

Bioenergian uudet haasteet Suomessa ja niiden ympäristönäkökohdat

Nykytilakatsaus

**Riina Antikainen, Jyrki Tenhunen, Mika Ilomäki,
Per Mickwitz, Pekka Punttila, Markku Puustinen,
Jyri Seppälä ja Lea Kauppi**

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUKSEN
RAPORTTEJA 11 | 2007

Bioenergian tuotannon uudet haasteet Suomessa ja niiden ympäristönäkökohdat

Nykytilakatsaus

**Riina Antikainen, Jyrki Tenhunen, Mika Ilomäki,
Per Mickwitz, Pekka Punttila, Markku Puustinen,
Jyri Seppälä ja Lea Kauppi**

Helsinki 2007

Suomen ympäristökeskus



Suomen ympäristökeskuksen raportteja 11 | 2007
Suomen ympäristökeskus

Taitto: DTPage Oy

Julkaisu on saatavana myös internetistä:
www.ymparisto.fi/julkaisut

Edita Prima Oy, Helsinki 2007

ISBN 978-952-11-2666-6 (nid.) tai (sid.)

ISBN 978-952-11-2667-3 (PDF)

ISSN 1976-1718 (pain.)

ISSN 1796-1726 (verkkokj.)

ESIPUHE

Suomi on yksi bioenergian käytön kärkimaita Euroopassa. Bioenergian tuotantoa ja käyttöä halutaan edelleen lisätä tavoitteena erityisesti kasvihuonekaasupäästöjen, fossiilisten polttoaineiden käytön ja tuontipolttoaineista riippuvuuden vähentäminen. Lisäksi bioenergian lisäämisellä nähdään olevan työllisyys- ja aluepoliittisia hyötyjä. Sekä kansallisesti että Euroopan Unionin tasolla on asetettu useita bioenergiaa koskevia tavoitteita.

Suomen ympäristökeskuksessa (SYKE) aloitettiin syksyllä 2006 selvitys, jonka tavoitteena oli luoda katsaus siihen, mitä bioenergian tuotannon ja käytön ympäristövaikutuksista sekä niihin kytkeytyvistä taloudellisista ja sosiaalisista vaikutuksista tiedetään. Selvitystyön aikana SYKEssä järjestettiin myös tilaisuus Bioenergian tuotanto Suomessa – keskustelu toimivien bioenergian tuotanto- ja käyttömallien löytämiseksi.

Selvitys tehtiin kirjallisuuteen ja asiantuntijanäkemyksiin perustuen. Selvityksen kirjoittamiseen osallistivat useat SYKEN tutkijat ja asiantuntijat. Kirjoittajien lisäksi myös seuraavat henkilöt avustivat merkittävästi tiedon keruussa ja kommentoivat käsikirjoitusta: Helena Dahlbo, Alec Estlander, Martin Forsius, Juha Grönroos, Timo Jouttijärvi, Jukka-Pekka Jäppinen, Minna Kaljonen, Niko Karvosenoja, Paula Kivimaa, Mikko Kuussaari, Ahti Lepistö, Tuuli Myllymaa, Sirkka Tattari ja Antti Tohka.

Selvityksessä bioenergian elinkaarikehitystä tarkastellaan kokonaisuutena ja useiden ympäristövaikutusten kannalta. Lisäksi pohditaan bioenergian roolia osana kestävämpää energiantuotantojärjestelmää. Kiitos kaikille selvitystyötä avustaneille. Toivomme julkaisun edistävän bioenergian käyttö- ja koko energiantuotantosektorin kestävyyttä.

Helsinki, toukokuu 2007

Lea Kauppi

SISÄLLYS

ESIPUHE	3
Määritelmät, lyhenteet	7
I Johdanto	9
1.1 Bioenergian tuotanto ja käyttö Suomessa.....	9
1.2 Bioenergian tuotannon lisäämisen tarve	11
1.3 Työn tarkoitus ja tavoitteet	15
1.4 Rajaukset	15
2 Bioenergian tuotantomahdollisuudet Suomessa	16
2.1 Bioenergian tuotannon kehitys Suomessa.....	16
2.2 Suomen bioenergiapotentiaali	18
2.3 Bioenergian tuotantoa mahdollistavia tai estäviä yhteiskunnallisia tekijöitä	22
3 Bioenergian tuotantotavat	25
3.1 Lähtökohtana elinkaarinäkökulma.....	25
3.2 Metsäbiomassa sähkön ja lämmön tuotannossa	26
3.2.1 Puujalostusteollisuuden jäteliemet.....	28
3.2.2 Teollisuuden ja energiatuotannon puupolttoaineet.....	28
3.2.3 Puun pienpoltto.....	29
3.3 Peltobiomassan käyttö sähkön ja lämmön tuotannossa	29
3.4 Liikennepolttoaineet.....	30
3.4.1 Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet	30
<i>Etanoli</i>	31
<i>Biodiesel</i>	31
<i>Biokaasu</i>	32
3.4.2 Liikenteen biopolttoaineiden tuotanto biojalostamoissa	33
3.5 Jätteen energiakäyttö	36
<i>Biohajoavien jätteiden merkitys jätteiden poltossa</i>	36
3.6 Bioenergian tulevaisuuden tuotantotavat ja niihin vaikuttavat tekijät...38	
4 Bioenergian tuotannon elinkaariset ympäristövaikutukset	40
4.1 Elinkaariarviointi bioenergian ympäristövaikutusten arvioinnissa	40
4.2 Ilmastonmuutos	42
<i>Sähkön ja lämmön tuotanto</i>	42
<i>Liikennepolttoaineet</i>	43
<i>Jätteet</i>	45
4.3 Yläilmakehän otsonin väheneminen	46
4.4 Happamoituminen	46
<i>Sähkön ja lämmön tuotanto</i>	47
<i>Liikennepolttoaineet</i>	47
4.5 Pienhiukkaset	48
<i>Sähkön ja lämmön tuotanto</i>	48
<i>Liikennepolttoaineet</i>	48
4.6 Alailmakehän otsonin muodostuminen	49
<i>Sähkön ja lämmön tuotanto</i>	49
<i>Liikennepolttoaineet</i>	49

4.7	Maaympäristön rehevöityminen.....	49
4.8	Vesistöjen rehevöityminen	49
	<i>Peltoenergia</i> tuotanto.....	50
	<i>Metsäbiomassan</i> tuotanto.....	51
4.9	Toksisuus	51
	<i>Sähkön ja lämmön</i> tuotanto.....	52
	<i>Liikennepolttoaineet</i>	52
4.10	Vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen	53
	<i>Pelto</i> biomassan tuotanto.....	53
	<i>Metsä</i> biomassan tuotanto.....	55
4.11	Maaperän tuottokyvyn heikkeneminen ja eroosio	56
4.12	Ulkomaiset raaka-aineet	57
4.13	Kokonaisarvioita olemassa olevista elinkaaritutkimuksista	59
	<i>Sähkön ja lämmön</i> tuotanto.....	59
	<i>Liikennepolttoaineet</i>	59
	<i>Jätteet</i>	60
	<i>Hajautettu vs. keskitetty bioenergian</i> tuotanto	60
4.14	Yhteenveto bioenergian ympäristövaikutuksista	60
5	Bioenergian rooli osana kestävämpää energiajärjestelmää	62
5.1	Bioenergian kestävyys ympäristönäkökulmasta	63
5.2	Bioenergian taloudellisten kustannusten ja hyötyjen vaikutuksia kestävyteen.....	64
5.3	Bioenergiaratkaisut osana sosiaalisesti kestävämpää kehitystä.....	66
5.4	Energiatase indikaattori kestävyden ympäristö- ja talousulottuvuuksista	67
5.5	Kiristyvä kilpailu biomassasta.....	68
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	71
6.1	Yhteenveto.....	71
6.2	Johtopäätökset.....	74
	Lähteet.....	77
	Liitteet	
1	Liikenteen biopolttoaineiden tuotannon kansainvälinen kehitys.....	83
2	Bioenergian tuotannolle ja käytölle asetettuja tavoitteita	84
3	Ympäristövaikutusten huomioon ottaminen bioenergian elinkaarinäkökulmaan perustuvissa tutkimuksissa, tarkastellut vaikutusluokat ja indikaattorit.....	90
4	Bioenergian vaikutus vesistöjen rehevöitymiseen, eroosioon ja luonnon monimuotoisuuteen.....	92
	Kuvailulehdet.....	96

MÄÄRITELMÄT, LYHENTEET

Lähteet mm.: Tilastokeskus 2005, Mäkinen ym. 2006.

- Bioenergia.** Biopolttoaineista saatua energiaa.
- Bioetanoli.** Etanoli, joka tuotetaan biomassasta ja/tai jätteiden biohajoavasta osasta käytettäväksi biopolttoaineena;
- Biodiesel.** Yleisnimitys kasviöljypohjaiselle dieselpolttoaineelle, joka valmistetaan kasviöljyistä vaihtoesteröimällä (rasvahappojen metyyliesterit).
- Biohajoava jäte.** Jäte, joka voidaan biologisesti hajottaa aerobisesti tai anaerobisesti. Biohajoava jäte voi sisältää biojätteen lisäksi kuitupohjaista jätettä, kuten puuta, paperia ja kartonkia sekä lietettä tai lantaa.
- Biojäte.** Muodostuu elintarvike-, ruoka- ja puutarhajätteestä.
- Biokaasu.** Orgaanisen aineksen anaerobisen hajoamisen tuote, pääkomponentit metaani ja hiilidioksidi.
- Biomassa.** Jonkin populaation tai elollisen aineksen kokonaismäärä tietyllä hetkellä. Biomassa voidaan ilmaista tuore- tai kuivapainona. Energiantuotannon yhteydessä biomassalla tarkoitetaan yleensä metsistä ja pellolta pinta-alayksikköä kohti saatavaa kasviperäistä raaka-ainetta. Biomassa voi olla myös teollisuuden ja yhdyskuntien jätteiden biohajoavaa osaa.
- Biopolttoaine.** Kiinteä, nestemäinen tai kaasumainen polttoaine, joka tuotetaan biomassasta.
- Biopolttoneste.** Nestemäinen biopolttoaine.
- Ensimmäisen sukupolven liikennepolttoaine.**
Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineilla tarkoitetaan peltokasvipohjaista etanolia ja biodieseliä, joiden käytöllä nykyisissä ajoneuvoissa on rajoitteita niiden käyttöominaisuuksien vuoksi.
- Exergia.** Osuus energiasta, joka on hyödynnettävissä vallitsevissa olosuhteissa.
- Kaasutus.** Terminen prosessi, jossa kaasuttava aine reagoi kiinteän tai nestemäisen polttoaineen kanssa korkeassa lämpötilassa muodostaen polttokaasuseoksen. Kaasuttavana aineena voi olla ilma, happi, vesihöyry tai jokin muu hapen kantaja.
- Liikenteen biopolttoaine.**
Nestemäinen tai kaasumainen liikenteessä käytettävä polttoaine, joka tuotetaan biomassasta. Liikenteen biopolttoaineita ovat esimerkiksi bioetanoli, biodiesel, biokaasu ja synteettiset biopolttoaineet. Biopolttoaineet voidaan jakaa ensimmäisen ja toisen sukupolven biopolttoaineisiin käyttöominaisuuksien tai raaka-aineiden mukaan. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineilla tarkoitetaan peltokasvipohjaista etanolia ja biodieseliä, joiden käytöllä nykyisissä ajoneuvoissa on rajoitteita niiden käyttöominaisuuksien vuoksi.
- Pyrolyysiöljy.** Korkeassa lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa valmistettu bioöljy, jota voidaan käyttää raskaan tai kevyen polttoöljyn korvaajana lämmityssektorilla. Pyrolyysitekniikalla tuotettuja bioöljyjä on esitetty käytettäväksi myös syötteenä synteetikaasulaitoksilla tai öljynjalostamoilla.
- Suurakylvö.** Menetelmä, jossa maata ei muokata ennen kylvöä eikä kylvön yhteydessä. Maan pinta on kasvipeitteinen ympäri vuoden. Kylvökoneessa on vankat kiekkovantaat, jotka leikkaavat maahan kylvöuran kasvi- ja korjuujätteiden läpi ja sijoittaa lannoitteet ja siemenet muokkaamattomaan maahan. Rikkakasvit torjutaan kemiallisesti.
- Synteetikaasu.** Kaasuseos, jonka pääkomponentit ovat vety ja hiilimonoksidi. Käytetään yleisesti kemian teollisuudessa, valmistetaan nykyisin

pääasiassa maakaasusta. Synteesikaasua voidaan valmistaa biomassasta kaasutuksen kautta.

Synteettinen polttoaine.

Yleisnimitys yleensä synteesikaasun valmistuksen kautta valmistetuille hiilivety-polttoaineille. Julkaisussa käytetään vetykäsittelyllä valmistetusta biopohjaisesta dieselpolttoaineesta termiä **synteettinen biodiesel** erotuksena biodieseltermistä, joka on vakiintunut yleisnimitys vaihtoesteröinnillä valmistetulle kasviöljypohjaiselle dieselpolttoaineelle.

Terminen biokaasu.

(Termisellä) kaasutuksella biomassasta valmistettu kaasumainen polttoaine. (Termisesti) kaasuttamalla saadaan vetyä ja hiilimonoksidia sisältävä polttokaasu, joka voidaan tarvittaessa edelleen prosessoida metaaniksi (SNG, synteettinen maakaasu) tai muiksi kaasuseoksiksi, esim. vedyksi.

Toisen sukupolven liikennepolttoaine.

Hyvälaatuiset hiilivety-polttoaineet, joihin ei liity merkittäviä käytörajoitteita. Raaka-aineina voidaan käyttää esimerkiksi lignoselluloosamateriaaleja.

Uusiutuva energia.

Aurinko-, tuuli-, vesi- ja bioenergia, maalämpö sekä aalloista ja vuoroveden liikkeistä saatavaa energiaa.

Polttoaineiden lyhenteet

DME	dimetyylieetteri, normaalilämpötilassa ja -paineessa kaasumainen dieselmootoreihin soveltuva polttoaine
E10, E85	bioetanolin ja bensiinin sekoite, etanolia 10 % ja 85 % bensiinin joukossa
ETBE	etyyli-tert-butyylieetteri, bensiinikomponentti, ns. oksygenaatti
EtOH	etanoli
FAME	rasvahappojen metyyliesterit (Fatty Acid Methyl Esters), esim. RME
F-T	Fischer-Tropsch, synteesiprosessi, jolla valmistetaan erityyppisiä polttonesteitä synteesikaasusta
MeOH	metanoli
MTBE	metyyli-tert-butyylieetteri, bensiinikomponentti, ns. oksygenaatti
NExBTL	Neste Oil Oyj:n kehittämä synteettinen biodiesel
RME	rypsimetyyliesteri

Tärkeimmät kasvihuonekaasut

CO ₂	hiilidioksidi
CH ₄	metaani
N ₂ O	dityppioksidi eli (vanha nimitys) typpioksiduuli eli (lääkinnällisessä käytössä) ilokaasu

Muut lyhenteet

CHP	combined heat and power production (yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto)
GWP	global warming potential (kasvihuonekaasujen suhteellista lämmitysvaikutusta kuvaava yksikkö)
LHV	tehollinen (alempi) lämpöarvo (lower heating value)
REF	syntypaikkalajitellusta jätteestä valmistettu polttoaine, kierrätys-polttoaine
RES-E	uusiutuvilla energialähteillä tuotettu sähkö

WTT well-to-tank (polttoaineketju, johon kuuluvat vaiheet raaka-aineen valmistuksesta aina polttoaineen annosteluun ajoneuvon tankkiin saakka)

WTW well-to-wheel (polttoaineketju, johon kuuluvat vaiheet raaka-aineen valmistuksesta aina ajoneuvon moottorin tekemään mekaaniseen työhön saakka)

Yksiköt

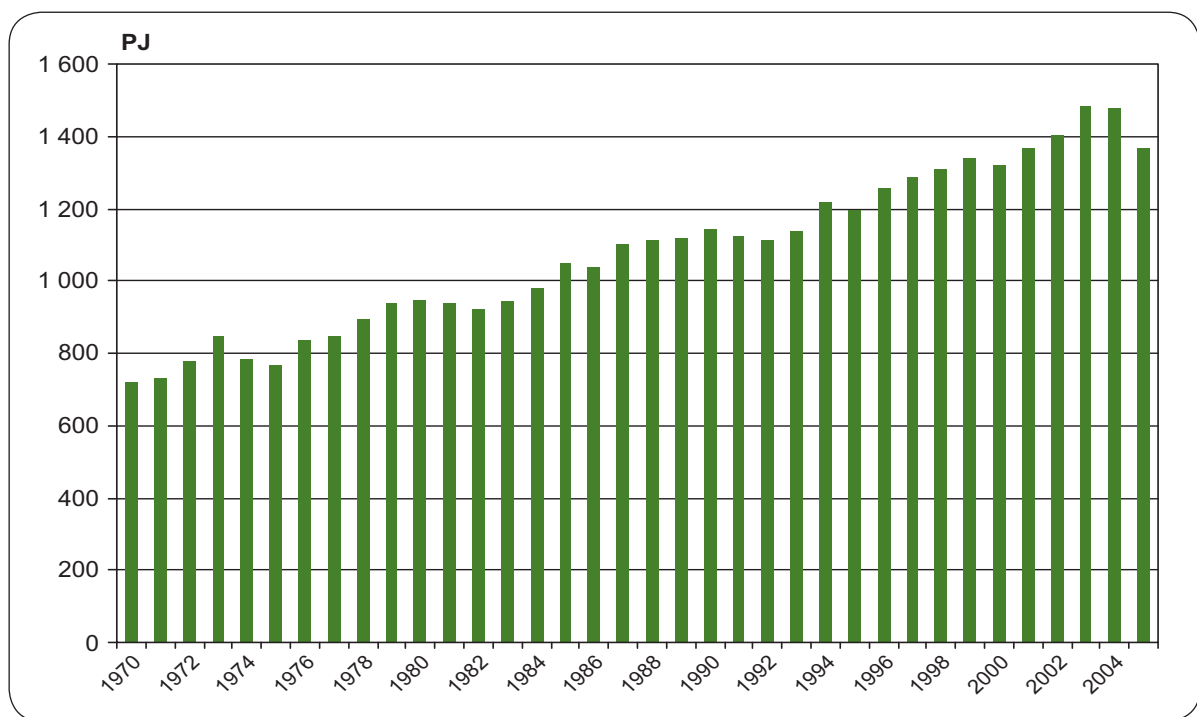
loe	ekvivalenttinen öljylitra
toe	ekvivalenttinen öljytonni
Wh	wattitunti
J	joule
k	kilo, 10^3
M	mega, 10^6
G	giga, 10^9
T	tera, 10^{12}
P	peta, 10^{15}
E	eksa, 10^{18}
1 MWh	= 3,6 GJ
1 Mtoe	= 11,6 TWh = 42,6 GJ
1 t biodieseliä	= 0,9 toe
1 t etanolia	= 0,64 toe

1 Johdanto

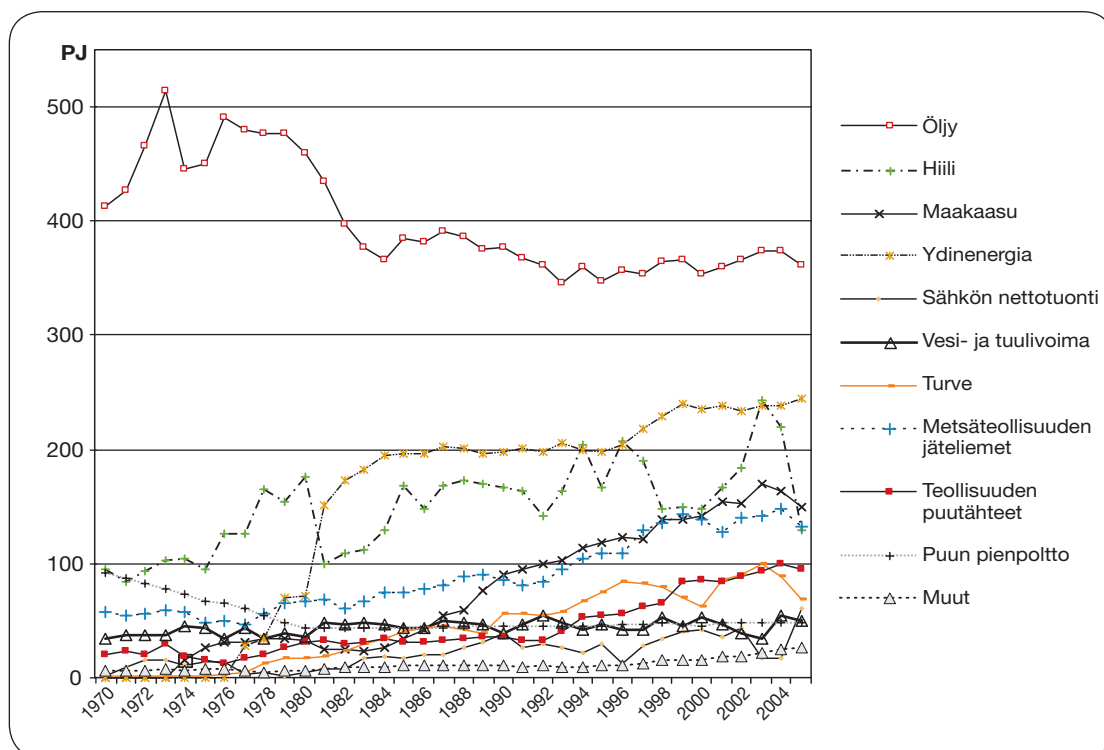
1.1

Bioenergian tuotanto ja käyttö Suomessa

Energian kokonaiskulutus Suomessa on suuri johtuen kylmästä ilmastosta, pitkistä välimatkoista, korkeasta elintasosta ja energiantensiivisestä teollisuudesta. Vuonna 2004 energian kokonaiskulutus oli 1 480 PJ (Tilastokeskus 2007). Vuonna 2005 kulutus väheni hieman ollen noin 1370 PJ (kuva 1a). Eniten v. 2004 kulutettiin öljyä (25,2 %), ydinvoimaa (16,0 %), kivihiiltä ja koksia (13,1 %) sekä maakaasua (11 %) (kuva 1b). Kun metsäteollisuuden jätehiemet (10,6 %), teollisuuden ja energiantuotannon puupolttoaineet (6,8 %) ja puun pienpoltto (3,3 %) lasketaan yhteen, nousevat puupolttoaineet energiakulutuksen osalta toiseksi merkittävämmäksi lähteeksi (20,7 %). Vuonna 2004 *bioenergian osuus* (ilman turvetta) energian kokonaiskulutuksesta oli noin 21 % ja *uusiutuvien energialähteiden osuus* kaikkiaan oli 25 %.



Kuva 1a: Energian kokonaiskulutus Suomessa 1970-2005 (PJ) (Tilastokeskus 2005, 2007).



Kuva 1b. Energian kokonaiskulutus energialähteittäin (PJ) Suomessa vuosina 1970-2005. Luokka "Muut" sisältää lämpöpumput ja teollisuuden reaktiolämmön (Tilastokeskus 2005, 2007).

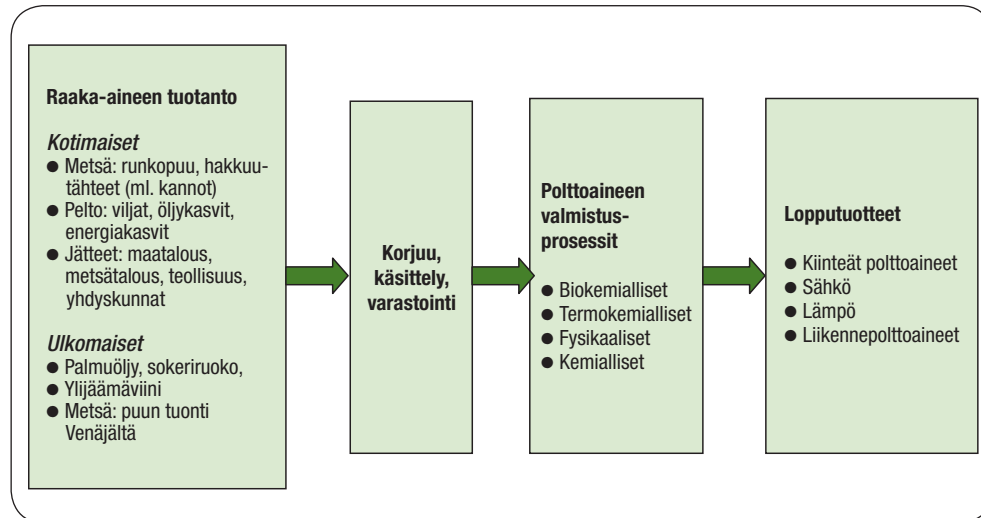
Lähes puolet Suomen metsistä korjatusta biomassasta päätyy energiakäyttöön, joko suoraan metsähakkeena ja polttopuuna tai metsäteollisuuden sivutuotteina. Suomen kansainvälisesti korkea bioenergian tuotantomäärä perustuukin teollisuuden korkeaan metsäbiomassan hyödyntämistäasteeseen energiatuotannossa (taulukko 1).

Taulukko 1: Uusiutuvat energialähteet (PJ) Suomessa v. 2004 (Tilastokeskus 2005).

	Vesivoima	Tuulivoima	Aurinkoenergia	Puunjalostus-teollisuuden jäteliemet	Teollisuuden ja energiantuotannon puupolttoaineet	Puun pienpoltto	Kierrätyspolttoaineet (bio-osuus) ja vety	Muu bioenergia	Biokaasu	Lämpöpumput	Liikenteen bio-polttoneste	Yhteensä
PJ	53,5	0,4	0,03	157,1	100,5	48,5	4,8	0,8	1,1	5,5	0,2	372,4
% uusiutuvista energialähteistä	14,4	0,1	0,0	42,2	27,0	13,0	1,3	0,2	0,3	1,5	0,0	100

Bioenergialla tarkoitetaan biopolttoaineista saatua energiaa. Biopolttoaineiksi kutsutaan biomassasta eli eloperäistä, fotosynteesin kautta syntyneistä kasvimassoista valmistettuja polttoaineita, joita voidaan tuottaa metsäbiomassan lisäksi peltobiomassasta ja jätteestä (kuva 2). Peltobiomassojen ja jätteen energiakäyttö on ollut Suomessa erittäin vähäistä (taulukko 1). Ruokohelpistä ja ohrasta on valmistettu kiinteää polttoainetta voimalaitosten käyttöön, jolloin saadaan lopputuotteena sähköä ja lämpöä. Jätteestä on valmistettu kierrätyspolttoainetta tai biokaasua. Jätteistä valmistetuilla kierrätys-

polttoaineilla tarkoitetaan yhdyskuntien ja yritysten polttokelpoisista, kuivista, kiinteistä ja syntyipaikoilla lajitelluista jätteistä valmistettua polttoainetta. Kierrätyspolttoaineeksi luetaan myös kierrätyspuu sekä lajittelemattomasta yhdyskuntajätteestä mekaanisella käsittely- ja lajitteluprosessilla valmistettu polttoaine.



Kuva 2. Bioenergian tuotannon päävaiheet.

1.2

Bioenergian tuotannon lisäämisen tarve

Biopolttoaineita käytetään Suomessa ensisijaisesti *yhdistetyssä sähkön ja lämmön* tuotannossa, jossa Suomi on maailman kärkimaita. Sen sijaan *liikenteen biopolttoaineiden* käyttö Suomessa on olematonta (taulukko 1). Energiataloudellisesti bioenergiaa on kannattavampaa tehdä yhdistetyn lämmön ja sähköntuotannon yhteydessä. Suomessa on kuitenkin uudella tavalla jouduttu pohtimaan suhtautumista liikenteen biopolttoaineisiin Euroopan parlamentin ja neuvoston biopolttoaineita ja uusiutuvia energialähteitä koskevan direktiivin 2003/30/EY myötä. Siinä jäsenvaltioille asetetaan selkeä tavoite uusiutuvien polttoaineiden vähimmäisosuudesta liikennepolttoaineissa: vuonna 2010 liikenteen polttoaineista 5,75 % tulee olla biopohjaisia. Tähän liittyen hallitus on antanut eduskunnalle lakiesityksen (HE 231/2006 vp laiksi biopolttoaineiden käytön edistämisestä liikenteessä).

Liikenteen biopolttoaineita koskeva direktiivi on edistänyt biopolttoaineiden käyttöä ja tuotantoa Euroopassa ja jopa maailmanlaajuisesti (liite 1). Kysynnän kasvun myötä biopolttoaineiden tuotantoteknologioiden kehitystyöhön on panostettu etenkin Brasiliassa ja Yhdysvalloissa. Suomessa on vaadittu kotimaisen liikennebiopolttoaineiden tuotannon aloittamista muun muassa sillä perusteella, että sitä kautta Suomi on mukana biopolttoaineiden maailmalaajuisessa teknologiakehityksessä. Muutoin Suomi uhkaa menettää bioenergian tuotantoon liittyvän teknologiaosaamisedun.

Liikkeellelähtö kotimaisen liikennepolttoaineiden tuotannossa tapahtuisi peltobio-massan kautta. Olemassa oleva autokanta ja polttoaineiden jakeluverkosto merkitsee sitä, että etanoli ja kasvipohjaiset biodieselit ovat varteenotettavimmat liikennepolttoaineet lähitulevaisuudessa Suomessa. Kotimaisina viljelykasveina tulevat tähän tarkoitukseen kysymykseen muun muassa ohra, rypsi ja mahdollisesti sokerijuurikas. Näistä jalostettavien ns. *ensimmäisen sukupolven* biopolttoaineisiin liittyvä käyttörajoit-

teita, eli nykyiset autot eivät voi käyttää niitä kuin bensiiniin tai dieseliin sekoitettuna. Yleensä suurin mahdollinen sekoitussuhde on noin 10 %. Tämän ja energia- ja kustannustehokkuuden parantamiseksi on ryhdytty kehittämään ns. *toisen sukupolven* liikennepolttoaineita, joihin ei liity merkittäviä käyttörajoituksia. Niiden raaka-ainevalikoima on myös laajempi kuin ensimmäisen sukupolven, sisältäen muun muassa puu- ja jätperäiset raaka-aineet. *Biojalostamot*, jotka tuottavat erityyppisistä biomassoista biopolttoaineiden lisäksi esimerkiksi rehuja, kemikaaleja ja materiaaleja sekä sähköä ja lämpöä, edistävät erityisesti raaka-ainetehokkuutta. Sekä ensimmäisen että toisen sukupolven polttoaineisiin voidaan kotimaisen raaka-aineen lisäksi käyttää tuontiraaka-aineita (mm. sokeriruoko, palmuöljy).

Bioenergian käytön lisääminen kytkeytyy osaksi suomalaista energia- ja ilmasto-politiikkaa. Riippuvuuden vähentäminen fossiilisesta tuontienergiasta ja erityisesti öljystä sekä huoltovarmuuden lisääminen ovat bioenergian lisäämisen keskeisiä argumentteja. Uusiutuvan energian ohjelma ja marraskuussa 2005 valtioneuvostolle annettu ilmasto- ja energiapoliittinen selonteko lähtevät jopa siitä, että erityisesti bioenergiaan perustuvalla kotimaisella uusiutuvalla energialla voidaan kattaa merkittävä osuus Suomen Kioto-velvoitteesta. Liikenteen biopolttoaineiden käytön lisäämiseksi tavoitellaan myös muun bioenergian käytön lisäämistä. Erityisesti metsätähteiden ja jätteen energiakäyttöä lisäämällä voidaan korvata fossiilisia polttoaineita (ks. luku 2.2). Metsätähteillä tarkoitetaan sekä puun maan pinnan yläpuolisia osia, latvusta ja oksia, sekä kantoja, joista erityisesti jälkimmäinen on kasvamassa oleva raaka-ainelähde.

Vuoden 2007 maaliskuussa EU hyväksyi päätöksen, jonka mukaan uusiutuvien energialähteiden osuus EU:ssa nostetaan 20 prosenttiin ja kasvihuonekaasupäästöjä vähennetään 20 prosentilla vuoteen 2020 mennessä. Samalla sovittiin, että liikenteen polttoaineista tulee olla biopohjaisia 10 prosenttia. Muilta osin lisäyistä jäsenmaiden päätettäväksi. Uusiutuvien energialähteiden osuus on koko EU:ssa keskimäärin 6,5 prosenttia. Suomen uusiutuvien energialähteiden tavoitteeksi on mainittu jopa 35–45 prosenttia, mikä merkitsee Suomen tapauksessa nimenomaan bioenergian tuotannon lisäämistä entisestään.

Ilmasto- ja energiapolitiikan lisäksi bioenergiaan vaikuttavat monet muut tekijät, kuten maatalouspolitiikkaan kytkeytyvä aluepolitiikka ja työllisyys, ympäristöpolitiikka, liikennepolitiikka sekä teknologia- ja innovaatiopolitiikka. Erityisesti maatalous- ja maaseutupoliittiset tavoitteet ovat nousseet bioenergiakeskustelussa vahvasti esille. Esimerkiksi maa- ja metsätalousministeriö asetti lokakuussa 2006 bioenergiatuotannon strategiatyöryhmän, joka määrittelee Suomen maaseudun kehittämissuunnitelman 2007–2013 bioenergiaa koskevat alueelliset ja tuotantoalakohtaiset kehittämiskohteet kesäkuun 2007 loppuun mennessä.

Bioenergian tuotannon ja käytön lisääminen voi edistää maaseudun elinvoimaisuutta tarjoamalla uusia toimeentulon mahdollisuuksia. Yhä pienempi osa maaseudun väestöstä saa toimeentulonsa suoraan maa- tai metsätaloudesta. Bioenergia kytkeytyykin erottamattomasti maaseudun tulevaisuusvaihtoehtoihin. Energiaomavaraisuus (bioenergian käyttö) voi nousta ratkaisevaksi maatalon elinkelpoisuudelle.

Edellä esitetyn lisäksi kotimaisen bioenergian tuotannon kasvupaineita aiheuttavat energian käytön kasvuennusteet sekä Euroopan yhteisön kautta tulleet bioenergiatuotantoon liittyvät linjaukset (liite 2), joista tuoreimpana EU:n sitova tavoite uusiutuvien energialähteiden lisäämisestä 20 prosenttiin unionin alueella vuoteen 2020 mennessä. Suomalaisia bioenergiatavoitteita on määritelty useissa eri yhteyksissä (taulukko 2 ja liite 2).

Taulukko 2. Bioenergiaa käsittelevien kotimaisten ohjelmien tavoitteita ja perusteita.

Ohjelma	Näkemykset bioenergiasta	Keskeinen peruste	Arvio ohjelmasta
<i>Arvio biomassan pitkän aikavälin hyödyntämismahdollisuuksista Suomessa (KTM 12.2.2007)</i>	Bioenergian lisäysmahdollisuudet ovat erittäin merkittävät yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa (jopa 50 % nykytilanteesta vuoteen 2015 mennessä fossiilisia polttoaineita korvaten). Bioenergian lisäämiseksi tarvitaan bioenergian edistämishjelma.	Suomi tarvitsee nykyistä pidemmän tähtäyksen energia- ja ilmastolinjat. Lisäksi erityistä huomiota on kiinnitettävä biomassan saatavuuden lisäämiseen kestäväällä tavalla metsistä, soilta, pelloilta ja jätteistä.	Korostaa bioenergian merkitystä yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa. Liikenteen biopolttoaineiden rooli vähäinen, ja tällä alueella painotetaan 2. sukupolven laajaan raaka-ainepohjaan (sisältäen selluloosapohjaiset raaka-aineet, sivutuotteet, jätteet ja turpeen) perustuvaa teknologiaa.
<i>Peltobiomassa, liikenteen biopolttonesteet ja biokaasu -jaosto, loppuraportti (MMM 18.1.2007)</i>	Vuonna 2015 peltoalaa bioenergiantuotantoon käytettävissä 500 000 ha, josta ruokohelpeä 100 000 ha. Ensimmäisen sukupolven liikennepolttoaineet välivaihe ennen nk. toisen sukupolven polttoaineita.	Tavoitteena toteuttaa uusiutuvan energian edistämishjelman tavoitteita pelloenergian, biopohjaisen liikenteen biopolttonesteiden sekä eloperäisistä kasvi- ja eläinjätteistä tuotetun biokaasun osalta.	Tuodaan esiin biopolttoaineiden elinkaaren ympäristö- ja terveysvaikutusten selvittämisen tarkeys. Bioenergiaa tulee kannattaa, mutta tuotannon ja käytön kasvuun liittyy useita haasteita.
<i>Suomen vastaus globalisaation haasteeseen – Talousneuvoston sihteeristön globalisaatioselvitys – OSA II (Valtioneuvoston kanslia 11.12.2006a)</i>	On tarpeen luopua ajatuksesta, että Suomessa joidenkin toimialojen kilpailukyky voidaan perustaa halpaan energiaan. Sen sijaan voimme edelleen vahvistaa energian tarjonnan varmuutta kotimaisten energialähteiden varassa ja samalla kehittää energiateknologiasta merkittävän vientituotteen. Bioenergia merkittävin uusiutuvan energian lisäyspotentiaali.	Globaaliin talouskasvuun liittyvät ympäristö-ongelmat ja energian kysynnän kasvu sellaisenaan tulevat asettamaan jatkossa yhä voimakkaampia reunaehdotuksia talouskehitykselle. Energian hinta nousee ja tämä on Suomelle keskimääräistä suurempi haaste, koska Suomi on sekä tuotantorakenteen että maantieteen takia energia-intensiivinen talous.	Selvityksessä pohditaan keinoja, joilla Suomi pärjää kiristyneessä maailmantaloudessa. Energian saatavuus ja hinta ovat merkittäviä tekijöitä.
<i>Kansallinen viljastrategia 2006-2015 (MMM 17.8.2006b)</i>	Strategian bioenergia-skenaario noudattelee Peltostrategian tavoitteita. Bioetanolit tuotannon odotetaan alkavan v. 2008 ja tuotannossa käytettävän viljämäärän kasvavan 400 tuhannesta tonnista lähes 600 tuhanteen tonniin vuoteen 2015 mennessä.	Biopolttoaineiden tuotanto ensisijaisesti kotimaisista raaka-aineista. Valtiolta tarvitaan selkeitä linjauksia ja kannustimia tuottajille. Etsittävä keinoja kotimaisen biopolttoaineen kilpailukykyyn parantamiseksi.	Strategian mukaan bioenergiatuotanto tarjoaa viljasektorille merkittävimmän kasvun mahdollisuuden seuraavien 10 vuoden aikana.
<i>Liikenteen biopolttoaineiden tuotannon ja käytön edistäminen (KTM 10.3.2006)</i>	Ehdotus toimista ja keinoista kun liikenteen biopolttoaineilla v. 2010 5 %:n osuus.	Käyttövelvoite ensisijainen ohjauskeino. Ei voida edellyttää, että tuotanto pohjautuu kotimaisiin raaka-aineisiin. 2. sukupolven polttoaineille teknologia-ohjelma.	Selkeä painotus teknologiseen kehitykseen ja 2. sukupolven polttoaineiden kustannustehokkuuteen. Markkinatalouteen perustuva ajattelu.

