin paljon.

Prosessianalyysi aliarvioi energian käyttöä, koska osa epäsuorista energiapanoksista rajataan tarkastelun ulkopuolelle jo systeemin määrittelyn yhteydessä (esim. yhteiskunnan infrastruktuuri). Epäsuoria energiapanoksia rajataan pois myös analyysin aikana, jos panoksia ei kyetä selvittämään riittävällä tarkkuudella tai jos ne eivät pienuutensa vuoksi vaikuta analyysin tarkkuuteen

Prosessianalyysissä tarkastellaan energian käyttöä pienimmistä osaprosesseista suurempiin kokonaisuuksiin (bottom-up-tarkastelu) ja top-down-tekniikkaa noudatettaessa toimitaan päinvastoin. Top-down-analyysien tuloksena on saatu kaksinkertaisia tai vieläkin suurempia energiankulutuksia prosessianalyysiin verrattuna. Top-down-tekniikka ottaa siis kaikki energiapanokset bottom-up-tekniikkaa paremmin huomioon. Paljon käytetty prosessianalyysi on kuitenkin helposti ymmärrettävä, eikä sen tekemiseen tarvita yksityiskohtaisia tilastotietoja energian kulutuksesta kuten top-down-analyysissä tarvitaan. Prosessianalyysi soveltuu myös prosessin osien energiatehokkuuden tunnistamiseen. Kun esimerkiksi tiedetään prosessivaiheen teoreettinen energiankulutus ja verrataan sitä mitattuun kulutukseen, voidaan etsiä keinoja energian säästämiseksi.

Prosessianalyysiin oleellisena kuuluvan inventaariovaiheen lähtötietojen keruu vie paljon aikaa. Energia-analyytikkojen näkökulmasta olisikin tärkeää saada aikaan kansainvälinen, avoin tietokanta, johon olisi tallennettuna hyvin dokumentoitujen ja läpinäkyvien tutkimusten tuloksia tuotteiden ja palveluiden tuottamiseen tarvittavista energiapanoksista. Tietokanta yhtenäistäisi analysointimenetelmiä, nopeuttaisi analyysien tekoa, parantaisi niiden laatua ja helpottaisi tulosten tulkintaa. Energia-analyyseissä tulisi käyttää nykyistä johdonmukaisemmin primäärienergiaa ja kertoimet sekundäärienergian muuttamiseksi primäärienergiaksi tulisi olla avoimesti saatavilla kuten tuotteiden ja palveluiden tuottamiseen tarvittavat energiapanoksetkin.

Peltokasvituotannon suurimpia energiapanoksia olivat epäsuorat energiapanokset, joiden osuus oli 75 – 85 % peltokasvien tuotantoketjujen energian kokonaiskulutuksesta. Tärkeimpiä epäsuoria energiapanoksia olivat maatalouskemikaalit (lannoitteet, kalkki, torjunta-aineet), siemenet ja koneet. Näistä lannoitetypen valmistus oli suurin yksittäinen energiapanos. Sen osuus oli suurin (57 %) säilörehun tuotantoon tarvittavista energiapanoksista. Koneiden osuus tuotannon kokonaisenergiapanoksesta oli enintään kolmannes, vaikka mukaan luettiin koneiden polttoaineenkulutuksen

lisäksi koneiden valmistuksen ja kunnossapidon energiankulutus. Tutkimus tosin osoitti, että maatalouskoneiden valmistuksen energiankulutusta ei ole varsinaisesti tutkittu, vaan niihin sovelletaan auton valmistuksen energiapanoksia, jotka on julkaistu jo 40 vuotta sitten.

Maatalouskoneiden todelliset käyttömäärät tunnetaan huonosti. Tietoa kuitenkin tarvittaisiin allokoitaessa valmistuksen energiapanos koneen elinikäiselle käyttömäärälle. Tässä tutkimuksessa käytetty tekninen, elinikäinen käyttömäärä on ilmeisesti pitempi kuin todellinen, mistä johtuen valmistuksen energiapanosta on saatettu aliarvioida.

Suomessa viljeltävien peltokasvien energiasuhde vaihteli kolmesta yhteentoista, kun tarkasteltiin viljelyä suositeltuja tuotantopanoksia käyttäen. Ruokohelpi, säilörehunurmi ja sokerijuurikas tuottivat eniten energiaa suhteessa tuotantopanoksiin. Viljojen ja öljykasvien energiasuhde oli kolmesta viiteen, kun otetaan pelkkä siemensato huomioon. Jos otettaisiin huomioon näiden kasvien olki- tai varsisato, energiasuhteet olisivat lähes kaksinkertaisia. Energiaa voidaan siis saada talteen moninkertaisesti tuotantoon käytettyihin energiapanoksiin verrattuna. Suomessa viljeltyjen viljojen energiasuhde oli samaa tasoa Italiassa ja Espanjassa viljeltyjen viljojen kanssa. Varsinaisten biomassakasvien kuten maissin, elefanttiheinän tai jättiruo'on energiasuhde on Keski- ja Etelä-Euroopassa parhaimmillaan yli 50. Suuria biomassasatoja saadaan C4-kasveista, jotka viihtyvät lämpimissä, aurinkoisissa kasvuoloissa. Ne käyttävät typpeä ja vettä säästeliäämmin kuin viileässä ilmastossa viihtyvät C3-kasvit.

Peltokasvien energiasuhteita arvioitaessa on otettava huomioon, että sadon kuiva-aineen lämpöarvo pellon reunassa on energiasadon suurin mahdollinen määrä. Jos peltobiomassasta tuotetaan polttonesteitä, sähköä tai jotain muuta kuin suoraan polttoon soveltuvaa energiaa, energiasuhde huononee. Lisäksi energiasuhde on vain yksi kriteeri arvioida peltoenergiatuotannon kannattavuutta. Sen rinnalle pitäisi saada arvio peltoenergian ympäristövaikutuksista, ja sitä pitäisi verrata muiden biopolttoaineiden sekä fossiilisten polttoaineiden ympäristövaikutuksiin. Taloudellinen kannattavuus on kolmas kriteeri, jonka perusteella voidaan tehdä tuotantopäätöksiä, mikäli energia- ja päästöanalyysit puoltavat peltobioenergian tuotantoa.

Peltoenergiatuotannon energiasuhdetta voidaan parantaa vähentämällä tuotantopanosten määrää tai lisäämällä satoa eli tuotettua energiamäärää. Hyvään energiasuhteeseen pääsemiseen ei ole olemassa yhtä keinoa, vaan siihen päästään monilla oikeaan aikaan toteutetuilla toimilla. Toimenpiteet hyvään energiasuhteeseen pääsemiseksi ovat pitkälti samoja kuin toimenpiteet hyvään ravinnetaseeseen pääsemiseksi. Hyvä ravinnetase saavutetaan käyttämällä panoksia harkiten ja pyrkimällä suureen satoon. Ravinnetaseiden seuranta on siis keino myös hyvään energiasuhteeseen pääsemiseksi. Energiasuhteen seuranta ravinnetaseen tapaan auttaisi viljelijöitä ymmärtämään viljelyyn tarvittavien energiapanosten suuruuden ja niiden keskinäiset suhteet.