<i>Peltoviljelyn tulevaisuuden linjaukset (MMM 29.12.2005)</i>	V. 2012 bioenergiassa 200 000 hehtaaria. Tarvittaessa 500 000 hehtaaria peltoenergian tuotantoon tulevaisuudessa.	Käytön tulisi perustua ensisijaisesti kotimaisiin raaka-aineisiin ja tuotantoon. Etsittävä sellaisia keinoja, joiden avulla pystytään parantamaan kotimaisen biopoltto-aineen ja sen raaka-ainetuotannon kilpailukykyä ulkomaiseen tuontiin nähden.	Ohjelman bioenergiaskenaario on hyvin kunnianhimoinen (500 000 ha). Peltoraaka-aineet biopolttoaineissa nähdään sopeutumiskeinona viljelyn rakennemuutokseen (mm. vientitukien poistaminen.)
<i>Ilmasto- ja energia-poliittinen selonteko (Valtioneuvosto 24.11.2005a)</i>	Luoda olosuhteet, joissa uusitut energiamuodot voivat kasvaa keskimäärin 10 % vuosivauhtia vuosina 2005–2015.	Suomi saavuttaa Kioton pöytäkirjan mukaiset kasvihuonekaasujen päästöjä koskevat velvoitteensa vuosina 2008–2012 strategian toimenpitein.	Strategian linjaukset ohjaavat kehitystä hieman kohti kestävää tuotantoa ja kulutusta, mutta vaikutus jäänee verrattain vähäiseksi, koska strategiassa ei ennakoita suuria muutoksia Kioton jälkeiselle ajalle. Laaja sopeutumisstrategia voi tukea osaltaan kehitystä.
<i>Maatalouspoliittinen selonteko (Valtioneuvosto 20.10.2005b)</i>	Varsinaiset bioenergian linjaukset jätetään tehtäväksi osana kansallista ilmasto- ja energiapoliittista strategiatyötä. Potentiaalisesti ruokohelpin viljelyalaksi todetaan 170 000–220 000 hehtaaria.	Energian hinnan nousun aiheuttama bioenergian kilpailukykyyn paraneminen johtaa maataloustuotannon osittaiseen siirtymiseen energiaraaka-aineiden tuotantoon. Peltoenergian tuotannon edistämiseksi keskeinen rooli on maatalouspoliittisilla tukitoimilla.	Maaseudun ja alueellisen kehityksen turvaamisessa bioenergian tuotannolla nähdään huomattavaa merkitystä.
<i>Uusiutuvan energian edistämishjelma 2003-2006 (KTM 5.12.2002)</i>	Uusiutuvan energian kokaistavoitteeksi v. 2010 noin 30 %:n lisäys v. 2001 verrattuna. Alustava tavoite liikenteen biopolttoaineille v. 2010 2 %.	Uusitun ohjelman keskeisiä toimenpidealueita ovat uuden teknologian kehittäminen, taloudelliset ohjaukset, säädökset, määräykset ja sopimukset sekä tiedotus ja koulutus.	Bioenergiainkkehiden painottaminen uuden teknologian käyttöönotossa.

Työn tarkoitus ja tavoitteet

Tämän selvityksen tarkoituksena on ollut kartoittaa bioenergian tuotannon uusia haasteita ja tehdä analyysi siitä, mitä bioenergian tuotannon ympäristövaikutuksista tiedetään. Työn tavoitteena oli käsitellä erityisesti seuraavia kysymyksiä:

- Mitkä ovat mahdollisuudet tuottaa bioenergiaa Suomessa? Mitkä ovat raaka-ainevarannot ja kuinka paljon niiden käytöstä on mahdollista suunnata biopolttoaineiden tuotantoon? Onko lisäämispotentiaalia?
- Millä tavoin bioenergiaa Suomessa tuotetaan? Millaisia mahdollisuuksia teknologian kehittyminen tarjoaa tulevaisuudessa?
- Mitä ympäristövaikutuksia bioenergian tuotannolla on, kun otetaan huomioon koko tuotantoketjun elinkaarenaikaiset ympäristövaikutukset? Saa-vutetaanko kasvihuonekaasujen vähentämistavoitteita? Millaisia ovat muut mahdolliset ympäristövaikutukset?
- Mikä on bioenergian rooli kestävässä energiantuotantojärjestelmässä? Miten sosiaalinen kestävyys otetaan huomioon globaalissa bioenergian tuotannossa?
- Miten energiatehokkaasti bioenergiaa voidaan tuottaa ja valmistaa? Mikä on edullisin tapa vähentää kasvihuonekaasupäästöjä?
- Millaiset poliittiset prosessit ohjaavat bioenergiasta käytävää keskustelua ja päätöksentekoa?

Rajaukset

Raportti käsittelee bioenergiaa. Turvetta käsitellään, kun se liittyy muun bioenergian käyttöön, esimerkiksi ruokohelpeä poltettaessa. Muuten turve on rajattu tämän selvityksen ulkopuolelle, koska sitä ei ole luokiteltu uusiutuvaksi energialähteeksi. Lisäksi työssä käsitellään ainoastaan biohajoavia jätteitä. Muiden jättejakeiden hyödyntämistä energiana ei tarkastella. Vaikka bioenergiaa käsitellään kokonaisuutena, painottuu selvitys liikenteen biopolttoaineiden ympäristönäkökohtiin niiden käytölle asetettujen lisäyßtavoitteiden vuoksi.

2 Bioenergian tuotantomahdollisuudet Suomessa

2.1

Bioenergian tuotannon kehitys Suomessa

Biomassa on ollut vuosisatojen ajan tärkeä polttoaine Suomelle, vaikka nykypäivän bioenergian tuotanto ja käyttö poikkeavatkin suuresti vuosisatojen takaisista jalostus- ja käyttömuodoistaan. Bioenergiaa saadaan Suomessa metsissä ja pelloilla kasvavista biomassoista sekä yhdyskuntien, maatalouden ja teollisuuden energian tuotantoon soveltuvista orgaanisista jätteistä.

1950-luvun puolivälissä selluloosan keittoprosessissa syntyvää musta- ja sulfiittilipeää ryhdyttiin käyttämään polttoaineena. Kyse oli merkittävästä energia- ja ympäristöaloudellisesta ratkaisusta, koska kaikki selluprosessissa ja suuri osa paperinvalmistuksessa tarvittavasta lämmöstä saatiin tuotettua tällä tavalla. 1960-luvun vaihteessa kyse oli noin 2,5 miljoonasta tonnista lipeää. Määrä kaksinkertaistui seuraavan kymmenen vuoden aikana. Sulfaattiselluloosan korvatus sulfiittisellun mustalipeän merkitys metsäteollisuuden energiatuotannossa kasvoi edelleen. Nykyisin Suomessa mustalipeän osuus metsäteollisuuden energiatuotannosta on noin kaksi kolmasosaa.

1960-luvulla Suomen energiantuotannossa oleellisia tekijöitä olivat vesivoiman käyttö sähköntuotantoon ja puupolttoaineiden hyödyntäminen lämmöntuotannossa. Nopeasti kasvava energiankysyntä tyydytettiin tuontiöljyllä ja –kivihiilellä. Ensimmäiset suuret polttolaitokset, jotka mahdollistivat kivihiilen lisääntyvän käytön, valmistuivat 1960-luvun alkuvuosina. Polttopuun merkitys alkoi supistua 1960- ja 70-lukujen vaihteesta lähtien ja kehitystä voimisti myöhemmin 1970-luvulta lähtien kaukolämmön yleistyminen sekä 1980-luvulla asuintalojen sähkölämmityksen voimakas lisääntyminen.

1970-luvulle tultaessa bioenergiaa ei vielä koettu houkuttelevaksi vaihtoehdoksi, koska muut energiamuodot olivat siirrettävyydeltään parempia ja suhteellisesti edullisempia. Ensimmäisen öljykriisin aikaan 1973 öljyn osuus Suomen primaarienergiasta oli 57 prosenttia. (Ericsson ym. 2004). Vuoden 1973 ensimmäinen öljykriisi aiheutti energiapolitiikassa täydellisen suunnanmuutoksen. Bioenergian tuotannon ja käytön lisääntymisestä muodostui yksi energiapolitiikan prioriteeteista. Muun muassa turpeen käyttöä energiantuotannossa lisättiin (ks. myös kuva 2). Toimet sisälsivät investointitukia, veroja sekä ja tutkimus- ja kehitystoimintaa. Tutkimustoimintaan panostaminen oli tärkeää, koska bioenergian kannattavuus oli heikko eikä teknologiaa ollut saatavilla varsinkaan pieniin laitoksiin. Bioenergian tutkimusrahoitus pysyi vakaana ja korkealla tasolla yli 20 vuoden ajan, mikä mahdollisti jatkuvuuden ja asiantuntijuuden kasvattamisen (Helynen 2004).

Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto antoi 1970-luvun lopulla uuden suunnan sähköntuotannon rakenteelle. Puupohjaiset aineet sekä turve nähtiin parhaimpina polttoainevalintoina sekä kaukolämmön että teollisuuden yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa.

1980-luvulla energiapolitiikassa elettiin vielä valtiojohtoisen sääntelyn aikaa. Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto kasvoi nopeasti, koska metsäteollisuus eli voimakasta kasvua ja kaukolämpöverkostoja laajennettiin. Samalla turve ja metsäpolttoaineet lisääntyivät lämmön ja sähköntuotannossa. Nykyisin valtaosa kaukolämmöstä pohjautuu yhdistetylle sähkön ja lämmön tuotannolle. Kaukolämmöllä lämmitetään yli 40 % Suomen rakennuskannasta. Vuonna 2004 noin 12 % kaukolämmöstä tuotettiin uusiutuvalla bioenergialla (Tilastokeskus 2005).

1990-luvulla yhdeksi bioenergiakenttää uudistaneiksi tekijöiksi on joidenkin masha- ja paperiteollisuuden toimijoiden taholta tunnustettu sähkömarkkinoiden vapautuminen ja kansainvälisen ilmastopolitiikan muotoutuminen (Kivimaa ja Mickwitz 2004). Sähkömarkkinoiden vapautuminen 1995–1997 on tuonut sähkön tuottajille ja myyjille uusia näkymiä myös bioenergian suhteen. Sähkön vapaa myynti markkinoilla on edistänyt mm. mustalipeän energiakäyttöä, sillä se on luonut sellutehtaille houkuttimia tuottaa sähköä yli oman tarpeen ja sijoittaa tehokkaampaan soodakattilateknologiaan (Kivimaa ja Mickwitz 2004). Suomen liittyminen Euroopan Unioniin vuonna 1995 toi mukanaan EU:n direktiivit ja sääntelyn. EU-jäsenyys ei kuitenkaan todennäköisesti juurikaan lisännyt kannusteita bioenergiaa kohtaan, koska kansallinen bioenergiaan kohdistuva politiikka on yleisesti ottaen ollut Suomessa vahvempaa kuin muualla EU:ssa (Ericsson ym. 2004). Tämä tilanne on nyt muuttumassa nopeasti varsinkin liikenteen biopolttoaineiden osalta.

Ilmastonmuutoksen torjumisesta tuli uusi lisäkannustin uusiutuvan energian käyttöön 1990-luvulla. Suomen ilmastostrategia vuodelta 1999 sisälsi uusiutuvan energian toimintasuunnitelman. Energian säästöllä ja uusiutuvan energian käyttöä lisäämällä arvioitiin katettavan noin puolet tavoiteltavista kasvihuonekaasupäästövähennyksistä. 2000-luvulla bioenergia on kytkeytynyt yhä tiukemmin osaksi Suomen ilmastopolitiikkaa. EU:n kautta tulevat vaatimukset liikenteen biopolttoaineista ovat nousseet myös suomalaiseseen bioenergiakeskusteluun. Energiansäästöohjelmaa uudistettiin vuonna 2002. Tavoitteita hieman tiukennettiin ja bioenergiatavoitteet määriteltiin aiempaa täsmällisemmin eri biomassatyypeittäin.

EU:n sisäisellä yritysten välisellä hiilidioksidin päästökauppajärjestelmällä on ollut viime vuosina vaikutusta bioenergian kilpailukykyyn yli 20 MW polttoainetehoisissa energiantuotantoyksiköissä. Toisin kuin fossiilisten polttoaineiden käyttö, puupolttoaineiden käyttö ei vähennä yritysten päästöoikeuskiintiötä. Jos yritys ei täytä sille määriteltyä päästöoikeuskiintiötä, se joutuu ostamaan päästöoikeuksia. Vastaavasti yritykset voivat myydä säästetyt päästöoikeudet. Tällä on ollut fossiilisten polttoaineiden käyttöä rajoittava vaikutus, erityisesti aikoina, jolloin päästöoikeuden hinta on noussut suhteellisen korkeaksi.

Suomeen on kehittynyt pieneen ja keskisuureen laitostekoon keskittynyttä lämpöyrittäjyyttä viimeisen kymmenen vuoden aikana. Tyypillisesti yrittäjä tarjoaa lämpöpalveluja, kuten kunnallisten kiinteistöjen lämmityksen tai koko aluelämpölaitoksen hallinnon. Palvelu kattaa polttoaineen hankinnan ja lämpölaitoksen toiminnan. Lämpöyrittäjä voi olla myös paikallinen metsänomistaja, joka etsii lisätuloja yksin tai yhteistyössä muiden paikallisten metsänomistajien kanssa. Koko tuotantoketjun kattavat organisaatiot metsästä loppukäyttäjiin voivat olla taloudellisesti hyvin kannattavia.

Pääosa bioenergiasta Suomessa saadaan metsäenergiasta, ja peltoenergian tuotanto Suomessa on vielä hyvin vähäistä. Vuonna 2006 energiakasvituen piirissä oli noin 17 000 hehtaaria, josta ruokohelpin osuus oli 92 % (taulukko 3).

Taulukko 3: Energiakasvien tuen piirissä olevat kasvikohtaiset viljelyalat Suomessa vuonna 2006 (lähde: MMM 2007, alkuperäinen lähde MMM/TIKE tukirekisterit)

Kasvi	Pinta-ala, ha
Ruokohelpi	15 763
Kaura	346
Rypsi, rapsi	821
Ruis	25
Ohra	37
Kuituhamppu	36
Vehnä	31
Energiapaju	7
Yhteensä	17 065

Myös yhdyskuntajätteen energiakäyttö on Suomessa hyvin vähäistä. EU:n jätteenpolttdirektiivi säätelee tarkoin jätteenpolttoa ja vuoden 2006 alusta voimaan tulleet päästömääräykset ovat lopettaneet jätteenpolton pienistä yksiköistä.

2.2

Suomen bioenergiapotentiaali

Bioenergiaa käytetään Suomessa jo tällä hetkellä määrällisesti paljon, ja lisäyspotentiaalia on suhteellisesti vähemmän kuin monissa muissa maissa. Kuitenkin jos tarkastellaan puhtaasti biologista potentiaalia (fotosynteesin teoreettisen hyötysuhteen asettamaa ylärajaa aurinkoenergian hyödyntämiselle), voidaan Suomessa tuottaa bioenergiaa moninkertaisesti energiantarpeeseen verrattuna (Lampinen ja Jokinen 2006). Toteutettavissa oleva lisäys riippuu muun muassa teknisistä ja taloudellisista reunaehdoista ja tuotannon rakenteesta, kuten metsäteollisuuden tuotannosta. Taulukkoon 4 on koottu eri yhteyksissä esitettyjä Suomen bioenergiapotentiaaleja.

Asplund ym. (2005) arvioivat uusiutuvien energianlähteiden edistämishjelmassa (KTM 2002) vuodelle 2010 asetettujen tavoitteiden ja vision vuodelle 2015 saavuttamismahdollisuuksia teknis-taloudellisista lähtökohdista (taulukko 4). Bioenergian osalta tavoite on mahdollista jopa ylittää vuoteen 2030 mennessä lähes kaikkien polttoaineiden ja käyttösektoreiden osalta, jos metsäteollisuuden tuotanto pysyy korkeana. Suurimmat potentiaalit arvioitiin olevan seuraavilla neljällä bioenergiälähteellä:

- metsähakkeen käytön lisäys (42 PJ)
- puun pienkäytön lisäys (21 PJ) (ilman metsähaketta)
- kierrätyspolttoaineiden ja biokaasun käytön lisäys (21 PJ), josta kierrätyspolttoaineet 14 PJ ja biokaasu 7 PJ, sekä
- peltobiomassojen käytön lisäys (15 PJ).

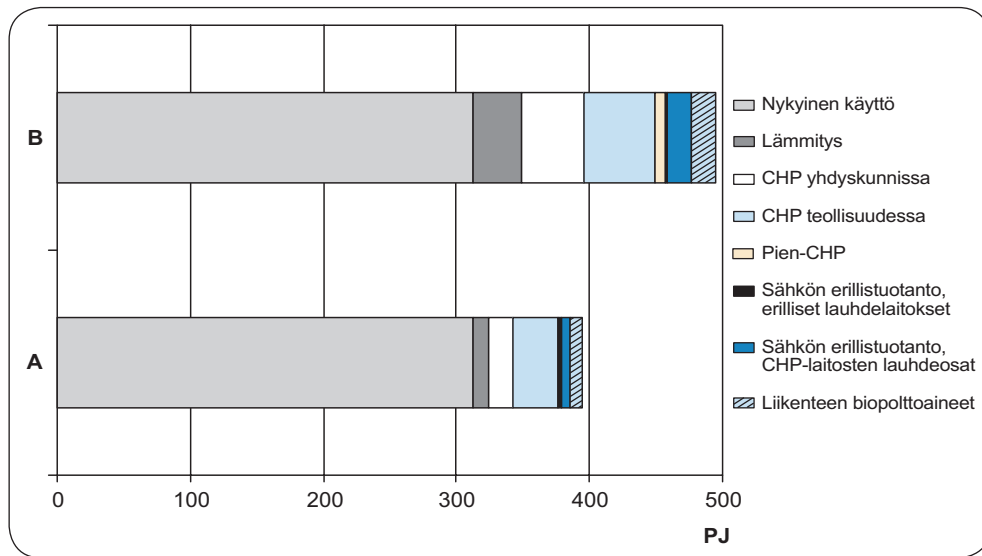
Arvion lähtökohdiana oli vuoden 2003 tilanne. Yhteenlaskettu lisäyspotentiaali 99 PJ on noin 7 % Suomen vuoden 2005 kokonaisenergiakulutuksesta.

EEA:n (2006) arvion mukaan Suomen suurin bioenergiapotentiaali sisältyy jätteesiin, joihin lasketaan mukaan mm. sellu- ja paperiteollisuuden jäteliemet (taulukko 4). Jäteliemet hyödynnetään jo nyt tehokkaasti energiantuotannossa, ja lisäpotentiaalia syntyy vain sellun tuotannon kasvun mukaan. Näin ollen lisäpotentiaali löytyy lähinnä maatalouden ja metsätalouden energiatuotteiden hyödyntämisestä. EEA:n arvion mukainen Suomen bioenergiapotentiaali, joka ei aiheuta merkittäviä ympäristöhaittoja, on noin 30 % Suomen vuoden 2005 kokonaisenergiakulutuksesta, kun nykyisin bioenergian osuus on hieman alle 25 %. Lisäyspotentiaalia on EEA:n arvion mukaan 80–90 PJ, eli samaa suuruusluokkaa kuin Asplundin ym. (2005) esittämä arvio.

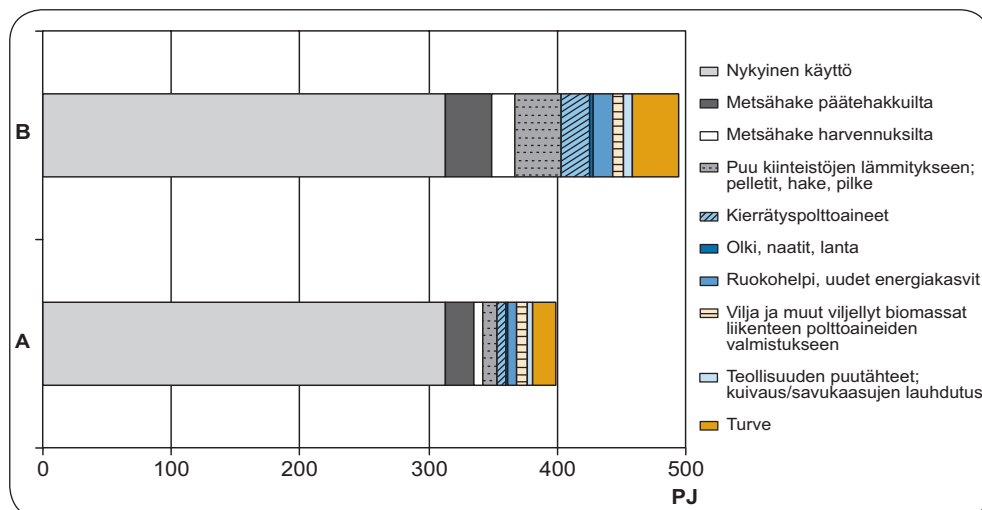
Taulukko 4: Suomen bioenergiapotentiaaleja (PJ) eri lähtökohdista arvioituna. Vuonna 2005 Suomen kokonaisenergiakulutus oli 1361 PJ.

Lähde	Maa- talous	Metsä- talous	Jäte	Yhteensä	Huom.
Asplund ym. 2005: bioenergian teknis-taloudelliset lisäysmahdollisuudet v. 2015	15	53	21	99	Jäte = kierrätyspolttoaineet ja biokaasu
EEA 2006: bioenergiapotentiaali, jonka käytöstä ei aiheudu merkittäviä ympäristöhaittoja	2010: 80 2020: 75 2030: 54	2010: 71 2020: 75 2030: 75	2010: 255 2020: 260 2030: 260	2010: 402 2020: 410 2030: 394	Jäte sisältää maatalousjätteet (esim. oljet), lannan, biohajoavan yhdyskuntajätteen ja sellu- ja paperiteollisuuden jäteliemet

Tuoreen selvityksen mukaan Suomessa voidaan bioenergian käyttöä lisätä jopa 50 % nykytilanteeseen (v. 2004) verrattuna (KTM 2007). Tällöin biopolttoaineiden käytön lisäämistä on kiihdytetty ohjaukskeinoin tai energian hintataso on noussut. Vuoden 2007 alun kivihiilen ja öljyn polttoaineiden maailman markkinoiden hintatasoon, nykytukiin ja päästöoikeuden hintaan 20 €/tonni perustuvassa skenaariossa bioenergian käyttö lisääntyisi 20 % nykytilanteeseen verrattuna. Yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto on tärkein biopolttoaineiden käytön lisäämiskohde seuraavan 10 vuoden ajan (kuva 3). Kuitenkin myös rakennusten lämmitys ja liikenteen biopolttoaineet voivat muodostua merkittäviksi lisäskohteiksi. Polttoaineista metsähake muodostaa suurimman lisäsmahdollisuuden (kuva 4). Skenaarioissa biopolttoaineiden käytön lähtötilanteena on käytetty vuotta 2004. Metsäteollisuuden puuraaka-aineen käytön on oletettu pysyvän nykytasollaan ja tuontipuun määrän laskevan jonkin verran. Skenaarioissa on käsitelty vain kotimaisia biopolttoaineita, ja oletettu biopolttoaineiden viennin pysyvän nykytasollaan.



Kuva 3. Bioenergian arvioitu lisäsmahdollisuus käyttökohdeittain vuoteen 2015. A = Nykytuet, fossiilisten polttoaineiden nykyhintataso ja päästöoikeus 20 €/tonni; B = Kiihdytetyt toimenpiteet ja/tai energian hintatason nousu (KTM 2007).



Kuva 4. Bioenergian käytön arvioitu lisäsmahdollisuus polttoaineittain vuoteen 2015. A = Nykytuet, fossiilisten polttoaineiden nykyhintataso ja päästöoikeus 20 €/tonni; B = Kiihdytetyt toimenpiteet ja/tai energian hintatason nousu (KTM 2007).

Metsähakkeen käytön lisäystä pidetään tärkeimpänä metsäenergian lisäyspotentiaalina (Asplund ym. 2005, KTM 2007). Runkopuuta Suomessa ei juurikaan käytetä sellaisenaan energiantuotantoon. Välillisesti sen merkitys on kuitenkin suuri teollisuuden jäteliemien, kuoren ja muiden sivutuotteiden energiakäytön kautta.

Metsähakkeen teoreettinen maksimituotantopotentiaali sisältää kaiken sen jäänösbiomassan, joka muodostuu runkopuuhakkuun yhteydessä (Hakkila 2004). Lisäksi se sisältää pienpuubiomassan, joka harvennusten yhteydessä poistetaan tai tulisi poistaa. Edellinen on riippuvainen markkinoiden vaihteluista, jälkimmäinen ei. Vain osa teoreettisesta biomassan tuotantopotentiaalista on todellisuudessa hyödynnettävissä. Hyödyntämismahdollisuuksiin vaikuttavat tekniset, sosio-ekonomiset ja ympäristöseikat kuten vaihtoehtoisten polttoaineiden hinnan, verotuksen ja tukien kehitys, teknologian ja logistiikan kehittyminen, metsäkone- ja kuljetusyritysten toimijoiden motivaatio osallistua korjuuseen, metsähakkeen laatuksymykset, yksityisten metsänomistajien halukkuus hyväksyä metsähakkeen keruu, johon vaikuttaa mm. hinta sekä kansallisen ja EU:n energia- ja ilmastopolitiikan sekä hiilidioksidikaupan kehittyminen. Samat tai samankaltaiset tekijät ovat olennaisia myös muun biomassan hyödyntämismahdollisuuksia tarkasteltaessa.

Metsähakkeen teoreettiseksi maksimituotantopotentiaaliksi on arvioitu 45 milj. m³. Teoreettinen potentiaali sisältää kaiken metsään runkopuuhakkuiden yhteydessä jätetyn biomassan sekä kaiken pienpuun, joka poistetaan tai tulisi poistaa metsänhoidollisista syistä. Teknisesti hyödynnettävissä oleva potentiaali on 15 milj. m³ (Hakkila 2004). Energiasisällöltään tämä vastaa noin 108 PJ, josta eri jakeiden osuudet ovat:

- energiapuuharvennus (kokopuuhake) 14 PJ,
- ensiharvennus (kokopuuhake) 22 PJ,
- päätehakkuu (hakkuutähde) 58 PJ ja
- kannot päätehakkuusta 14 PJ.

Nykyinen metsähakkeen tuotanto on n. 2,6 milj. m³/a (ks. myös kuva 6). Teknisesti hyödynnettävissä olisi siis kuusinkertainen ja teoreettisesti hyödynnettävissä 18-kertainen määrä metsähaketta nykytilanteeseen verrattuna. Yli puolet teknisestä potentiaalista on oksistossa (sisältäen lehvästön). Jotta asetetut tavoitteet voidaan saavuttaa, on hyödynnettävä myös lehvästö vaikkakin se heikentää hakkeen laatua ja vie ravinteita pois metsästä (Hakkila 2004). Jos kaikki teknisesti hyödynnettävissä oleva metsähake käytettäisiin energiantuotantoon, vastaisi tämä noin 8 % Suomen kokonaisenergiankulutuksesta. Tavoitteena onkin merkittävästi lisätä metsähakkeen energiakäyttöä. Esimerkiksi Kansallisen metsäohjelman tavoite vuodelle 2015 on 8 milj. m³:ä. Lisäksi on esitetty, että energiamarkkinat ja -politiikka voivat parantaa metsäenergian kilpailukykyä, jolloin vuositavoitetta on mahdollista nostaa vielä tästäkin 3–5 miljoonalla kuutiometrillä (MMM 2006a). Edellytyksenä on kuitenkin pidetty, että metsähakkeen käyttö ei aiheuta haittaa luonnon monimuotoisuudelle ja metsien ravinnetaseelle. Suomen WWF on yhdessä Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion kanssa arvioimassa, onko tavoite mahdollista toteuttaa ottaen huomioon nykyiset metsäteollisuuden ympäristöohjeet energiapuun korjuussa.

Peltoenergian tuotantoalan odotetaan kasvavan merkittävästi tulevaisuudessa nykyisestä noin 10 000 hehtaarista. Esimerkiksi MTT:n vetämässä 'Ennakoiden kohti kestävä maataloutta' -tutkimuksessa (Rikkonen ym. 2006) asiantuntijoiden Delphi-paneeli ennakoii, että energiakasviviljelyksessä olisi 200 000 ha peltoa vuonna 2015 ja 400 000 ha vuonna 2025. Bioenergian tuotantoon liittyvät viljelyteknologiset ongelmat ovat helposti ratkaistavissa, eivätkä ne rajoita viljelyalan kasvua. Kun tavoitteena on merkittävästi lisätä energiakasvien peltoviljelyä (ks. esim. taulukko 2 ja liite 2; Peltoviljelyn tulevaisuuden linjaukset Suomessa –työryhmä, MMM 2005), on maataloudessa odotettavissa melko suuria tuotantosuuntaan ja rakenteeseen liittyviä muutoksia jo lähivuosina. Toisaalta näkemykset tuotannon lisäysmahdollisuuksista

poikkeavat merkittävästi toisistaan. Asplund ym. (2005) arvioivat, että peltobioenergian lisäyspotentiaali lähinnä oljen ja ruokohelven energiakäyttöä lisäämällä on 15 PJ vuoteen 2015 mennessä vastaten 150 000 hehtaarin tuotantopinta-alaa. Tämä on 350 000 ha vähemmän kuin pellonkäyttöryöryhmän (MMM 2005) näkemys suurimmasta mahdollisesta bioenergian tuotantoon vuonna 2012 käytettävästä pinta-alasta ja 50 000 ha vähemmän kuin työryhmän näkemys todennäköisestä peltobioenergian tuotantopinta-alasta.

Laskennallisesti voidaan arvioida, että jos kaikki Suomen henkilö- ja pakettiautot kulkisivat fossiilisten polttoaineiden sijaan bioetanolilla, sen tuottamiseen tarvittaisiin vuosittain noin 14 miljoonan metsähehtaarin vuosikasvu tai noin 3,6 miljoonan ohra-peltohehtaarin sato (Rantanen 2006). Suomen metsämaan pinta-ala on 20,2 miljoonaa hehtaaria (METLA 2006a), eli etanolin tuottamiseen käytettäisiin yli puolet tästä. Suomen maatalousmaan pinta-ala puolestaan on 2,2 miljoonaa hehtaaria, eli etanolin tuottamiseen tarvittaisiin koko maatalousmaamme – kesannot mukaan lukien – 1,6-kertaisesti. Mikäli myös ruoantuotantoa halutaan edelleen jatkaa, tarvittaisiin lisämaatalousmaata selvästi enemmän. Toisaalta myös jalostuslaitosten tuotantopotentiaali on biopolttoaineiden tuotantoa rajoittava tekijä.

Maatilojen koon kasvaessa bioenergian tuotantodellytykset ovat merkittävässä määrin parantuneet. Aktiiviviloja oli vuonna 1990 noin 130 000 ja niillä oli viljelyksessä keskimäärin noin 17 ha peltoa. Vuonna 2005 aktiivivilojen määrä oli laskenut noin 70 000 tilaan ja keskimääräinen viljelyksessä oleva peltoala oli kasvanut 34 hehtaariin. Kokonaispeltoala on pysynyt ennallaan. Tilakoon edelleen kasvaessa valmiudet kehittyä vaihtoehtoisin tuotantosuuntiin ovat aiempaa paremmat.

Suomen biokaasun tuotantopotentiaalista suurin osa muodostuu maatiloilla syntyvästä lannasta ja oljesta (taulukko 5). Biokaasun teoreettisen tuotantopotentiaalın Suomessa on arvioitu olevan 140–530 PJ, mikäli yhdyskuntien ja elintarviketeollisuuden orgaaninen jäte, kaatopaikkakaasu, lanta ja olki sekä kesantoalalla (220 000 ha) tuotettu nurmi käytettäisiin biokaasun raaka-aineena. Mikäli biokaasunurmea tuotettaisiin 500 000 hehtaarin alalla, jonka suuruinen ala voitaisiin maa- ja metsätalousministeriön mukaan käyttää energiakasvien viljelyyn vuonna 2012 (MMM 2005), biokaasun teoreettinen tuotantopotentiaali nousisi vielä 31,3 PJ edellä esitetystä arviosta (Tuomisto 2006). Vuonna 2005 hyödynnetyn biokaasun määrä (1,4 PJ, Kuittinen ym. 2006) oli vain 0,04 % teoreettisesta tuotantopotentiaalista.

Taulukko 5: Biokaasun teoreettinen maksimituotantopotentiaali ja teknis-taloudellinen tuotantopotentiaali v. 2015 Suomessa (Asplund ym. 2005).

		Teoreettinen maksimituotantopotentiaali	Teknis-taloudellinen tuotantopotentiaali
Jätelaji	Määrä (t)	Energia (PJ)	Energia (PJ)
Yhdyskuntajäte	860 000	3,1–4,6	1,9–2,8
Elintarviketeollisuus	430 000	1,5–2,3	0,8–1,2
Jätevedenpuhdistamoiden liete	160 000	3,1	0,6
Lanta ja olki	25 000 000	110–490	11–49
Peltobiomassat (kesantopelto)	1 900 000	25	7,5
Kaatopaikkakaasu		2,4	2,4
Yhteensä		140–530	24–64

Biokaasun tuotannon lisäksi voidaan biojätteiden energiaa hyödyntää polttamalla. Biojätettä ei kuitenkaan sellaisenaan suunnitella poltettavan missään, koska märkänä materiaalina se on energiataloudellisesti kannattamaton polttoaine ja sen sisältämä kloridi ja eräät muut aineet ovat vahingollisia kattiloiden lämpöpinnolle. Kuitenkin arinapohjaisessa, sekajätteelle suunnitellussa laitoksissa kulkeutuu myös biojätettä polttoon. Lisäksi rinnakkaispolttona voidaan hyödyntää yhdyskuntien jätevesilietettä.

Valtakunnallisen vuoteen 2016 ulottuvan jättesuunnitelman mukaan kierrätykseen soveltumattoman jätteen sisältämän energian hyötykäyttöä on lisättävä jätteen hyödyntämistason nostamiseksi ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Perusskenaario eli tavoitetilan mukaan v. 2016 jätteenpolttolaitoksia olisi Suomessa 6-7 kpl palvelemassa suurimpia väestökeskittymiä. Näiden lisäksi polttokelpoista jätettä hyödynnettäisiin 15–25 rinnakkaispolttolaitoksessa (Huhtinen ym. 2007). Vuoden 2003 tilastojen perusteella polttokelpoista eli orgaanista jätettä sijoitettiin kaatopaikoille noin 1,8 miljoonaa tonnia, josta suurin osa eli 1,5 miljoonaa tonnia voidaan katsoa biohajoavaksi jätteeksi (Myllymaa ym. 2006). Tällaisen jätteen lämpöarvo olisi kaiken kaikkiaan noin 18 PJ.

2.3

Bioenergian tuotantoa mahdollistavia tai estäviä yhteiskunnallisia tekijöitä

Suomen tulevaisuuden bioenergiatuotanto ei tule määräytymään pelkästään biologisesta potentiaalista tai teknis-taloudellisista reunaehdoista vaan hyvin paljon siitä, millaisilla yhteiskunnallisilla toimenpiteillä erilaisia vaihtoehtoja tuetaan tai estetään. Bioenergian edellytyksiä voidaan tukea joko suoraan tai epäsuoraan ja vaikutukset voivat olla ennakoituja tai ennakoimattomia. Vastaavasti bioenergian tuotannon lisääminen voi vaikeutua tai estyä sivuvaikutuksena jostain toisesta julkisesta ratkaisusta.

Tulevaisuuden bioenergiatuotanto riippuu siis oleellisesti siitä, miten yhteiskunnan muut järjestelmät kuin energiajärjestelmä, kuten maatalouspolitiikka ja tuotantojärjestelmä tai aluepolitiikka, tukevat bioenergian kehitystä. Bioenergian laaja poliittinen suosio tällä hetkellä (luku 1.2) perustuu paljolti siihen, että bioenergian uskotaan tarjoavan jokaiselle jotakin. Bioenergian monitavoitteisuudessa piilee sekä mahdollisuuksia että ehkä myös uhkia. Maissa, joissa on monipuoluejärjestelmä, on helpompaa saada ja ylläpitää tukea sellaisille toimenpiteille, jotka edistävät useita tavoitteita. Mikäli osa tavoitteista ajan myötä osoittautuu ristiriitaisiksi, esimerkiksi työllisyyttä edistävä pellettien vienti Ruotsiin ei edistäkään energian omavaraisuutta, voivat koalitiot bioenergiatukemiseksi murtua. Bioenergiatuotannon laajentumisen kannalta ei ole riittävää, että tuotannon jokainen vaihe sopii yhteen yhteiskunnan muiden rakenteiden kanssa; lisäksi tuotantoketjun kaikkien vaiheiden (kuva 2) tulee kannustaa samankaltaisiin energiaratkaisuihin. Esimerkiksi liikennebiopolttoaineiden jakelujärjestelmien ominaisuudet tai odotukset käytettyjen bioautojen jälleenvienninnoista voivat rajoittaa liikennebiopolttoaineiden kasvua silloinkin, kun itse polttoaine ja bioautot olisivat olleet saatavilla kilpailukykyiseen hintaan.

Nykyiset energiantuotantoteknologiat, niiden päästöt ja kustannukset riippuvat paljolti vuosikymmeniä aiemmin tehdyistä ratkaisuista (Hughes 1983, Verbong ja Geels 2006). Tämä ei kuitenkaan johdu vain teknologiasta ja kiinteästä pääomasta, vaan myös olemassa olevat instituutiot, osaaminen ja ajatusmallit vaikuttavat siihen, mikä on nyt ja tulevaisuudessa mahdollista. Keskitettyjen energiajärjestelmien ihanteen on useissa tutkimuksissa (esim. Åkerman 2006, Peltola 2007 ja Kivimaa 2007a) todettu vaikuttavan merkittävästi siihen, minkälaiset energiavaihtoehdot nähdään Suomessa ylipäättään mahdollisina. Bioenergian osalta tämä tarkoittaa sitä, että sellaiset bioenergian tuotantotavat, jotka sopivat yhteen keskitetyn energiantuotantoparadigman kanssa yleistyvät helpommin kuin sellaiset, jotka samalla kyseenalaistavat tämän paradigman. Kuntatasolla on osoitettu, miten olemassa oleva teknologia ja siihen liittyvä osaaminen hankaloitti siirtymistä öljystä toiseen polttoaineeseen Alavudella (Peltola 2006). Tuoreen selvityksen mukaan metsäalan tulevaisuusseminaariin

osallistuneet päättäjät näkivät vakiintuneet ajattelumallit, arvot, käyttäytymisnormit ja toimintamallit selkeästi merkittävimmiksi metsäalan innovaatioita ja uudistumista rajoittaviksi tekijöiksi (Metsäalan tulevaisuusfoorumi 2006).

Vaikka tehdyt ratkaisut vaikuttavat tämän hetken ja tulevaisuuden mahdollisuuksiin, ne eivät määritä niitä (David 2006). Teknologia-, liiketoiminta- sekä politiikkainnovaatiot tuottavat jatkuvasti muutospotentiaalia, joka muokkaa niin energijärjestelmiä kuin energiaa käyttävää yhteiskuntaakin. Niinpä Alavudellakin oli - Vapon avustuksella - mahdollista siirtyä kaukolämpöjärjestelmään, joka käyttää sekä turvetta että biopolttoainetta (Peltola 2006). Vastaavasti monet kunnalliset energiantuottajat ovat pystyneet siirtymään hiilestä muihin polttoaineisiin, mm. bioenergiaan, kun metsäteollisuuden biopolttoainesovelluksia siirrettiin ja modifioitiin sopiviksi kunnallisiin energiantuotantolaitoksiin (Midttun ja Koefoed 2005). Samalla tavoin kuin aiemmat päätökset vaikuttavat siihen, millaisia energiaratkaisuja kehitetään ja otetaan käyttöön, myös nyt omaksuttavat bioenergiateknologiat vaikuttavat tulevaisuudessa tehtäviin ratkaisuihin.

Se, millainen bioenergiapotentiaali tulevaisuudessa toteutuu, ei riipu ainoastaan eri vaihtoehtojen yhteensopivuudesta jo olemassa olevien järjestelmien kanssa, vaan siihen vaikuttavat selvästi myös eri toimijoiden intressit, pyrkimykset ja toimenpiteet. Kehitykseen vaikuttaa siis keskeisesti se, kehen vaikutukset kohdistuvat yhteiskunnassa. Bioenergiaratkaisut liittyvät kiinteästi maa- ja metsätalouteen. Näillä sektoreilla on perinteisesti ollut suuri poliittinen vaikutusvalta Suomessa (Donner-Amnell 1995; Granberg 1989). Metsäteollisuus on aktiivisesti tukenut ydinvoiman lisäämistä, mutta samalla se on myös halunnut edistää bioenergiaa (esim. Åkerman 2006). Metsäteollisuuden suhtautumista puuenergiaan on kuitenkin rajoittanut pyrkimys varmistaa ensisijaisesti massa- ja paperivalmistuksen raaka-aineen saatavuus ja hinta (Karesuo 2001). Metsäteollisuus on näin ollen tukenut erityisesti bioenergian tuottamista massan ja paperin valmistuksen sivutuotteena. Toisaalta metsänomistajille jopa pienimuotoinen lämpöenergian tuotanto puusta on auttanut monipuolistamaan metsän käyttömuotoja ja lisäämään paikallisten toimijoiden itsenäisiä toimintamahdollisuuksia (Leskinen ym. 2006). (Ks. lisää luku 5.4).

Energiapolitiikkaa on perinteisesti tehty laajasti kansallisella tasolla, ottaen toki kauppapoliittiset kansainväliset kytkennät huomioon, erityisesti Neuvostoliiton aikana. Energiapolitiikan yhä voimakkaampi kytkentä ympäristöpolitiikkaan, erityisesti ilmastomuutoksen mutta myös luonnon monimuotoisuuskysymyksiin, vahvistaa kansainvälisen politiikan merkitystä energiaratkaisuihin. Bioenergian raaka-aineen tuotanto on, kuten todettu, hyvin riippuvainen muista politiikkalohkoista ja erityisesti niiden käytännöistä paikallisella tasolla. Tulevaisuuden bioenergiatuotanto tulee näin ollen paljolti riippumaan siitä, miten eri politiikan tasoilla ja sektoreilla tehtävät toimet tukevat toinen toisiaan.

Esimerkkejä konkreettisista trendeistä, jotka jatkuessaan voivat merkittävästi vaikuttaa siihen, miten laajasti ja millaisena bioenergiapotentiaali toteutuu Suomessa:

- Mikäli massa- ja paperiteollisuuden tuotanto Suomessa vähenee, vähenevät myös jäteliemet sekä puunjalostusteollisuuden sivuvirtoina syntyvä puupolttoaine.
- Kansainvälisten kauppaneuvottelujen ja Euroopan Unionin maatalouspolitiikan ratkaisujen vaikutukset maataloustuotteiden hintoihin vaikuttavat ratkaisevasti siihen, millä vaihtoehtoishinnoilla peltohiomassan kannattavuutta arvioidaan. Toistaiseksi hinnat ovat laskeneet, eikä signaaleja toisenlaisesta kehityksestä ole näköpiirissä.
- Mikäli nykyinen trendi kohti harvempia, mutta selvästi isompia maatiloja jatkuu, paranevat biokaasutuotannon tilataloudelliset edellytykset. Biokaasun tuotannon on arvioitu olevan kannattavaa vasta melko suurissa yksiköissä (MMM 2007). Biokaasuntuotanto edellyttää suuria eläinyksiköitä ja/tai maa-

tilojen välisen yhteistyön lisäämistä. Tämä on linjassa nykyisten maatalouspoliittisten linjausten kanssa.

- Liikennepolttoaineiden osalta olemassa olevan jakelujärjestelmän kanssa kilpailevaa jakeluverkostoa edellyttävät ratkaisut eivät vaikuta kovin todennäköisiltä. Lähitulevaisuudessa liikenteessä käytetään todennäköisesti edelleen pääosin nestemäisiä polttoaineita, ja nykyinen teknologinen kehitys, mm. metsäteollisuudessa, tähtääkin sellaisiin ratkaisuihin, jotka tuottavat biopolttoainetta nykyiseen infrastruktuuriin sopivaksi.

3 Bioenergian tuotantotavat

3.1

Lähtökohtana elinkaarinäkökulma

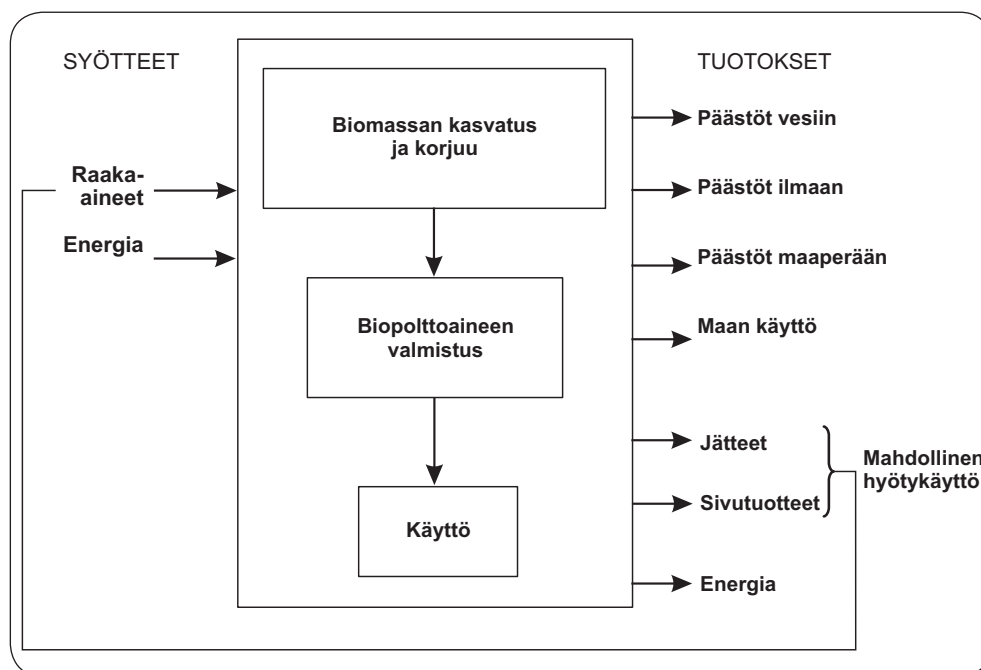
Tämän raportin lähtökohtana on tarkastella bioenergian tuotantotapoja ja niiden ympäristövaikutuksia elinkaariajatteluun pohjautuen. Bioenergian tuotanto käsittää biomassan kasvatuksen, korjuun, käsittelyn, varastoinnin ja kuljetukset sekä polttoaineen valmistuksen, kuljetuksen, varastoinnin ja käytön. Kukin tuotantoketjun vaihe eli elinkaarivaihe vaatii energiaa ja erilaisia raaka-aineita. Päästöjä vesiin, ilmaan ja maaperään sekä jätteitä syntyy kaikissa elinkaaren vaiheissa: peltoviljelyssä tai metsää kasvatettaessa, satoa tai puuta korjattaessa, raaka-aineen jalostuksessa ja käytössä (kuva 5). Lisäksi eri elinkaaren vaiheiden toiminnot aiheuttavat maankäytön seurauksena vaikutuksia muun muassa luonnon monimuotoisuuteen ja varaavat maa-aluetta siten, että se ei ole käytettävissä muihin toimintoihin. Kaikissa elinkaaren vaiheissa kuluu raaka-aineita ja energiaa. Elinkaariajattelussa myös tuontivirrat ja niiden aiheuttamat vaikutukset ja raaka-aineiden ja energian kulutus otetaan huomioon.

Metsä- ja peltobiomassan tuotannon vaikutuksia ympäristöön voidaan lähestyä kahdella tavalla. Perinteinen tapa tarkastella esimerkiksi maatalouden päästöjä on tehdä se pinta-alakohtaisesti: mikä on esimerkiksi hehtaarilta tulevan ravinnekuormituksen suuruus. Toinen tapa on esittää päästöt ja muutokset tuotettua tuoteyksikköä kohti, kuten elinkaariarvioinnissa tehdään. Ensin mainitulla tavalla voidaan tarkastella tietyn alueen tai esimerkiksi valtakunnan tasolla tapahtuvia kuormitusmuutoksia. Jälkimmäinen tapa kertoo itse tuotteelle kohdistuvan ympäristörasituksen, mikä mahdollistaa erilaisten mutta samaa toimintoa toteuttavien tuotteiden tai palvelujen ympäristövaikutusten vertaamisen.

Erilaisten bioenergiavaihtoehtojen elinkaarisia ympäristövaikutuksia selvittäessä on noussut esiin kysymys siitä, millä tavalla peltoenergiakasvien tuotannon päästöt tulisi arvioida. On esitetty, että energiakasvien viljelystä pelloilla ei aiheutuisi merkittäviä kasvihuonekaasupäästöjä tai muuta kuormitusta, koska ne syntyisivät joka tapauksessa leipä- tai rehuviljan tuotannossa. Näin tilanne onkin, jos tarkastellaan päästöjä hehtaari- tai valtakunnan tasolla, mutta tuoteyksikköä kohti tarkasteltuna tämä ei päde. Viljelykasvia vaihdettaessa viljelystä aiheutuva hehtaarikohtainen kuormitus ei välttämättä muutu paljon, mutta kuormitus kohdistuu nyt toiselle tuotteelle kuin ennen muutosta. Ei esimerkiksi voida ajatella, että siirryttäessä ohranviljelystä vehnänviljelyyn, joissa hehtaarikohtainen ravinnekuormitus on suunnilleen yhtä suurta, vehnänviljelystä ei aiheutuisi lainkaan päästöjä, koska hehtaarikohtainen kuormitus ei lisäänty. Viljelystä aiheutuu edelleen päästöjä, joka vain kohdennetaan toiselle tuotteelle.

Biopolttoaineen eri elinkaarivaiheissa saattaa muodostua sivutuotteita, joita voidaan käyttää varsinaisen bioenergiatuotantjärjestelmän ulkopuolella. Sivutuotteiden hyötykäytön seurauksena vältetään prosesseja ja toimintoja, jotka ilman sivutuotteiden hyötykäyttöä toteutuisivat. Välttämällä toimintoja ja niihin liittyviä ympäristövaikutuksia aiheutetaan vähemmän haittaa ympäristölle, minkä vuoksi sivutuotteiden hyötykäyttö parantaa bioenergian ympäristötasetta (ks. tarkemmin kohta 4.1). Toisaalta muiden tuotejärjestelmien jäte- ja sivutuotemateriaaleja voidaan käyttää bioenergian tuotannon raaka-aineina.

Tässä luvussa on kuvattu tärkeimpiä suomalaisia bioenergian tuotantotapoja. Luvussa 4 niiden aiheuttamia ympäristövaikutuksia on kuvattu ympäristövaikutusluokittain.



Kuva 5. Bioenergian tuotantojärjestelmä sekä siihen liittyvät syötteen ja tuotokset.

3.2

Metsäbiomassa sähkön ja lämmön tuotannossa

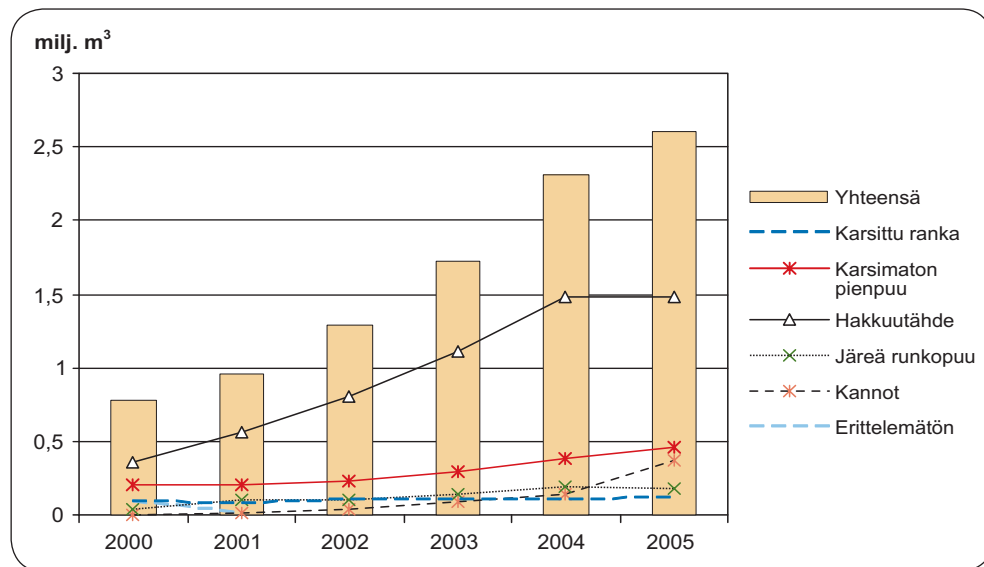
Puuenergian käytön elinkaareen liittyvät metsien hoito- ja puun korjuutoimenpiteet. Uudistushakkuista noin 80 % tehdään avohakkuina ja loput luontaiseen uudistamiseen tähtäävinä hakkuina. Metsien uudistusojitus on loppunut, mutta vanhoja ojituksia kunnostetaan jatkuvasti. Metsänuudistukseen kuuluu maanmuokkaus, kuten äestys tai laikutus. Metsäkeskus Tapion ohjeiden mukaan uudistusalat kannattaa muokata kaikkein karuimpia kasvupaikkoja lukuun ottamatta. Metsälannoitus oli suurimmillaan 1970-luvulla, jonka jälkeen se vähitellen lähes lopetettiin kokonaan. Viime vuosina kuitenkin turvemaiden fosforilannoitusala on kasvanut viime vuosina 1990-lukuun verrattuna. Puun poltossa muodostuvan tuhkan kierrätyksellä voidaan ravinteita palauttaa takaisin metsään, mutta tässä on edelleen teknisiä haasteita. Lisäksi polttoprosessissa typpi poistuu ilmaan, eikä lannoituksen avulla voida palauttaa orgaanista aineista.

Hyvin organisoituneet metsänomistajat sekä kansantaloudellisesti merkittävä metsäteollisuus ovat olleet oleellisia tekijöitä Suomen bioenergian kehityksessä. Selu- ja paperiteollisuus on energiaintensiivistä teollisuutta, ja teollisuus toimii sekä energiabiomassan tuottajana että kuluttajana. Lähes 60 prosenttia metsäteollisuuden käyttämästä energiasta tulee teollisuuden sisältä puuperäisistä polttoaineista lopun ollessa pääasiassa sähköä, joka tuotetaan useilla erilaisilla polttoaineilla (Ericsson ym. 2004). Metsäteollisuuden jäteliemet, kuori, sahanpuru ja puutähdehake muodostavat suurimman osan puuenergian käytöstä. Näiden jakeiden käyttö energiantuotannossa on hyvin riippuvainen metsäteollisuuden tuotantorakenteesta ja määrästä. Mustalipeän käyttö kasvaa samassa suhteessa kuin selluloosan valmistuskin kasvaa. Teknologisen kehityksen ansiosta soodakattiloiden hyötysuhde on parantunut. Mustalipeä yleensä poltetaan samalla tehtaalla kuin sitä syntyy. Venäjältä tuotavan puun määrän muutokset heijastuvat metsäteollisuuden puuenergiapotentiaaliin. Vuosina 2001–2005 kotimaisen ainespuun markkinahakkuut olivat keskimäärin 56 milj. m³.

Metsäntutkimuslaitoksen laskelmien mukaan vuotuiset hakkuut ovat kestävästi nostettavissa runsaaseen 66 milj. m³:in vuosina 2005–2014 ja seuraavalla kymmenvuotiskaudella runsaaseen 70 milj. m³:in (MMM 2006a).

Suurin osa puupolttoaineista käytetään sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Suurin yksittäinen bioenergian (mustalipeä) käyttäjä on sellutehtaiden soodakattilat. Lisäksi teollisuuden voimaloissa käytetään muita prosessien sivutuotteita kuten puurua ja kuorta. Suurten kaupunkien kaukolämpöä ja sähköä tuottavissa vastapainevoimalaitoksissa käytetään pääasiassa kiinteitä puupolttoaineita. Lisäksi pientalojen suoraan lämmitykseen käytetään klapeja, haketta ja pellettejä.

Metsähake on yksi merkittävimmistä bioenergian lisäysmahdollisuuksista (ks. luku 2.2). Vuonna 2005 metsähakkeen tuotanto oli noin 2,6 milj. m³ (pois lukien pientalokiinteistöt) ja se on yli kolminkertaistunut vuodesta 2000 lähtien (kuva 6). Pääosa metsähakkeesta valmistetaan hakkuutähteistä eli hakkuualalta korjattujen puiden oksista ja latvuksista. Seuraavaksi eniten käytettiin lähinnä taimikonhoidossa ja nuoren metsän harvennuksessa syntyvää karsimatonta pienpuuta. Kantojen ja juurakoiden käyttö metsähakkeen raaka-aineena kaksinkertaistui vuosina 2004–2005 (METLA 2006b). Metsähakkeen kokonaiskäyttö (ml. pientalokiinteistöjen hakkeen käyttö) oli vuonna 2005 3,0 milj. m³ (energiasisältö 21 PJ). 62 % metsähakkeesta käytettiin sähkön ja lämmön yhteistuotantoon ja 25 % lämmöntuotantoon. Pientalokiinteistöt käyttivät 13 %.



Kuva 6. Metsähakkeen raaka-ainelähteet vuosina 2000–2005. Ei sisällä pientalokiinteistöjen käyttämää metsähaketta (METLA).

Puuperäisiä polttoaineita on käytetty teollisuuden ja energiantuotannon kattiloissa sekä pientalojen lämmityksessä laajasti jo vuosikymmeniä. Niiden energiahyötymisen tekniikoita on kuvattu kattavasti kirjallisuudessa (esim. Hoffman ym. 2004). Seuraavissa kappaleissa käsitellään lyhyesti tärkeimmät puupolttoaineiden suorat energiakäyttötavat.

3.2.1

Puujalostusteollisuuden jäteliemet

Puunjalostusteollisuuden jäteliemiä käytettiin vuonna 2004 157 PJ eli noin 42 % Suomen uusiutuvasta energiasta. Suomessa mustalipeän osuus metsäteollisuuden sivutuotteiden energiakäytöstä on noin kaksi kolmasosaa. Selluloosan tuotannossa mustalipeän polttaminen soodakattiloissa on osa kemikaalikiertoa. Metsäteollisuudessa mustalipeän käyttöä ei arvioida ensisijaisesti energiantuotannon lähtökohdista (Helynen ym. 2002), mutta tulevaisuudessa energian tuottaminen metsäteollisuussin-tegraateissa voi olla merkittävämpää kuin nykyisin.

Mustalipeä on liuos, joka erotetaan puumassasta keiton jälkeen. Mustalipeän kuiva-aine koostuu pääasiassa pilkkoutuneesta sekä liuenneesta ligniinistä ja polysakkaridien ja selluloosien pilkkoutumistuotteista. Mustalipeän kuiva-aineesta on noin 40 % hiiltä ja noin 5 % rikkiä. Noin puolet kuiva-aineesta on tuhkaa, jonka pääkomponentit ovat natriumsulfaatti ja karbonaatti.

Yli 60 % kuiva-ainetta sisältävä mustalipeä on haihdutuksen jälkeen valmista poltettavaksi soodakattilassa. Polton tarkoitus on saada epäorgaaninen ja orgaaninen osa erotettua toisistaan mahdollisimman taloudellisesti. Talteen otetulla energialla tuotetaan prosessihöyryä ja sähköä.

Sulfaattiselluloseprosessin kemikaalikierto on tehostunut merkittävästi. Kehityksen taustalla ovat olleet muutokset keittoprosessissa ja kloorin käytön vähentyminen valkaisussa (Helynen ym. 2002). Nykyisin uusilla kattiloilla voidaan päästä lähelle 85% kuiva-ainepitoisuutta, kun vielä 80-luvun puolivälissä kuiva-ainepitoisuus oli tyypillisesti 65 % (Vakkilainen ym. 2004). Kuiva-ainepitoisuuden nousu on sekä lisännyt soodakattilassa tuotetun höyryn määrää että parantanut höyryn tuotannon hyötysuhdetta (Helynen ym. 2002).

Sulfaattisellutehtaan soodakattilalle on jo vuosikymmenien ajan kehitetty vaihtoehtoisia prosessia, joka perustuisi mustalipeän kaasutukseen. Mustalipeän kaasutus tarjoaa perinteiselle soodakattilalle vaihtoehdon, jolla voidaan nostaa sellutehtaan energiantuotannon rakennusastetta (Helynen ym. 2002). Mustalipeän kaasutus tarjoaa myös mahdollisuuden tuottaa liikennepolttoaineita ja muita kemikaaleja sulfaattisellutehtaan yhteydessä (ks. luku 3.3.2). Ensimmäinen kaupallisen mittakaavan laitos on ollut käynnissä Kanadan Ontariossa vuodesta 2003 lähtien. Täyden mittakaavan laitos löytyy myös Yhdysvaltain Philadelphiasta ja ainakin Ruotsin Pettenissä on pilot-kokoluokan laitos.

3.2.2

Teollisuuden ja energiantuotannon puupolttoaineet

Teollisuuden ja energiantuotannon puupolttoaineilla (puutähteillä, kierrätyspuulla, metsähakkeella sekä puunjalostusteollisuuden muilla sivu- ja jätetuotteilla) tuotettiin vuonna 2004 noin 27 % Suomen uusiutuvasta energiasta.

Metsäteollisuuden kiinteät sivutuotteet ovat edullisin puupolttoainevaihtoehto. Puhdas hake samoin kuin suurin osa sahoilla syntyvästä purusta käytetään selluloosateollisuuden raaka-aineena. Purusta noin 32 % arvioidaan käytettävän suoraan tai jalostettuna polttoaineena energiantuotannossa. Metsäteollisuuden sivu- ja jätetuotteita hyödynnettiin vuonna 2004 puupolttoaineina yhteensä noin 80 PJ, joista kuorta oli 54 PJ, purua 16 PJ ja haketta 7 PJ (Tilastokeskus 2005). Lisäksi yhä enenevässä määrin käytetään hakkuiden yhteydessä talteen otettua metsähaketta (21 PJ vuonna 2005). Muita metsäteollisuuden sivutuotteita ovat mäntyöljy, tärpähti ja lietteet. (Helynen ym. 2002). Erilaisesta polttoaineverotuksesta johtuen pellettien kilpailukyky on Suomessa huonompi kuin Ruotsissa. Sen seurauksena niiden käyttö on meillä

vähäisempää. Tilanne on johtanut siihen, että Suomessa tuotetuista pelleteistä yli 80 % viedään pääosin Ruotsiin (Tilastokeskus 2005).

Puupolttoaineet poltetaan leijupeti- tai arinakattiloissa. Tuotettu lämpö käytetään prosessihöyrynä teollisuudessa tai taajamien kaukolämmityksessä. Useissa prosesseissa tuotetaan lisäksi myös sähköä.

Suurissa käyttökohteissa puupolttoaine ja turve ovat suurelta osin vaihtoehtoisia ja toisiaan täydentäviä polttoaineita. Polttoaineen riittävän ympärivuotisen saatavuuden takia on usein tärkeää, että puuta ja turvetta voidaan käyttää joustavasti vaihtelevissa suhteissa samassa kattilassa. Metsähakkeen käyttö ei myöskään aina ole mahdollista ainoana polttoaineena kattilan likaantumisen ja korroosioriskin takia. Turpeen sisältämä tuhka auttaa pitämään kattilan puhtaana ja rikki sitoo muun muassa puupolttoaineen sisältämää klooria. (Helynen ym. 2002)

3.2.3

Puun pienpoltto

Puun pienpoltolla tarkoitetaan pientalojen ja vapaa-ajan asuntojen puun polttoa tulisijoissa ja kattiloissa. Vuosittainen puun pienpolttomäärä Suomessa on noin 6 milj. m³ (sisältäen kotitalouksien klapit ja vastaavat, jätepuun ja metsähakkeen). Tämä vastaa energiamäärältään noin 48 PJ. Noin puolet käytetään puulämmitteisissä pientaloissa, kolmannes sähkö- tai öljylämmitteisten talojen lisälämmönlähteenä ja loput vapaa-ajan rakennuksissa.

Suurin osa polttopuusta hankitaan omasta metsästä tai muuten omatoimisesti, ostetun polttopuun osuus on noin viidennes (Sevola ym. 2003). Puu poltetaan pääasiassa klapeina. Puupellettejä tuotetaan Suomessa n. 200 000 tonnia (n. 3 PJ) vuodessa. Suurin osa tuotannosta menee vientiin ja vain noin 10% käytetään pientalojen lämmitykseen Suomessa. Haketta poltetaan jonkin verran, n. 3 PJ/a, pääasiassa maataloilla.

Pellettien raaka-aineena käytetään pääasiassa kuivaa kutterinlastua tai sahanpuurua. Pellettien puristuksessa syntyvä lämpö pehmittää puun ligniinin hetkeksi, jolloin pelletti saa muotonsa ja kovuutensa. Kosteaa raaka-ainetta on kuivattava ennen puristamista. (Helynen ym. 2002) Energiatehokkuuden parantamiseksi pellettien tuotanto voidaan integroida esimerkiksi CHP-laitoksen yhteyteen.

Polttoteknisesti puun pienpoltto on hyvin heterogeeninen sektori. Puulämmitteisissä pientaloissa puuta poltetaan eniten klapikattiloissa. Pellettikattilat eivät ole kovin yleisiä Suomessa, mutta suosio on kasvussa. Lisälämmityskäyttö tapahtuu pääasiassa varaavissa takoissa ja uuneissa. Lisäksi puuta poltetaan mm. avotakoissa, saunan uuneissa, helloissa ja kamiinoissa. Suomessa on erilaisia tulisijoja noin 2,2 miljoonaa kappaletta ja pienkattiloita noin 100 000. 1980-luvulta lähtien sähkölämmitteiset pientalot on lähes poikkeuksetta varustettu puulämmitteisellä tulisijalla, ja tämä kehitys jatkuu todennäköisesti tulevaisuudessakin.

3.3

Peltobiomassan käyttö sähkön ja lämmön tuotannossa

Kiinteinä polttoaineina käytettäviä peltoenergiatuotteita ovat lähinnä ruokohelpi ja olki. Myös esimerkiksi viljan jyviä voidaan polttaa. Merkittävimäksi kiinteää polttoainetta tuottavaksi peltoenergiakasviksi on Suomessa osoittautumassa ruokohelpi, jonka viljelypinta-ala on nykyään noin 17 000 hehtaaria. Jos ala olisi 110 000 hehtaaria, kuten Finbion peltoenergiaohjelman tavoitteisiin kirjattiin vuonna 2003, voitaisiin

helpipelloilla tuotetulla polttoaineella tuottaa 0,6 prosenttia (noin 9 PJ) Suomen nykyisestä energian kokonaiskulutuksesta. (Motiva 2007)

Mikäli viljelyala ei aseta rajoituksia, on ruokohelpin polttoon soveltuvaa käyttöpotentiaalia Suomessa noin 15,5 PJ. Suurimmat tekniset käyttöpotentiaali-alueet ovat Pohjanmaalla, Keski- ja Itä-Suomen alueilla. Kuitenkin taloudellisesti järkevän maksimaalisen kuljetusmatkan (hankinta-alueen säde arviolta 70 km) perusteella ruokohelven käyttökapasiteetiksi arvioitiin 6,5 PJ. Tämä tuottamiseksi tarvittaisiin 80 000 ha ruokohelpiala (satotaso 79 GJ/ha). Vuonna 2010 ruokohelven polttoainekäytön arvioitiin olevan noin 1,6–2,2 PJ ja vuonna 2015 vastaavasti 3,2–4,3 PJ. Nämä vastaavat 20 000 ha ja 40 000 ha viljelyaloja. Lisäksi ruokohelpiä voitaisiin tuottaa seospellettien raaka-aineeksi noin 30 000 hehtaarilla (Flyktman ja Paappanen 2005).

Suomessa yleisimmät kiinteän biopolttoaineen polttotavat ovat arina- ja leijupolttot. Suuret CHP-laitokset ovat lähes yksinomaan joko kierto- tai kerrosleijupolttot. Ruokohelpi sopii hyvin turpeen ja puun seospolttoaineeksi erityisesti leijukerrospolttot käyttäviin voimalaitoksiin. Ruokohelpistä ja myös turpeesta on mahdollista kaasutamalla valmistaa synteetikaasua ja siitä edelleen liikennepolttoaineita ja kemikaaleja (ks. 3.4.2.).

3.4

Liikennepolttoaineet

Liikenteen biopolttoaineita voidaan valmistaa erilaisista raaka-aineista kuten esimerkiksi peltokasveista, selluloosapohjaisista raaka-aineista, jätteistä tai myös turpeesta. Liikenteen biopolttoaineet jaetaan yleensä ensimmäisen ja toisen sukupolven polttoaineisiin. Ensimmäisen polven liikennepolttoaineilla tarkoitetaan etanolia, kasviöljypohjaista biodieseliä (FAME) ja biokaasuja. Etanolia ja biodieseliä ei voi teknisten rajoitusten vuoksi käyttää nykyisessä ajoneuvoissa kuin 5–10 tilavuusprosentin seoskomponentteina. Toisen sukupolven biopolttoaineilla tarkoitetaan hyvälaatuisia hiilivetympolttoaineita, joihin ei liity merkittäviä käyttörajoitteita.

3.4.1

Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet

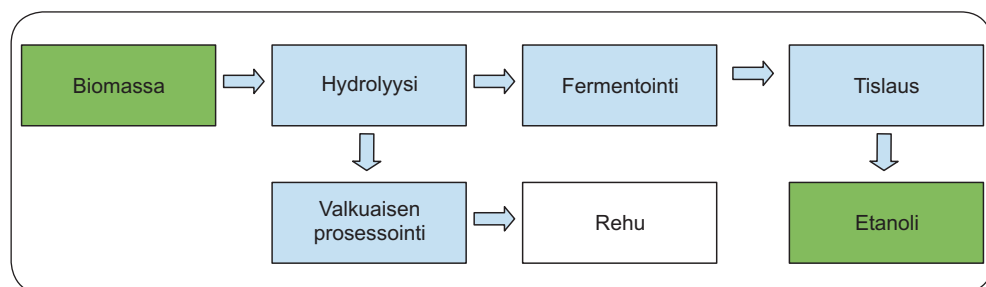
Ensimmäisen sukupolven liikenteen biopolttoaineita voidaan valmistaa mm. ohraista, maissista, rypysistä, sokeriruo'osta ja -juurikkaasta. Biopolttoaineiden tuotantoon soveltuvien kasvien keskimääräinen sato vaihtelee alueittain merkittävästi (taulukko 6). Esimerkiksi ohran sato on Keski-Euroopassa lähes kaksinkertainen verrattuna suomalaiseseen keskimääräiseen satotasoon. Satotaso vaikuttaa merkittävästi biopolttoaineen tuotannon kannattavuuteen ja koko elinkaaren aikaisiin energia- ja kasvihuonekaasutaseisiin. Peltoenergian ympäristövaikutukset aiheutuvat ennen kaikkea maanmuokkauksesta, lannoituksesta (ml. lannoitteiden valmistus) ja torjunta-aineiden käytöstä sekä sadon korjuusta ja käsittelystä (muun muassa viljan kuivaus).

Taulukko 6: Eräiden biopolttoaineiden tuotantoon soveltuvien kasvien keskimääräinen sato (kg/ha) vuonna 2005 eri maissa (FAO 2007)

	Suomi	Italia	Ranska	Saksa	Yhdysvallat	Kanada	Brasilia	Kiina
Vehnä	3 700	3 600	7 000	7 500	2 800	2 700	2 200	4 300
Ohra	3 500	3 800	6 400	6 000	3 500	3 200	2 800	4 000
Maissi		9 400	8 400	9 200	9 300	8 600	3 000	5 300
Rapsi	1 400	1 700	3 700	3 800	1 600	1 800	1 700	1 800
Soija		3 600	2 500	1 700	2 900	2 700	2 300	1 800
Sokerijuurikas	37 800	55 900	82 300	60 200	50 000	45 400		37 500
Sokeriruoko					67 800		72 800	64 200

Etanoli

Etanoli on tällä hetkellä maailmanlaajuisesti merkittävin biopolttoneste. Sitä valmistetaan pääasiassa fermentoimalla sokereita mikro-organismien avulla alkoholiksi. Raaka-aineita on käytössä useita. Noin 60 % maailmassa tuotetusta etanolista on valmistettu sokeripitoisista viljelykasveista, kuten sokeriruosta ja sokerijuurikkaasta, ja suurin osa lopusta valmistetaan viljasta, lähinnä maissista. Tärkkelyspitoisten raaka-aineiden, kuten perunan ja viljojen, tärkkelys on muunnettava ennen fermentointia sokereiksi ns. hydrolyysin avulla (kuva 7). Tärkkelys on suhteellisen helposti hydrolysoitavissa sokereiksi. Sokeri- ja tärkkelyspitoisiin viljelykasveihin perustuva prosessi on tunnettua tekniikkaa ja käytössä polttoainetuotannossa laajassa mittakaavassa Brasiliassa ja Yhdysvalloissa. Suomessa viljaetanolin saanto olisi noin 0,91 t/ha, kun raaka-aineena olisi ohra. Viljapohjaisessa tuotannossa saadaan lisäksi rehukäyttöön soveltuvaa valkuaisista. Olki voidaan puolestaan hyödyntää energiana esimerkiksi sähkön- ja lämmöntuotannossa (Mäkinen ym. 2005).

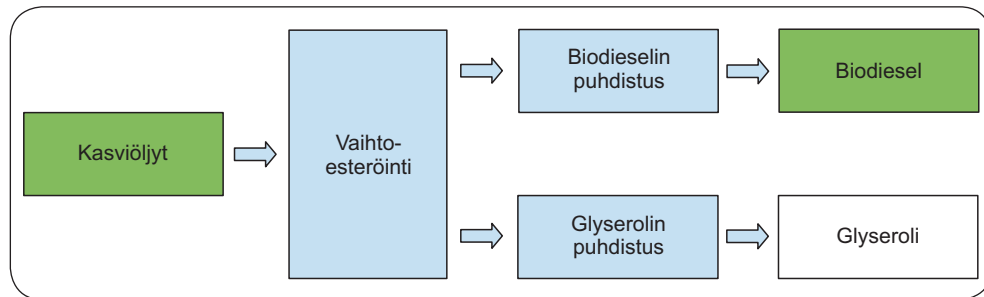


Kuva 7. Etanolin tuotantoprosessin vuokaavio (Mäkisen ym. 2005 pohjalta).

Biodiesel

Biodieselin yleisin raaka-aine on rypsi tai rapsi. Muita raaka-aineita ovat auringonkukkaöljy sekä erityisesti Yhdysvalloissa soijaöljy. Euroopassa noin 95 % biodieselistä tuotetaan rypsistä tai rapsista (Körbitz ym. 2003). Suomessa kasviöljypohjaisen biodieselin kotimainen pääraaka-aine olisi rypsi (tuotteena RME, rypsimetyyliesteri). Rypsimetyyliesterin valmistuksessa siemenet puristetaan ensin mekaanisesti, jolloin saadaan raakarypsiöljyä sekä valkuaispitoiseksi eläinrehuksi kelpavaa kiinteää jäännöstä eli rypsirouhetta. Kuumapuristuksella saadaan kylmäpuristusta hieman korkeampi öljysaanto. Kiinteä jäännös voidaan vielä uutata liuottimilla, esim. heksaanilla, jolloin öljysaanto paranee. Rypsimetyyliesteriä saadaan esteröimällä raakarypsiöljy metanolilla. Sivutuotteena syntyy glyserolia. Suomessa rypsinsementtien keskimääräinen saanto on noin 1,75 t/ha, joka vastaisi rypsimetyyliesterin saantoa noin 0,61 t RME/ha. (Mäkinen ym. 2006)

Kasviöljyt eivät sellaisenaan sovi nykyisten ajoneuvojen polttoaineeksi. Kasviöljyt vaihtoesteröidään alkoholin kanssa viskositeetin ja kylmäominaisuuksien säätämiseksi diesekäyttöön soveltuvaksi. Yleensä vaihtoesteröintiin käytetään metanolia, jolloin kasviöljyjen rasvahapot ja metanoli reagoivat muodostaen rasvahappojen metyyliestereitä (FAME), ns. biodieseliä, sekä glyserolia (kuva 8) (Mäkinen ym. 2006).