Peltoenergiakasvien teoreettinen vertailu pellon metsittämiseen antoi viitteitä siitä, että nopeakasvuisista puista, kuten hybridihaavasta ja rauduskoivusta, saataisiin biomassaenergiaa lähes yhtä hyvällä energiasuhteella kuin C4-kasveista lämpimämmissä maissa. Myös nettoenergian määrä olisi kilpailukykyinen peltoenergiakasveihin verrattuna. Pellon metsittämistä ei siis pidä unohtaa, kun suunnitellaan biomassan tuottamista energiatarkoituksiin Suomessa.

LÄHTEET

Agrifood Research of Finland – MTT 2005. Profitability book-keeping data of Finnish agriculture (Farm Accountancy Data Network – FADN). Agrifood Research of Finland, Economics Research.

Ahokas, J., Ståhlber, P. & Maaskola, I. 1983a. Olki polttoaineena. Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos, Tutkimusselostus nro 30. 88 p.

- 1983b. Energiantuotanto maatilan omista energianlähteistä. Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos, Tutkimusselostus nro 33. 66 p.
- , Koivisto, K.1983c. Energiansäästö viljankuivauksessa. Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos, Tutkimusselostus nro 31., 89 p.
- & Mikkola, H. 1986. Traktorin polttoaineenkulutukseen vaikuttavia seikkoja. Valtion maatalousteknologian tutkimuslaitos. Tutkimusselostus nro 43. 107 p.

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Tiedotteita 2045. 172 p.

Alluvione, F., Moretti, B., Sacco, D. & Grignani, C. 2011. EUE (energy use efficiency) of cropping systems for a sustainable agriculture. Article in press. Energy (2011).

Almgren, I. 2010. Pretreatment of grain for ethanol production during storage. Swedish University of Agricultural Sciencies. Department of Microbiology. 35 p. + 2 appendixes.

Angelini, L. G., Ceccarini, L., Nassi o Di Nasso, N. & Bonari, E. 2009. Comparison of Arundo donax L. Miscanthus x giganteus in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. Biomass and Bioenergy 33: 635 – 643.

Antikainen, R., Tenhunen, J., Ilomäki, M., Mickwitz, P., Punttila, P., Puustinen, M., Seppälä, J. & Kauppi, L. 2007. Bioenergian uudet haasteet Suomessa ja niiden ympäristönäkökohdat. Suomen ympäristökeskus, raportti 11/2007. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=70772&lan=fi. Hakupäivä 8.3.2012.

Anttila, P. & Tähtinen, M. 1992. Rikki- ja typpilaskeuman kehitys Suomessa 1980 – 1990. Ilmatieteen laitos, raportteja. 27 p.

ASAE D497.5 FEB2006. Agricultural machinery management data. American Society of Agricultural and Biological Engineers: 390 – 398.

Bak, F., Jensen, M. G. & Hansen, K. F. 2003. Forurening fra traktorer og ikkevejgående maskiner i Danmark. Teknologisk Institut. Miljøprojekt nr. 779. 70 p.

Berg, S. & Lindholm, E.-L. 2003. Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden. Journal of Cleaner Production 13: 33 – 42.

Berry, R. S. & Fulton Fels, M. 1972. The production and consumption of automobiles. An energy analysis of the manufacture, discard and reuse of the automobile and its component materials. A report to the Illinois institute for environmental quality. Department of Chemistry, University of Chicago, July 1972. 74 p.

von Bertalanffy, L. 1968. General System Theory. George Braziller Publ. New York. 295 p.

BIOGRACE 2012. Harmonised calculations of biofuel greenhouse gas emissions in Europe. Saatavissa: http://www.biograce.net/. Hakupäivä 29.2.2012.

Boehmel, C., Lewandowski, I. & Claupein, W. 2007. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. Agricultural Systems 96: 224 – 236.

Bowers W. 1992. Agricultural field equipment. In: Stout, B. A., Fluck, R. C. (Editors). Energy in world agriculture. Energy in farm production, vol. 6. Elsevier; 1992. pp. 117 – 129.

Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Barraclough, P. & Kuhlmann, H. 2004. Environmental analysis of intensity level in wheat crop production using life cycle assessment. Agriculture, Ecosystems and Environment 113: 216 – 225.

British Petroleum 2011. Oil prices. Saatavissa: http://www.bp.com/sectiongenericarticle800.do?categoryId=9037172&contentId=7068612. Hakupäivä 8.4.2011.

Brown, M. T. & Herendeen, R. A. 1996. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. Ecological Economics 19: 219 – 235.

Bullard, C. W., Penner, P. S. & Pilati, D. A. 1978. Net energy analysis. Handbook for combining process and input–output analysis. Resources and Energy 1: 267 – 313.

Böhringer, C. & Rutherford, T. F. 2006. Combining top-down and bottom-up in energy policy analysis: A Decomposition approach. Discussion paper No. 06-007. Centre for European Economic Research. 19 p. Saatavissa: http://www.mpsge.org/qpdecomp.pdf. Hakupäivä 8.6.2011.

Börjesson P. 1996. Energy analysis of biomass production and transportation. Biomass and Bioenergy 11: 305 – 318.

Carter, T. R. 1998. Changes in the thermal growing season in Nordic countries during the past century and prospects for the future. Agricultural and Food Science in Finland 7: 161 – 179.

Cleveland, C. 2010. Net energy analysis. The Encyclopedia of Earth. Saatavissa: http://www.eoearth.org/article/Net_energy_analysis. Julkaistu 23.7.2010. Hakupäivä 8.4.2011.

Danfors, B. 1988. Bränsleförbrukning och avverkning vid olika system för jordbearbetning och sådd. Jordbrukstekniska Institutet, Meddelande nr 420. 85 p.

Davis, J. & Haglund, C. 1999. Life cycle inventory (LCI) of fertiliser production. The Swedish Institut for Food and Biotechnology. SIK Report No 654. 112 p. + 65 appendixes.

Earth Trends 2011. World Resources Institute. Energy consumption. Total energy consumption per capita. Saatavissa: http://earthtrends.wri.org/searchable_db/index.php?theme=6&variable_ID=351&action=select_countries. Hakupäivä 11.4.2011.

ELCD Database 2012. LCA tools services and data. Saatavissa: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm. Hakupäivä 29.2.2012.

Energiateollisuus 2011. Kaukolämmön hinnat tyyppitaloissa eri paikkakunnilla. Saatavissa: http://www.energia.fi/fi/tilastot/kaukolampotilastot/kaukolammonhinta. Hakupäivä 15.8.2011.

Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi 2009/28/EY, annettu 23. päivänä huhtikuuta 2009. Direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä sekä direktiivien 2001/77/EY ja 2003/30/EY muuttamisesta ja myöhemmästä kumoamisesta. 47 p. Saatavissa: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:FI:PDF. Hakupäivä 4.4.2011.

European Environment Agency 2011. Observed global fossil fuel CO_2 emissions compared with six scenarios from the IPCC. Saatavissa: http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/observed-global-fossil-fuel-co2. Hakupäivä 10.8.2011.

European Union 2006. European Parliament resolution on a strategy for biomass und biofuels, 14 December 2006. 12 p. Saatavissa: http://www.google.fi/#hl=fi&source=hp&q=European+Parliament+Resolution+on+a+strategy+for+biomass+und+biofuels&btnG=Google-haku&meta=&aq=f&oq=&fp=3c35ad68c41213fc. Hakupäivä 28.4.2011.

Fischer, G., van Velthuizen, H., Shah, M. & Nachtergaele, F. 2002. Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century. IIASA, Laxenberg, Austria. 119. p. Saatavissa: http://www.iiasa.ac.at/Admin/PUB/Documents/RR-02-002.pdf. Hakupäivä 8.3.2012.

Fischer, T. & Krieg, A. 2001. Agricultural biogas plants – worldwide. International Congress, Renewable Energy Sources in the Verge of XXI Century, Warschau, 10.-11. Dezember, 2001. 4 p. Saatavissa: http://www.kriegfischer.de/upload_downloads/International_Kongress_011120_.pdf. Hakupäivä 14.6.2011.

Fluck R. C. & Baird C., D. 1980. Agricultural energetics. Westport, CT: AVI Publishing Co., Inc.; 1980. 192 p.

- 1985. Energy sequestered in repairs and maintenance of agricultural machinery. Transactions of the ASAE, 28: 738 – 744.

Freibauer, A., Mathijs, E., Brunori, G., Damianova, Z., Faroult, E., Girona i Gomis, J., O´Brien, L. & Treyer, S. 2011. Sustainable food consumption and production in a resource-constrained world. European Commission – Standing Committee on Agricultural Research (SCAR). The 3rd SCAR Foresight Exercise. 147 p. Saatavissa: http://ec.europa.eu/research/agriculture/scar/pdf/scar_feg_ultimate_version.pdf. Hakupäivä 8.3.2012.

Gustafsson, L., Lanshammar, H. & Sandblad, B. 1982. System och modell. En introduktion till systemanalysen. Studentlitteratur, Lund. 275 p.

Gustafsson, J., Larsson, S. & Nordh, N-E. 2010. Manual för Salixodlare. Lantmännen Agroenergi AB/Salix. Saatavissa: http://www.google.fi/search?source=ig&hl=fi&rlz=1G1GGLQ_FIFI315&=&q=Manual+f%C3%B6r+Salixodlare&oq=Manual+f%C3%B6r+Salixodlare&aq=f&aqi=&aql=&gs_sm=e&gs_upl=2672l2672l0l4908l1l1l0l0l0l0l212l212l2-1l1l0. Hakupäivä 6.6.2011.

Hadders, G., Arshadi, M., Nilsson, C. & Burvall, J. 2001. Bränsleegenskaper hos spannmålskärna. JTI-Rapport 289. 38 p.

Hannon, B. 1973. The structure of ecosystems. Journal of Theoretical Biology 41: 535 – 546.

Harvey, A. & Pilgrim, S. 2011. The new competition for land: Food, energy, and climate change. Food Policy 36: S40 – S51.

Hau, J. L. & Bakshi, B. R. 2004. Promise and problems of emergy analysis. Ecological Modelling, 178: 215 – 225.

Heino, E. & Hytönen, J. 2005. Suomalainen pajubibliografia – Finnish bibliography on willow. Metlan työraportteja 17. 39 p. Saatavissa: http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2005/mwp017.htm. Hakupäivä 6.6.2011.

Helzel, Z. R. 1992. Energy and alternatives for fertilisers and pesticide use. In: Fluck, R. C., (ed.). Energy in farm production. Vol. 6. In: Stout, B. A. (ed.). Energy in world agriculture, Amsterdam: Elsevier; 1992.

Hemming, M., Maunu, T., Suokannas, A., Järvenpää, M. & Pehkonen, A. 1996. Agrokuidun tuotanto ja käyttö Suomessa. Tutkimuksen loppuraportti, II osa: ruokohelven korjuu, varastointi ja mekaaninen esikäsittely sekä tuotantokustannukset ja saatavuus. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A, 1996:4. 98 p.

Herendeen, R. A. 2004. Energy analysis and EMERGY analysis – a comparison. Ecological Modelling 178: 227 – 237.

Hernánz, J. L., Girón, V. S. & Cerisola, C. 1995. Long-term energy use and economic evaluation of three tillage systems for cereal and legume production in central Spain. Soil & Tillage Research 35: 183 – 198.

Hildén, M., Huhtala, A., Koikkalainen, K., Ojanen, M., Grönroos, J., Helin, J., Isolahti, M., Kaljonen, M., Kangas, A., Känkänen, H., Puustinen, M., Salo, T., Turtola, E. & Uusitalo, R. 2007. Verotukseen perustuva ohjaus maatalouden ravinnepäästöjen rajoittamisessa. Ympäristöministeriön raportteja 15. 73 p.

Hülsbergen, K.J., Feil, B., Biermann, S., Rathke, G.-W., Kalk, W.D. & Diepenbrock, W. 2001. A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial. Agriculture, Ecosystems and Environment 86: 303 – 321

Hynynen, J., Ahtikoski, A. & Eskelinen, T. 2004. Viljelyhaavikon tuotos ja kasvatuksen kannattavuus. Metsätieteen aikakausikirja I/2004: 113 – 116.

Hynönen, T. & Hytönen, J. 1997. Pellosta metsäksi. 2. painos. Kustannusosakeyhtiö Metsälehti. 152 p.

IEA Statistics 2010. CO2 emissions from fuel combustion, highlights. International Energy Association. 130 p. Saatavissa: http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf. Hakupäivä 14.4.2011.

Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000. Emission scenarios. IPCC Special Report 2000. Summary for Policymakers. 21 p. Saatavissa: http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf. Hakupäivä 10.8.2011.

International Fertilizer Industry Association 2009. Energy efficiency and CO_2 emissions in ammonia production, 2008-2009. Summary Report. 3 p.

Jalli, H., Laine, A., Junnila, S., Kangas, A. & Kurtto, J. 1999. Laon, kasvitautien ja kirvojen torjunnan kannattavuus kevätvehnän ja ohran viljelyssä. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 57: 37 p.

Kalkitusyhdistys 2007. Kalkitusopas. 20 p. Saatavissa: http://www.kalkitusyhdistys.net/index.php?id=195. Hakupäivä 29.2.2012.

Kaltschmitt, M. & Reinhardt, G. A. 1997. Nachwachsende energieträger. Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Braunschweig. 527 p.