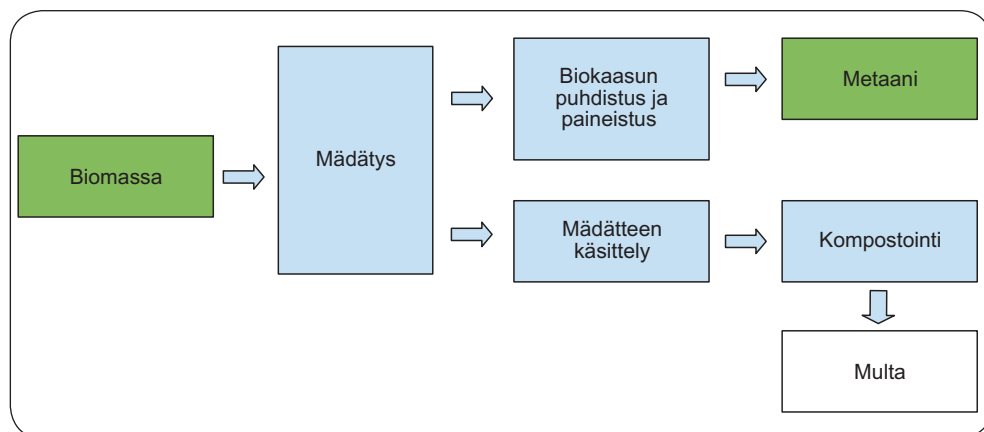


Kuva 8. Biodieselin valmistuksen vuokaavio (Mäkisen ym. 2006 pohjalta).

Suomessa on viime vuosikymmeninä kehitetty vaihtoehtoisia kasviöljyestereiden tuotantokonsepteja eri kokoluokkiin. Maatilakohtaisesti voidaan valmistaa sinappi-, rapsi- ja rypsiöljyä matalaseosteiseksi dieselpolttoaineeksi. Myös esteröinti RME:ksi voi tapahtua pienehköissä laitoksissa. (Mäkinen ym. 2006)

Biokaasu

Biokaasua valmistetaan mädättämällä orgaanista materiaalia kuten kasvibiomassaa, lantaa, jätevesilietettä tai biojätettä (kuva 9). Kaatopaikoilla muodostuu vastaavaa kaasua, ns. kaatopaikkakaasua. Biokaasu sisältää yleensä 60–70 % metaania, 30–40 % hiilidioksidia, alle 1 % rikkivetyä ja pieniä määriä muita kaasuja. Biokaasuja voidaan hyödyntää muun muassa lämmön- ja sähköntuotannossa sekä liikenteen polttoaineena. Liikennekäyttö edellyttää kaasun puhdistusta ja paineistusta. Biokaasu puhdistetaan ajoneuvokäyttöä varten niin, että se vastaa laadultaan hyvälaatuista maakaasua. Kaasusta poistetaan kaikki korroosiota aiheuttavat ja syövyttävät yhdisteet. Kosteus ja CO₂ poistetaan, jotta kaasu voidaan paineistaa ajoneuvojen vaatimaan noin 250 bar:in paineeseen. (Mäkinen ym. 2005)



Kuva 9. Biokaasun tuotantoprosessin vuokaavio.

Biokaasua voidaan tuottaa mm. biokaasureaktoreissa tai ottamalla biokaasu talteen kaatopaikoilta. Mädätys on jo pitkään ollut käytössä jätevesilietteiden käsittelyssä. Myös maatiloilla syntyvästä jätteestä kuten lannasta ja kuivikejätteestä voidaan tuottaa biokaasua reaktoreissa. Maatilaan integroitu biokaasulaitos voi olla tilakohtainen tai keskitetty. Tilakohtaisessa laitoksessa käsitellään vain yhden maatilan tuottama orgaaninen aines kuten lanta sekä mahdollisesti lähialueella tuotettua muuta orgaanista materiaalia, esim. kasvibiomassaa tai elintarviketeollisuuden biojätteitä. Muodostunut energia hyödynnetään tilalla lämpönä ja sähkönä tai jalostetaan liikennepoltoaineeksi, ja käsitelty biomassa (määdäte) käytetään lannoitteena tilan pelloilla. Mädäte tarvitsee tavallisesti käsittelyä ennen kuin se voidaan hyödyntää. Useimpien teollisten biojätteen mädätyslaitosten prosesseihin kuuluu 1–2 viikon kompostointi. Maatiloilla tuotettua sähköä voidaan myydä myös sähköverkkoon. Keskitetyssä biokaasulaitoksessa käsitellään usealta maatilalta kerättyä lantaa teollisuuden ja yhdyskuntien biojätteiden ja -lietteiden kanssa. Energia myydään verkkoon ja käsitelty materiaali jaetaan lannoitteeksi usealle maatilalle. (Tuomisto 2006)

Vuoden 2005 lopulla maatilakohtaisia biokaasulaitoksia oli Suomessa 7 kpl (Kuittinen ym. 2006). Kiinnostus biokaasulaitosten rakentamiseen maatiloille kuitenkin lisääntyy jatkuvasti. Biokaasulaitosten suosiota ovat lisänneet energiakustannusten nousu, lannan käsittely- ja sijoitustarpeet sekä lisätulonlähteiden etsiminen maatiloille (MMM 2006b).

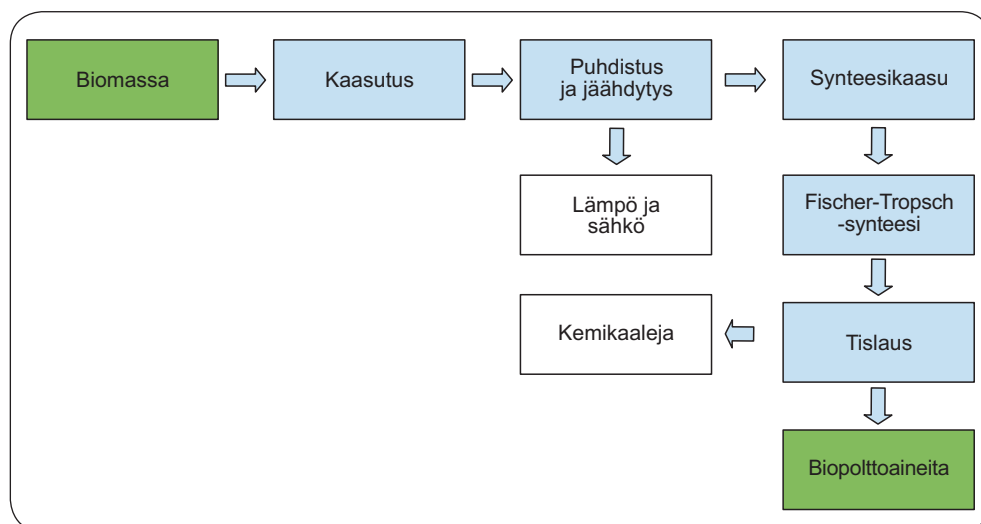
Kaupunkien jätevedenpuhdistamoilla toimi Suomessa vuoden 2005 lopussa 15 biokaasureaktoria. Teollisuuden jätevesiä käsiteltiin anaerobisesti kolmessa eri laitoksessa. Näistä yhdessä käsiteltiin puunjalostuksen ja kahdessa elintarviketeollisuuden jätevesiä sekä orgaanisia liuottimia. Lisäksi muita reaktorilaitoksia oli vuoden 2005 lopussa 3 kpl ja suunnitteilla 1 kpl. Nämä kaikki olivat erilaisia biojätteitä yhdessä lantojen tai puhdistamolietteiden kanssa käsitteleviä yhteismädätyslaitoksia. Yhteensä reaktorilaitoksilla tuotettiin biokaasua 26,5 milj. m³. Ylijäämäpoltoon kului biokaasua 3,3 milj. m³. Lämpö- ja sähköenergiana sekä mekaanisena energiana hyödynnettiin yhteensä 0,4 PJ.

Vuonna 2005 33 kaatopaikkalaitokselta kerättiin talteen yhteensä 118,4 milj. m³, josta 70,3 milj. m³ käytettiin sähkön ja lämmön tuotantoon. Energiaa tällä tuotettiin 1 PJ. (Kuittinen ym. 2006). Vertailuna voidaan todeta, että suurimman yksittäisen laitoksen (Espoon Ämmässuon kaatopaikan) vuonna 2004 hukkapoltetulla metaanilla (22,3 milj. m³) olisi voitu liikennöidä kaasumoottorista linja-autoa noin 32,1 milj. km, mikä osapuilleen vastaa Helsingin liikennelaitoksen linja-autojen vuosittaista ajokertymää (Kuittinen ym. 2005).

3.4.2

Liikenteen biopolttoaineiden tuotanto biojalostamoissa

Biojalostamot tuottavat eri tyyppisistä biomassoista biopolttoaineiden lisäksi esimerkiksi rehuja, kemikaaleja ja materiaaleja sekä sähköä ja lämpöä. Biojalostamoja ovat myös synteetikaasun valmistukseen perustuvat prosessit (kuva 10). Näissä prosesseissa biomassasta valmistetaan ensin termisesti kaasuttamalla synteetikaasua. Synteetikaasusta voidaan tunnetuilla prosesseilla valmistaa korkealaatuista diesel-polttoainetta, niin sanottua Fischer-Tropsch-dieseliä (F-T-diesel), metanolia tai dimeytyllieetteriä (DME). Metanolia ei voi käyttää ajoneuvoissa polttoaineena sellaisenaan. Metanolista voidaan edelleen valmistaa eettereitä, kuten MTBE:tä, käytettäväksi bensiinin lisäaineina. Synteetikaasusta voidaan valmistaa myös synteettistä maakaasua tai vetyä. Kaasutuksen tuotekaasu täytyy ennen synteesiä puhdistaa epäpuhtauksista eri kaasunpuhdistusmenetelmillä ja edelleen konvertoida synteetiproessin vaatimusten mukaiseksi synteetikaasuksi.



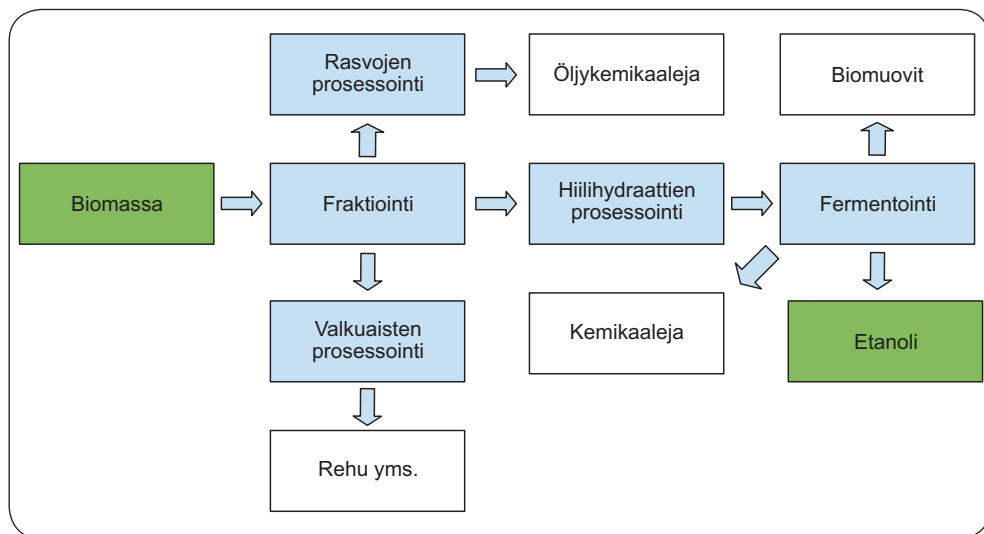
Kuva 10. Metsäteollisuuden yhteyteen suunnitellun biojalostamon toiminta perustuu biomassan kaasutuksella saatavaan synteesikaasuun (Mäkisen ym. 2006 pohjalta).

Liikenteen biopolttoaineiden valmistukseen kaasuttamalla Suomessa tulisivat kyseeseen lähinnä puuraaka-aineet, kuten metsätähde ja kuori, sekä ruokohelpi ja jättepohjaiset raaka-aineet. Raaka-aineena voisi olla myös turve. Ruotsiin on suunnitteilla pilottilaitos ja kaksi demonstraatiolaitosta, jotka tuottaisivat mustalipeän kaasutuksesta 100 tonnia polttoainetta päivässä (Nyteknik 2006). Suomessa kaavailtujen konseptien perusajatuksena on ollut liikenteen biopolttoaineiden ja sähkön tai lämmön yhteistuotanto, mikä näyttäisi tarjoavan useita vaihtoehtoja kehittää kokonaisuutensa taloudeltaan houkuttelevia yhteistuotantolaitoksia esim. metsäteollisuusintegraatin tai öljynjalostamon yhteydessä. Integroinnin etuna saavutetaan erittäin korkea biomassan käyttöaste: energiahyötysuhde voi olla jopa noin 90 prosenttia. Paperi- ja sellutehdasympäristöön sijoitettavan laitoksen tyypillinen tuotto on 50 000–150 000 tonnia dieselpolttoainetta vuodessa, mikä vastaa 150–400 MW:n biomassasyöttöä. Tehtaalla laitos korvaa kuorikattilan ja noin puolet sen tarvitsemasta raaka-aineesta on omaa kuorta ja toinen puoli lisäbiomassaa, kuten metsätähdettä, ruokohelpiä tai kierrätyspolttoainetta. Myös turve on hyvä lisä- tai varapolttoaine. (Mäkinen ym. 2006)

Metsäyhtiö UPM ryhtyy valmistamaan sellu- ja paperitehtaidensa yhteydessä F-T-dieseliä. Raaka-aineena suunnitellaan käytettäväksi hukkapuuta, risuja, sellutehtaan jäteliemiä ja kuorta. Ensimmäisen laitoksen UPM suunnittelee saavansa valmiiksi noin viiden vuoden sisällä jonkin UPM:n paperitehtaan yhteyteen Isossa-Britannissa, Ranskassa, Saksassa tai Suomessa.

Biojalostamoissa voidaan hyödyntää myös jätteiden sisältämät bioperäiset materiaalivirrat, kuten kaatopaikalle päätyvät eloperäiset jätteet, tasalaatuiset biojätevirrat, kierrätykseen kelpaamattomat ”likaantuneet” paperituotteet ja muut biopohjaiset sivuvirrat (kuva 11). Nykyisten teollisten bioetanolin valmistukseen soveltuvien prosessien raaka-aineet ovat maatalousperäisiä (esim. vilja, sokerijuurikas), jolloin niiden ongelmana ympäristönäkökulmasta on niiden valmistuksen vaatima suhteellisen suuri fossiilisen energian määrä, minkä seurauksena esim. viljapohjaiselle etanolille kasviuonekaasupäästöjen vähenemäksi on arvioitu vain n. 10-15 % verrattuna bensiiniin (KTM 2006). Lignoselluloosapohjaisilla raaka-aineilla, joita jätevirratkin suureksi osaksi edustavat, vähenemä on vähintään 70 % (viljelty ruokohelpi, KTM 2006) tai alempi, jos käytetään esim. metsäbiomassaa. Biomassan saatavuus ja hinta saattavat olla tulevaisuudessa rajoittavia tekijöitä esimerkiksi biopolttoaineiden laajamittaisen käytön ollessa kyseessä (KTM 2006). Suomessa kaatopaikoille ja kompostointiin päätyvä materiaali on identifioitu tärkeäksi potentiaaliseksi raaka-

aineeksi (Mäkinen ym. 2005). Tämä materiaali sisältää myös runsaasti eloperäistä ainesta, esimerkiksi hiilihydraatteja, jotka voitaisiin bioetanolin lisäksi hyödyntää myös sellaisten tuotteiden valmistuksessa, joiden jalostusaste on oleellisesti suoraa energiakäyttöä korkeampi. Näin ollen yhdyskuntajätteitä voidaan myös tarkastella potentiaalisina raaka-aineina biojalostamokonseptissa.



Kuva 11. Etanolin tuotantoon tähtäävän biojalostamon vuokaavio.

Myös jätehuollon osana toimiviksi suunnitelluissa biojalostamoissa biopohjaisia raaka-aineita hyödynnetään kokonaisvaltaisesti ja mahdollisimman tehokkaasti energian tai kemikaalien tuottoon. Eri jakeiden lämpöarvo tai jalostustuotteiden arvo pyritään maksimoimaan ja siten nostamaan koko jalostusketjun arvoa. Prosesseissa hyödynnetään tarpeen mukaan eri tekniikoita: termisiä, kemiallisia tai bioteknisiä menetelmiä. Eri maissa on esitetty raaka-aineista ja paikallisista olosuhteista ja tarpeista riippuen useita erilaisia konsepteja maatalous- tai metsäpohjaisten raaka-aineiden biojalostamoiksi. Sen sijaan yhdyskuntajätteisiin perustuvia biojalostamokonsepteja on selvitetty vähemmän. Hiilihydraatteja hyödyntävissä tyypillisissä biojalostamokonsepteissa raaka-aine hajotetaan pienemmiksi komponenteiksi (sokereiksi) esimerkiksi entsyymaattisella hydrolyysillä ja nämä komponentit konvertoidaan esim. bioteknisesti halutuksi lopputuotteeksi. Esimerkiksi sokeri-, tärkkelys- ja selluloosapitoisista jätteistä voidaan valmistaa hydrolyysin ja fermentoinnin avulla etanolia tai kemikaaleja. Eläinrasvoja ja kasviöljyjä taas voidaan hyödyntää esim. biodieselin valmistukseen. Jätepohjaiset materiaalivirrat ovat jo edullisuutensa vuoksi kiinnostava raaka-ainevaranto.

Neste Oil on kehittänyt uudentyyppisen biodieselprosessin, jolla tuotetaan vetykäsitteilyprosessilla kasviöljyistä ja eläinrasvoista hiilivedyistä koostuvaa biodieselpolttoainetta perinteisen rasvahappoestereistä muodostuvan biodieselin sijasta. Tuotteen kaupallinen nimi on NExBTL, ja se vastaa toisen sukupolven liikennepolttoaineita, sillä sen käyttöön ei liity merkittäviä käyttörajoitteita. Porvoon jalostamolle rakennetaan kaksi biodieseliä valmistavaa tuotantolaitosta. Ensimmäisen laitoksen on määrä käynnistyä kesällä 2007 ja toisen loppuvuodesta 2008. Laitosten tuotantokapasiteetit ovat 170 000 tonnia vuodessa. Prosessin raaka-aineina on kaavailtu käytettävän esimerkiksi Malesiasta tuotavaa palmuöljyä, kotimaisia jäterasvoja ja rypsiöljyä.

Neste Oil ja Stora Enso suunnittelevat koelaitosta puuperäisen synteetikaasun tuottamiseen Stora Enson Varkauden tehtaalle. Puhdistetusta kaasusta valmistetaan raakabiodieseliä Fischer-Tropsch-prosessissa. Laitoksen on määrä käynnistyä 2008, ja sen tuottama lämpö ja sähkö on tarkoitus käyttää paikallisesti. Prosessissa valmistettava raakabiodiesel jalostetaan kaupalliseksi polttoaineeksi Neste Oilin Porvoon jalostamolla.

Jätteen energiakäyttö

Tässä on käsitelty lähinnä jätteen hyödyntämistä energiana polttamalla. Biokaasun tuotantoa on käsitelty luvussa 3.3.1.

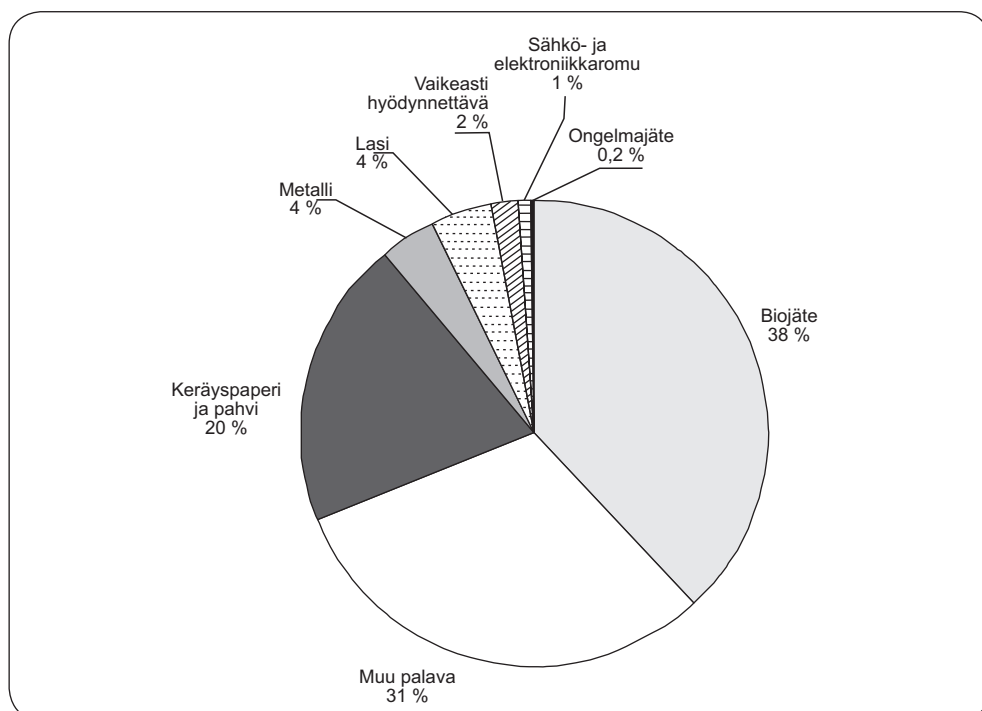
Teollisuudessa, esimerkiksi metsäteollisuudessa, on perinteisesti poltettu sen omia tuotantojätteitä osana energiantuotantoa (vrt. luvut 3.2.1. ja 3.2.2.). Polttokelpoisista teollisuusjätteistä (lähinnä erilaisista puuperäisistä jätteistä ja muoveista) hyödynnetäänkin energiana suurin osa eli viime vuosina noin 8 miljoonaa tonnia vuodessa. Tästä noin puolet on metsäteollisuuden jätettä (jäteliemet, kuori jne.) (Mäenpää ym. 2006). Kaatopaikoille tällaista jätettä päätyy vain noin puoli miljoonaa tonnia vuodessa. Energiahyödynnetyn jätteen osuus teollisuuden kokonaisjättemäärästä on noin 60 prosenttia. (Huhtinen ym. 2007)

Yhdyskuntajätteiden energiana hyödyntämisen menetelmiä ovat kierrätyspolttamiseen poltto, jätteen poltto sitä varten suunnitelluissa kattiloissa ja jätteestä valmistetun kaasun poltto tai käyttö liikennepolttoaineena. Yhdyskuntajätteiden energiahyödynnys on Suomessa ollut toistaiseksi vähäistä. Vuonna 2004 yhdyskuntajätteistä poltettiin 8 prosenttia eli alle 200 000 tonnia vuodessa. Tästä määrästä 50 000 tonnia on sekajätettä, joka poltetaan Suomen toistaiseksi ainoassa jätteenpolttolaitoksessa Turussa. Laitoksen 50 000 tonnin vuosikapasiteetilla tuotetaan lämpöä kaupungin kaukolämpöverkkoon n. 0,36 PJ vuodessa. Sähköä laitokselle joudutaan ostamaan oman tuotannon kulutuksen jälkeen ulkoa. Laitos edustaa kuitenkin vanhaa tekniikkaa, jossa sähköntuotannon hyötysuhde on heikko. Loppuosa yhdyskuntajätteen poltosta on yhdyskuntaperäisten kierrätyspolttoaineiden energiahyödyntämistä rinnakkaispoltona. Kierrätyspolttoaineilla tarkoitetaan erilliskerättyä REF2-3- eli muovi- ja kuituenergiajätettä tai sekajätteestä mekaanisesti valmistettua RDF-kierrätyspolttoainetta. Näitä kierrätyspolttoaineita polttavia laitoksia oli vuoden 2006 lopussa noin kymmenkunta.

Vuodelta 2003 peräisin olevan jätteenpolttoasetuksen (362/2003) vaatimukset tiukensivat vuoden 2006 alusta kaikkien jätettä polttavien laitosten lupaehtoja. Sen seurauksena monet jäteperäisiä polttoaineita käyttäneet energiantuotantolaitokset lopettivat jätteen rinnakkaispolton voimalaitoksissaan. Uusien yhdyskuntajätettä polttoaineenaan käyttävien polttolaitosten rakentamista onkin 2000-luvulla hidastanut lainsäädännöllinen epävarmuus mm. jätteenpolttoasetuksen tulkinnasta. Lisäksi kansalaiset ovat suhtautuneet jätteenpolttoon osin epäilevästi. Jätteenpolttoasetuksen vaatimukset täyttäviä laitoshankkeita oli vuoden 2007 vaihteessa vireillä parisen kymmentä, mutta pitkälliset valitusprosessit ovat kuitenkin hidastaneet lupien myöntämistä. Suunnitella olevissa laitoksissa on sekä pelkkää jätettä polttavia laitoksia (5–7 kappaletta) että kierrätyspolttoaineen rinnakkaispolttolaitoksia. Uutta tekniikkaa edustavia sekajätteen polttolaitoksia on rakenteilla Riihimäelle ja Kotkaan. Suunniteltujen ja jo lupakäsittelyssä olevien jätteenpolttolaitosten yhteensä laskettu kokonaiskapasiteetti poltettavalle yhdyskuntajätteelle on tällä hetkellä ylimitoitettu. Osa suunnitteilla olevista laitoksista on kuitenkin toisilleen vaihtoehtoisia hankkeita. (Huhtinen ym. 2007)

Biohajoavien jätteiden merkitys jätteiden poltossa

Sekajätteen polttoon liittyvissä suunnitelmissa polttoaineena suunnitellaan käytettäväksi syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä. Biojätettä, kuten muitakin hyödynnettäväksi soveltuvia jätejakeita on syntypaikkalajitellussakin sekajätteessä vielä runsaasti, kuten YTV:n alueella tehty tutkimus osoittaa (kuva 12): vaikka pääkaupunkiseudulla on järjestetty erilliskeräys biojätteille, paperille, kartonkipakkauksille, lasille, ongelmajätteille ja jonkin verran metallille ja sähkö- ja elektroniikkaromulle, silti kotitalouksien sekajäte sisältää vielä mm. 38 % biojätettä ja 20 % keräyspaperia ja -pahvia, eli yhteensä 58 % biohajoavaa jätettä.



Kuva 12. Kotitalouksien sekajätteen koostumus YTV:n selvityksen mukaan vuonna 2003. Lähde: YTV (2004).

Pääkaupunkiseudun yhdyskuntajäte poikkeaa todennäköisesti koostumukseltaan jonkun verran muun maan yhdyskuntajätteestä. Turun seudulla saadut lajittelutulokset ovat kuitenkin kotitalouksien sekajätteen osalta pääpiirteissään samansuuntaiset (taulukko 7).

Taulukko 7. Kierrätyskelpoisten materiaalien osuudet sekajätteestä (yhteenvedo tutkimuksista YTV 2004, Jokinen 2005, Roström ja Uggeldahl 2003). Huom! Taulukkoon on poimittu vain ne jakeet, jotka voisivat olla hyödynnettävissä materiaalina tai energiana.

Jätejakee	Osuus kotitalouksien tai asuin- kiinteistöjen sekajätteessä (%)		Osuus palvelusektorin sekajätteessä	
	Turun seudulla ¹	YTV:n alueella	Turun seudulla ²	YTV:n alueella ³
Keräyskelpoinen paperi ja pahvi	9 – 16	20	9	9 – 30
Paperijäte	5 – 7		4	
Muu paperi, pahvi ja kartonki				1 – 9
Lasi	2 – 4	4	1	<1 – 3 ⁴
Metalli	2 – 3	4	1	<1 – 4 ⁴
Muovi			24	12 – 20
Tekstiilit ja vaatteet				<1 – 3 ⁴
Muu palava aines, josta	30 – 32	31	6 ⁵	2 – 4 ⁶
– muovia		44		
– puuta		9		
– tekstiilejä		14		
Biojäte / Eloperäinen aines	33 – 41	38	54	9 – 55 ⁷

¹ Tulokset omakotitaloalueelta, kerrostaloalueelta sekä asuin-/liikekerrostaloista.

² Palvelusektorilta vain vähittäiskauppa mukana selvityksessä.

³ Mukana kauppa, ravintolat ja hotellit, koulut, sairaalat ja toimistot.

⁴ Luvut poimittu pylvädiagrammista, eivät ole tarkkoja.

⁵ Puu + muu palava.

⁶ Tässä selvityksessä sekajätteestä oli lajiteltu useita jakeita, jotka muissa selvityksissä on laskettu mukaan muuhun palavaan ainekseen. Tämä luku ei siksi ole verrattavissa muihin.

⁷ Elintarvikejäte + puutarha- ja muu biojäte.

Kierrätyspolttoaineet eli REF1-3-laatuluokkien polttoaineet ovat pääasiassa puukuitupohjaista jätettä (puuta, paperia, pahvia) sekä muovia. Biohajoava osuus eli kuitujen määrä valmistetussa REF-polttolainneessa riippuu asukkaiden lajittelu- ja kulutuskäyttäytymisestä ja on YTV:n alueella ollut hieman alle 50 massa-% (Suunnittelukeskus Oy 2003).

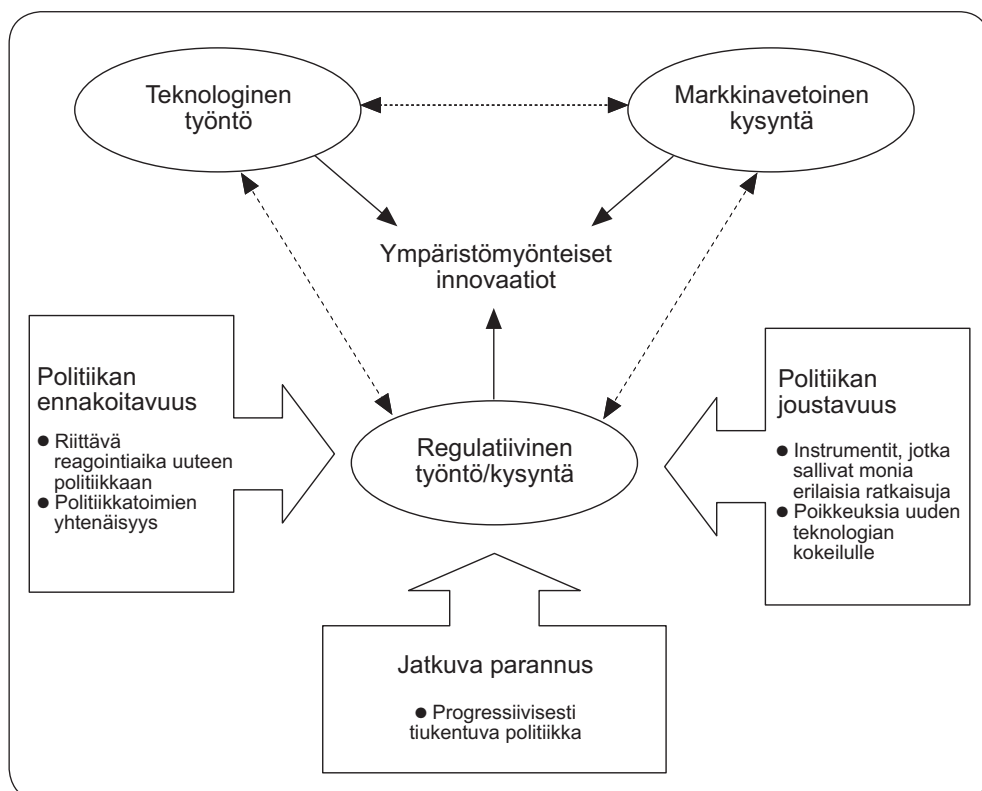
3.6

Bioenergian tulevaisuuden tuotantotavat ja niihin vaikuttavat tekijät

Edellä on pääosin käsitelty vakiintuneita bioenergian tuotantoprosesseja. Bioenergian kehityksen kannalta on kuitenkin tärkeää, miten olemassa oleva teknologia otetaan käyttöön sekä se, miten uusia innovaatioita syntyy. Perinteisesti suomalainen innovaatiopolitiikka on perustunut laajalti teknologiseen työntöön (technology push), siis ideaan, että uutta teknologiaa edesautetaan suuntaamalla toimenpiteitä teknologian tarjontaan vaikuttaviin tekijöihin, esimerkiksi tukemalla julkisilla varoilla tutkimus- ja kehitystyötä tai uuden teknologian riskirahoitusta. Myös bioenergian alueella tutkimusta ja tuotekehitystä on tuettu laajasti useiden vuosikymmenien aikana, mm. puuenergiaan kohdistuvien tutkimusohjelmien kautta. Innovaatiotutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että myös kysynnällä on merkittävä vaikutus teknologiseen kehitykseen (kuva 13). Monet innovaatiotutkijat suosittelivatkin kysyntäpainotteisen innovaatiopolitiikan lisäämistä (esim. Georghiou 2006), tai teknologisen kysynnän (market pull) lisäämistä. Keskeisiä instrumentteja voivat tällöin olla esimerkiksi julkiset hankinnat tai säädökset ja normit. Vaatimus siitä, että liikenteen polttoaineista 5,75 % tulisi olla biopohjaisia, edustaa juuri tätä lähestymistapaa. Tällä säädöksellä edistetään biopolttolainneiden kysyntää, mutta poliittisesti ei oteta kantaa siihen, miten kyseiset biopolttolainneet tuotetaan.

Julkisella tutkimus- ja kehitystyöllä ja sen rahoituksella on ollut ja tulee jatkosakin olemaan merkittävä vaikutus tulevaisuuden tuotantotapoihin. Tutkimus- ja kehitystyön tuella voi olla erityisen suuri merkitys bioenergian osalta, sillä metsä- ja maatalous ovat molemmat aloja, jotka ovat panostaneet poikkeuksellisen vähän omia resursseja tutkimukseen ja tuotekehitykseen (Rantala 2006). Ideat uusien teknologioiden taustalla voivat syntyä "vahingossa" perustutkimuksen seurauksena. Esimerkiksi mahdollisuus rikkipäästöjen vähenemiseen mustalipeän poltossa huomattiin sattumalta, kun mustalipeää energiaksi polttavien soodakattiloiden tehostamista tutkittiin 1970-luvulla (Kivimaa ja Mickwitz 2004, Kivimaa 2007b). Tekniset ratkaisut biopolttolainneiden tuottamiseksi mustalipeän tai biomassan kaasutuksen avulla takautuvat 1980-luvulla tehtyyn tutkimustyöhön Suomessa ja Ruotsissa (Kivimaa ym. 2007). Tällöin mustalipeän energiakäytön tehostamista tuettiin useissa tutkimusohjelmissa, kuten esimerkiksi KTM:n rahoittamissa LIEKKI (1988–1992) ja JALO (1988–1992) -ohjelmissa. Ilman julkisesti rahoitettua perustutkimusta monet ympäristöinnovaatiot voisivatkin jäädä syntymättä. Yksityisen rahoituksen saatavuus ja asiakasyritysten kiinnostus on puolestaan elintärkeää teknologian kaupallistumisvaiheessa (Kivimaa ym. 2007).

Ympäristöpolitiikalla on todettu olevan merkittävä vaikutus ympäristömyönteisen teknologian syntyyn ja erityisesti sen leviämiseen (Hemmelskamp 1997, Kemp 1997, 2000, Norberg-Bohm 1999, Ashford 2005). Ilmansuojelupolitiikka on yhdessä kotimaisen energiantuotannon tukemisen kanssa edistänyt uusien mustalipeän polttoon suunniteltujen soodakattiloiden ja niihin liittyvien päästövähennystekniikoiden jatkokehitystä ja käyttöönottoa tehtäillä sekä ennakoinnin että varsinaisten lupamääräysten kautta (Kivimaa ja Mickwitz 2004). Täten politiikka on vaikuttanut



Kuva 13. Uuteen teknologiaan vaikuttavat sekä tarjonta että kysyntä. Kaavio perustuu Renningsin (2000) ja Kivimaan (2007b) malleihin.

osaltaan nykyisen bioenergiakapasiteetin syntymiseen, kun massa- ja paperiteollisuuden kasvaessa ympäristölupamääräykset ovat edellyttäneet tehokasta mustalipeän polttoa. Erityisesti, jos uuden teknologian alkukustannukset tai riskit ovat olleet korkeat suhteessa markkinoiden yleiseen kustannustasoon, ympäristöpolitiikan luomat erityismarkkinat ovat olleet tärkeitä uuden teknologian kaupallistamisessa. Mustalipeän ja biomassan kaasutusteknologiaa on kehitetty jo 1980-luvulla monen teknologiayrityksen toimesta. Kaasutuksen kehitys ajautui säästöliekille 1990-luvulla vaikka riittävät tiedot suurimittaisen prototyypin rakentamiseksi olivat jo olemassa (Kettunen 2002), joten teknologioiden kaupallistumisvaihe on jäänyt saavuttamatta. Vasta öljyn hinnan noustessa ja EU:n biopolttoainedirektiivin kautta metsäteollisuusyritykset ovat kiinnostuneet ottamaan käyttöön biokaasutusteknologiaa, jota voidaan soveltaa muun muassa liikenteen biopolttoaineiden tuotantoon; direktiivi on luonut markkinat uudelle teknologialle, kun taas öljyn hinnan nousu on lisännyt biopolttoaineiden kilpailukykyä (Kivimaa ym. 2007).