Kangas, A., Laine, A., Niskanen, M., Salo, Y., Jauhiainen, L. & Rahkonen, A. 2012. Tärkeimmät peltokasvilajikkeet 2012. In: Maatalouskalenteri 2012. ProAgria Keskusten liitto: 179 – 187.

Kapuinen, P., Perälä, P. & Regina, K. 2008. Mädätyksen vaikutus sian lietelannan lannoitusominaisuuksiin ohralla. In: Toim. Leena Rantamäki-Lahtinen. Maataloustieteen Päivät 2008 10.-11.1.2008, Viikki, Helsinki: esitelmä- ja posteritiivistelmät. Suomen maataloustieteellisen seuran tiedote 24: p. 243.

Katajajuuri, J.-M., Loikkanen, T., Pahkala, K., Uusi-Kämppä, J., Voutilainen, P., Kurppa, S., Laitinen, P., Mikkola, H. J., Kivinen, T. & Salo, S. 2000. Ympäristöhallintaa tukevan tietopohjan kehittäminen osana maatilojen laatujärjes-

telmää: Case: Rehuohran elinkaariarviointi. VTT tiedotteita 2034: 134 p. + 4 liitesivua.

Kauppa- ja teollisuusministeriö 2007a. Arvio biomassan pitkän aikavälin hyödyntämismahdollisuuksista Suomessa. Asiantuntijaryhmän raportti 12.2.2007. 40 p. + 4 liitettä. Saatavissa: http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/D63221D46DD9F4CCC22572B100424FE9/$file/284642006.pdf. Hakupäivä 2.5.2011.

- 2007b. Biokaasulla tuotettavan sähkön syöttötariffi Suomessa – Perusteita järjestelmän toteuttamiselle. Kauppa- ja teollisuusministeriö. Työryhmän mietintö 5.12.2007. 75 p. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/18256/Biokaasutariffi_tr_raportti_191207.pdf. Hakupäivä 2.5.2011.

Kemppainen, E. & Heimo, M. 1981. Karjanlannan hyväksikäytön tehostaminen. Kirjallisuustutkimus. Maatalouden tutkimuskeskus. Maanviljelyskemian ja -fysiikan laitoksen tiedote 14. 89 p.

Kepner, R. A., Bainer, R & Barger, E. L. 1978. Principles of farm machinery. 3rd ed. Westport, CT: AVI Pub. Co., Inc.; 1978. 527 p.

Koneviestin tietolaari 2012. Suorakylvö. Saatavissa: http://www.koneviesti.fi/Tietolaari/fi_FI/suorakylvo/. Hakupäivä 14.2.2012.

Korhonen, R., Korpela, L. & Sarkkola, S. (toim.) 2008. Finland – Fenland. Research and sustainable utilisation of mires and peat. Suoseura and Maahenki. 288 p.

Korpi, H. 2011. Bioetanolista businesta – loppuraportti. Etelä-Pohjanmaan liitto. 30 p.

Kosmina. N. P. 1956. Organisation und Technik der Getreidelagerung. Deutscher Bauernverlag. 287 p.

Kyoto Protocol to The United Nations Framework Convention on Climate Change, 1998. Saatavissa: http://www.kyotoprotocol.com/resource/kpeng.pdf. Hakupäivä 4.4.2011.

Känkänen, H., Kangas, A., Mela, T., Nikunen, U., Tuuri, H. & Vuorinen, M. 1998. Timing incorporation of different green manure crops to minimize the risk of nitrogen leaching. Agricultural and Food Science in Finland 7: 553 – 567.

- 2004. Sato siirtymäkauden aikana. In: Alakukku,L. Mikkola, H., Teräväinen, H. (toim.). Suorakylvöopas. Maaseutukeskusten liiton julkaisuja 1003: 57 – 71.
- & Eriksson, C. 2007. Effects of undersown crops on soil mineral N and grain yield on spring barley. European Journal of Agronomy 27: 25 – 34.

Kärhä, K., Elo, J., Lahtinen, P., Räsänen, T. & Pajuoja, H. 2009. Puupolttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa. Metsätehon katsaus 40/2009. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Katsaus/Katsaus_040_Puupolttoaineiden_saatavuus_kk.pdf. Hakupäivä 8.4.2011.

Kärkkäinen, M. 1977. Puu. Sen rakenne ja ominaisuudet. Helsingin yliopiston monistuspalvelu. 442 p.

Laine, A. 1998. Konekustannusten alentaminen koneiden käyttöikää pidentämällä. Työtehoseuran julkaisuja 360. 82 p.

Laitila, J., Asikainen, A. & Anttila, P. 2008. 1. Energiapuuvarat. In: Kuusinen, M. & Ilvesniemi, H. (toim.) 2008. Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja: 6 – 12. Saatavissa: http://www.metla.fi/julkaisut/muut/energiapuu/index.htm. Hakupäivä 12.4.2011.

Laki 1472/1994. Laki nestemäisten polttoaineiden valmisteverosta. Saatavissa: http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1994/19941472. Hakupäivä 23.1.2012.

Laki 1305/2007. Laki nestemäisten polttoaineiden valmisteverosta annetun lain muuttamisesta. Saatavissa: http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2007/20071305. Hakupäivä 4.5.2011.

Lampinen, A. & Jokinen, E. 2006. Suomen maatilojen energiantuotantopotentiaalit. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 84. 162 p. Saatavissa: https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/18309/9513924971.pdf?sequence=1. Hakupäivä 10.1.2011.

McLaughlin, N. B., Drury, C. F., Reynolds, W. D., Yang, X. M., Li, Y. X., Welacky, T. W. & Stewart, G. 2008. Energy inputs for conservation and conventional primary tillage implements in a clay loam soil. Transactions of the ASABE 51: 1153 – 1163.

Lehtomäki, A., Viinikainen, T. A. & Rintala, J. A. 2008. Screening boreal energy crops and crop residues for methane biofuel production. Biomass and Bioenergy 32: 541 – 550.

Leikola, M. 1976. Maanmuokkaus ja pintakasvillisuuden torjunta peltojen metsittämisessä. Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja 88(3). 101 p.

Leinonen, A. 2010. Turpeen tuotanto ja käyttö, yhteenveto selvityksistä. VTT Tiedotteitta 2550. Saatavissa: http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2550.pdf. Hakupäivä 25.1.2012.

Lemmer, A., Vogtherr, J. & Oechsner, H. 2008. Biogas process operational details. International biogas training course, 15 – 19 September 2008, University of Hohenheim. Luentomateriaalia. 31 p.

Leontief, W. 1966. Input-Output Economics. New York: Oxford University Press. 257 p.

Levomäki, T. 2010. Koneviestin suorakylvökokeen viides vuosi. Koneviesti 58 (17): 21 – 24.

Lewandowski, I. & Kauter , D. 2003. The influence of nitrogen fertilizer on the yield and combustion quality of whole grain crops for solid fuel use. Industrial Crops and Products 17: 103 – 117.

- & Shcmidt, U. 2005. Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. Agriculture, Ecosystems and Environment 112: 335 – 346.

Lundin, G. 1993. Skördetröskning med reparbord. Jordbrukstekniska Institutet, Meddelande nr. 443. 48 p.

Lönnemark, H. 1971. Kostnader och kostnadsberäkningar för jordbruksmaskiner. Jordbrukstekniska institutet. Meddelande nr 340. 70 p.

Lötjönen, T. 2008. Harvest losses and bale density in reed canary grass (Phalaris arundinacea L.) spring-harvest. In: Booth, E., Green, M., Karp, A., Shield, I., Stock, D. & Turley, D. (Editors) Biomass and Energy Crops III. Aspects of Applied Biology 90: 263 – 268.

- & Knuutila, K. 2009a. Pelloilta energiaa – opas ruokohelven käyttäjille. Jyväskylä Innovation Oy ja Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. 42 p.
- (Ed.) 2009b. Energy from field energy crops – a handbook for energy producers. Jyväskylä Innovation Oy. 64 p.

Maa- ja metsätalousministeriö 2001. Tavanomainen hyvä maatalouskäytäntö. 24 p.

- 2004. Peltobiomassa, liikenteen biopolttonesteet ja biokaasujaosto. Väliraportti. Työryhmämuistio 2004:11. Helsinki, 53 p. Saatavissa: http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmamuistiot/2004/trm2004_11.pdf. Hakupäivä 29.4.2011.
- 2005. Peltoviljelyn tulevaisuuden linjaukset Suomessa. Työryhmämuistio 2005:15. 44 p. Saatavissa: http://wwwb.mmm.fi/tiedoteliitteet/trm2005_15.pdf. Hakupäivä 10.1.2011.

- 2007. Peltobiomassa, liikenteen biopolttonesteet ja biokaasujaosto. Loppuraportti. Työryhmämuistio mmm 2007:2. Helsinki, 64 p. Saatavissa: http://www.mmm.fi/attachments/mmm/julkaisut/tyoryhmamuistiot/2007/5lYTgDdW9/trm2007_2.pdf. Hakupäivä 29.4.2011.
- 2011a. Ehdotus soiden ja turvemaiden kestävän ja vastuullisen käytön ja suojelun kansalliseksi strategiaksi. Työryhmämuistio MMM 2011:1. 159 p. Saatavissa: http://www.mmm.fi/attachments/ymparisto/suojaturvemaat/5xxrwGBpQ/Suostrategia_final_160211korjattu150411.pdf. Hakupäivä 7.3.2011
- 2011b. Suomesta ravinteiden kierrätyksen mallimaa. Työryhmämuistio mmm 2011:5. 58 p. Saatavissa: http://www.mmm.fi/attachments/mmm/julkaisut/tyoryhmamuistiot/newfolder_25/5xN59lPQI/trm2011_5.pdf. Hakupäivä 17.2.2012.

Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2007. Maatilatilastollinen vuosikirja 2007. 267 p.
- 2010. Maatilatilastollinen vuosikirja 2010. 270 p.
- 2012a. Maatilatilastollinen vuosikirja 2011. 270 p.
- 2012b. Matilda maataloustilastot. Käytössä oleva maatalousmaa 2011. Saatavissa: http://www.maataloustilastot.fi/kaytossa-oleva-maatalousmaa. Hakupäivä 19.1.2012.

Maaseutuvirasto 2008. Ravinnetaseet. Ympäristötuen lisätoimenpide lannoituksen ja sadon ravinnemäärien seurantaan. 16 p.
- 2009. Opas ympäristötuen ehtojen mukaiseen lannoitukseen 2007 – 2013. 28 p. Saatavissa: http://www.mavi.fi/attachments/mavi/viljelijatuet/hakuoppaatjaohjeet/ymparistotuenperusjalisatoimenpiteidenop-paat/5FSJ2pUCH/912996_lannoiteopas_LR_vii.pdf. Hakupäivä 8.8.2011.
- 2011. Maatalouden ympäristötuen sitoumusehdot 2011. 36 p. Saatavissa: http://www.mavi.fi/attachments/mavi/ymparistotuki/5xQHBic3n/Ymparistotuen_sitoumusehdot_2011.pdf. Hakupäivä: 22.2.2012.

MacLean, H. & Lave, L. 1998. A life-cycle model of an automobile. Environmental Science and Technology/News, July 1, 1998: 322 – 330. Saatavissa: http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es9836242. Hakupäivä 14.6.2011.

Maidell, M., Pyykkönen, P. & Toivonen, R. 2008. Metsäenergiapotentiaalit Suomen maakunnissa. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen työpapereita nro 106. 42 p.

Martínez-Alier, J. & Schlüpmann, K. 1987. Ecological economics: energy, environment and society. Basil Blackwell., Oxford. 286 p.

Masami, I. & Tetsuo, Y. 1999. Inter-relationships among agricultural income ratio, energy input-output ratio, and fossil energy income ratio. Journal of Rakuno Gakuen University 23: 135 – 138.

Mattson, L. 1999. Mullhalt och kvävemineralisering i åkermark. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för markvetenskap. Avd. för växtnäringslära. Rapport. 17 p.

Mengel, K. & Kirkby, E. A. 2001. Principles of plant nutrition, 5th edition. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 849 p.

Mikkola, H. J. & Ahokas, J. 2009. Challenges of bioenergy analyses. 2009 Bioenergy Engineering Conference, Seattle, Washington October 11 – 14, 2009. Paper No: BIO-097977. 7 p.

Metsäntutkimuslaitos, Metinfo 2011a. Kansainvälisiä metsätilastoja. Saatavissa: http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2005/vsk05_12.pdf. Hakupäivä 3.5.2011.
- 2011b. Valtakunnallinen metsien inventointi. Saatavissa: http://www.metla.fi/metinfo/vmi/index.htm. Hakupäivä 16.5.2011.
- 2011c. Tilastopalvelu/Puun käyttö/ Laatuselosteet/Puun energiakäyttö/6.1 Yleisimmät muuntokertoimet. Saatavissa: http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/laatu/puupolttoaine.htm. Hakupäivä 3.5.2011.
- 2012. Metsien terveys, metsätuho-opas. Saatavissa: http://www.metla.fi/metinfo/metsienterveys/opas/tuhonaiheuttajaluettelo.htm. Hakupäivä: 16.2.2012.

Moreno, M. M., Lacasta, C., Meco, R. & Moreno, C. 2011. Rainfed crop energy balance of different farming systems and crop rotations in a semi-arid environment: Results of a long-term trial. Soil & Tillage Research 114: 18 – 27.

Mukula, J. & Rantanen, O. 1987. Climatic risks to the yield and quality of field crops in Finland. Annales Agriculturae Fenniae 26: 1 – 18.

Mustonen, E. 2012. Vapo leikkaa rajusti helpituotantoa ja myy kolmasosan helpipelloistaan. Käytännön Maamies 61, 2/2012: 6 – 10.