4 Bioenergian tuotannon elinkaariset ympäristövaikutukset

4.1

Elinkaariarviointi bioenergian ympäristövaikutusten arvioinnissa

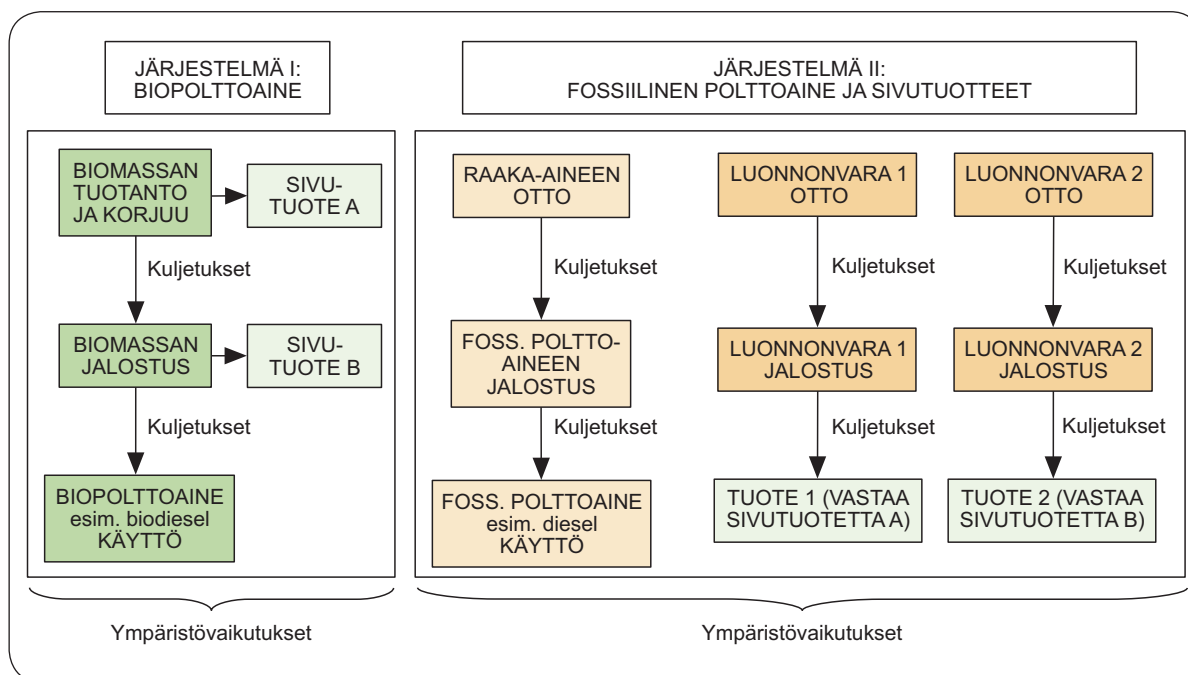
Liikenteen biopolttoaineiden valmistus ja käyttö ovat nopeassa kasvussa niin kansallisesti kuin kansainvälisestikin (ks. liite 1). Ainoastaan osa Suomessa tulevaisuudessa käytettävästä liikenteen biopolttoaineesta voidaan tuottaa Euroopassa. Palmuöljyn tuonti biodieselin raaka-aineeksi Malesiasta ja Indonesiasta kasvaa nopeasti. Brasiiliasta puolestaan tuodaan Eurooppaan etanolia biobensiinin tuotantoa varten. Tuotannon nopea kasvu uhkaa aiheuttaa ekologisia ja sosiaalisia ongelmia raaka-aineen tuotantomaissa. Oman kansallisen tuotannon ja tuontiraaka-aineiden välisen oikean tasapainon löytäminen edellyttää hyvää tietämystä koko elinkaariketjun ympäristövaikutuksista sekä eri vaihtoehtojen taloudellisista ja sosiaalisista vaikutuksista.

Biomassaa voidaan käyttää myös muun bioenergian kuin liikenteen biopolttoaineiden tuotantoon, mikä Suomessa on ollutkin vallitseva käytötapa jo pitkään. Lisäksi saattaa olla tarpeen arvioida, kannattako biomassaa käyttää energiantuotantoon vai materiaalina esimerkiksi ravinnoksi tai rehuksi, paperiksi, rakennusmateriaaliksi tai lääkeaineiden materiaaliksi. Elinkaaritarkastelun avulla voidaan verrata tietyn biomassan eri elinkaariketjujen ympäristöominaisuuksia toisiinsa ja arvioida eri ketjujen mielekkyyttä esimerkiksi kasvihuonekaasupäästöjen kannalta.

Elinkaariarviointi mahdollistaa myös eri tuotantotapojen keskinäisen vertailun. Tulosten tulkinta riippuu paljolti valitusta vertailukohteesta. Bioenergian tuotantojärjestelmän ympäristömyötävyyden arvioinnissa vertailukohteena on tavallisesti vastaavan energian tuottava fossiilisiin polttoaineisiin perustuva tuotantojärjestelmä. Lopputuloksen kannalta on olennaista, että eri tuotantojärjestelmien sivutuotteet on otettu oikealla tavalla huomioon vertailussa. Sivutuotteiden käyttö aiheuttaa ympäristöhyötyjä niitä muodostavalle tuotantojärjestelmälle, koska niiden hyötykäytön seurauksena vältetään vastaavia tuotteita valmistavat toiminnot ja niiden ympäristövaikutukset (kuva 14, ks. myös kohta 3.1). Periaatteessa laskelmissa ei saa tehdä hyvityksiä, jos sivutuotteita ei pystytä hyödyntämään.

Sivutuotteita ja vertailukohteita koskevien menettelyjen lisäksi bioenergiaa käsittelevien elinkaaritutkimusten ongelmana ja niiden tulkintaa vaikeuttavana tekijöinä ovat usein systeemin rajaus ja puutteellisuus, esimerkiksi, mitkä raaka-aineet on jätetty tarkastelun ulkopuolelle, mikä on tarkasteltu teknologia ja esimerkiksi mikä on biopolttoaineen ja fossiilisen polttoaineen sekoitussuhde (Quirin ym. 2004, Farrel ym. 2006). Tulokset riippuvat myös muista lähtöolettamuksista kuten lannoitteiden käyttömääristä, satotasosta ja kuljetusmatkoista. Merkittävää on myös, mikä on oletettu biopolttoaineen tuotannon energianlähteeksi (fossiilinen vai uusiutuva). Tulokset riippuvat myös siitä, mihin ne suhteutetaan – lasketaanko tulokset esimerkiksi pinta-alaa, kuljettua matkaa vai polttoaineen energiasisältöä kohden. Lisäksi monia raaka-aineita tutkittu vain vähän tai ei lainkaan. Esimerkiksi kookosöljypohjaisen ja orgaanisista jätteistä valmistettujen biopolttoaineiden tutkimustarve on suuri (Quirin ym. 2004).

Kasvihuonekaasupäästöjen väheneminen on yksi tärkeimpiä bioenergiaa puoltavia tekijöitä. Bioenergian tuotannolla ja käytöllä on myös muita ympäristövaikutuksia, joiden huomioon ottaminen on tärkeää kokonaisuutta arvioitaessa. Tällaisia ovat muun muassa happamoittavat, rehevöittävät, toksiset, hiukkas- ja alailmakehän otso-



Kuva 14. Bio- ja fossiiliin polttoaineisiin perustuvan tuotantojärjestelmän ympäristövaikutusten arvioinnin periaate elinkaariarvioinnissa. Järjestelmien I ja II aiheuttamia ympäristövaikutuksia vertaillaan toisiinsa (mukaeltu Concawen ym. 2006 perusteella).

nia muodostavat päästöt sekä maankäyttöön liittyvät muutokset, jotka vaikuttavat luonnon monimuotoisuuteen ja maaperän tuottokykyyn.

Liikenteen biopolttoaineiden elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia on viime aikoina aiheen ajankohtaisuudesta johtuen selvitetty useissa tutkimuksissa. *Bioetanolin* elinkaaren aikaisia energiataseita ja ympäristövaikutuksia on tutkittu erilaisiin raaka-aineisiin perustuen. Vehnäetanolia ovat tutkineet mm. Bernesson ym. (2006), maissietanolia Ulgiati (2001), Kim ja Dale (2005a, 2005b), Patzek ym. (2005), Farrell ym. (2006) ja Hill ym. (2006), selluloosaetanolia Fu ym. (2003), Kemppainen ja Shonnard (2005) ja Farrell ym. (2006), maniokkietanolia Hu ym. (2004), sokeriruokoetanolia Tzilivakis ym. (2005) ja sokeriruokojäte-etanolia Kadam (2002). Murphy ja McCarthy (2005a, 2005b) ovat tutkineet sokerijuurikkaasta ja jätepaperista valmistettua etanolia sekä biokaasua. *Biokaasun* ympäristövaikutuksia ovat selvittäneet myös Börjesson ja Berglund (2003).

Biodieselin (soijasta, kookosöljystä) elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia ovat tutkineet mm. Tan ym. (2004), Kim ja Dale (2005b) ja Hill ym. (2006). Janulis (2004) on tutkinut soijapohjaisen ja Nelson ja Schrock (2006) naudanasvapohjaisen biodieselin energiataloutta. Myös palmuöljyn tuotannosta Malesiassa on tehty elinkaariarviointi (Yosoff ja Hansen 2005). Eri liikennepolttoaineita elinkaarimenetelmällä ovat vertailleet myös mm. Lave ym. (2000) ja MacLean ym. (2000, 2003).

Sveitsissä on käynnissä hanke, jossa kerätään useiden bioenergiamuotojen elinkaari- ja ympäristötietoja ja tehdään vaihtoehtoisille elinkaariarvioinnit (ESU-services 2006). Hankkeessa tutkitaan etanolin, metanolin, biokaasun, BTL-polttoaineiden ja kasviöljyjen tuotantoa ja käyttöä Sveitsissä. Maataloustuotteista ovat mukana mm. nurmi, oljet ja rapsi. Lisäksi tutkitaan Sveitsiin tuotavan bioenergian sekä perinteisten energiatuotteiden kuten bensiinin tuotantoa ja käyttöä. Kerätty tieto kootaan Ecoinvent-elinkaari tietopankkiin ja se tulee saataville tietopankin seuraavan päivityksen yhteydessä (2007). Hanke on Sveitsin liittovaltion energia-, ympäristö- ja maatalousorganisaatioiden rahoittama ja sitä koordinoi ESU-services.

Biomassan käytöstä sähkön ja/tai lämmön tuotantoon on myös tehty useita elinkaari-tarkasteluja. Useimmiten ne koskevat sähköntuotantoa (esim. Heller ym. 2004, Skodras ym. 2004, Quin ym. 2006), ja yhdistetty sähkön ja lämmön tuotantoa tarkasteltu harvemmin (esim. Dornburg ja Faaji 2001, Eriksson ym. 2007). Kuitenkin esimerkiksi Eriksson ym. (2007) vertailivat elinkaariarvioinnilla kaukolämmön tuotantoa jätteistä, puubiomassasta tai maakaasusta. Tuotantomenetelminä olivat yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto ja kaukolämmön erillistuotanto. Näistä yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto oli ympäristövaikutusten kannalta edullisempi vaihtoehto. Myös Dornburg ja Faaji (2001) totesivat, että puuperäiseen biomassaan perustuvassa energiantuotannossa yhdistetty sähkön- ja lämmön tuotanto oli energiatehokkain, vaikkakaan ei kustannustehokkain, vaihtoehto kaasutukseen ja sähkön tuotantoon verrattaessa.

Bioenergian elinkaaritutkimuksissa on keskitytty kasviuonekaasupäästöihin ja energiataseisiin. Muita päästöjä ilmaan on tutkittu melko kattavasti, mutta vesistöjen rehevöityminen, eroosio, monimuotoisuuden väheneminen ja maan laadun heikkeneminen on pääsääntöisesti jätetty pois biopolttoaineiden elinkaaritutkimuksista (Farrell ym. 2006; liite 3). Monimuotoisuuden ja maan laadun osalta tämä johtuu sekä menetelmällisistä että lähtötietojen puutteellisuudesta. Myös toksisten parametrien (esim. formaldehydi, bentseeni, PAH-yhdisteet) sekä pienhiukkasten päästötiedoissa on merkittäviä puutteita. Vaikutusarvioinnin osalta on merkittävää, missä päästöjen on ajateltu tapahtuvan. Erityisen olennainen tämä on hiukkasten terveysvaikutus- ja toksisuuskyseissä, joissa haitta-aineita vastaanottavan ympäristöosan merkitys on suuri tulosten kannalta.

Seuraavissa luvuissa esitetään kirjallisuuteen ja asiantuntija-arvioihin perustuen, mitä bioenergian elinkaarikehityksen eri vaiheiden ympäristövaikutuksista tiedetään ja mitä tiedonpuutteita on havaittu. Tarkastelu tehdään ympäristöongelmittain. Lisäksi lopuksi esitetään karkea yhteenveto eri bioenergiavaihtoehtojen ympäristövaikutuksista.

4.2.

Ilmastonmuutos

Ilmastonmuutoksella tarkoitetaan ihmisen toiminnan seurauksena voimistunutta kasvihuoneilmiötä. Ilmastonmuutosta aiheuttavat varsinaiset kasvihuonekaasut ovat hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄), dityppioksidi (N₂O), F-kaasut (HFC- ja PCF-yhdisteet), rikkiheksafluoridi (SF₆) ja halogenoidut hiilivedyt (lähinnä CFC- ja HCFC-yhdisteet). Välillisiä kasvihuonekaasuja ovat haihtuvat hiilivedyt (VOC), typen oksidit (NO_x) ja hiilimonoksidi, sillä ne muodostavat otsonia (O₃). Hiilidioksidia pidetään merkittävimpänä ilmastonmuutosta voimistavana tekijänä.

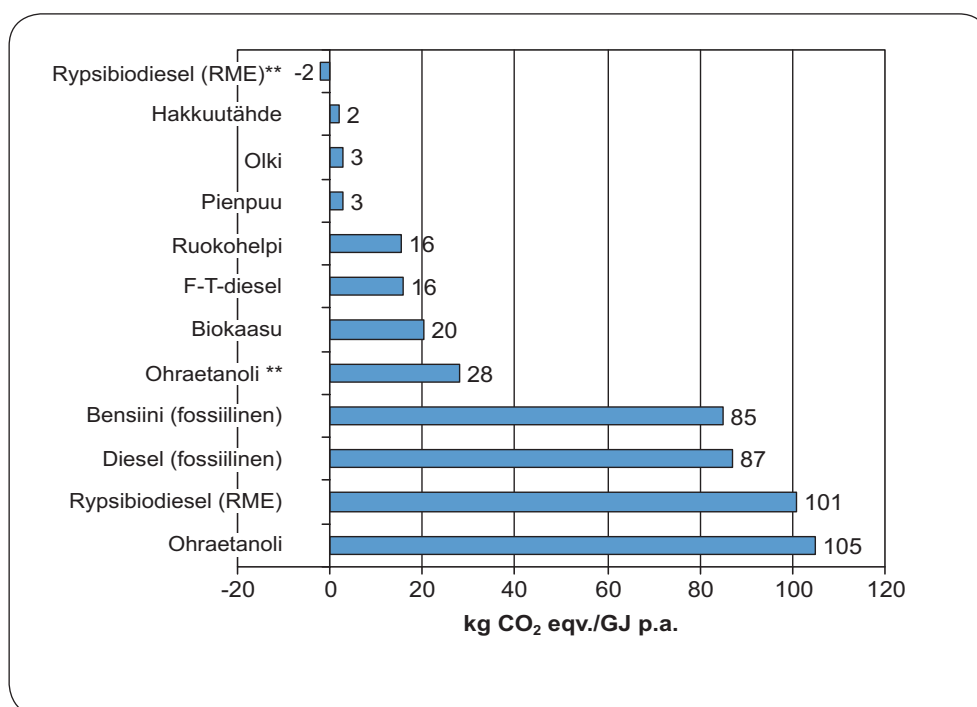
Hiilidioksidin merkittävin päästölähde on fossiilisten polttoaineiden käyttö. Bioenergian käyttö ei lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta edellyttäen, että uutta biomassaa kasvaa yhtä paljon kuin sitä käytetään. Näin ollen biopolttoaineiden poltossa vapautuvaa hiilidioksidia ei oteta mukaan elinkaariarvioinneissa laskettaessa biopolttoaineiden kasvihuonekaasupäästöjä. Kuitenkin elinkaariajattelun periaatteiden mukaan biopolttoaineiden käytön ilmastonmuutosvaikutusta tulee tarkastella ottaen huomioon koko elinkaarikehityksen aikaiset kasvihuonekaasupäästöt. Tällöin tarkasteltavaksi tulevat mm. peltoenergian tuotannon aikaiset, bioenergian viljelyssä käytettävien lannoitteiden valmistuksessa aiheutuvat ja maatalous- ja metsäkoneiden sekä kuljetusten aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt.

Sähkön ja lämmön tuotanto

Bioenergian käyttö yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa antaa parhaan kasvihuonekaasuvähennyksen (Eriksson ym. 2007). Hakkuutähteen, oljen ja pienpuun

suoran polton kasviuonekaasupäästöt ovat vain muutama hiilidioksidiekvivalenttikilo polttoaineen energiasisältöä (GJ) kohden (kuva 15).

Karkeasti arvioituna puun tuotannon ja polton aiheuttamat fossiilisten polttoaineiden käytöstä peräsin olevat hiilidioksidipäästöt ovat voimalaitosmittakaavassa monikymmenkertaisesti alhaisemmat verrattuna maakaasun, kivihiilen ja turpeen tuotannon ja polton vastaaviin päästöihin (Dahlbo ym. 2005, Seppälä ym. 2006, EcoInvent 2006, SYKEN ilmapäästörekisteri 2007). Maakaasun tuotannon ja polton CH₄-päästöt ovat yli satakertaiset verrattuna puun tuotantoon ja polttoon ja turpeen tuotannon ja polton N₂O -päästöt noin kaksinkertaiset verrattuna puun tuotannon ja polton vastaaviin päästöihin. Kasviuonekaasujen elinkaariset päästöt puun poltosta ovat myös huomattavasti pienemmät kuin öljylämmityksen.



Kuva 15. Eräiden polttoaineiden tuotannon ja polton kasviuonekaasupäästöjä polttoaineen energiasisältöä kohden. Rypsibiodieselin ja etanolin päästöt on laskettu sekä ilman oljen energiahyödyntämistä että olettaen, että olki korvaa turvetta (**) energian tuotannossa. Oljen, hakkuutähteen ja pienpuun luvuissa ovat mukana vain korjuun, kuljetuksen ja valmistuksen päästöt. Fischer-Tropsch diesel (F-T-diesel) on valmistettu hakkuutähteestä. Biokaasu on valmistettu tavanomaisesti viljelystä ruokohelplistä, jota on lannoitettu biokaasutuksessa syntyvällä mädätteellä. Fossiilisen bensiinin polton päästöt muodostavat 86 % ja dieselin 84 % niiden koko ketjun päästöistä. Kaavio perustuu lähteisiin Mäkinen ym. 2006 ja Tuomisto 2006.

Liikennepolttoaineet

Biomassan jalostaminen liikennepolttoaineiksi vaatii energiaa ja lisää yleensä myös kasviuonekaasupäästöjä.

Vaikka biopolttoaineiden raaka-aine on uusiutuvaa, voivat polttoaineiden koko elinkaaren aikaiset kasviuonekaasupäästöt olla jopa suuremmat kuin vastaavalla tavalla lasketut fossiilisten polttoaineiden päästöt (kuva 15). VTT:n ja MTT:n tutkimuksessa (Mäkinen ym. 2006) ohrasta valmistetun etanolin kasviuonekaasupäästöt perinteiseen kyntöön perustuvalla viljelyllä ovat 105 kg CO₂-ekv./GJ polttoainetta, kun olkea ei hyödynnetä energiana (kuva 15). Samaa suuruusluokkaa ovat myös rypsistä valmistetun biodieselin (RME) kasviuonekaasupäästöt. Rypsistä valmistetun biodieselin (RME) ja ohrasta valmistetun bioetanolin elinkaariset kasviuonekaasupäästöt

ovat noin 20 % suuremmat kuin fossiilisten dieselin ja bensiinin tuotannon ja käytön kasvihuonekaasupäästöt. Tutkimuksen perusteella ruokohelpipohjaisen Fischer-Tropsch -dieselin kasvihuonekaasupäästöt olivat vain noin kolmasosa fossiilisten vertailupolttoaineiden tuotannon kasvihuonekaasupäästöistä ja hakkuutähdepohjaisen Fischer-Tropsch -dieselin noin viidesosa. Etanolin ja biodieselin elinkaariketjuissa lannoitteiden valmistuksen ja maaperän N₂O-päästöt aiheuttavat merkittävää epävarmuutta tuloksiin. (Mäkinen ym. 2006)

VTT:n ja MTT:n tutkimuksen mukaan, jos ohran olki voitaisiin korjata joka toinen vuosi talteen ja hyödyntää turpeen korvaamiseen sähkön ja/tai lämmön tuotannossa ja tästä saatava hyöty kasvihuonekaasujen päästöjen vähentymisessä laskettaisiin ohraetanolin hyväksi, alentuisivat ohraetanolin tuotannon oletuskertoimilla lasketut kasvihuonekaasupäästöt perinteiseen kyntöön perustuvalla viljelyllä 28 kg CO₂-ekv./GJ polttoainetta eli noin 70–80 %. Vastaava alenema RME:lle rypsin korren hyötykäytön seurauksena olisi noin 100 % (kuva 15).

Ulkomaisissa tutkimuksissa viljaetanolin ja biodieselin kasvihuonekaasutaseet ovat suotuisimmat kuin VTT:n ja MTT:n tutkimuksessa. Esimerkiksi Concawen, EU:n JRC:n ja EUCAR:n tutkimuksessa (Concawe ym. 2006) vehnäetanolin ja biodieselin (RME) koko elinkaariketjujen kasvihuonekaasupäästöt ovat keskimäärin noin puolet Mäkisen ym. esittämistä arvoista. Tutkimuksen mukaan perinteisesti valmistettujen bioetanolin ja biodieselin kasvihuonekaasupäästöt riippuvat voimakkaasti tuotantoprosessista ja sivutuotteiden käytöstä. Samoin kuin Mäkisen ym. (2006) tutkimuksessa suurin epävarmuus liittyy maatalouden N₂O päästöihin.

Ruotsalaisen tutkimuksen (Bernesson ym. 2006) mukaan kasvihuonekaasupäästöt ovat vain noin 30 % Mäkisen ym. (2006) ohraetanolille laskemista arvoista, kun rehurouheella korvataan soijarehua ja olkia ei hyödynnetä. Ero johtunee noin 40-70 % suuremmasta satotasosta, pienemmästä lannoitteiden käyttömäärästä, uusiutuvien energianlähteiden käytöstä prosessissa sekä eroavaisuuksista lähtöarvoissa mm. N₂O-päästöjen osalta (Tuomisto 2006). Tan ym. (2004) tutkivat kookosöljystä valmistettavan biodieselin elinkaaren aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna fossiilisen dieselin päästöihin. Biodieselin nettokasvihuonekaasuvähennys oli 77–104 g/MJ. Suuri vähenemä johtui suuresta raaka-aineresurssista (paljon biomassajäännöstä) ja kookospalmujen perinteisten viljelymenetelmien vähäisestä energiantarpeesta. Toisaalta perinteisten viljelymenetelmien tuotto on alhainen, mikä rajoittaa kookosbiodieselin tuotantopotentiaalia.

Mäkisen ym. (2006) tutkimuksessa on oletettu, että energian tuotantoon tulevat pellot ovat kesantopeltoja. Tehdyllä oletuksella ei ole ratkaisevaa merkitystä, jos käytetään jo olemassa olevia peltoja, koska viljelyn aiheuttama ympäristökuormitus kohdennetaan viljeltävälle kasville riippumatta siitä, käytetäänkö se energiantuotantoon tai esimerkiksi rehuksi.

EU:n komissio (EC 2006) on koonnut eurooppalaisissa tutkimuksissa saatuja kasvihuonekaasuvähennymiä verrattuna vastaaviin fossiilisiin polttoaineisiin bioetanolia sokerijuurikkaasta ja viljasta sekä biodieseliä rapsista valmistettaessa. Kasvihuonekaasuvähennemä korvattaessa vastaavia fossiilisia polttoaineita on kerätyn aineiston perusteella keskimäärin 20–60 % viljaetanolille ja rapsibiodieselille.

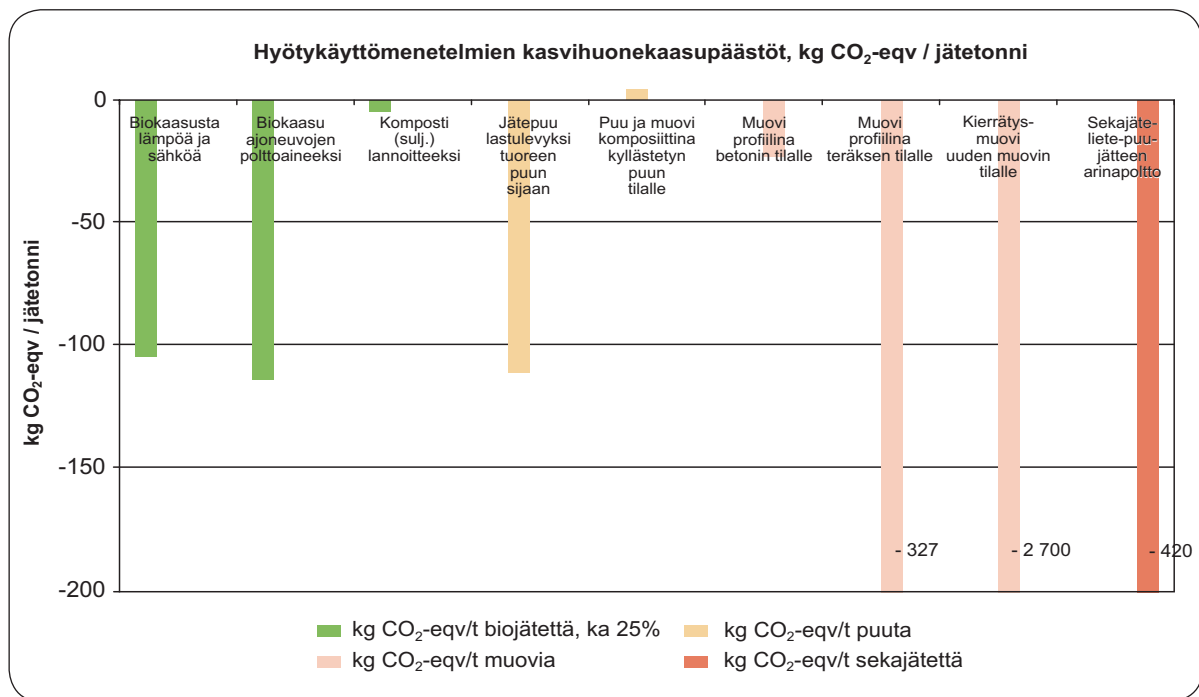
Saksalaisen energia- ja ympäristötutkimusinstituutti (IFEU 2004) on analysoinut noin 60 elinaariarviointiin perustuvaa liikenteen biopolttoaineiden energia- ja kasvihuonekaasututkimusta. Analysoidun aineiston perusteella saavutetaan energia- ja kasvihuonekaasusäästöjä sekä vehnästä valmistetun etanolin että rapsista valmistetun biodieselin (RME) tapauksessa. Tulosten keskinäinen hajonta on kuitenkin erittäin suuri.

Biokaasun tuotannon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt ovat huomattavasti pienemmät kuin viljaetanolin ja öljykasveista valmistetun biodieselin. Esimerkiksi Helsingin yliopistolla tehdyn selvityksen (Tuomisto 2006) mukaan peltobiokaasun

(nurmi ja ruokohelpi) kasvihuonekaasupäästöt ovat noin 23–42 % fossiilisen bensiinin tai dieselin päästöistä. Vastaavasti lannasta, elintarviketeollisuuden jätteistä ja orgaanisesta yhdyskuntajätteestä valmistetun biokaasun kasvihuonekaasupäästöt ovat vain noin 13–23 % fossiilisen bensiinin tai dieselin päästöistä. Tuomiston (2006) tutkimus on tehty noudattaen samoja periaatteita oletusten ja rajausten suhteen kuin Mäkisen ym. (2006) tutkimus. Biokaasun kasvihuonepäästöistä on samaan suuntaisia tuloksia esitetty esimerkiksi lähteissä Berglund ja Börjesson (2006) ja Concawe ym. (2006).

Jätteet

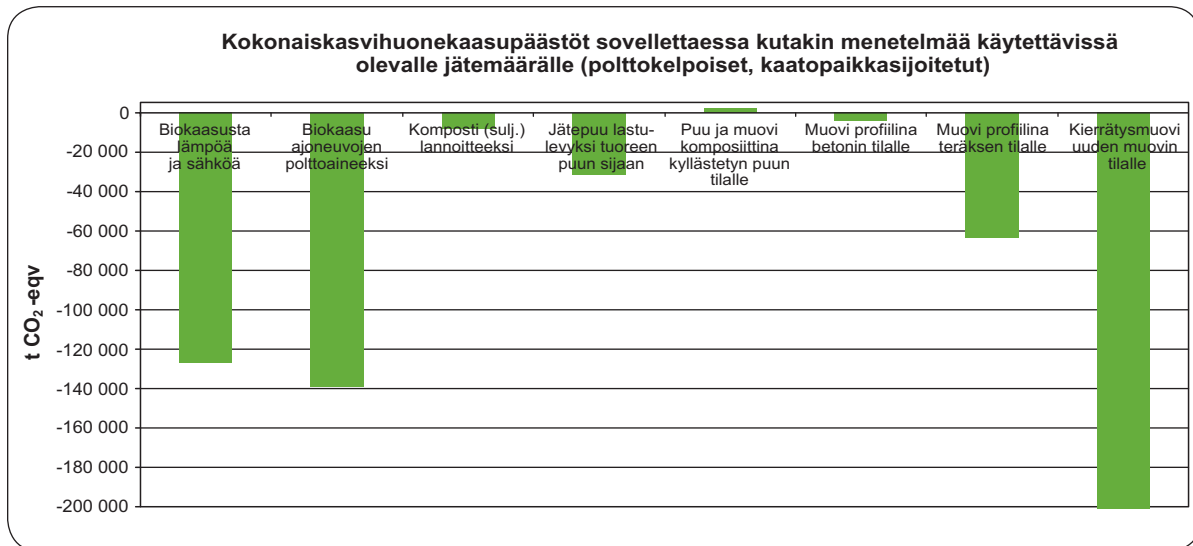
Valtakunnallista jättesuunnitelmaa varten tehdyssä taustaselvityksessä (Myllymaa ym. 2006) laskettiin kaatopaikalle päätyvien polttokelpoisten eli orgaanisten jätteiden energia- ja materiaalihyödyntämisen vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin. Kuvassa 16 on esitetty eri hyödyntämismenetelmien säästöpotentiaali kyseisellä menetelmällä hyödynnettävissä olevaa jätetonnia kohti. Biojätteen osalta selvästi enemmän hyötyä saavutetaan mädätyksellä ja tästä syntyvän biokaasun käytöllä kuin kompostoinnilla. Kompostoinnin osalta laskelmissa ei kuitenkaan ole mukana kompostituotteen positiivinen vaikutus maan koostumukseen.



Kuva 16. Jätteiden hyödyntämisellä saavutettavat kasvihuonekaasupäästöjen säästöt eri hyötykäyttömenetelmillä hiilidioksidiekvivalenteina jätetonnin kohti. Polttomenetelmistä kuvaan on valittu arinapoltto. (Lähde: Myllymaa ym. 2006).

Jätteen energiahyödyntämisen osalta kasvihuonekaasupäästöjen säästöpotentiaalın laskennassa otettiin huomioon ne päästöt, jotka voidaan välttää kun jätteestä saatavalla energialla korvataan jollakin muulla tekniikalla ja polttoaineella valmistettua energiaa. Säästön suuruus riippuu monesta tekijästä, mm. energiantuotannon hyötysuhteista sekä korvattavasta polttoaineesta. Kuvassa 16 esitettävän arinapolton säästöpotentiaalın laskennassa jäteperäisellä energialla on korvattu kivihiiltä käytävällä CHP-laitoksella tuotettua energiaa.

Materiaalihyödyntämiskonseptien kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa otettiin huomioon tuotanto- ja valmistusprosessin päästöt (eli jätteen sisältämän hiilen ja typen päätyminen ilmapäästöiksi) sekä prosessien energiankulutus ja sen päästöt.



Kuva 17. Hyötykäyttömenetelmillä saavutettavat kasviuonekaasujen maksimisäästöt sovellettaessa menetelmiä koko kaatopaikalle päätyvälle jätemäärälle. Kolme alimmaista pylvästä kuvaavat kaatopaikalle päätyvän biojätteen ja lietteen hyödyntämisvaihtoehtojen säästöpotentiaalia. (Lähde: Myllymaa ym. 2006).

Lisäksi esitetään arvioita niiden tuotteiden valmistuksen ja energiankulutuksen kasviuonekaasupäästöistä, joita kierrätystuotteiden käyttö korvaa.

Jotta eri hyödyntämismenetelmien kokonaisvaikutukset ja -päästösäästöt voitaisiin arvioida, on eri menetelmien päästöt ja päästösäästöt painotettava valtakunnallisesti syntyvien polttokelpoisten jätteiden materiaalikohtaisilla määrillä (kuva 17).

Sekä jätteen energia- että materiaalihyödyntämisellä saavutettavat ympäristöhyödyt ovat hyvin paljon sidoksissa kulloinkin tarkasteltavaan alueeseen. Alueelliset piirteet jätteiden määrissä ja laadussa, kuljetusetäisyyksissä, energiahuollossa, infrastruktuurissa, elinkeinorakenteessa ja sitä kautta materiaalien hyötykäyttömahdollisuuksissa jne. vaikuttavat kuitenkin siihen, mikä ratkaisu millekin alueelle soveltuu parhaiten.

4.3

Yläilmakehän otsonin väheneminen

Yläilmakehän otsonikerroksen ohenemisella tarkoitetaan stratosfäärin otsonin määrän vähenemistä. Ilmiötä aiheuttavia aineita ovat CFC-aineet, halonit, hiilitetrakloridi, 1,1,1-trikloorietaani ja metyylibromidi. Bioenergian elinkaarikehityksen vaikutukset yläilmakehän otsonin vähenemiseen ovat vähäiset. Kuitenkin fossiilisten liikennepolttoaineiden jalostuksessa muodostuu yläilmakehän otsonikatoa aiheuttavia päästöjä, ja näin ollen bioenergia on kyseisen ympäristövaikutusluokan kannalta parempi vaihtoehto (Fu ym. 2003).

4.4

Happamoituminen

Happamoitumisella tarkoitetaan maaperän ja vesistöjen heikentynyttä kykyä puskuroida happamoitettavaa laskeumaa. Happamoituminen on haitallista monille kasveille ja erityisesti vesieliöille. Esimerkiksi pitkälle happamoituneissa järvissä voi tapahtua kalojen joukkokuolemia. Lisäksi happamissa olosuhteissa monien haitallisten aineiden, erityises-

ti raskasmetallien, liukoisuus lisääntyy. Happamoittava laskeuma aiheuttaa myös korroosio- ja muita materiaalivaikutuksia rakennetuille pinnoille. Tärkeimmät happamoittavat yhdisteet ovat rikkidioksidi (SO₂), typen oksidit (NO_x) ja ammoniakki (NH₃).

Suomessa rikin päästöt ovat pääosin peräisin fossiilisia polttoaineita käyttävistä voimalaitoksista. Bioenergian elinkaariketjuissa rikkipäästöjen merkitys on vähäinen. Typen oksideja syntyy kaikessa poltossa polttoaineen ja palamisilman sisältämästä tuestä. Suurin osa typen oksidien päästöistä (vuonna 2001 58 %) on peräisin liikenteestä ja työkoneista. Bioenergian elinkaariketjuissa typen oksideja muodostuu kaikissa vaiheissa lähinnä kuljetusten ja työkoneiden päästöinä sekä käyttövaiheessa bioenergian polton seurauksena. Ammoniakista suurin osa tulee maataloudesta. Se aiheuttaa Suomen ammoniakkipäästöistä 97 %. Ammoniakkipäästöjen kannalta on olennaista, mistä raaka-aineista ja millä tavoin bioenergia tuotetaan. Lisäksi on olennaista, miten lannasta syntyvät päästöt allokoidaan – esimerkiksi kohdennetaanko ne lihantuotannon päästöiksi, jolloin lannasta lannoitteena ei tule päästöjä.

Sähkön ja lämmön tuotanto

Biopolttoaineiden käytön aiheuttamat rikkidioksidipäästöt ilmaan ovat pääsääntöisesti alhaisemmat verrattuna vastaaviin fossiilisiin polttoaineisiin, sillä biopolttoaineiden rikkipitoisuus on hyvin pieni. Esimerkiksi puun rikkipitoisuus on alle 0,02 %, kun taas kivihiilen rikkipitoisuus on noin 1 % ja raskaan polttoöljyn rikkipitoisuus vaihtelee välillä 0,9–2,5 %. Voimalaitosmittakaavassa vertailtuna puun tuotannon ja polton aikaiset SO₂-päästöt ovat noin kymmenen kertaa pienemmät kuin turpeen ja kivihiilen tuotannon ja polton (Dahlbo ym. 2005, Seppälä ym. 2006, EcoInvent 2006, SYKEN ilmapäästörekisteri 2007).

Biopolttoaineiden käytön NO_x-päästöt teollisuudesta ja voimalaitoksista eivät merkittävästi eroa vastaavista fossiilisten polttoaineiden aiheuttamista päästöistä. Tyypillisen puuta polttavan leijupetikattilan päästöt ovat hieman alhaisemmat kuin esim. kivihiilen polypoltossa. Puun pienpolton NO_x-päästöt ovat suhteellisen alhaiset ja samaa suuruusluokkaa kuin öljylämmityksessä.

Liikennepolttoaineet

Suomessa liikenteen käyttämät bensiini ja diesel ovat nykyisin rikittömiä. Lähitulevaisuudessa myös työkonepolttoaineet muuttuvat rikittömiksi. Siksi liikenteen biopolttoaineiden käytöstä aiheutuvat rikkipäästöt eivät juuri eroa fossiilisten liikennepolttoaineiden rikkipäästöistä. Fossiilisten polttoaineiden jalostus kuitenkin aiheuttaa rikkidioksidipäästöjä ilmaan, vaikkakin Suomessa jalostuksen rikkipäästöjä on saatu vähennettyä merkittävästi. Esimerkiksi Neste Oilin Porvoon jalostamon rikkidioksidipäästöt ovat pienentyneet alle kolmasosaan vuoden 1990 tilanteesta. Vuonna 2005 SO₂ päästöt olivat Porvoon ja Naantalien jalostamoilta yhteensä noin 6400 tonnia. (Neste Oil 2005a, 2005b).