Myllylä, I. 2012. Biodieselhanke etenee. VapoViesti 1/2012: 18 – 22.

Mäkelä, O., Ahokas, J. & Suurinkeroinen, J. 1983. Kotimainen polttoaine viljankuivauksessa. Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos, Tutkimusselostus nro 32. 71 p.

Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. & Mikkola, H. J. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit. VTT tiedotteita 2357: 134 p. + liitteitä 19 p.

National Renewable Energy Laboratory 2011. Energy Analysis. Saatavissa: http://www.nrel.gov/analysis/. Hakupäivä 20.4.2011.

Nykänen, A., Granstedt, A. & Salo, Y. 1998. How to minimize the nitrogen leaching risk after clover-rich leys in organic farming? In: G. Nagy and K. Petö (Eds). Ecological aspects of grassland management. Grassland Science in Europe 3: 991 – 995.

Nässen, J., Holmberg, J., Wadeskog, A. & Nyman, M. 2007. Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input-output analysis. Energy 32: 1593 – 1602.

Odum, H.T., 1996. Environmental Accounting: EMERGY and environmental decision making. John Wiley, New York. 370 p.

Ozkan, B., Akcaoz, H. & Fert, C. 2004. Energy input–output analysis in Turkish agriculture. Renewable Energy 29: 39 – 51.

Paappanen, T., Lindh, T., Kärki, J.,Impola, R. & Rinne, S. 2008. Ruokohelven tuotanto- ja toimitusketju ja käyttö polttoaineena voimalaitoksissa. Julkaisussa: Maataloustieteen Päivät 2008 [verkkojulkaisu]. Suomen Maataloustieteellisen Seuran tiedotteita no 23. Toim. Anneli Hopponen. 7 p. Saatavissa: http://www.smts.fi. Hakupäivä 23.1.2012.

Pahkala, K., Mela, T., Hakkola, H., Järvi, A. & Virkajärvi, P. 1996. Agrokuidun tuotanto ja käyttö Suomessa. Tutkimuksen loppuraportti, I osa : Agrokuitukasvien viljely: viljelytoimenpiteiden ja lajikevalinnan vaikutus agrokuitukasvien satoon ja kivennäisainekoostumukseen. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A, 1996:3. 68 p. + 14 liitettä.

- , Isolahti, M., Partala, A., Suokannas, A., Kirkkari, A.-M., Peltonen, M., Sahramaa, M., Lindh, T., Paappanen, T., Kallio, E. & Flyktman, M. 2005. Ruokohelven viljely ja korjuu energian tuotantoa varten. 2. korjattu painos. Maa- ja elintarviketalous 1: 31 p. Saatavissa: http://www.mtt.fi/met/pdf/met1b.pdf. Hakupäivä 5.3.2012.
- , Hakala, K., Kontturi, M. & Niemeläinen, O. 2009. Peltobiomassat globaalina energianlähteenä. Maa- ja elintarviketalous 137: 53 p. Saatavissa: http://www.mtt.fi/met/pdf/met137.pdf. Hakupäivä 4.1.2011.

Palonen, J. & Oksanen, E. H. 1993. Labour, machinery and energy data bases in plant production. Työtehoseuran julkaisuja 330. 106 p.

Palva, R., Jaakkola, S., Siljander- Rasi, H., Valaja, J., Root, T. & Peltonen, S. 2005. Viljan tuoresäilöntä. In: Palva, R., Kirkkari, A.-M. & Teräväinen, H. (toim.). Viljasadon käsittely ja käyttö. Tieto tuottamaan 108. ProAgria Maaseutukeskusten Liitto: 55 – 66.
- 2008. Tuoresäilöntä on entistä kiinnostavampi vaihtoehto. Teho 5/2008: 18 – 20.

Pehkonen, A., Pitkänen, J., Turtola, E., Pietilä, S. & Sipilä, I. 1996. Ympäristöä säästävä muokkaus- ja kylvölannoitustekniikka. Helsingin yliopisto, Maa- ja kotitalousteknologian laitos. Maatalousteknologian julkaisuja nro 20. 70 p.

Peltola, A. & Kallioniemi, M. 1988. Viljankuivausopas. Työtehoseuran julkaisuja 299. 125 p.

Peltonen, S. 2012a. Kylvötaulukko. In: Maatalouskalenteri 2012. ProAgria Keskusten liitto: 177 – 178.
- 2012b. Typpilannoitus. In: Maatalouskalenteri 2012. ProAgria Keskusten liitto: 166 – 167.

Peura, P. & Hyttinen, T. 2011. The potential and economics of bioenergy in Finland. Journal of Cleaner Production 19: 927 – 945.

Pimentel, D., Hurd, L. E., Bellotti, A. C., Forster, M. J., Oka, I. N., Sholes, O. D. & Whitman, R. J. 1973. Food production and the energy crisis. Science 2, November 1973: 443 – 449.
- 1980. Handbook of Energy Utilisation in Agriculture. CRC Press. Boca Raton, FL. 487 p.

Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia 2008. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008. 129 p. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus_311008.pdf. Hakupäivä: 16.2.2012.

Pohjonen, V. 2010. Bioenergia. Veli Pohjonen: Homepage. Saatavissa: http://pohjonen.org/dub/?page_id=53. Hakupäivä 6.6.2011.

Raunio, A. Schulman, A. & Kontula, T. (toim.) 2008. Suomen ympäristö 8/2008. Luonto, Osa 2: Luontotyyppien kuvaukset. 572 p. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=283838&lan=fi. Hakupäivä 16.2.2012.

Raunio, H. 2010. Suomeen saattaa nousta kolme biodiesellaitosta. Tekniikka & Talous – Energia 14.9.2010. Saatavissa: http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article498941.ece. Hakupäivä: 25.1.2012.

da Rosa, A. V. 2005. Fundamentals of Renewable Energy Processes. Elsevier Academic Press. 689 p.

Rinaldi, M., Erzinger, S., & Stark, R. 2005. Treibstoffverbrauch und Emissionen von Traktoren bei landwirtschaftlichen Arbeiten. FAT-Schriftenreiche Nr. 65. 92 p.

Rosenberger, A., Kaul, H.-P., Senn, T. & Aufhammer, W. 2001. Improving the energy balance of bioethanol production from winter cereals: the effect of crop production intensity. Applied Energy 68: 51 – 67.

Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yang, X. B., Epstein, P. R. & Chivian, E. 2001. Climate change and extreme weather events. Global change & Human health 2: 99 – 104. Saatavissa: http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1023&context=nasapub&sei-redir=1#search=%22impact+of+weather+on+food+production%22. Hakupäivä 8.6.2011.

Rydberg, T. & Jansén, J. 2002. Comparison of horse and tractor traction using emergy analysis. Ecological Engineering 19: 13 – 28.

Ryynänen, V. & Pölkki, L. 1978. Maanviljelystalous. 265 p.

Räisänen, J. 2008. Kasvihuoneilmiö, ilmastonmuutos ja vaikutukset. Helsingin yliopisto, fysiikan laitos. 177 p. Saatavissa: http://www.atm.helsinki.fi/~jaraisan/kasvihuonemoniste_uusi.pdf. Hakupäivä 17.2.2012.

Sage, R. & Monson, R. 1999. C4 plant biology. Academic press. 596 p.

Sahramaa, M. & Hömmö, L. 2000. Ruokohelven jalostustutkimus. In: Salo, Riitta (toim.). Biomassan tuottaminen kuidun ja energian raaka-aineeksi. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 84: 7 – 14.

Saijonkari-Pahkala, K. 2001. Non-wood plants as raw material for pulp and paper. Agricultural and Food Science in Finland 10, Supplement1: 101 p. Diss.: Helsingin yliopisto, 2001. (Doctoral Dissertation). Saatavissa: http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/sbiol/vk/saijonkari-pahkala/. Hakupäivä 6.5.2011.

Salo, R. (toim.) 1998. Ruokohelpiseminaari : biomassan tuotanto pelloilla ja turvesoilla sekä käyttö energian tuotantoon : esitelmät Oulunsalo, 29.9.1997. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 39: 61 p.

- 2000a. Biomassan tuottaminen kuidun ja energian raaka-aineeksi: Tutkimuksen loppuraportti, osa I: Ruokohelven jalostus ja viljely. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 84: 86 p.
- 2000b. Biomassan tuottaminen kuidun ja energian raaka-aineeksi: Tutkimuksen loppuraportti, osa II : Ruokohelven ja oljen korjuu, tuotantokustannukset ja polttotekniikka. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 85: 169 p.

Sander, B. 1997. Properties of Danish biofuels and the requirements for power production. Biomass and Bioenergy 12: 177 – 183.

Sankari, H. & Mela, T. 1998. Characteristics of reed canary grass (Phalaris arundinacea L.) breeding lines compared at three experimental sites in Finland. In: Eds. H. Kopetz, T. Weber, W. Palz, P. Chartier, G. L. Ferrero. Biomass for Energy and Industry: 10th European Conference and Technology Exhibition; Proceedings of the International Conference, Würzburg, Germany, 8 – 11 June 1998. Rimpar: C.A.R.M.E.N.: 894 – 896.

Schroeder, J., W. 2004. Silage fermentation and preservation. Saaatavissa: http://www.ag.ndsu.edu/pubs/ansci/dairy/as1254w.htm. Hakupäivä: 8.2.2012.

Schweimer, G. & Levin, M. 2002. Life cycle inventory for the Golf A4. 40 p. Saatavissa: www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/info_center/en/publications/2007/01/Golf_A4__Life_Cycle_Inventory.-bin.acq/qual-BinaryStorageItem.Single.File/golfa4_english.pdf. Hakupäivä 14.6.2011.

Scienceman, D. M. 1987. Energy and Emergy. In: Pillet, G. and T. Murota (eds), Environmental Economics: the Analysis of a Major Interface. Geneva: R. Leimgruber: 257 – 276.

Selin, P. 1999. Turvevarojen teollinen käyttö ja suopohjien hyödyntäminen Suomessa. Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science 79. 239 p.

Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A & Rintala, J. 2009. Biogas production from boreal herbaceous grasses – Specific methane yield and methane yield per hectare. Bioresource Technology 100: 2952 – 2958.

Seppänen, H. 1992. Perunan varastointi. In: Seppänen, H. & Komulainen, M. (toim.) Perunan tuotanto. Maaseutukeskusten liitto. Tieto tuottamaan 64. 111 p.

SFS-EN ISO 14040. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Suomen Standardisoimisliitto. 48 p.

SFS-EN ISO 14044. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja. Suomen Standardisoimisliitto. 96 p.

Siljander-Rasi, H., Valaja, J., Jaakkola, S. & Perttilä, S. 2000. Tuoresäilötty ohra sikojen ja siipikarjan rehuna. Työtehoseuran maataloustiedote 518. 6 p.

Silvennoinen, H., Latvala, T., Järvinen, E., Toivonen, R., Rämö, A-K & Pelkonen, P. 2008. Bioenergiaa metsistä ja pelloilta: Viljelijöiden suhtautuminen bioenergiaraaka-aineiden tuotantoon ja tarjontaan sekä bioenergiayrittäjyyteen. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen raportteja 211. 125 p. Saatavissa: http://www.ptt.fi/dokumentit/rap211_1812081533.pdf. Hakupäivä 5.3.2012.

Simola, A. & Kola, J. (toim.) 2010. Bioenergian tuotannon aluetaloudelliset vaikutukset Suomessa. Helsingin yliopisto, Taloustieteen laitos. Julkaisuja 49. 88 p.

Sinkko, T., Hakala, K. & Thun, R. 2010. Biopolttoaineiden raaka-aineeksi viljeltävien kasvien aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt Suomessa Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/28/EY mukainen laskenta. MTT Raportti 9: 41 p. Saatavissa: http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti9.pdf. Hakupäivä 6.5.2011.

Slesser, M. 1974. Energy analysis. Energy analysis workshop on methodology and conventions. International Federation of Institutes for Adcanced Study (IFIAS). Stockholm 1974. 89 p.

Sørensen, B. 2004. Renewable Energy. Elsevier Academic Press. 928 p.

Stafford, J. V. 2000. Implementing Precision Agriculture in the 21st Century. J. agric. Engng Res. 76: 267 – 275.

Steffen, R., Szolar, O. & Braun, R. 1998. Feedstock for anaerobic digestion. University of Agricultural Sciences Vienna. 29 p. Saatavissa: http://www.adnett.org/dl_feedstocks.pdf. Hakupäivä 16.2.2012.

Straw for energy production. Technology – Environment – Economy 1998. The Center for Biomass Technology 1998, second edition. 53 p. Saatavissa: http://www.videncenter.dk/uk/index.htm. Hakupäivä 3.5.2011.

Suomalaiset ravitsemussuositukset 2012. Valtion ravitsemusneuvottelukunta. Saatavissa: http://www.ravitsemusneuvottelukunta.fi/portal/fi/ravitsemussuositukset/suomalaiset_ravitsemussuositukset/. Hakupäivä 7.2.2012.

Suomen bioenergiayhdistys 2007. Peltoenergiastrategia. Saatavissa: http://www.google.fi/#hl=fi&source=hp&q=peltoenergiastrategia&btnG=Google-haku&meta=&aq=f&oq=peltoenergiastrategia&fp=a5dadf355cd13854. Hakupäivä 2.5.2011.

Suomen laki 1977. Laki kasvijalostustoiminnan edistämisestä, 896/1977.

Suomen laki 2000. Siemenkauppalaki, 728/2000.

Suomen virallinen tilasto 2010. Metsätilastollinen vuosikirja 2010. Saatavissa: http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2010/vsk10_kokonaan_10.pdf. Hakupäivä 23.1.2012.