Useiden tutkimusten perusteella liikenteen biopolttoaineet näyttäisivät lisäävän sekä käytön että koko elinkaaren aikaisia NO_x-päästöjä ilmaan verrattuna fossiilisiin liikennepolttoaineisiin (BABFO 2001, Krahl ym. 2003, Hu ym. 2004, Sheehan ym. 2004). Toisaalta biodieselin on myös raportoitu vähentävän NO_x-päästöjä verrattuna fossiiliseen dieseliin (EC 2006). Käytön aikaisia NO_x-päästöjä voidaan vähentää teknisillä keinoilla. Lisäksi käytön aikaiset päästöt tulevat vähenemään tulevaisuudessa lainsäädännön vaatimusten ja autokannan uusiutumisen myötä. Täten tulevaisuuden autokannassa NO_x-päästöt ovat suhteellisen alhaiset, eikä biopolttoaineiden käytön aikaisten päästöjen arvioida merkittävästi eroavan fossiilisten päästöistä. Polttoaineen jalostus aiheuttaa NO_x-päästöjä ilmaan, jotka ovat kuitenkin vähäisiä verrattuna liikenteen ja työkoneiden eli liikennepolttoaineiden aiheuttamiin päästöihin. Neste Oilin ympäristöraporttien mukaan jalostamoiden vuoden 2005 NO_x-päästöt olivat yhteensä noin 3 100 tonnia, joka on noin 4 % liikenteen päästöistä (Neste Oil 2005a, 2005b).

Pienhiukkaset

Pienhiukkasia pääsee ilmaan suoraan erilaisista lähteistä kuten polttoprosesseista (primääriset pienhiukkaset). Niitä muodostuu myös ilmassa kaasumaisista yhdisteistä kuten VOC-yhdisteistä, typen ja rikin oksideista ja ammoniakista (sekundääriset pienhiukkaset). Pienhiukkaset luokitellaan niiden koon mukaan. PM10 tarkoittaa pienhiukkasia, joiden aerodynaaminen halkaisija on alle 10 µm, ja PM2,5 vastaavasti halkaisijaltaan alle 2,5 µm pienhiukkasia.

Pienhiukkasten haitalliset vaikutukset kohdistuvat ensisijaisesti ihmisiin. Ilman hiukkasmaisten saasteiden pitoisuudet ovat yhteydessä hengityselinten sekä sydän- ja verenkiertoelimistön sairauksiin. Vaikutuksia on havaittu myös suhteellisen alhaisilla Suomessa tyypillisillä pitoisuuksilla. Euroopassa PM2,5 hiukkasten on arvioitu aiheuttaneen 350 000 ennenaikaista kuolemaa vuonna 2000 ja määrän arvioidaan pienenevän nykytoimilla 270 000:en vuonna 2020 (EEA 2005).

Sähkön ja lämmön tuotanto

Puupolttoaineiden käyttö voimalaitoskokoluokassa ei hiukkaspäästöjen osalta eroa merkittävästi vastaavista kiinteistä fossiilisista polttoaineista. Suuret laitokset on varustettu tehokkailla hiukkassuodattimilla, ja hiukkaspäästöt ovat alhaiset. Pienissä laitoksissa, joissa ei ole erotinlaitteita savukaasun puhdistuksessa, aiheutuu eri polttoaineiden tuotannosta ja käytöstä suuria eroja päästöissä (vrt. taulukko 8).

Puun pienpoltto tuottaa merkittäviä hiukkaspäästöjä. Erityisesti panospolttoiset tulisijat ja klapi-kattilat aiheuttavat puun epätäydellisen palamisen seurauksena hiukkas- ja hiilivety-päästöjä. Polttoaineen laadulla ja polttotavoilla on suuri merkitys päästöihin. Ongelmallisimpia polttolaitteita ovat vanhat, usein väärin mitoitetut klapi-kattilat. Päästöjä lisää poltto riittämättömällä ilmamäärällä, ”kitupoltto”, joka on yleistä erityisesti ilman riittävää lämpövaraajaa toimivilla klapi-kattiloilla. Sen sijaan automaattiset jatkuvatoimiset puulämmityslaitteet, kuten pellettikattilat aiheuttavat huomattavasti vähemmän päästöjä. (Tissari ym. 2005, Karvosenoja ym. 2006)

Suurin osa puun pienpoltosta tapahtuu haja-asutusalueilla, jolloin sen päästöjen vaikutukset terveyteen ja viihtyvyyteen päästön läheisyydessä ovat vähäiset. Puuta poltetaan kuitenkin yhä enenevässä määrin myös suurempien kaupunkien pientalo-alueilla. Tällöin on tärkeää, että käytetyt tulisijat ja polttoaineet ovat korkealaatuisia. Ympäristöministeriössä on valmisteltu asetusta puupolttoaineita käyttävien uusien rakennusten lämmityslaitteiden päästöjen ja hyötysuhteiden teknisiksi standardeiksi. Raja-arvot ovat kohdistettu hiilimonoksidille ja hiilivedyille, mutta epäsuorasti ne vaikuttavat myös pienhiukkaspäästöihin.

Liikennepolttoaineet

Liikenteen biopolttoaineiden pienhiukkaspäästöistä on erityisesti elinkaaren aikaista tutkimustietoa on vielä melko vähän (Quirin ym. 2004). Kirjallisuustietojen perusteella etanoli aiheuttaa vähemmän pienhiukkaspäästöjä verrattuna fossiilisiin liikennepolttoaineisiin, mutta biodieselin osalta on raportoitu sekä positiivisia, negatiivisia että ei vaikutusta -tuloksia (EC 2006). BABFOn (2001) mukaan biodiesel vähentää pienhiukkaspäästöjä verrattuna fossiiliseen dieseliin 20–39 %. Krahl ym. (2003) biodieselin käytön aikaisten pienhiukkaspäästöt suhde verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin riippuu rasiituksesta. Alhaisessa rasiituksessa biodieselin päästöt saattavat olla suuremmat kuin fossiilisten, mutta suuremmissa rasiituksissa biodieselin pienhiukkaspäästöt ovat alhaisemmat tai samaa tasoa kuin fossiilisilla polttoaineilla. Tulevaisuuden ajoneuvokannan hiukkaspäästöihin pätee sama kuin NO_x- ja VOC-päästöjenkin kohdalla. EU:n tiukkenneiden pakokaasumääräysten ansiosta myös dieselajoneuvot joudutaan varustamaan pakokaasujen jälkikäsittelytekniikoilla, ja päästöt tulevat olemaan hyvin alhaiset.

Alailmakehän otsonin muodostuminen

Alailmakehässä otsonia muodostuu kemiallisissa reaktioissa typen oksideista, hiilimonoksidista ja hiilivedyistä auringonvalon vaikutuksesta. Korkeat alailmakehän otsonipitoisuudet ovat terveydelle vaarallisia. Otsoni myös heikentää puiden ja viljelykasvien kasvua. Tielikenne on typen oksidien ja VOC-yhdisteiden tärkeimpiä lähteitä.

Sähkön ja lämmön tuotanto

Puun pienpoltto on liikenteen ja työkoneiden (benssiini- ja dieselkäyttöisten) ohella yksi tärkeimmistä hiilimonoksidin ja hiilivetyjen lähteistä Suomessa. Voimalaitosmittakaavassa puun tuotannon ja polton vaikutus alailmakehän otsonin muodostuminen on alhaisempi kuin maakaasulla ja kivihiilellä (vrt. taulukko 8 kohdassa 4.14).

Liikennepolttoaineet

Liikenteen biopolttoaineiden vaikutuksista alailmakehän otsonin muodostumista aiheuttaviin päästöihin on ristiriitaista tietoa. BABFOn (2001) mukaan biodieselin VOC-päästöt ovat 55 % alhaisemmat ja bioetanolin (E85) 45 % alhaisemmat kuin bensiinin. Hun ym. 2004 mukaan bioetanolilla käyttävän auton elinkaaren aikaiset alailmakehän otsonin prekursorina toimivien HC- ja CO-päästöt ovat pienemmät kuin bensiiniautojen, mutta NO_x-päästöjen suuremmat. Sheehanin ym. (2004) tutkimuksen mukaan puolestaan maassietanolin elinkaaren aikaiset sekä NO_x- että CO-päästöt ovat suuremmat, mutta hiilivety-päästöt ovat pienemmät kuin bensiinin.

Maaympäristön rehevöityminen

Maaympäristön rehevöityminen aiheutuu ilmaperäisestä typpilaskeumasta, joka puolestaan johtuu typen oksidien ja ammoniakkin päästöistä ilmaan (vrt. luku 4.4). Maaympäristön rehevöityminen ilmenee muun muassa metsien kasvun lisääntymisenä ja tyypeä suosivan kasvillisuuden lisääntymisenä. Maaperään joutuva ylimääräinen typpi voi huuhtoutua vesistöihin (vrt. luku 4.8) tai suotautua pohjavesiin aiheuttaen sen nitraattipitoisuuden kasvamista. Maaympäristön rehevöityminen on erityisesti Keski-Euroopassa koettu ongelmaksi. Suomessa sen merkitys on toistaiseksi arvioitu melko vähäiseksi verrattuna esimerkiksi vesistöjen rehevöitymiseen. Bioenergian elinkaarikehityksen tärkeimmät maaperää rehevöittävät vaiheet ovat samat kuin happamoittavia päästöjä aiheuttavat vaiheet.

Vesistöjen rehevöityminen

Rehevöityminen tarkoittaa ravinnekuormituksen aiheuttamaa lisääntyvää perustuotantoa ja siihen liittyviä ilmiöitä. Sisävesialueilla perustuotantoa rajoittaa erityisesti fosfori, kun taas Itämeren alueella typen merkitys on suuri. Bioenergian tuotanto ja käyttö aiheuttaa vesistöjen rehevöitymistä yhtäältä suorina ravinnepäästöinä vesistöihin ja toisaalta typen oksidien ja ammoniakkin päästöinä ilmaan. Laskeuman kautta nämä päätyessään vesistöihin aiheuttavat rehevöitymistä.

Bioenergian elinkaarikehityksen eri vaiheista rehevöittäviä päästöjä aiheuttavat erityisesti tuotanto (peltobiomassan viljely, metsän korjuu), kuljetukset ja työkoneiden

käyttö (NO_x-päästöt) ja käyttö (NO_x-päästöt). Myös jalostusvaiheessa syntyy rehevöittäviä NO_x-päästöjä ja esimerkiksi ohraetanolin jalostuksen vesistökuormituksenä. Jalostusvaiheen suorat päästöt vesiin ovat kuitenkin suhteellisen pienet verrattuna peltotuotannon aiheuttamaan kuormitukseen. Typen oksidien ja ammoniakkin ilmapäästöjä on käsitelty luvussa 4.4. Happamoituminen, ja alla käsitellään lähinnä pelto- ja metsäbioenergian tuotannon vesistöjen rehevöitymisvaikutuksia.

Peltobioenergian tuotanto

Peltobioenergian tuotantovaiheessa ravinnekuormituksen kannalta on merkityksellistä, mitä raaka-ainetta tuotetaan, millaisella pellolla sitä viljellään ja millaisia viljelymenetelmiä käytetään. Etanolin tai biodieselin tuotantoon kasvatettavan viljan, sokerijuurikkaan tai öljykasvien vesistövaikutukset eivät poikkea ruoka- tai rehututuotantoa varten viljeltävien vastaavien kasvien vaikutuksista. Vesistökuormitusta voidaan pienentää esimerkiksi valitsemalla viljelymenetelmäksi syksyllä tehtävän kynnön sijaan suorakylvö (Puustinen ym. 2005). Jos taas bioenergian raaka-aineiden (viljat, sokerijuurikas, öljykasvit) tuotantoon otetaan lisää peltoalaa nurmiviljelystä tai pysyvältä kesantoalalta (viherkesanto), kasvaa vesistökuormitus merkittävästi. Erityisesti eroosio ja partikkelimaisen fosforin, kokonaistypen sekä nitraattitypen huuhtoumat kasvavat.

Sokerijuurikkaan viljelyala on vaihdellut viimeisen kymmenen vuoden aikana 30 000–35 000 ha:n välillä. Viljely on keskittynyt Etelä- ja Lounais-Suomen savialueille. Viljakasvien viljelyala on ollut viime vuosina 53–55 % viljelyksessä olevasta peltoalasta (2,2 milj. ha). Suorakylvömenetelmällä viljellään noin 150 000 peltohehtaaria ja viljelyala tulee edelleen kasvamaan jo lähivuosina. Sokerijuurikkaan tuotannossa oleva pelto kuormittaa voimakkaasti vesistöjä. Pelto jää talven ajaksi ilman kasvipeitettä ja juurikkaan lannoitustasot ovat korkeita. Myös syyskyntöön perustuva kevätiljan viljely kuormittaa voimakkaasti vesistöjä suuren eroosioriskin vuoksi. Suorakylvö minimoi eroosion, jolloin partikkelifosforin ja typen kuormitus alenevat. Haittana on kuitenkin liukoisen fosforin huuhtoutumien kasvu.

Ruokohelpin viljelyalan odotetaan kasvavan nykyisestä noin 10 000 hehtaarista melko nopeasti noin 50 000–100 000 hehtaariin (ks. MMM 2007). Ruokohelpi on monivuotinen kasvi, joka kasvaa yhdellä kylvökerralla noin 10–15 vuotta. Sato korjataan kevättalvella. Ruokohelven lannoitustarve on pieni verrattuna esimerkiksi rehunurmeen. Perustamisvuonna ruokohelven lannoitus on 40–60 kg N/ha, ja seuraavina vuosina 60–90 kg N/ha. Fosforilannoitus tehdään viljavuustutkimusten perusteella ollen tyypillisesti noin 10 kg P/ha/a (Pahkala ym. 2005).

Vähäinen lannoitemäärä ja pitkä viljelykierto vähentävät ruokohelpin aiheuttamaa ravinnekuormitusta merkittävästi verrattuna esimerkiksi rehunurmeen (Partala ja Turtola 2000). Saraturvemaassa kasvavasta ruokohelpinurmesta huuhtoutuu liukoista tyyppiä kymmenessä vuodessa noin 40 % vähemmän kuin rehunurmesta. Kokonaistypen huuhtouma pienenee noin 30 % ja liukoisen fosforin kuormitus vähenee 18 %. Kokonaisfosforin huuhtoutuminen on yli 10 % pienempi ruokohelpiviljelmältä kuin rehunurmesta.

Parhaimmillaan laajamittainen energiakasvien peltoviljely (400 000 ha) voi vähentää eroosiota ja ravinnekuormitusta erittäin merkittävästi, jopa 20–25% nykyisestä kuormituksesta. Tämä edellyttää pysyvän kasvipeitteisyyden kaltaista tilannetta pelloilla (ruokohelpi) tai suorakylvön soveltamista (Puustinen ym. 2005) viljaetanolin raaka-aineen tuotannossa. Pysyvillä kasvipeitteisillä pelloilla on lisäksi hyvät ominaisuudet estää kuormituksen kasvua hydrologisesti epäedullisina vuosina (Puustinen ym. 2007), joita ilmaston muutos aiheuttaa jo lähitulevaisuudessa lisääntyvässä määrin. Pahimmillaan energiakasvien viljely lisää huomattavasti nykyistä kuormitusta, mikä tilanne edelleen huononisi ilmaston muuttuessa. Huonoin vaihtoehto tässä olisi sokerijuurikkaan viljelyalan merkittävä kasvu nykyisistä pinta-aloista.

Metsäbiomassan tuotanto

Metsätaloustoimenpiteet vaikuttavat metsäbiomassan tuotannon vesistökuormitukseen. Metsien uudistusojitus on loppunut, mutta vanhoja ojituksia kunnostetaan jatkuvasti. Ojitusten vähentyminen rajoittaa edelleen hieman typpikuormitusta. Metsätaloustoimenpiteiden vaikutuksia koskevien tutkimusten tähänastiset tulokset osoittavat, että metsänhakkuiden ja maanmuokkauksen jälkeen pohjaveden nitraattipitoisuus voi hieman kohota (Nyroos ym. 2006). Turvemaiden fosforilannoitusalan kasvu viime vuosina ilmeisesti jonkin verran lisää metsätalouden aiheuttamaa fosforikuormitusta.

Uudistushakkuualueilla on todettu lyhytaikaista (joitakin vuosia) fosforin huuhtouman lisääntymistä (Piirainen 2002, Palviainen 2005). Kokonaistypen huuhtouma ei yleensä lisääntynyt, mutta NH_4^+ ja NO_3^- -huuhtoumat voivat kasvaa. Ravinteiden pääasiallinen lähde oli maahan jätetty lehvästö. Näin ollen hakkuutähteiden korjuu saattaa vähentää ravinnehuuhtoumaa. Maaperän prosessit ja mikrobiologinen immobilisaatio ovat ensisijaiset ravinteita pidättävät tekijät. Lisäksi nopeasti toipuva pintakasvillisuus sitoo tehokkaasti ravinteita ja toimii ravinnevarastona (Palviainen 2005).

Metsätalouden asiantuntijat ovat olleet huolissaan siitä, että *hakkuutähteiden* mukana viedään metsistä pois ravinteita. Tämä saattaa aiheuttaa tarpeen lisätä lannoitusta, mikä aiheuttaa riskin ravinnekuormituksen lisääntymiseen. Lisäksi lannoitteiden tuotanto ja levitys kuluttavat energiaa ja aiheutuvat muita päästöjä ympäristöön. Metsämaan kokonaisravinnevarasto on kuitenkin hyvin suuri verrattuna hakkuutähteisiin sitoutuneeseen ravinne määrään (Haapanen ym. 2004), eikä hakkuutähteiden hyödyntäminen näyttäisi merkittävästi vaikuttavan metsämaan C, N, P (Al-liukoinen) ja K pitoisuuksiin (Rosenberg ja Jacobson 2004). Kuitenkin maaperän Ca ja Mg varasto saattaa köyhtyä, ja Joki-Heiskala ym. (2003) ovat arvioineet, että laskeuma ja rapautuminen yhdessä eivät riitä korvaamaan kokopuukorjuussa menetettyjä emäskationien määriä Etelä- ja Keski-Suomessa.

Kantoja on nostettu energiatuotantoon vasta muutamia vuosia, ja korjuun vaikutuksia ravinnehuuhtoumaan ja eroosioon on tutkittu vasta vähän. Vesistövaikutuksia pidetään kuitenkin merkittävämpänä erityisesti eroosion ja partikkeleihin sitoutuneen fosforin osalta kuin uudistushakkuun ja oksien ja latvusten poiston. Syinä tähän ovat kantojen korjuun maanmuokkausvaikutus ja toisaalta se, että kannot korjattaessa metsässä joudutaan käymään aiempaa useammin raskailla työkoneilla, mikä lisää erityisesti eroosioriskiä. (Tattari ja Lepistö, suullinen tiedonanto 18.10.2006)

Metsätaloudessa on annettu ohjeita ja suosituksia energiapuun korjuusta (Kois-tinen ja Äijälä 2006, Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2006, UPM-Kymmene 2006). Näillä pyritään vähentämään korjuun aiheuttamia haittoja ympäristölle ja puuston kehitykselle. Suosituksissa on mm. kuvattu, millaisilta kasvupaikoilta korjuu ei ole suositeltavaa ja kuinka paljon hakkuutähteistä tulisi jättää metsään ravinnetasapainon säilyttämiseksi. Lisäksi annetaan ohjeita muun muassa suojavyöhykkeistä metsätoimenpiteitä tehtäessä. Ohjeet ja suositukset eivät kuitenkaan ole sitovia, eikä niitä aina käytännössä voida noudattaa.

4.9

Toksisuus

Elinkaariarvioinnissa toksisia vaikutuksia arvioidaan eliöiden (ekotoksisuus) ja ihmisten (toksisuus ihmisille, humanitoksisuus) kannalta. Toksisten vaikutusten arviointi on vielä hankala elinkaariarvioinnin alue. Siinä joudutaan tekemään monia yksinkertaistuksia esimerkiksi perinteiseen riskinarviointiin verrattuna.

Bioenergian elinkaarikehityksissä toksisuusvaikutuksia syntyy lähinnä *energiaraaka-aineen tuotannossa*. *Peltoenergian viljelyssä* ympäristöön levitetään tarkoituksellisesti

haitallisia torjunta-aineita. Lisäksi *metsätalouden* maan muokkaustoimenpiteet voivat lisätä haitallisten aineiden (esim. elohopea) huuhtoutumista metsämaasta vesistöihin aiheuttaen ekotoksisuusvaikutuksia. Toisaalta *polttoaineen jalostuksen, varastoinnin ja käytön* aikaiset toksiset vaikutukset saattavat olla alhaisempia kuin fossiilisten polttoaineiden. Esimerkiksi öljynjalostukseen ja fossiilisten polttonesteiden varastointiin ja jakeluun liittyy haihtuvien hiilivetyjen kuten bentseenin päästöjä, joita biopolttoaineiden elinkaariketjuissa voidaan välttää.

Bioenergian elinkaaritarkasteluissa toksisuuden arviointi on ollut suhteellisen harvinaista. Kuitenkin kokonaisympäristövaikutuksia arvioitaessa toksisuus saattaa nousta merkittäväksi (Kemppainen ja Shonnard 2005). Raaka-aine ja sen tuotantotapa, johon liittyy erityisesti torjunta-aineiden käyttö, ovat ratkaisevassa asemassa toksisuusvaikutuksia arvioitaessa. Esimerkiksi luomutuotannon avulla voidaan ekotoksisia vaikutuksia vähentää (Broek van den ym. 2002).

Sähkön ja lämmön tuotanto

Puupolttoaineiden käyttö suurissa voimalaitoksissa ei aiheuta merkittävästi PAH-, dioksiini- tai raskasmetallipäästöjä. Asiaa ei tosin ole juurikaan tutkittu ja esim. dioksiinin tiettyihin kasveihin kerääntymisen vaikutus päästöihin, jos ne päätyvät polttoon, on epäselvää. Jos puun polton oletetaan korvaavan kivihiilen käyttöä, sillä on elohopeapäästöjä alentava vaikutus (Karvosenoja ym. 2005). Myöskään biojätteen poltosta ei aiheudu merkittäviä päästöjä. Jätteenpolttolaitoksissa käytetään yleensä tehokkaita aktiivihilisuodattimia hiukkas-, dioksiini- ja raskasmetallipäästöjen vähentämiseksi, jotta alitetaan EU:n jätteenpolttodirektiivin päästöarajat.

Puun pienpoltto panospolttoisissa tulisijoissa ja klapi-kattiloissa aiheuttaa epätäydellisen palamisprosessin seurauksena PAH-päästöjä (esim. Boman 2005).

Liikennepolttoaineet

Fu ym. (2003) totesivat, että etanolin elinkaaren kokonaiskarsinogeenisten aineiden päästöt ovat suhteellisen alhaisia. Kriittistä on torjunta-aineiden käyttö raaka-aineen tuotantovaiheessa. Jos etanolin raaka-aine on pelloilla tuotettua, ovat karsinogeenisten aineiden päästöt koko elinkaaren aikana suuremmat kuin bensiinin. Jos etanolin tuotantoon puolestaan käytetään jättemateriaaleja, kuten jättepuuta tai maatalouden jätteitä, ei karsinogeenisissä päästöissä ole eroa bensiiniin verrattuna. Sekä viljellystä biomassasta että jättemateriaalista tuotetun bioetanolin todettiin aiheuttavan vähemmän raskasmetallien päästöjä kuin bensiinin. Kadamin (2002) mukaan maniokkietanolin toksisuuspotentiaali ihmiselle on alhaisempi kuin bensiinin. Tulokset ovat saman suuntaisia kuin Fu ym:n (2003), sillä raaka-aineeksi on oletettu sokerintuotannossa syntyvä maniokkijäte.

Kemppainen ja Shonnard (2005) vertasivat raakapuusta ja jätepaperista valmistettua *etanolia*. Vaikka jätepaperietanolin kokonaisympäristöindeksi oli alhaisempi kuin raakapuuetanolin, sen toksisuus ihmiselle oli suurempi. Toksisuus kaloille puolestaan oli jätepaperietanolilla alhaisempi kuin raakapuuetanolilla.

Rypsin viljelyn ekotoksisuusvaikutukset näyttävät olevan huomattavasti suuremmat kuin vehnän, kauran ja ohran viljelyn vaikutukset (Katajajuuri ym. 2006). Tämä johtuu rypsin käytettävien torjunta-aineiden merkittävästi suuremmasta ominaishaitallisuudesta.

Liikenteen biopolttoaineiden käytön aikaisista toksisten aineiden päästöistä, kuten PAH-yhdisteistä, bentseenistä ja butadieenista on vain vähän tietoa saataville, mutta todennäköisesti niiden päästöt ovat liikenteen biopolttoaineilla alhaisemmat kuin fossiililla liikennepolttoaineilla (Krahl ym. 2003, EC 2006). Biodieselin mutageenisuuden on myös todettu olevan alhaisempi kuin fossiilisten polttoaineiden (Krahl ym. 2003).

Vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen

Koska luonnon monimuotoisuuden ja maaperän tuottokyvyn arviointi on elinkaariarvioinnin yleiselläkin taholla vasta kehitysasteella, ei näitä tekijöitä juurikaan ole tarkasteltu bioenergian elinkaariarvioinnissa. Lisäksi lähtötietojen puutteellisuus vaikeuttaa tekijöiden huomioon ottamista elinkaariarvioinnissa. Tässä selvityksessä bioenergian luonnon monimuotoisuuteen ja maaperän tuottokykyyn kohdistuvien vaikutusten olennaisiksi indikaattoreiksi tunnistettiin seuraavat tekijät:

- Kokonaisbiodiversiteetti
- Lajien määrä, taantuneiden ja uhanalaisten lajien määrä
- Putkilokasvit, perhoset, kovakuoriaiset, linnut (maatalous)
 - Edellisten lisäksi kääväkät, sienet, jäkälät, epiksyylisammaleet (metsät)
 - Lahopuun määrä (metsät)
- Maan orgaanisen aineksen määrä
- Maan viljavuus ja tuottokyky
- Maisemarakenne

Liitteessä 4 on esitetty alustava arviointi eräiden kotimaisten bioenergian elinkaari-
ketjujen vaikutuksista näihin tekijöihin. Lisäksi alla on sanallisesti kuvattu bioenergian
mahdollisia vaikutuksia näihin. Bioenergian monimuotoisuus- ja maaperän tuotto-
kykyvaikutukset ilmenevät ensisijaisesti tuotantovaiheessa eli metsässä ja pelloilla.

Luonnon monimuotoisuudella eli biodiversiteetillä tarkoitetaan maapallon elollisen
luonnon kokonaiskirjoa. Tähän luetaan eliölajien sisäinen perinnöllinen monimuotoi-
suus (geneettinen muuntelu), lajien monimuotoisuus ja lukumäärä sekä lajien ja niiden
elottoman ympäristön muodostamien elinympäristöjen (ekosysteemien) monimuotoi-
suus. Käsitteeseen kuuluvat luonnonvaraisten eliölajien lisäksi myös viljelykasvilajik-
keet ja kotieläinkannat sekä ekosysteemien toimintaan liittyvät luontaiset prosessit.
Lisäksi voidaan tarkastella maisemarakenteen ja geologista monimuotoisuutta.

*Bioenergian elinkaari-
ketjun merkittävimmät monimuotoisuusvaikutukset liittyvät
sen alkupäähän eli maatalous- ja metsäympäristöihin.* Seuraavissa vaiheissa muun muassa polttoaineiden jalostus- ja energiantuotantolaitokset varaavat maa-alaa ja siten heikentävät lajien elinmahdollisuuksia näillä alueilla. Lisäksi polttoaineiden käyttö saattaa välillisesti aiheuttaa monimuotoisuusvaikutuksia lajistokoostumukseen happamoittavien ja rehevöittävien päästöjen kautta. Esimerkiksi maaympäristön rehevöityminen suosii reheviin olosuhteisiin sopeutuneita lajeja. Seuraavassa on rajauduttu tarkastelemaan raaka-aineen tuotannon monimuotoisuusvaikutuksia.

Peltobiomassan tuotanto

Monimuotoisuutta ei juurikaan ole tarkasteltu bioenergian elinkaari-
tutkimuksissa. Tässä on esitetty alustava näkemys bioenergian mahdollisista vaikutuksista maatalou-
sympäristöjen lajiston monimuotoisuuteen. Näkemys perustuu Mikko Kuussaaren,
Janne Heliölän, Juha Pykälän ja Anna Schulmanin, SYKE/LTO, Terho Hyvösen MTT
ja Juha Tiaisen RKTL (13.10.2006) asiantuntemukseen.

Yleisesti voidaan todeta, että viljellyillä pelloilla ei ole juurikaan merkitystä taan-
tuneille ja uhanalaisille kasveille (poikkeuksena aiemmin kylvösiemenen mukana
levinneet ns. vanhakantaiset rikkakasvit) ja hyönteisille. Peltojen toimenpiteillä ja vilje-
lykierroilla on kuitenkin merkitystä taantuneille ja uhanalaisille maatalouslinnuille.

Monivuotisten nurmien väheneminen on yksi tärkeimpiä maatalousbiodiversi-
teettiä köyhdyttäneitä maatalouden muutoksia Suomessa. Monivuotiset (pysyvät)
nurmet ovat yleensä laidunkäytössä tai kesantona ja niillä on positiivinen vaikutus
maatalousluonnon monimuotoisuuteen. Siksi kaikilla energiakasveilla on negatiivinen
biodiversiteettivaikutus silloin, kun pitkäaikaisia nurmia siirretään energiatuotantoon.

Yksivuotisten rehunurmien siirrolla energiakasvituotantoon ei ole selviä negatiivisia monimuotoisuusvaikutuksia, sillä ne ovat yleensä lajistoltaan köyhiä alueita, yleensä huomattavasti köyhempiä kuin viljapelot. Kuitenkin kovakuoriaisista maakiitäjäisten lajimäärä ja runsaus ovat suurempia yksi- kuin monivuotisissa kasvustoissa. Sokerijuurikaspelloilla on kasvukauden alkupuolella niukasti maakiitäjäisiä, mutta kasvukauden lopulla ne ovat kevätiljapeltojen ohella parhaita ympäristöjä.

Laidunnurmilla on suurin merkitys linnuille, mutta niillä on merkitystä myös perhosille. Monivuotisilla viherkesannoilla on myönteistä merkitystä monien eliöryhmien lajeille, erityisesti linnuille ja monille hyönteisille. Kesantojen merkitykseen vaikuttavat suuresti kesannon perustamistapa ja ikä. Yleensä lajisto monipuolistuu kesannon vanhetessa. Siemenravintoa käyttävät linnut hyötyvät sänkeen perustetuista tai sopivaa kasvilajistoa kylvämällä perustetuista kesannoista, selkärangattomia eläimiä syövät lajit taas useampivuotisista kesannoista. Monimuotoinen kesantokasvusto saadaan aikaan antamalla sänkipellon kasvillisuuden kehittyä ilman nurmikasvien kylvöä tai välttämällä tiheää voimakkaasti kilpailevien heinälajien kylvöä.

Kasvilajeja on enemmän viljapelloilla kuin nurmilla, jotka ovat yleensä kasvistoltaan vähälajisia. Viljapelloilla on runsaasti yksivuotisia rikkakasvilajeja, jotka puuttuvat monivuotisilta nurmialueilta. Myös yksivuotisilla nurmilla on vähemmän kasvilajeja kuin viljapelloilla. Läheskään kaikki rikkakasvilajit eivät ole tuotannolle haitallisia. Monet niistä tarjoavat ravintoa ja elinmahdollisuuksia eläinlajistolle.

Suorakylvöllä on lievästi positiivinen vaikutus biodiversiteettiin suhteessa tavanomaiseen muokkaukseen: rikkakasvilajisto ja sitä kautta myös eläimistö monipuolistuu. Tämä vaikutus kuitenkin nollautuu, jos peltojen rikkakasviruiskutuksia lisätään suorakylvöpelloilla, kuten käytännössä usein näyttää tapahtuneen. Myös rypsipelloilla on lievä positiivinen vaikutus perhosiin ja yleensäkin pölyttäjähöynteisiin rypsin mettä tuottavien kukkien vuoksi.

Voimakkaasti lannoitetut ja ruiskutetut sokerijuurikaspellot ovat kasvukauden alkupuolella vähälajisia suhteessa nurmiin ja viljapeltoihin, mutta kasvukauden lopulla tilanne on toinen. Sokerijuurikaspelloilla kasvilajisto valikoituu torjunta-aineita sietäviin lajeihin.

Ruokohelpipeltojen biodiversiteettiä ei ole tutkittu Suomessa. MTT:n ruokohelpipelloilta on tosin kertynyt käytännön kokemuksia linnuista ja nisäkkäistä. Karkeita vaikutusarviointeja voidaan tehdä myös vertaamalla ruokohelpikasvustojen ominaisuuksien muihin tiheisiin heinäkasvustoihin. Ruokohelven monimuotoisuusvaikutukset riippuvat erittäin paljon ruokohelven viljelyn toteutuksesta maisematasolla eli siitä, kuinka suuria ja ennen kaikkea leveitä lohkot ovat (reunavaikutus) ja mitä niiden naapurilohkoilla/alueilla viljellään/kasvaa.

Monivuotisiin nurmiin verrattuna ruokohelven vaikutus on energiakasveista negatiivisin, sillä muu kasvilajisto jää vähäiseksi korkean ja tiheän ruokohelpikasvuston alla. Vaarana on myös, että ruokohelpi leviää pientareille ja köyhdyttää niiden lajistoa. Ruokohelpillä voi olla suojapaikkamerkitystä talvehtiville fasaaneille sekä keväällä peltopyylle ennen kuin viereisten ravinnon hankintaan käytettyjen lohkojen kasvustot kehittyvät. Ruokohelpi ei tarjoa ravintoa linnuille. Yleisesti ruokohelpikasvustot ovat linnustollisesti erittäin köyhiä; ruokohelven korjuuajankohta tekee siitä vielä erityisen ongelmallisen lintujen kannalta. Kevätviljavaltaisessa eteläsuomalaisessa maatalousmaisemassa ruokohelpipelloilla on maisemarakennetta monipuolistava vaikutus, mutta tämä hyöty menetetään, jos ruokohelpi on vaihtoehto kesannoille. Ruokohelpipeltoja on ollut Suomessa toistaiseksi niin vähän, että niiden lajistollisesta monimuotoisuudesta ei ole kertynyt tietoa muiden maatalousluonnon monimuotoisuustutkimusten osana.

Ruokohelpillä on negatiivinen vaikutus myös muutettaessa viljapeltoja ruokohelpipelloiksi, sillä muu kasvilajisto jää vähäiseksi korkean ja tiheän ruokohelpikasvuston alla toisin kuin viljapelloilla, joilla elää melko monipuolinen rikkakasvilajisto.

Viljapeltojen rikkakasvit tarjoavat ravintoa monille selkärangattomille eläimille ja peltolinnustolle.

Metsäbiomassan tuotanto

Metsätalous on yksi tärkeimpiä Suomen luonnon monimuotoisuuden vaikuttavia tekijöitä. Suuri osa (n. 20–25 %) suomalaisista metsälajeista on riippuvainen lahoppuusta, jonka määrä on vähentynyt metsätalouden vuoksi (Siitonen 2001b). Energiapuun korjuussa tämän monimuotoisuudelle tärkeän resurssin määrä vähenee edelleen. Näin olleen suunnitelmat lisätä merkittävästi hakkuutähteiden korjuuta aiheuttavat lisäpaineita metsäluonnon monimuotoisuuskehitykselle. Aihetta on tutkittu vasta vähän ja kantojen noston vaikutusta tuskin lainkaan, eikä pitkäaikaisista vaikutuksista ole saatavilla tietoa (esim. Berglund 2006, Dahlberg ym. 2006, Jonsell 2007). Voidaan kuitenkin arvioida, että lisääntyvän metsähakkeen korjuun monimuotoisuusvaikutukset ovat Etelä-Suomessa suuremmat kuin Pohjois-Suomessa, sillä Etelä-Suomessa on enemmän lajeja ja uhanalaisuuspainet ovat suuremmat erityisesti koska lahoppuun ja luonnontilaisen kaltaisen metsän määrät sekä metsien suojelualueverkon pinta-ala ovat alhaisimmillaan Etelä-Suomessa (Siitonen 2001a, 2001b, Punttila ym. 2005, Hänninen ym. 2006).

Arvioiden mukaan talousmetsien säästöpuut tuottavat vuosittain n. 0,5 miljoonaa kuutiometriä uutta lahoppuuta samaan aikaan kun energiapuun korjuu vähentää sitä jo lähivuosina kertaluokkaa suuremman määrän, 5 miljoonaa kuutiometriä vuosittain ja korjuun määrän ennustetaan nousevan 8 miljoonaa kuutiometriin vuodessa v. 2015 mennessä, jonka jälkeen vuositavoitetta on mahdollista nostaa vielä 3-5 miljoonalla kuutiometrillä (Hetemäki ym. 2006, MMM 2006a). Energiapuun korjuun yleistyessä kovaa vauhtia on tärkeää varmistaa, ettei energiapuun korjuuta kohdisteta myös järeään, läpimitaltaan ≥ 10 cm kuolleeseen puuhun (Siitonen 2001a, Berglund 2006, Dahlberg ym. 2006, Jonsell 2007; vrt. Rudolphi ja Gustafsson 2005), jonka säästämistä ja lisääntymistä on pyritty edistämään viimeisen vuosikymmenen kuluessa uusituissa talousmetsien metsänhoitosuosituksissa (esim. Heinonen ym. 2005, Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2006). Myös energiapuun korjuukoneet tuhoavat hakkuualojen lahoppuuta – ilman energiapuun korjuutakin uudistushakkuualojen maapuusta on osoitettu tuhoutuvan ja/tai hautautuvan peräti 81 % hakkuun ja maanmuokkauksen vuoksi (Hautala ym. 2004; ks. myös Punttila 2005, Jonsell 2007). Avohakkuualojen lahoppu on lisäksi erittäin monien luonnonmetsien suuriin häiriöihin (suuret myrskyt, metsäpalot) sopeutuneiden lahoppulajien käytännössä ainoa lisääntymismahdollisuus nykyisissä metsissä, joissa luontaisesti esiintyvät suurten häiriöiden jälkeiset lahoppuusokkeiot puuttuvat kokonaan (Jonsell 2007).