- 2012a. Tilastokeskuksen PX-Web –tietokannat. Energian hankinta ja kulutus. Saatavissa: http://pxweb2.stat.fi/database/statfin/ene/ehk/ehk_fi.asp. Hakupäivä 23.1.2012.
- 2012b. Tilastokeskuksen PX-Web –tietokannat. Energian hinnat. Saatavissa: http://pxweb2.stat.fi/database/statfin/ene/ehi/ehi_fi.asp. Hakupäivä 16.2.2012.

Swedish Board of Agriculture - SJV. Jordbruksstatistisk årsbok 2010. Åkerarealens användning. Saatavissa: http://www.jordbruksverket.se/download/18.32b12c7f12940112a7c80002015/3+%C3%85kerarealens+anv%C3%A4ndning.pdf. Hakupäivä 6.6.2011.

Swedish National Energy Agency, 2004. Syntes av forskning rörande Salix inom programmet Fasta biobränslen från jordbruksmark. 37 p.

Swiss Agricultural Life Cycle Assessment 2012. Saatavissa: http://www.agroscope.admin.ch/oekobilanzen/01199/index.html?lang=en. Hakupäivä 29.2.2012.

Tennenbaum, S. E. 1988. Network energy expenditures for subsystem production. M.S. Thesis. University of Florida. 131 p.

Tilastokeskus 2012. Käsitteet ja määritelmät. Saatavissa: http://www.stat.fi/meta/kas/energiaintensit.html. Hakupäivä 25.1.2012.

Tuomisto, J. 2010. Pelto-, lanta- ja jäteperäisen energian alueelliset potentiaalit Suomessa. In: Simola, A. & Kola, J. (toim.). Bioenergian tuotannon aluetaloudelliset vaikutukset Suomessa – BioReg-hankkeen loppuraportti. Helsingin yliopisto, Taloustieteen laitos. Julkaisu no 49: 41 – 60.

Työvoima- ja elinkeinoministeriö 2008. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus_311008.pdf. Hakupäivä 8.4.2011.

UNFCCC 2004. United Nations Framework Convention on Climate Change. Guidelines for the preparation of national communications by Parties included in Annex I to the Convention, Part I: UNFCCC reporting guidelines on annual inventories (following incorporation of the provisions of decision 13/CP.9). 91 p. Saatavissa: http://unfccc.int/resource/docs/2004/sbsta/08.pdf. Hakupäivä 28.4.2011.

United Nations 1998. Mineral fertilizer production and the environment. Part 1: The Fertilizer Industrie's Manufacturing Processes and Environmental Issues. United Nations Industrial Development Organisation. Technical report no 26. 73 p.

United Nations Framework Convention on Climate Change, 1992. Saatavissa: http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf. Hakupäivä 4.4.2011.

Valtioneuvoston asetus 1397/2010. Valtioneuvoston asetus uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 30.12.2010. Saatavissa: http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20101396. Hakupäivä 6.5.2011.

Vapo 2011. Biopolttoainetermejä. Turve ja peltobiomassat. Saatavissa: http://www.vapo.fi/fin/palvelut/viestintapalvelut/biopolttoainetermeja/?id=572#Turve. Hakupäivä 4.5.2011.

Varis, E., Sundman, V. & Aura, E. 1983. Biologinen typensidonta peltokasvien viljelyssä. Suomen akatemian sopimustutkimuksen 383 loppuraportti. 342 p.

Vehnän ja rapsin kasvihuonekaasupäästöt viljeltäessä niitä biopolttoaineiden raaka-aineeksi Suomessa 2010. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/28/EY mukainen laskenta, Artikla 19(2). Helsinki, 12.5.2011. 9 p. Saatavissa: http://www.mmm.fi/attachments/maatalous/maataloustuotanto/bioenergia/5qWnE6HyK/Bio_raportti_vehnan_ja_rapsin_kasvihuonekaasupaatot__12052011.pdf. Hakupäivä 8.8.2011.

Venturi, P. & Venturi, G. 2003. Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. Biomass and Bioenergy 25: 235 – 255.

Vermerris, W. 2008 (ed.). Genetic improvement of bioenergy crops. Springer Verlag, Heidelberg, Germany. 450 p.

Vilja-alan yhteistyöryhmä 2012. Viljatietopankki. Lannoitteiden ja maanparannusaineiden hintakehitys Itämeren maissa. Saatavissa: https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/taloustohtori/viljatietopankki/itameren_maat/maatalouden_tuotantopanokset/lannoitteet. Hakupäivä 16.2.2012.

Virtanen, K., Hänninen, P., Kallinen, R.-L., Vartiainen, S., Herranen, T. & Jokisaari, R. 2003. Suomen turvevarat 2000. Summary: The peat reserves of Finland in 2000. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti – Geological Survey of Finland, Report of Investigation 156. 101 p., 54 figures, 19 tables and 7 appendices.

Virtanen, Y., Usva, K., Silvenius, F., Sinkko, T., Nurmi, P., Kauppinen, T. & Nousiainen, J. 2009. Peltoenergian tuotantojärjestelmien ympäristövaikutukset. Maa- ja metsätalousministeriö, muut julkaisut. Saatavissa: http://www.mmm.fi/attachments/mmm/julkaisut/muutjulkaisut/5Jl2waBUc/Peltobioenergia_raportti.pdf. Hakupäivä: 14.2.2012.

VTT, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus 2004. Energia Suomessa. Oy Edita Ab, 3. painos. 396 p.

Väisänen, J. 2000. Biological nitrogen fixation in organic and conventional grass-clover swards and a model for its estimation. Helsingin yliopisto, kasvintuotantotieteen laitos. Lisensiaattityö. 42 p.

Wall, G. 1990. Exergy conversion in the Japanese society. Energy 15: 435 – 444.

World Energy Outlook 2009. Saatavissa: http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/weo2009.pdf. Hakupäivä 2.5.2011.

World Health Organization 2005. Modern food biotechnology, human health and development: an evidence-based study. 85 p. Saatavissa: http://www.who.int/foodsafety/publications/biotech/biotech_en.pdf. Hakupäivä 22.2.2012.

Yli-Viikari, A., Hietala-Koivu, R., Risku-Norja, H., Seuri, P., Soini, K., Widbom, T. & Voutilainen, P. 2000. Maatalouden kestävyyden indikaattorit. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 74: 116 p.

Yrjölä, H. 2009. Ruokohelven varastointi energiakäyttöön. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, Agroteknologian laitos. 97 p.

Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung 2005 Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs in der Land- und Forstwirtschaft. 5 p.



ISBN 978-952-10-4316-1 (Print)
ISBN 978-952-10-4317-8 (Online)
ISSN 1798-7407 (Print)
ISSN 1798-744X (Online)
ISSN-L 1798-7407

Elektronisessa muodossa oleva
julkaisu on luettavissa osoitteessa:
http://ethesis.helsinki.fi

Unigrafia
Helsinki 2012