Eliöryhmiä, joita energiapuun korjuu ja lahoppuun määrän väheneminen erityisesti koskee, ovat lahoppueliöt, mm. kääväkkäät ja lahoppuella elävät hyönteiset, joiden joukossa on runsaasti metsätalouden vuoksi uhanalaistuneita ja taantuneita lajeja. Syy lahoppulajiston uhanalaistumiseen on järeän lahoppuun väheneminen metsissä (esim. Jonsell ym. 1998, Siitonen 2001a, Dahlberg ja Stokland 2004). Kuitenkin esimerkiksi kääväkkäisiin kuuluvissa oravakoissa on paljon lajeja, jotka vaativat nimenomaan pieniläpimittaista lahoppuuta, johon hakkuutähteen korjuu erityisesti kohdistuu – näin on eräissä muissakin lahottajasieniryhmissä (esim. Dahlberg ja Stokland 2004, Nordén ym. 2004). Esimerkiksi eteläruotsalaisissa tammimetsissä lahoppuella elävistä kotelosienistä peräti 75 % ja kantasienistäkin 30 % esiintyi vain pieniläpimittaisilla lahoppuilla – näistä osa oli uhanalaisia (Nordén ym. 2004; kovakuoriaisista ks. Schiegg 2001). Vaikka esimerkiksi uhanalaisista selkärangattomista hyvin harvat lajit vaativat nimenomaan pieniläpimittaista lahoppuuta tai kantoja, huomattava osa näistä lajeista kuitenkin pystyy elämään myös näillä (Jonsell ym. 1998), jolloin hakkuutähteet ja -kannot saattavat toimia osalle lajistoa “askelkivinä” ja edesauttaa niiden leviämistä runsaslahoppuustoisten metsiköiden välillä. Lahoppueliöiden kannalta metsämaise- man rakenteellinen kytkeytyneisyys voi siis heikentyä energiapuun korjuun vuoksi.

Lahopuulajien esiintymiselle pieniläpimittainen lahoppu on osoitettu tärkeäksi tavallisissa talouskuusikoissa, joissa järeää lahoppuuta on tyypillisesti hyvin vähän (Kruys ja Jonsson 1999, Kruys ym. 1999). Myös vanhoissa talousmänniköissä järeää lahoppuuta on hyvin vähän, ja huomattavan suuri osa (peräti 30 %) näiden metsien lahoppukovakuoriaisista esiintyi hakkuutähteillä ja -kannoilla (Korhonen 2004). Aktiivisesti leviävien, lahoppuun tuottamien kemiallisten aineiden perusteella lisääntymispaikoille suunnistavien lahoppulajien (esim. hyönteiset) kohdalla hakkuutähdemasojen houkutusvaikutus saattaa olla näiden lajien populaatioille paikallisesti tuhoisaa, kun suurin osa yksilöistä munii hakkuutähdemasoihin, jotka korjataan energiakäyttöön ennen kuin jälkeläiset ovat aikuistuneet (Jonsell 2007).

Putkilokasveilla avohakkuu jo sinänsä muuttaa lajistoa suuresti, mutta lisäksi tutkimuksissa on havaittu ruderaatti- ja siemenpankkilajiston runsastuvan sitä enemmän mitä enemmän energiapuun korjuu aiheuttaa maaperähäiriötä (ks. Siitonen, 2001a ja viitteet siinä). Perhosilla (putkilokasvilajiston hyödyntäjiä, herbivoreja) energiapuun korjuun monimuotoisuusvaikutukset ilmenevät epäsuorasti. Oksien korjuun jälkeen ravintokasvit eivät jää peittoon ja maanpinnan rikkominen tuo runsaasti uusia kasvilajeja ja niiden herbivoreja. Varttuneen metsän perhoslajisto puolestaan taantuu tai häviää jo pelkän hakkuun vuoksi, eli energiakäyttö ei sinänsä tuo lisää negatiivisia vaikutuksia.

Hakkuutähteet ja kannot toimivat varjostusta ja kosteutta säilyttävinä suojapaikkoina suurelle joukolle lajeja (esim. pikkunisäkkäät, linnut, maakiitäjäiset, varttuneen metsän sammallajisto), mutta energiapuun korjuun vaikutusta näihin lajeihin ei ole juurikaan tutkittu (Berglund 2006).

Pieniläpimittaisen hakkuutähteen energiapuukäytön ongelmia pidetään suurina lähinnä vain lehtipuiden, lähinnä haavan, koivun ja jalojen lehtipuiden, kohdalla ja toisaalta sellaisilla alueilla ja seuduilla, joilla on poikkeuksellisen hyvin säilyneitä vaate-
liaiden ja uhanalaisten lahoppulajien paikalliskantoja joita energiapuun korjuu uhkasi (Berglund 2006, Dahlberg ym. 2006, Jonsell 2007). Kantojen korjuuta pidetään erityisen ongelmallisena ensinnäkin siksi, että kantopuu on osa talousmetsien muutenkin vähäistä järeää lahoppuun määrää, ja toisekseen siksi että sen vaikutuksista tiedetään huomattavasti vähemmän kuin muun hakkuutähteen korjuun vaikutuksista (Berglund 2006, Dahlberg ym. 2006, Jonsell 2007). Osittain tutkimuksen puutetta selittää se, että kantojen käyttö energiapuuna on niin tuore ilmiö, ja esim. Ruotsissa kantoja ei käytetä energiapuuna toistaiseksi lainkaan (Berglund 2006, Jonsell 2007). Uhanalaisten ja vaate-
teliaiden lajien on kuitenkin osoitettu pystyvän käyttämään ainakin avohakkuualueille jätettyjä korkeita kantoja (ks. Siitonen ja Ollikainen 2006). Energiapuun korjuun monimuotoisuusvaikutuksia pidetään vähäisinä lisäksi sillä edellytyksellä, että talousmetsissä tuotetaan maisematasolla riittäviä määriä järeää lahoppuuta energiapuun korjuun haittavaikutusten kompensoimiseksi (esim. Dahlberg ym. 2006). Samoin edellytetään huolehdittavan siitä, ettei talousmetsien luonnonhoidon nimissä säästetyt järeät säästö- ja lahoppuut päädy energiapuuksi (ks. esim. Rudolphi ja Gustafsson 2005).

4.11

Maaperän tuottokyvyn heikkeneminen ja eroosio

Maaperän tuottokyky riippuu monista tekijöistä, kuten maa-aineksesta, sen ravinteikkoudesta ja maan rakenteesta. Lisäksi maan laatua saattavat heikentää sinne kertyneet haitalliset aineet (maaperän pilaantuminen). Bioenergian tuotannossa vaikutukset maaperän tuottokykyyn liittyvät lähinnä maatalouden ja metsätalouden raaka-
ainetuotantoon. Polttoaineen varastointi, jalostus- ja polttolaitokset toki varaavat maapinta-
alaa ja esimerkiksi tuotantolaitoksen rakentaminen ja alueen asfaltointi heikentävät

maaperän tuottokykyä. Suhteessa raaka-aineen tuotantoon merkitys on kuitenkin vähäinen. Elinkaariarvioinnin menetelmät maaperän tuottokyvyn ja maankäytön, kuten myös monimuotoisuuden vähenemisen, arvioinnin osalta ovat vasta kehitteillä, eikä näitä tekijöitä ole juurikaan otettu bioenergian elinkaariarvioinneissa mukaan muuten kuin sanallisina arvioina.

Viljelymaan tuottokykyä heikentää mm. maan tiivistyminen ja viljavuuden heikkeneminen. Maan viljavuutta heikentää orgaanisen aineksen väheneminen ja eroosio. Eroosiolla tarkoitetaan yleisesti maaperän ja kallioperän kulumista ja kulkeutumista alkuperäiseltä paikaltaan sateen, virtaavan veden, jään, lämpötilavaihtelun tai tuulen vaikutuksesta. Suomessa eroosio on lähinnä sateen ja virtaavan veden ylläpitämä prosessi, jossa kiintoaine ja siihen sitoutuneet ravinteet kulkeutuvat vesistöihin. Eroosio siis köyhdyttää maaperää ja lisää vesistöihin kohdistuvan kiintoainekuormituksen lisäksi myös ravinnekuormitusta. Bioenergian tuotannossa eroosiota tapahtuu lähinnä tuotantotapahtumaan liittyvän maatalous- ja metsätalousmaan muokkauksen tai vastaavan maan käsittelyn seurauksena.

Edelleen viljelymaan tuottokykyä heikentävät pitkään jatkunut yksipuolinen viljely sekä ojituksen ja kalkituksen laiminlyönti. Huonorakenteisessa maassa ravinteiden hyväksikäyttö heikkenee ja sadot jäävät alhaisiksi, minkä seurauksena ravinnehävikit ympäristöön lisääntyvät. Eroosiota voidaan vähentää pitämällä maa kasvipeitteisenä ympäri vuoden. Viljelymaan orgaanista ainesta voidaan lisätä viljelykiertojen ja kasvivuorottelun avulla.

Energiakasvien viljelyn aiheuttamat maaperän laatuun liittyvät ongelmat eivät poikkea ravintokasvien viljelyn aiheuttamista ongelmista, mikäli vain jyvät ja siemenet käytetään hyväksi. Jos kuitenkin energiantuotantoon käytetään jatkuvasti koko kasvi (oljet mukaan lukien), saattaa tästä pitkällä aikavälillä aiheutua merkittävää viljelymaan orgaanisen aineksen vähenemistä.

Metsissä hakkuutähteiden korjuu saattaa heikentää maaperän ravinnetasapainoa. Ravinteet ovat kuitenkin periaatteessa korvattavissa lannoitetäydennyksellä, esim. palauttamalla puutuhka energiapuun korjuualoille. Lahopuun poistamisen aiheuttamaa maaperän orgaanisen aineksen vajetta ei kuitenkaan voida korvata. Myös maaperän sieniverkoston, erityisesti mykorritsasienten, ja tätä kautta puiden ravinteiden oton kannalta kantojen ja juurien korjuu saattaa olla olennaista. Kuitenkin on todettu, että suursienten itiöemien ja biomassan määrät eivätkä mykorritsasienten ja lahottajasienten suhteelliset osuudet eronneet tavanomaisten hakkuiden ja energiapuuhakkuiden välillä 15 vuotta hakkuun jälkeen (ks. Siitonen, 2001a ja viitteet siinä).

4.12

Ulkomaiset raaka-aineet

Tässä käsitellään lyhyesti palmuöljyn ja sokeriruohon raaka-aineiden ympäristövaikutuksia. Bioenergiaa ja liikenteen biopolttoaineita voidaan tuottaa myös monista muista raaka-aineista kuten kookosöljystä, mutta tarkastelun on tässä rajattu niihin ulkomaisiin raaka-aineisiin, jotka ovat merkittävimpiä suomalaisen bioenergiakustelun kannalta.

Palmuöljystä on muodostumassa yksi merkittävimmistä liikenteen biopolttoaineiden raaka-aineista. Sen käyttöä kohtaan on esitetty viime aikoina runsaasti kritiikkiä. Merkittävin syy on palmuöljyn tuotannon mahdolliset vaikutukset trooppisten alueiden metsien monimuotoisuuteen (Humalisto 2006).

Palmuöljyä tuotetaan mm. Malesiassa ja Indonesiassa suurilla viljelmillä, joiden tieltä on hakattu trooppista metsää. Tällä hetkellä palmuöljyn pääkäyttökohde on elintarviketeollisuus. Jos sen kysyntä biopolttoaineena kasvaa, on mahdollista, että

palmuviljelmien tieltä raivataan lisää trooppisia metsiä. Öljypalmujen viljeleminen heikentää monien uhanalaisten eläinten kuten tiikereiden, norsujen, orankien ja sarvikuonojen elinmahdollisuuksia. Lisäksi alueilla elää paljon muita lajeja, joiden olemassa oloa metsien raivaus saattaa uhata. Esimerkiksi Malesian pinta-alasta noin jo nyt 11 % palmuviljelmien peittämää, mikä aiheuttaa merkittävän luonnon monimuotoisuuden vähenemisen (Yusoff ja Hansen, 2005).

Lajien uhanalaistumisen lisäksi metsien raivaus ja palmuöljyn tuotanto vaikuttaa hiilitaseisiin ja trooppisen metsämaan kasvukuntoon. Bioenergian tuotannon raaka-aineita kuten palmuöljyä ja sokeriruokoetanolia arvioitaessa nämä tekijät tulisi ottaa huomioon.

Yusoff ja Hansen (2005) tutkivat elinkaarianalyysillä palmuöljyn tuotantoa sisältäen viljelyn, korjuun, kuljetukset ja jalostuksen Malesiassa. Lannoitteiden tuotannon arvioitiin aiheuttavan ketjun merkittävimmät ympäristövaikutukset, ja seuraavina olivat kuljetusten ja höyrykattilan päästöt ilmaan. Lannoitteet ja kuljetukset aiheuttivat lähinnä hiilidioksidipäästöjä ja höyrykattila epäorgaanisia, hengitysteihin vaikuttavia päästöjä. Tarkastelussa metsän raivaus uusien viljelyalueiden tieltä ja sen vaikutukset otettiin vain laadullisesti huomioon, ja näin ollen niiden vaikutusten suuruus ei näy määrällisen elinkaariarvioinnin tuloksissa. Hiilitaseen muutosten perusteella voidaan kuitenkin arvioida, että metsän raivaus vaikuttaa merkittävästi ilmaston lämpenemiseen. Toisaalta palmuöljyn tuotto hehtaaria kohti on yli nelinkertainen verrattuna esimerkiksi rypsiin tai auringonkukkaan.

Brasilian hallitus aloitti vuonna 1975 öljykriisin jälkeen kansallisen etanolipolttoaineohjelman (PROÁLCOOL), jonka tavoitteena oli edistää sokeriruokoetanolin tuotantoa ja käyttöä liikennepolttoaineena. Tuotanto ja käyttö lisääntyivät nopeasti. Vuosina 1986 ja 1987 etanolin tuotanto oli suurimmillaan (12,3 milj. litraa vuodessa), ja etanoliautojen osuus oli 95 % myynnistä. Tämän jälkeen sokerin hinnan nousu ja öljyn hinnan lasku pysäyttivät etanolin käytön kasvun. Vuosina 1997-1999 kiinnostus etanolin käyttöön lisääntyi uudelleen, mikä johti vuonna 2003 sellaisen auton markkinoille tuloon, joka voi käyttää kaikkia bensiinin ja etanolin sekoituksia polttoaineenaan (flex-fuel). Tällaisten autojen osuus on nykyisin 77 % Brasilian autokannasta. Tätä myötä myös etanolin tuotanto on kasvanut. Vuonna 2003 Brasilia tuotti noin neljänneksen (345 milj. tonnia) maailman sokerista. Tästä noin puolet käytettiin etanolin tuotantoon. Brasilian hallitus tavoittelee edelleen etanolin tuotannon ja viennin lisäämistä. (Román 2006).

PROÁLCOOL-ohjelmalla on arvioitu olleen merkittävä vaikutus kasvihuonekaasupäästöjen vähenemiseen. Arvion mukaan ohjelman ansiosta hiilidioksidipäästöjä säästyi 110 MtC vuosien 1975-2000 aikana. Toisaalta metsien hävittäminen, mahdollisesti myös lisääntyvän sokerin tuotannon tieltä, on Brasilian suurin kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttaja. Lisäksi lisääntyvän sokerin tuotannon pelätään vievän mahdollisuuksia karjan laiduntamiselta ja ruoan tuotannolta. Myös etanolin jalostuksen on todettu aiheuttavan ympäristöongelmia, koska tuotantolaitosten ympäristövaatimukset ovat alhaiset. Lisäksi sosiaalisen kestävyysnäkökulmasta ongelmia aiheuttaa työehtosopimuksien ulkopuolella olevien työntekijöiden suuri määrä. Tämä aiheuttaa ongelmia myös alan investointi- ja teknologian kehittymismahdollisuuksiin. (Román 2006).

Marris (2006) puolustaa sokeriruo'on viljelyä ja etanolin tuotantoa useilla tekijöillä, muun muassa sen energiatehokkuudella. Kun etanolin valmistuksesta syntyvä etanolijäte hyödynnetään energiana, tuottaa etanolin elikaariketju arviolta 8-kertaa enemmän energiaa kuin se kuluttaa. Lisäksi sokeriruo'on tuotannon vaatimat tuotantopanokset ovat vähäiset; nykyisillä kasvuaalueillaan Brasiliassa se ei tarvitse kastelua ja täydellinen sadonkorjuu ja auraus tehdään vain viiden vuoden välein. Muina vuosina riittää sadonkorjuu, ja kasvi kasvaa itsestään takaisin. Suurimmaksi ympäristöhaasteeksi myös Marris mainitsee sen, että sokerinviljely laajenee vähentäen luonnon monimuotoisuutta ja aiheuttaen hiilivarastojen pienenemistä. Hänen

mukaansa tuotanto voitaisiin 2–4-kertaistaa ilman merkittäviä vaikutuksia sademetsiin tai ruoantuotantoon, muun muassa koska sokeriruoko ei viihdy sademetsistä raivatuilla alueilla vaan kuivemmilla tasankoalueilla.

4.13

Kokonaisarvioita olemassa olevista elinkaaritutkimuksista

Sähkön ja lämmön tuotanto

Eriksson ym. (2007) vertailivat elinkaariarvioinnilla kaukolämmön tuotantoa jätteistä, puubiomassasta tai maakaasusta. Tuotantomenetelminä olivat yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto ja kaukolämmön erillistuotanto. Näistä yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto oli ympäristöllisesti edullisempi vaihtoehto. Myös Dornburg ja Faaji (2001) totesivat, että puuperäisen biomassaan perustuvassa energiantuotannossa yhdistetty sähkön- ja lämmön tuotanto oli energiatehokkain, vaikkakaan ei kustannustehokkain, vaihtoehto kaasutukseen ja sähkön tuotantoon verrattaessa.

Liikennepolttoaineet

Elinkaariarviointitutkimuksissa on pääsääntöisesti todettu, että peltobiomassasta valmistettujen liikenteen biopolttoaineiden energia- ja kasvihuonekaasutaseet ovat edullisia verrattuna fossiilisiin liikenteen polttoaineisiin, vaikkakin eräissä tutkimuksissa on päädytty jopa päinvastaisiin johtopäätöksiin (Quirin ym. 2004). Peltobiomassat ovat pääsääntöisesti huonompia happamoitumisen, rehevöitymisen ja N_2O päästöjen suhteen kuin fossiiliset polttoaineet. Peltoenergian osalta merkittävin vaihe ympäristökuormituksen aiheuttajana on viljan viljely, jossa tärkeimpinä tekijöinä ovat lannoitteiden käyttö, maaperästä vapautuvat päästöt ja koneiden energiankulutus (Bernesson ym. 2006).

Euroopan komissio on arvioinut Euroopan unionin bioenergiastrategian vaikutuksia (EC 2006). Arvion mukaan bioenergian tuotannon riski on, että kasvihuonekaasuvähennyksessä saavutettavat globaalit hyödyt häviävät paikallisille ympäristöhaitoille kuten biodiversiteettivaikutuksille, maan laadun heikkenemiselle, lisääntyvälle veden käytölle, ja lisääntyvälle pestisidien käytölle (non-food tuotannossa on väljemmät säädökset torjunta-aineiden osalta kuin ruoantuotannossa). Toisaalta tietyillä alueilla energiakasvien viljely saattaa auttaa ylläpitämään maatalousmaa tuotannossa, mikä voi estää tulvia ja maanvyörymiä, ja suojella tärkeitä elinympäristöjä.

Liikenteen osalta myös biopolttoaineita käytettäessä ajoneuvojen pakokaasupäästöjen on täytettävä EURO –päästörajoitteet. Nykyisten liikenteen biopolttoaineiden ympäristövaikutusten ei katsota juurikaan poikkeavan fossiilisten polttoaineiden vaikutuksista (EC 2006). Kun etanolia sekoitetaan bensiinin kanssa, kasvaa sen höyrynpaine, josta johtuen sen ilman laatua heikentävät päästöt eivät välttämättä ole alhaisemmat kuin bensiinin (Beer ja Grant 2007). Etanolin käyttö aiheuttaa vähemmän partikkelipäästöjä, mutta sen saattaa olla vaikea täyttää vaatimuksia VOC-päästöjen osalta. Biodiesel vähentää CO -päästöjä, mutta partikkelien, NO_x -ien ja hiilivetyjen osalta on raportoitu sekä positiivisia, negatiivisia että neutraaleja tuloksia. Synteettisen dieselin odotetaan vähentävän ilmapäästöjä hyvien palamisominaisuuksiensa, rikittömyyden ja aromaattisten yhdisteiden puuttumisen vuoksi.

Resurssien, muun muassa tuottavan maan pinta-alan, ollessa rajallisia, saattaa olla ympäristön kannalta kannattavampaa käyttää peltobiomassaa energian tuotannon sijaan materiaaliraaka-aineena. Dornburg ym. (2004) tarkastelivat biopolymeerien energian käyttöä, kasvihuonekaasuvähennyksiä ja maankäyttöä bioenergian vastaviin vaikutuksiin 11 elinkaaritutkimukseen pohjautuen. Biopolymeerien kasvihuonekaasujen ja energiankulutuksen vähenemä oli kaikissa tutkimuksissa suurempi

kuin bioenergian, kun otettiin sivutuotteiden hyödyntäminen mukaan tarkasteluun. Maapallon väestön lisääntyessä ja elintason noustessa kilpailu kasviproteiinista kiihtyy, ja erityisesti tämän raaka-aineen riittävyys muuhun kuin ravinnoiksi lienee tulevaisuudessa rajoitettua. Näyttäisikin siltä, että liikenteen biopolttoaineiden raaka-aineena kannattaisi käyttää erilaisia selluloosapohjaisia materiaaleja tai jättemateriaaleja peltobiomassan sijaan (Hill ym. 2006).

Jätteet

Biojätteistä valmistettujen polttoaineiden osalta tilanne vaihtelee tapauskohtaisesti, mutta yleensä biojätteet ovat lähtökohtaisesti parempia bioenergian raaka-aineena kuin neitseelliset raaka-aineet. Biojätteet ovat jo olemassa, eikä niiden valmistamiseen tarvita tuotantopanoksia tai energiaa kuten esimerkiksi viljan viljelyyn. Erikssonin ym. (2007) mukaan jätteenpolto on yleensä suositeltava menetelmä silloin, kun vaihtoehtona on jätteen kaatopaikkasijoitus. Jos jäte voidaan kuitenkin kierrättää, ei jätteenpolto ole ympäristövaikutusten perusteella suositeltavaa, eikä myöskään silloin, jos jätteenpolto vaikuttaa siihen, miten tehokkaasti jätteensyntyä voidaan ehkäistä.

Hajautettu vs. keskitetty bioenergian tuotanto

Kotimaisessa keskustelussa on usein pohdittu, kannattaako panostaa pienimittakaavaiseen, hajautettuun vai suurten laitosten keskitettyyn bioenergiantuotantoon. Ruotsissa tehdyn tutkimuksen mukaan tuotannon kokoluokka ei vaikuta merkittävästi etanolin tuotannon ympäristövaikutuksiin ja energiankulutukseen (Bernesson ym. 2006). Suuremmissa tuotantolaitoksissa tehokkuus on usein parempi kuin pienemmissä laitoksissa. Kuitenkin suurempiin laitoksiin raaka-aineita tuodaan yleensä laajemmalla alueella kuin pienempiin, jolloin kuljetusmatkojen aiheuttamat vaikutukset jossain määrin kumoavat tehokkaampien tuotantoprosessien tuoman hyödyn. Toisaalta Forsbergin (2000) mukaan suurissa laivayksiköissä kuljetus on tehokasta, ja pitkänkin laivamatkan päästöt ovat alhaiset verrattuna bioenergiasysteemien paikallisiin päästöihin.

4.14

Yhteenvedo bioenergian ympäristövaikutuksista

Bioenergian elinkaariketjuilla on monia ympäristövaikutuksia. Toisaalta biopolttoaineet vähentävät päästöjä verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin, mutta toisaalta ne saattavat lisätä kuormitusta. Osa vaikutuksista on vielä selvittämättä. Esimerkiksi biokaasua voidaan valmistaa monista materiaaleista, ja lopullinen ympäristökuormitus riippuu raaka-aineesta. Toisaalta peltoenergian ympäristövaikutukset riippuvat muun muassa viljelymenetelmistä. Esimerkiksi suorakylvön rehevöittävät ja eroosiota aiheuttavat vaikutukset ovat pienemmät kuin tavanomaisen viljelyn.

Biopolttoaineiden elinkaariset ympäristövaikutukset muodostuvat pääasiassa biomassan tuotannossa ja biopolttoaineen käyttövaiheessa. Biopolttoaineen valmistus on vähemmän merkityksellinen ja kuljetusten ympäristövaikutukset riippuvat siitä, millä välineellä kuljetukset tapahtuvat. Pitkäänkin laivamatka suurissa kuljetusyksiköissä ei biopolttoaineikköä kohti aiheuta yleensä suuria ympäristövaikutuksia, mutta mikäli polttoainetta kuljetetaan pienehköissä yksiköissä maanteitse, voi tämän vaiheen merkitys ilmastonmuutoksen ja muiden ilmapäästöjen suhteen nousta olennaiseksi.

Peltobiomassan tuotannossa nousevat tärkeimmiksi ympäristövaikutusluokiksi ilmastonmuutos, rehevöityminen, maaperän tuottokyky ja eroosio sekä toksisuus. Näiden osalta viljelymenetelmä ja bioenergiakasvi vaikuttavat merkittävästi vaikutuksen suuruuteen. Metsäbiomassan tuotannossa luonnon monimuotoisuus, maaperän tuottokyky ja eroosio sekä rehevöityminen ovat tärkeimpiä ympäristövaikutusluokkia.

Käyttövaiheessa päästöt ilmaan ja tätä kautta vesistöjen ja myös maaympäristön rehevöityminen ovat olennaisia ympäristövaikutuksia. Ilmastonmuutos ja kokonaisenergiatase ovat elinkaaren kokonaisuuden kannalta ratkaisevia.

Kasvihuonekaasu- ja energiataseen kannalta biomassan suora poltto vaikuttaa kannattavimmalta (vrt. luvut 4.2 ja 5.4). Verrattuna maakaasun, turpeen ja kivihiilen polttoon, on puun polton vaikutus ilmastonmuutokseen monikymmenkertaisesti alhaisempi (taulukko 8). Myös vaikutus happamoitumiseen on puun poltossa alhaisempi kuin turpeella ja kivihieillä, ja vaikutus alailmakehän otsonin muodostumiseen alhaisempi kuin maakaasulla ja kivihieillä. Pienissä laitoksissa, joissa ei ole erotinlaitteita savukaasun puhdistuksessa, ovat terveysvaikutuksia kuvaavien pienhiukkasten (PM_{2,5}) päästöt puun tuotannosta ja poltosta ovat kuitenkin hieman suuremmat kuin maakaasun vastaavat päästöt ja samaa suuruusluokkaa kuin turpeen vastaavat päästöt.

Taulukko 8: Ympäristövaikutuksia kuvaavien indikaattoreiden suuruusluokkavertailu eri polttoaineilla. Mitä suurempi indikaattoriluku on, sitä haitallisempia kyseisen polttoaineen tuotanto ja käyttö ovat ympäristölle. Luvuissa ovat mukana polttoaineen tuotanto- ja käyttövaiheet, ja polttotekniikka on ilmoitettu suluissa. Vertailuun on valittu pienet laitokset, joissa ei ole erotinlaitteita savukaasun puhdistuksessa. Päästöt on laskettu Dahlbon ym. (2006) ja Seppälän ym. (2006) esittämien sekä Ecolnvent (2006) –tietokannasta ja SYKEN ilmapäästökisteristä (2007) saatujen päästötietojen ja ominaispäästökertoimien perusteella. Vaikutusluokkien karakterisointikertoimina on käytetty Seppälän ym. 2006 esittämiä kertoimia.

	Puu (arina)	Maakaasu (poltin)	Turve (arina)	Kivihili (arina)
Ilmastonmuutos	1	39	46	53
Happamoituminen	1	1	3	11
Alailmakehän otsonin muodostuminen	1	7	1	5
PM _{2,5} (kuvaava terveysvaikutuksia)	3	1	3	12

Pienimuotoisessa lämmityksessä puuperäisen biomassan kasvihuonekaasupäästöt hyvin alhaiset verrattuna öljylämmitykseen. Happamoitavissa ja rehevöittämissä ilmapäästöissä ei ole suuria eroja. Toisaalta puunpoltto tulisijoissa ja klapi-kattiloissa aiheuttaa suurempia pienhiukkas-, hiilivety- ja PAH-päästöjä kuin öljykattilat.

Liikenteen biopolttoaineista F-T –diesel, biokaasu ja ohraetanoli sekä rypsi biodiesel (RME) silloin, kun oljet hyötykäytetään energiantuotannossa, ovat kasvihuonekaasupäästöjen kannalta parempia kuin fossiiliset liikennepolttoaineet (kuva 15, taulukko 8). Sen sijaan jos olkia ei hyötykäytetä, ovat ohraetanolin ja rypsi biodieselin (RME) elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt suuremmat kuin bensiinin ja dieselin. Muiden ilmapäästöjen osalta ei bio- ja fossiililla liikennepolttoaineilla ole suuria eroja, sillä samat EURO –päästönormit koskevat molempia. Biopolttoaineiden vaikutukset ravinteiden huuhtoutumiseen, luonnon monimuotoisuuden vähenemiseen ja maaperän tuottokyvyn heikkenemiseen ovat suuremmat kuin fossiilisten polttoaineiden.

Taulukko 9: Kasvihuonekaasujen suhteelliset päästöindikaattorit eri polttoaineille. Mitä suurempi suhteellinen päästö on, sitä suurempi on polttoaineen vaikutus ilmastonmuutokseen. Luvuissa ovat mukana polttoaineen tuotanto- ja käyttövaiheet. Päästötietojen lähteinä Mäkinen ym. (2006) ja Tuomisto (2006).

Polttoaine	Suhteellinen KHK-päästöindikaattori *
Ohraetanoli	7
Rypsi biodiesel (RME)	6
Diesel (fossiilinen)	5
Bensiini (fossiilinen)	5
Ohraetanoli **	2
Biokaasu	1
F-T –diesel	1

* laskettu elinkaaren aikaisista CO₂ -ekvivalenttipäästöistä

** olki korvaa turvetta energian tuotannossa

5 Bioenergian rooli osana kestävämpää energiajärjestelmää

Brundtlandin toimikunta määritteli kehityksen kestäväksi, jos se "tydyttää nykyhetken tarpeet viemättä tulevilta sukupolvilta mahdollisuutta tyydyttää omat tarpeensa" (UM/YM 1987, 26). Kahdessakymmenessä vuodessa kestävää kehitystä on tutkittu erittäin paljon, mutta siitä huolimatta yhteisymmärrystä kestävästä kehityksen tarkemmasta määritelmästä ja sisällöstä tai siitä, miten sitä tulisi edistää, ei ole saavutettu. Toisaalta yhteiskunnassa on hyvin laaja yhteisymmärrys siitä, ettei nykyinen kehitys ole kaikilta osin kestävää. Suomen kestävästä kehityksen strategiassa (Valtioneuvoston kanslia 2006b) sanotaan, että "Suomen kannalta kestävästä kehityksen merkittävimmät kehitystrendit ja haasteet liittyvät ilmastonmuutokseen, sopeutumiseen maailmantalouden nopeisiin muutoksiin ja väestörakenteen muutokseen." Lisäksi todetaan, että myös globaalit haasteet, erityisesti ilmastonmuutos, köyhyys ja eriarvoisuus sekä väestön kasvu vaikuttavat myös Suomessa.

Kestävästä kehityksen edistämiseen liittyy kokonaisvaltainen lähestymistapa, jossa yhdistetään kolme ulottuvuutta: ympäristö, talous ja sosiaaliset näkökohdat. Lähestymistavassa pyritään ottamaan huomioon eri ulottuvuuksiin kohdistuvat pitkäaikaiset vaikutukset sekä eri toimijoiden, toimenpiteiden ja valintojen yhteisvaikutukset, riippuvuudet ja takaisinkytkennät. Kokonaisvaltainen kestävästä kehityksen edistäminen näyttäisikin edellyttävän hyvin laaja-alaista suunnittelua ja seurausten arviointia. Toisaalta esimerkiksi valtiovallan taholta tapahtuvaan suunnitteluun on ryhdytty suhtautumaan yhä kriittisemmin erityisesti suunnitelmatalouksien romahduksen jälkeen (Meadowcroft 1999). Tämä ristiriita on kuitenkin ensivaikutelmaa pienempi, jos kestävässä kehityksessä korostetaan käsitteen prosessinomaista ja dynaamista piirrettä: uuden tiedon pohjalta tehdään kestävyteen tähtäävien toimenpiteiden uudelleen arviointia ja muokkaamista.

Miten bioenergian käytön voidaan nähdä edistävän kehitystä kestävämpään suuntaan? Peruslähtökohtana on se, että kestävyden arvioinnissa otetaan huomioon eri bioenergiantuotantojärjestelmien taloudellinen, sosiaalinen ja ympäristöulottuvuus. Toiseksi bioenergiaa ei tulisi käsitellä yksinään vaan osana energiajärjestelmän kokonaisuutta. Toisin sanoen bioenergiatuotanto voi edistää kestävyttä vain osana kestävämpää energiajärjestelmää. Kolmanneksi bioenergia on merkittävä osa muita järjestelmiä, joiden kestävyttä bioenergiakehityksen tulisi myös tukea tai ainakaan bioenergian käytön kokonaishaitat eivät saa olla suuremmat kuin kokonaishyödyt. Tällaisia muita bioenergiaan liittyviä järjestelmiä ovat muun muassa maa- ja metsätalousjärjestelmät sekä liikennejärjestelmä. Erilaisten biomassaresurssien saatavuus on rajoitettua, joten bioenergian tuotannolla ja valituilla tuotantomuodoilla on vaikutusta muiden järjestelmien taloudelliseen, ekologiseen ja sosiaaliseen kestävyteen. Neljänneksi bioenergian tulisi edistää kestävyttä eri alueellisilla tasoilla paikallisesta globaaliin ja ajallisilla tasoilla nykyhetkestä tulevaisuuteen.

Jotta käytännössä voidaan arvioida, edistääkö bioenergian tuotanto kestävämpää kehitystä, tulee olla kestävyden eri ulottuvuuksien tarkasteluun soveltuvia kriteerejä. Suomessa ei kuitenkaan tällaisia kriteerejä ole määritetty. Niiden tarve on kuitenkin tunnistettu esimerkiksi Suomen kestävästä kehityksen strategiassa (Valtioneuvoston kanslia 2006b). Monessa muussa maassa bioenergiaan liittyviä kestävyden kriteeristöjä on kehitetty tai ollaan kehittämässä. Esimerkiksi Hollannissa on kehitetty alustavat liikenteen biopolttoaineiden kestävästä tuotannon ja jalostuksen kriteerit (Sustainable production of biomass 2006). Myös ainakin Australiassa ja Brasiliassa on pohdittu kestävästä bioenergian tuotannon kriteerejä (O'Connell ym. 2005, Moret ym. 2006). Samoin Iso-Britanniassa ja Euroopan Unionissa on aloitettu bioenergian

tuotannon kestävyyskriteerien kehitystyö. Palmuöljyn tuotannon kestävyys edistämiseksi on perustettu Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO). RSPO:ssa on mukana palmuöljyn tuottajia ja käyttäjiä, mm. Neste Oil. Tavoitteena on laatia kestävä palmuöljyn tuotannon ja kulutuksen kriteerit ja indikaattorit.

Erilaisten bioenergiavaihtoehtojen elinkaariset ympäristövaikutukset eivät yksinään ratkaise sitä, edistääkö tiettyjen bioenergiatuotantotapojen yleistyminen kestävämpää kehitystä, vaan myös alla olevia seikkoja tulee ottaa huomioon ratkaisujen hyväksyttävyyttä arvioitaessa. Lisäksi edellä mainitut bioenergian kestävyys arvioinnin neljä peruslähtökohtaa tulee ottaa huomioon.

- Se, edistääkö tietty bioenergiajärjestelmä kestävyyttä ympäristönäkökulmasta, riippuu ilmastonmuutosvaikutuksen lisäksi useista muista ympäristövaikutuksista. Bioenergiajärjestelmän ympäristövaikutukset on arvioitava koko elinkaaren ajalta (luku 5.1).
- Bioenergian käytön yhteiskunnalliset kustannukset ja hyödyt sekä niiden kohdentuminen vaikuttavat keskeisesti siihen, edistävätkö tietyt bioenergiaratkaisut taloudellista kestävyyttä (luku 5.2).
- Sellaiset bioenergiaratkaisut edistävät sosiaalista kestävyyttä, jotka edistävät yksilöiden ja yhteisöjen mahdollisuuksia sopeutua muutoksiin ja luovat positiivisia toimintamahdollisuuksia tuottavia kehityspolkuja (luku 5.3).
- Vain sellaiset bioenergiaratkaisut, joiden kokonaisenergiatase on selkeästi positiivinen, voivat pidemmällä aikavälillä edistää kestävä kehitystä (luku 5.4).
- Biomassasta tuotetaan paljon muutakin kuin energiaa. Puusta tehdään sanomalehtiä, pakkauksia ja hygieniatuotteita. Kehitysmaiden elintason noustessa on arvioitu myös biomassaan perustuvien tuoteryhmien kysynnän kasvavan. Peltobiomassasta tehdään pääasiassa ruokaa ihmisille ja eläimille. Väestönkasvun ja elintason nousun seurauksena ruuan ja rehun kysyntä kasvaa. Kilpailu biomassasta lisääntyy. Se, edistääkö biomassan käyttö energiantuotannon kestävyttä vai ei, riippuu kokonaisuudesta eikä ainoastaan bioenergiasta (luku 5.5).

5.1

Bioenergian kestävyys ympäristönäkökulmasta

Kun arvioidaan sitä, edistääkö tietty bioenergiajärjestelmä kestävyyttä ympäristön kannalta, on otettava huomioon kaikki ympäristövaikutukset (vrt. luku 4). Arvioinnin tulee perustua elinkaariajatteluun. Ympäristökriteerien pitäisi pystyä vastaamaan ainakin seuraaviin kysymyksiin:

1. Onko biomassan tuotanto toteutettu siten, että maaperän tuottokyky ei heikene eivätkä ekologiset vaikutukset ylitä luonnon kantokykyä?
2. Miten bioenergiajärjestelmän ympäristövaikutukset suhtautuvat vaihtoehtoisen energijärjestelmän ympäristövaikutuksiin? Ovatko ne pienemmät vai suuremmat ja mistä erot johtuvat?

Ilmastonmuutosta pidetään tällä hetkellä merkittävimpana ympäristöongelmana. Bioenergian lisäämistä perustellaan kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisellä ja näin ollen ilmastonmuutoksen torjunnalla. Hollantilaisten liikennepolttoaineita koskevan kriteeristön (Sustainable production of biomass 2006) mukaan biopolttoaineiden kasvihuonekaasupäästöjen tulee olla vähintään 30 % pienemmät kuin fossiilisten polttoaineiden kasvihuonekaasupäästöjen, jotta kestävyyskriteeri toteutuisi. Hollantilaisten mallissa (Sustainable production of biomass 2006) muut kuin kasvihuonekaasupäästökriteerit on kuvattu vain yleisellä tasolla. Luonnon monimuotoisuuden osalta todetaan, että luonnonsuojelualueille tai arvokkaille ekosysteemeille

ei saa aiheutua haittaa. Mallissa kestävyden kriteeri täyttyy useiden tekijöiden osalta (mm. jätteet, päästöt ilmaan), jos tuotanto tapahtuu voimassa olevaa lainsäädäntöä ja lupia noudattaen. Suomalaisia kriteerejä kehitettäessä on harkittava, voitaisiinko määrällisiä kriteereitä ottaa käyttöön myös muille kuin kasvihuonekaasupäästöille.

Toisaalta bioenergian tuotannon ja käytön ympäristövaikutukset voivat joiltain osin (esim. luonnon monimuotoisuus) olla suurempia kuin fossiilisten polttoaineiden. Vaihtoehtojen paremmuuden arvioinnissa on tällöin viime kädessä kyse siitä, mikä painoarvo annetaan eri ympäristövaikutuksille (ks. esim. van den Broek ym. 2002). Tähän liittyen on kehitetty arvottomistekniikoita (esim. Finnveden ym. 2002), mutta ongelmaksi jää aina painokertoimien subjektiivisuus.

Bioenergian tuotannolla ja käytöllä voidaan saavuttaa kasvihuonekaasupäästöjen vähenemien ohella myös muita ympäristöhyötyjä. Esimerkiksi vesiensuojelun kannalta kriittisillä alueilla voidaan edistää vesiä vähemmän kuormittavien energiakasvien viljelyä. Lannan ylituotanto-ongelmaa voidaan puolestaan lieventää tuottamalla lannasta biokaasua. Jättemateriaaleista tuotettu biopolttoaine lisää jätteiden hyötykäyttöä ja vähentää omalta osaltaan kasvihuonekaasupäästöjä ja säästää resursseja. Samalla nämä ratkaisut voivat edistää taloudellista ja sosiaalista kestävyttä esimerkiksi luomalla lisätyöpaikkoja maaseudulle.

Merkittäviä win-win -ratkaisuja voi syntyä uusien innovaatioiden kautta. Esimerkiksi perinteisessä massa- ja paperiteollisuudessa syntyy uusia liiketoimintamahdollisuuksia, kuten biojalostamot, jotka entistä energia- ja materiaalitehokkaammin hyödyntävät uusiutuvia luonnonvaroja. Kokonaisvaltainen lähestymistapa, jossa eri bioenergiaketjuja ja niiden tuotanto- ja käyttömahdollisuuksia tarkastellaan yhdessä yksittäisten elinkaariketjujen sijaan, voi paljastaa tehostamismahdollisuuksia. Esimerkiksi yhden toimijan tuottamia jätteitä voidaan mahdollisesti käyttää toisen raaka-aineena tai energialähteenä.

Suomessa käytettävä bioenergia ei saa aiheuttaa ekologisia haittoja myöskään maamme rajojen ulkopuolella. Kestävyttä arvioitaessa olisi pystyttävä huomioimaan myös tulevaisuudessa realisoituvat vaikutukset. Usein kuitenkin arviointimenetelmät ovat rajoittuneita, eikä pitkälle tulevaisuuteen ulottuvia vaikutuksia pystytä kunnolla ennakoimaan. Esimerkiksi CFC -aineiden osalta ei osattu tunnistaa niiden kriittisiä vaikutuksia yläilmakemän otsonikerrokselle. Bioenergian osalta tällaisia tulevaisuuden kestäättömiä vaikutuksia voivat olla esimerkiksi luonnon monimuotoisuuden väheneminen ja maaperän tuottokyvyn heikkeneminen intensiivisen biomassan korjuun vuoksi.

5.2

Bioenergian taloudellisten kustannusten ja hyötyjen vaikutuksia kestävyteen

Suomen kuten muidenkin maiden talous on yhä voimakkaammin kytketty kansainväliseen talouteen. Tästä seuraavat entistä laaja-alaisemmat taloudelliset mahdollisuudet laajentuvien vientimarkkinoiden myötä, mutta toisaalta myös ankarampi kilpailu. Siksi kaikkien tuotantotekijöiden kustannuksia tarkastellaan yhä perusteellisemmin. Tuotannon, myös energiatuotannon, talous ei kuitenkaan riipu ainoastaan kustannuksista vaan myös tuotetuista hyödyistä. Suomen teollisuustuotanto on OECD-maiden energiaintensiivisimpiä (Valtioneuvoston kanslia 2006b, 101), näin ollen energian hinta on keskeinen tekijä niin yritysten kuin valtion talouden kannalta. Todennäköisesti energian maailmanmarkkinahinnat tulevat jatkossa nousemaan (Valtioneuvoston kanslia 2006b). Eri bioenergiavaihtoehtojen kustannuksia tulisikin arvioida yleinen kehitys huomioon ottaen.

Kustannusten määrän lisäksi tärkeää on myös se, kenelle kustannukset kohdistuvat. Energiakustannukset eivät määräydy täydellisen kilpailun tuloksena, vaan ne syntyvät epätäydellisillä markkinoilla, joilla tietyillä toimijoilla on huomattavaa markkinavoimaa (Purasjoki 2006). Energian tuotantoon liittyy usein paljon ulkoisvaikutuksia, joiden perusteella julkinen sektori puuttuu markkinoihin. Bioenergian kustannuksiin ja niiden kohdentumiseen vaikuttavat suorat ja välilliset tuet, kuten maataloustuet tai esimerkiksi metsäteiden kunnostuksiin käytettävät julkiset varat. Eri bioenergiavaihtoehtojen kansantaloudelliset ja yritystaloudelliset kustannukset ovat monimutkainen ja laaja kysymys. Seuraavassa kuvataan vain eräitä asiasta tehtyjä tutkimuksia. Lähinnä näissä tutkimuksissa on tutkittu vain kustannuspuolta, vaikka kustannusten ja taloudellisten hyötyjen samanaikainen tarkastelu olisi toivottavampaa.

Suomessa kansantaloudellisesti kustannustehokkaimpana tapana vähentää kasvihuonekaasupäästöjä bioenergian avulla on pidetty puuperäisen biomassan käyttöä yhdistetyssä lämmön ja sähkön tuotannossa. Turpeen korvaaminen hakkuutähteellä lämmön ja sähkön tuotannossa voi olla joissakin tapauksissa jopa taloudellisesti kannattavaa (Mäkinen ym. 2006). Kyseisen tutkimuksen mukaan myös ohraetanoli on kustannustehokas tapa vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, jos oljella korvataan turvetta lämmön ja sähkön yhteistuotannossa. Tuotantokustannukset laskettiin biopolttoaineita tuottavan laitoksen kannalta. Sen sijaan tutkimuksessa ei arvioitu kansantaloudellisia tai yhteiskunnallisia hyötyjä eikä kustannuksia. Ilman oljen energiahyödyntämistä perinteisesti valmistetut viljaetanoli ja biodiesel eivät ole kustannustehokkaita tapoja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Ne saattavat jopa lisätä kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna vastaavien fossiilisten polttoaineiden tuotanto- ja käyttöketjuihin.

Edellä mainitussa VTT:n ja MTT:n tutkimuksessa (Mäkinen ym. 2006) rypsi biodieselin tuotantokustannuksiksi arvioitiin noin 21 €/GJ ja ohraetanolin noin 26 €/GJ, kun raaka-aineen hintana käytettiin nykyistä markkinahintaa. Vastaavasti puusta ja ruokohelvestä valmistetun Fischer-Tropsch -dieselin tuotantokustannukset olivat 13-15 €/GJ välillä. Fossiilisen bensiinin ja dieselin jalostuskustannukset ovat noin 11 €/GJ. Bensiinin verollinen hinta on noin 40 €/GJ raakaöljyn tynnyrihinnan ollessa 60 €. Kun raaka-ainekustannuksina käytetään todellisia kustannuksia, sekä ohraetanolin että rypsi biodieselin tuotantokustannukset lähes kaksinkertaistuvat ollen noin 60 €/GJ (ohraetanoli) ja noin 55 €/GJ (rypsibiodiesel). Ohran ja rypsin todelliset tuotantokustannukset ovat 3-3,5 -kertaiset niiden markkinahintaan nähden. (Mäkinen ym. 2006)

Biopolttoaineiden, kuten viljasta valmistetun bioetanolin ja öljykasveista valmistetun biodieselin (RME), tuotantokustannukset ovat eri arvioiden perusteella useimmilla tuotantoketjuilla selvästi korkeammat kuin fossiilisten polttoaineiden tuotantokustannukset. Jätteraaka-aineita käytettäessä voidaan joissakin tapauksissa päästä lähelle fossiilisten polttoaineiden tuotantokustannuksia. Tuotantokustannuksiksi lasketaan yleensä raaka-aineiden ja niiden kuljetusten kustannukset sekä jalostuksen ja jakelun kustannukset. Verot ja tukiaiset sekä välilliset kustannukset on jätetty pois tuotantokustannuksista.

Laajassa EU-hankkeessa Concawe ym. (2007) arvioivat erilaisten vaihtoehtoisten liikennepolttoaineiden käytöstä EU:lle koituvia kustannuksia. Vertailuskenaariona ovat perinteiset autot ja fossiiliset polttoaineet ja tarkasteltava ajanjakso vuodet 2010-2020. Tietystä raaka-aineesta koituvat kustannukset on laskettu maailmanmarkkinahintojen perusteella. Tämänkaltaisissa laskelmissa keskeisiä ovat aina lähtöoletukset. Esimerkki keskeisestä oletuksesta on, että olemassa olevaa jakeluverkostoa täydennetään, ei siis täysin korvata, uusilla laitteilla. Näin ollen esimerkiksi vaihtoehtoisen polttoaineen toimitukseen voidaan käyttää fossiilisilla polttoaineilla kulkevia tankkiautoja. Tähän liittyy oletus, että 5 % liikennepolttoaineista olisivat biopohjaisia. Öljyn hinnalla on suuri merkitys tuloksiin ensinnäkin, koska se määrää fossiilisten polttoaineiden hintaa, ja toiseksi, koska öljyn hinta vaikuttaa melkein kaikkien mui-

den materiaalien ja palvelujen hintoihin. Tutkimuksessa kustannuksia on laskettu kahdella eri öljynhinnoilla, 25 €/tynnyri ja 50 €/tynnyri.

Concawen ym. (2007) laskelmien mukaan uusiutuvien liikennepolttoaineiden käytön lisääminen EU:ssa olisi tällä hetkellä kallista. Samalla kustannuksella saavutettu kasvihuonekaasuvähenemä voi vaihdella huomattavasti. Hiilidioksidivähenemän kustannus käyttäen perinteisiä biopolttoaineita olisi luokkaa 150–300 €/CO₂ tonni, mikäli öljyn hinta olisi 25 €/tynnyri ja noin 100–200 €/CO₂ tonni, mikäli öljy maksaisi 50 €/tynnyri. Liikenteen biopolttoaineiden valmistus kaasuttamalla puuperäisestä biomassasta (esim. hakkuutähteet, mustalipeä) metsäteollisuuteen integroituvissa biojalostamoissa on yksi kustannustehokkaimmista tavoista vähentää kasvihuonekaasupäästöjä.

Kustannusten ja hyötyjen kohdentuminen vaikuttaa laajasti erilaisten uudistusten toteutettavuuteen. Mikäli taloudellinen hyöty uudesta ratkaisusta menee eri yhtiöille kuin niille, jotka saavat voittoa käytössä olevasta järjestelmästä, yrittävät perinteiset toimijat käyttää sekä markkinavoimaansa että poliittista vaikutusvaltaansa tällaisen kehityksen asemansa turvaamiseksi. Samankaltaisia intressiristiriitoja voi syntyä myös muiden bioenergia- ja biomassan käyttömuotojen osalta (ks. myös luku 5.5).

5.3

Bioenergiaratkaisut osana sosiaalisesti kestävämpää kehitystä

Sosiaalinen kestävyys on kestävä kehityksen ulottuvuuksista epämääräisin ja sen konkreettinen sisältö hankalasti hahmotettavissa. Raition ja Rannikon (2006) mukaan ”tämä johtuu paljolti siitä, että sosiaalinen kestävyys on hyvin kontekstisidonnaista, riippuvaista niin sovellutusalueelta kuin kohdealueesta”. Näin ollen ei ole mielekästä puhua bioenergiatuotannon kestävydestä yleisellä tasolla, vaan bioenergian eri tuotantotapojen sosiaalinen kestävyys tulee käsitellä erikseen, osana niitä järjestelmiä, joissa tuotanto tapahtuu (esimerkiksi maa- ja metsätalousjärjestelmät) ja paikallisessa sekä ajallisessa yhteydessään.

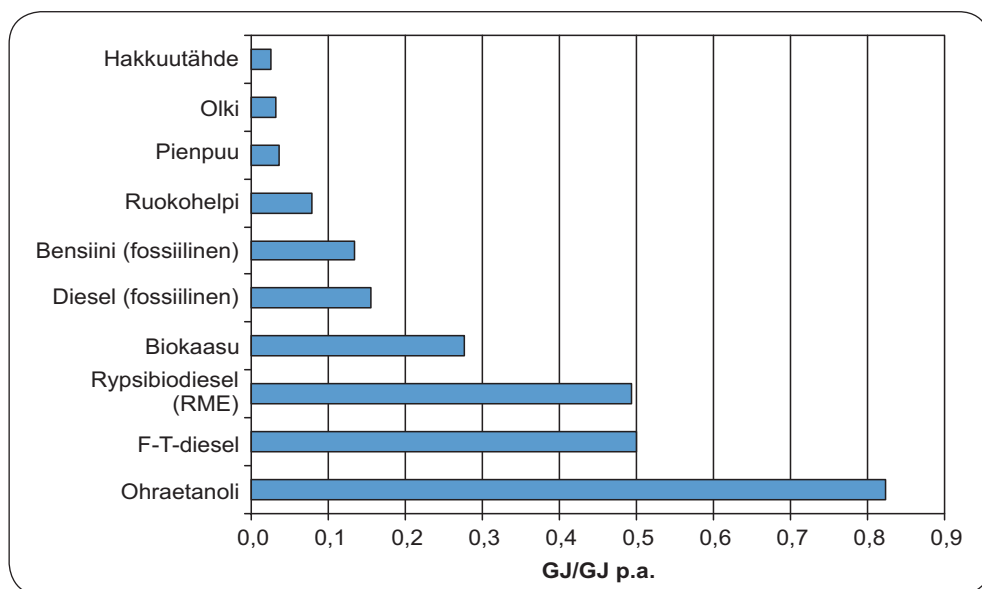
Sosiaalisen kestävyuden perusta on sosioekologisen järjestelmän kyvyssä sopeutua muutoksiin ja luoda positiivisia toimintamahdollisuuksia tuottavia kehityspolkuja. Raitio ja Rannikko (2006) pitävät sosiaalista kestävyttä ihmiskeskeisenä käsitteenä, joka korostaa ihmisten hyvinvointia. Heidän mukaansa ”sosiaalinen kestävyys liittyy yksilöiden mahdollisuuksiin hallita omaa elämäänsä”. Leskinen ym. (2006) korostavat sosiaalista kestävyttä dynaamisena ilmiönä, jossa keskeistä on tunnistaa toimintakentän muutokset ja puskurikyky, toimintakapasiteetin kasvu sekä järjestelmän kyky muuntua itseohjautuvasti. Dynaamisen sosiaalisen kestävyuden tarkastelu on tärkeä staattisen, indikaattoreihin perustuvan sosiaalisen kestävyuden täydentäjä. Se mahdollistaa kestävyuden tulkinnan ilman, että kestävyuden kriteerit sidotaan johonkin vallitsevaan tilanteeseen tai vakiintuneisiin intresseihin.

Kestävä kehityksen sosiaalisen ulottuvuuden konkretisoimiseksi on kehitetty erilaisia indikaattoreita. Nämä liittyvät mm. paikallisen väestön vaikutusmahdollisuuksiin, paikallisen väestön työllisyyteen ja työoloihin, työvoiman taitojen kehittämiseen, monikäytön elinkeinollisiin ulottuvuuksiin, virkistysmahdollisuuksiin, paikallisten sosiaalisten järjestelmien toimivuuteen sekä paikallisen kulttuurin jatkuvuuteen (Raitio ja Rannikko 2006). Lähtökohtaisesti bioenergian eri tuotantomuodot ovat sosiaalisesti kestävämmällä pohjalla, mikäli ne vahvistavat yllä mainittuja tekijöitä verrattuna muihin energian tuotantomuotoihin.

Energiatase indikaattori kestävyiden ympäristö- ja talousulottuvuuksista

Vain sellaiset bioenergiaratkaisut, joiden kokonaisenergiatase on selkeästi positiivinen voivat edistää kestävästä kehitystä ympäristönäkökulmasta, mutta myös kokonaistaloutta ajatellen. Kokonaisenergiataseita tarkastelemalla saadaan käsitys, miten biomassaa tulisi käyttää, jotta saavutetaan mahdollisimman hyvä energiantuotannon hyötysuhde. Asia on ajankohtainen etenkin liikenteen biopolttoaineiden yhteydessä.

Energiatase on tapa tuottaa bioenergiaa on käyttää metsistä saatavaa puuainesta ja pelloilta saatavia energiakasveja ja biopolttoaineita kuten olkea suoraan esimerkiksi yhdistetyssä lämmön ja sähkön tuotannossa. Hakkuutähde, olki, pienpuu ja ruokohelpi ovat tuotettavissa pienemmällä energiapanoksella kuin fossiiliset polttoaineet bensiini ja diesel (kuva 18). Myös biokaasun energiatase on melko lähellä fossiilisten polttoaineiden tasetta.



Kuva 18. Eräiden polttoaineiden tuotannon primäärienergiapanos polttoaineen energiasisältöä kohden. Fischer-Tropsch-diesel (F-T-diesel) on valmistettu hakkuutähteestä. Oljen, hakkuutähteen ja pienpuun luvuissa ovat mukana vain korjuun, kuljetuksen ja valmistuksen vaatimat energiapanokset. Biokaasu on valmistettu tavanomaisesti viljellystä ruokohelvestä, jota on lannoitettu biokaasutuotuksessa syntyvällä mädätteellä. Kaavio perustuu lähteeseen Mäkinen ym. 2006 ja biokaasun osalta lähteeseen Tuomisto 2006.

Mäkinen ym. (2006) tutkimuksessa energiatase oli kaikilla tarkastelluilla biopolttoaineilla (ohraetanoli, rypsi pohjaisen biodiesel (RME), hakkuutähde- ja ruokohelpi pohjainen Fischer-Tropsch -diesel) positiivinen eli polttoaineen energiasisältö oli suurempi kuin tuotantoon kuluva energia (kuva 18). Etanolin tuotantoon kului tutkimuksen tulosten mukaan noin 80 % etanolin sisältämästä energiasta eli noin 0,82 GJ/GJ etanolia. Biodieselin (RME) ja hakkuutähde- ja ruokohelpi pohjaisen Fischer-Tropsch-dieselin tuotantoon kului noin 50 % polttoaineiden sisältämästä energiasta. Etanolin ja biodieselin tuotantoketjussa suurin osa energiasta kuluu polttoaineen valmistuksessa ja jakelussa. Raaka-aineen tuotannon osalta eniten energiaa kuluu lannoitteiden valmistukseen ja siementen kuivaukseen.

Useissa ulkomaisissa tutkimuksissa viljaetanolin ja RME:n energiataseet ovat suositelluiksi kuin Mäkisen ym. (2006) tutkimuksessa, johtuen ilmeisesti suuremmasta satotasosta. Esimerkiksi ruotsalaisen tutkimuksen (Bernesson ym. 2006) mukaan

vehnäetanolin energiapanos on tuotantomittakaavasta riippuen $0,13\text{--}0,19 \text{ GJ/GJ}_{\text{etanoli}}$ kun rehuruuheella korvataan soijarehua eikä olkia hyödynnetä. Energiantarve on siis vain noin 20 % Mäkisen ym. (2006) ohraetanolille laskemista arvoista. Erot johtuvat noin 40–70 % suuremmasta satotasosta, alemmasta lannoitustasosta, uusiutuvien energianlähteiden käytöstä jalostusprosessissa sekä eroavaisuuksista lähtöarvoissa (Mäkinen ym. 2006).

Concawen ym. (2006) laskelmien mukaan kokonaisenergiataseet olivat lähes kaikissa perinteisissä etanolin ja biodieselin tuotantoketjuissa selvästi negatiivisia eli energiaa kului biopolttoaineen valmistamiseen enemmän kuin kyseisten biopolttoaineiden energiasisältö on. Esimerkiksi vehnästä valmistetun etanolin tuotantoon kuluu noin 1,5–1,75 kertaa etanolin energiasisältö, mikäli olkea ei hyödynnetä energiana, mutta valkuainen käytetään eläinten rehuna. Vastaava suhde RME:lle on noin 1,2, kun glyseroli käytetään eläinten rehuna. Mäkinen ym. (2006) arvioivat, että suuri ero heidän laskelmiin verrattuna johtuu lähtöoletuksesta. Concawen ym. tutkimuksessa on ilmeisesti rehuruuheeksi menevän biomassan energiasisältö laskettu mukaan primäärienergiatarpeeseen, vaikka se korvaa lähes identtisen määrän soijarehun energiasisältöä.

Biokaasun energiataaseita on laskettu myös Suomessa. Tuomiston (2006) mukaan biokaasun tuotanto nurmesta ja ruokohelpistä kuluttaa energiaa noin 21–39 % biokaasun energiasisällöstä eli primäärienergiaa kuluu $0,21\text{--}0,39 \text{ GJ/GJ}_{\text{biokaasu}}$ (kuva 18). Ruotsalaisen elinkaaritutkimuksen mukaan biokaasun tuotantoon kuluu 15–50 % biokaasun energiasisällöstä riippuen raaka-aineesta (Berglund ja Börjesson 2006). Biokaasun tuotannossa energiaa kuluu eniten biokaasureaktorin lämmittämiseen. Esimerkiksi lämmönvaihtimilla voidaan parantaa biokaasureaktoreiden energiatehokkuutta varsinkin suuremmissa tuotantoyksiköissä. Mätäneminen on eksoterminen reaktio, joten fossiilisia polttoaineita biokaasun tuotantoon tarvitaan vain vähän.

Yleisesti ensimmäisen polven biopolttoaineiden valmistuksen energiatehokkuus on huono, vaikka fossiilisten polttoaineiden käytössä niilläkin saavutetaan säästöjä. Myönteinen poikkeus on biokaasu, jonka kokonaisenergiatase on myös Concawen ym. (2006) laskelmien mukaan positiivinen. Toisen polven biopolttoaineiden valmistamista pidetään huomattavasti lupaavampana mahdollisuutena tuottaa biopolttoaineita energiatehokkaasti.

Energiatase on hyvä indikaattori tarkasteltaessa yksittäisten biopolttoaineiden tuotannon ekologista ja myös taloudellista kestävyyttä. Käytännössä laajamittaisen biopolttoaineiden tuotannon kestävyuden arviointi edellyttää tarkempaa ympäristövaikutusten arviointia ja myös moniulotteista yhteiskunnallisten ja sosiaalisten näkökohtien tarkastelua.

5.5

Kiristyvää kilpailu biomassasta

Bioenergian tulisi edistää kestävyyttä eri alueellisilla tasoilla paikallisesta globaaliin ja ajallisilla tasoilla nykyhetkestä tulevaisuuteen. Talouden globalisaation myötä ympäristönsuojelu kytkeytyy erottamattomasti kansainväliseen vastuuseen luonnonvarojen kestävästä käytöstä. Materiaalivirrat sitovat Suomen muiden maiden ja alueiden luonnonvarojen käyttöön. Kestävää kulutusta ja tuotantoa on tarkasteltava yhtäältä kotimaisen luontopääoman tehokkaan käytön näkökulmasta ja toisaalta tuonnin ja niihin liittyvien piilovirtojen näkökulmasta (Ilomäki ja Hildén 2006).

Biomassasta tehdään paljon muutakin kuin energiaa. Puusta tehdään muun muassa sanomalehtiä, pakkauksia ja hygieniatuotteita. Kun kehitysmaiden elintaso nousee, näidenkin tuoteryhmien kysyntä kasvaa. Pelloilla tuotetaan pääasiassa ruokaa

ihmisille ja eläimille. Väestönkasvun ja elintason nousun seurauksena ruuan ja rehun kysyntä kasvaa. On siis useita syitä olettaa biomassan kysynnän kasvavan. Biomassan käyttö energian tuotantoon vaikuttaa myös siihen, miten biomassaan avulla voidaan tyydyttää näitä muita kasvavia tarpeita. Se, edistääkö bioenergian käyttö kestävyyttä, riippuu siten biomassan käytöstä kokonaisuudessaan, tarkasteltuna taloudellisesta, sosiaalisesta ja ympäristönäkökulmasta.

Biopolttoaineiden tuotantovaihtoehtoja arvioitaessa tulee huomioida raaka-aineiden vaihtoehtoiset käyttötavat, kuten ruoka, kemikaalit ja metsäteollisuuden tuotteet. Esimerkiksi EU:n 5,75 %:n biopolttoainetavoitteen toteuttaminen Suomessa perustuu hyvin todennäköisesti ainakin osittain malesialaiselle palmuöljylle ja mahdollisesti myös brasilialaiselle etanolille, koska kotimaisten raaka-aineiden tuotantopotentiaali ei ainakaan lyhyellä tähtäimellä ole riittävä. Vaikka EU:n biopolttoainetavoitteilla yritetään luoda kysyntää Euroopan kasviöljyille, ne todellisuudessa lisäävät myös malesialaisen palmuöljyn ja brasilialaisen soijan kysyntää. Tämä puolestaan saattaa lisätä sademetsien hakkuita soija- ja palmuviljelmien tieltä. Toisaalta kasvava kysyntä myös nostaa hintoja. Concawe ym. (2007) arvioivat, että EU:n 5,75 % biopolttoainetavoite kasvattaa kasviöljyn kysyntää maailman markkinoilla 9 % vuonna 2012 ja tästä seuraisi 6–16 % hinnannousu. Korkeammat maailmanmarkkinahinnat merkitsisivät lisää vientituloja mm. Brasilialle ja mahdollisesti myös esimerkiksi sokeriruo'on viljelijöille. Ei ole olemassa yleistä vastausta siihen, miten kasvava bioenergiakysyntä EU:ssa taikka Suomessa vaikuttaa kehitysmaiden talouksiin ja niiden eri väestöryhmien tulonmuodostuksiin. Se riippuu siitä, miten näiden maiden eri markkinat ovat kytkeytyneet maailmanmarkkinoihin ja miten maan sisäiset markkinat toimivat. Oleellisia tekijöitä ovat myös esimerkiksi maan ja tuotantolaitosten omistus, poliittiset instituutiot ja valtasuhteet.

Liikennepolttoaineiden kansainvälinen tarkastelu muodostuu erittäin haastavaksi, kun tarkastellaan raaka-aineisiin liittyviä eettisiä kysymyksiä. YK:n ennusteen mukaan maapallon väestön kasvaa edelleen nykyisestä 6,7 miljardista 9,2 miljardiin vuonna 2050 (YK 2007). Voidaankin kysyä, halutaanko tuottaa ruokaa ihmisille vai polttoainetta autoille. Elintason noustessa lihan kulutus kasvaa, mikä tarkoittaa rehun tarpeen kasvua. Viljan tarpeen on arvioitu kaksinkertaistuvan vuoteen 2050 mennessä, mikä asettaa maatalouden kestävyydelle suuria haasteita liittyen muun muassa monimuotoisuuteen, ekosysteemipalveluihin, ravinnetasapainoon sekä torjunta-aineiden ja antibioottien käyttöön (ks. Tilman ym. 2002). Kriitikkojen mukaan energiakasvien viljely on jo nykyisin epäeettistä osan maailman väestöstä kärsiessä aliravitsemuksesta.

Toisaalta, vaikka maailman väkiluku onkin kasvanut, on ruoan kokonaistarjonta kasvanut vielä nopeammin, eli keskimääräinen henkilöä kohden laskettu ruoantarjonta on maailmassa noussut (esim. Sen 1999). Senin (1999) mukaan nälänhätä ja aliravitsemus johtuvatkin siitä, että yksilöllä tai perheellä ei ole tarpeeksi resursseja tuottaakseen tai ostaakseen ruokaa. Siten nälänhätää voi esiintyä, vaikka ruokaa olisikin runsaasti tarjolla. Tällainen tilanne voi muodostua, jos tiettyjen ryhmien tulot romahtavat esimerkiksi työttömyyden, luonnonkatastrofin tai sodan takia. Ihmisten kyky ostaa tai tuottaa ruokaa riippuu ensinnäkin heidän resursseistaan, joista tärkein on työkyky, mutta myös omaisuudesta kuten peltomaasta. Toiseksi se riippuu käytävissä olevista tuotantomahdollisuuksista ja kolmanneksi vaihdantaolosuhteista, mahdollisuudesta myydä ja ostaa tavaroita ja suhteellisista hinnoista. Nälänhätää ja aliravitsemusta esiintyy siis ennen kaikkea, koska tulot ja varallisuus ovat hyvin epätasaisesti jakautuneet. Kun biomassan tuotanto tai käyttö energiaksi lisääntyy jossain päin maailmaa, voi se hyvinkin vaikuttaa kaikista köyhempien ihmisten mahdollisuuksiin saada ravintoa muuttamalla suhteellisia hintoja, siirtämällä resursseja, erityisesti maata, ruoantuotannon piiriin tai pois siitä ja pidemmällä aikavälillä muuttamalla näiden ihmisten kykyä tuottaa tai ostaa ruokaa. Nämä muutokset voivat olla joko myönteisiä tai kielteisiä ravinnonsaannin kannalta.

Kiristynvä kilpailu biomassasta voidaan myös nÄhdÄ osana vielä laajemmasta kilpailusta maankÄytöstÄ eri kÄyttötarkoituksia varten. Liikenne kÄyttÄÄ yhä enemmän maata ja kaupunkimaisen asutuksen leviäminen vie yhä enemmän alueita biomassatuotannon piiristä. Myös ympÄristössä tapahtuvat prosessit, kuten eroosio ja tulvat vähentävät ihmisten eri tarpeisiin soveltuvia maa-alueita. Biomassan tuotantoa ja kÄyttöä onkin tarkasteltava osana laajempaa maankÄytön kestÄvyyttä.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

6.1

Yhteenveto

Suomi on yksi bioenergian käytön kärkimaita EU:ssa. Bioenergian osuus kokonaisenergiankulutuksestamme on lähes neljännes. Pääasiallinen käyttötapa on sähkön ja lämmön yhteistuotanto metsäteollisuuden puuperäisillä sivutuotteilla kuten metsähakkeella, kuorella, sahanpurulla ja jäteliemillä. Suomessa tavoitellaan muiden EU-maiden tavoin merkittävää bioenergian käytön lisäämistä erityisesti liikennepolttoaineiden osalta. Tätä perustellaan muun muassa kasvihuonekaasupäästöjen ja fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämisellä sekä energiaomavaraisuuden ja maaseudun työllisyyden ja elinvoimaisuuden turvaamisella. Suomi on sitoutunut lakiesityksessään toteuttamaan EU:n direktiivin (2003/30/EY) tavoitteen, jossa vuonna 2010 liikenteen polttoaineista 5,75 % tulee olla biopohjaisia. EU:n päätös, jonka mukaan uusiutuvien energialähteiden osuus EU:ssa nostetaan 20 prosenttiin ja kasvihuonekaasupäästöjä vähennetään 20 prosentilla vuoteen 2020 mennessä, luo erityisen suuria paineita käyttää Suomessa biomassaa sähkön ja lämmön tuotannossa fossiilisten polttoaineiden korvaajana. Samassa yhteydessä sovittiin, että liikenteen polttoaineista tulee olla biopohjaisia 10 prosenttia.

Biomassan tuotantomahdollisuudet Suomessa

Taloudellisesti kannattavaa ja teknologisesti käyttökelpoista lisäyspotentiaalia kotimaisesta raaka-aineesta arvioidaan olevan noin 70–150 PJ, mikä vastaa noin 5–10 % Suomen nykyisestä kokonaisenergiankulutuksesta. Potentiaali riippuu muun muassa tuotantorakenteen muutoksista, teknologisesta kehityksestä, ohjauskeinoista ja vaihtoehtoisten polttoaineiden hinnoista. Suurimmaksi yksittäiseksi bioenergian lisäyspotentiaaliksi on Suomessa arvioitu metsähake, sisältäen latvuksen, oksat ja kannot. Tärkein lisäyksen käyttökohde on yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto teollisuudessa ja yhdyskunnissa.

Koska kotimaista liikenteen biopolttoaineiden raaka-ainetta ei ainakaan lyhyellä aikavälillä saada riittävästi kattamaan kysyntää, on raaka-ainetta tuotava ulkomailta. Tärkeimmäksi lähteeksi näyttää muodostuvan Malesiasta ja Indonesiasta saatava palmuöljy. Sen tuotanto voi aiheuttaa sekä ekologisia että sosiaalisia ongelmia, joiden merkitys suhteessa kotimaisten raaka-aineiden vaikutuksiin tulisi arvioida.

Bioenergian tuotantotavat

Bioenergiantuotantoa tarkastellaan elinkaarinäkökulmasta. Biopolttoaineiden elinkaari käsittää raaka-aineen tuotannon, korjuun, käsittelyn, kuljetukset, polttoaineen tuotantoprosessin ja lopputuotteen käytön sekä myös sivutuotteiden hyödyntämisen. Päästöjä vesiin, ilmaan ja maaperään sekä jätteitä syntyy kaikissa elinkaaren vaiheissa. Maankäyttö ja vaikutukset maaperän tuottokykyyn ovat merkittäviä bioenergiin liittyviä ympäristötekijöitä. Kaikissa elinkaaren vaiheissa kuluu raaka-aineita ja energiaa. Elinkaariajattelussa myös tuontivirrat ja niiden aiheuttamat vaikutukset ja raaka-aineiden ja energian kulutus otetaan huomioon.

Metsäteollisuuden jäteliemet, kuori, sahanpuru ja puutähdehake muodostavat suurimman osan bioenergian käytöstä. Näiden jakeiden käyttö energiantuotannossa on hyvin riippuvainen metsäteollisuuden tuotantorakenteesta ja -määristä. Mustalipeän osuus metsäteollisuuden sivutuotteiden energiakäytöstä on noin kaksi kolmasosaa. Teollisuuden ja energiantuotannon kiinteillä puupolttaineilla (puutäh-

teillä, kierrätyspuulla, metsähakkeella sekä puunjalostusteollisuuden muilla sivu- ja jätetuotteilla) tuotettiin vuonna 2004 noin 27 % Suomen uusiutuvasta energiasta. Kiinteinä polttoaineina käytettäviä peltoenergiatuotteita ovat lähinnä ruokohelpi ja olki. Niiden nykyinen käyttö Suomessa on kuitenkin vielä hyvin vähäistä.

Liikenteen biopolttoaineita voidaan valmistaa erilaisista raaka-aineista, kuten esimerkiksi peltokasveista, selluloosapohjaisista raaka-aineista, jätteistä tai myös turpeesta. Ensimmäisen polven liikennepolttoaineilla tarkoitetaan yleensä etanolia, kasviöljypohjaista biodieseliä ja biokaasuja. Toisen sukupolven biopolttoaineilla tarkoitetaan hyvälaatuisia hiilivety-polttoaineita, joihin ei liity merkittäviä käyttörajoitteita.

Liikenteen biopolttoaineita voidaan tuottaa myös biojalostamoissa. Biojalostamot tuottavat eri tyyppisistä biomassoista biopolttoaineiden lisäksi esimerkiksi rehuja, kemikaaleja ja materiaaleja sekä sähköä ja lämpöä. Biojalostamoja ovat esimerkiksi metsäteollisuuden yhteyteen suunnitellut synteetikaasun valmistukseen perustuvat prosessit. Biojalostamoissa voidaan hyödyntää myös jätteiden sisältämät bioperäiset materiaalivirrat, kuten kaatopaikalle päätyvät eloperäiset jätteet, tasalaatuiset biojätevirrat, kierrätykseen kelpaamattomat paperituotteet ja muut biopohjaiset sivuvirrat. Esimerkiksi sokeri-, tärkkelys- ja selluloosapitoisista jätteistä voidaan valmistaa hydrolyysin ja fermentoinnin avulla etanolia tai kemikaaleja. Eläinrasvoja ja kasviöljyjä taas voidaan hyödyntää esim. biodieselin valmistukseen. Jätepohjaiset materiaalivirrat ovat jo edullisuutensa vuoksi kiinnostava raaka-ainevaranto.

Bioperäisen jätteen suora energiahyödyntäminen on osa jätteen käsittelyä. Teollisuudessa on perinteisesti poltettu sen omia tuotantojätteitä osana niiden energiantuotantoa (esim. yllä mainitut mustalipeä ja muut puunjalostusteollisuuden sivu- ja jätetuotteet). Yhdyskuntajätteiden energiana hyödyntämisen menetelmiä ovat kierrätyspolttoaineen poltto, jätteen poltto sitä varten suunnitelluissa kattiloissa ja jätteestä valmistetun kaasun poltto tai käyttö liikennepolttoaineena. Jätteen energiahyödyntämisen vaihtoehtoisissa biojätettä kulkeutuu polttoon lähinnä vain arinapohjaisessa, sekajätteelle suunnitellussa laitoksessa. Biojätettä ei kuitenkaan suunnitella poltettavan missään laitoksista, koska märkänä materiaalina se on energiataloudellisesti kannattamaton polttoaine ja sen sisältämä kloridi ja eräät muut aineet ovat vahingollisia kattiloiden lämpöpinnolle. Sekajätteen polttoon liittyvissä suunnitelmissa polttoaineena suunnitellaan käytettäväksi syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä. Biojätettä, kuten muitakin hyödynnettäväksi soveltuvia jätejakeita on syntypaikkalajitellussakin sekajätteessä vielä runsaasti.

Metsäteollisuuden kiinteät sivutuotteet ovat edullisin puupolttoainevaihtoehto.

Bioenergiantuotannon elinkaariset ympäristönäkökulmat

Bioenergiantuotannosta saadaan suurimmat ympäristöhyödyt käyttämällä biomassaa yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa kaupungeissa ja teollisuudessa. Verrattuna maakaasun, turpeen ja kivihiihen polttoon, on puun polton elinkaaren aikainen vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin monikymmenkertaisesti alhaisempi. Puun polton vaikutus happamoitumiseen on pienempi kuin turpeella ja kivihiihellä, ja vaikutus alailmakehän otsonin muodostumiseen pienempi kuin maakaasulla ja kivihiihellä. Pienissä laitoksissa, joissa ei ole erotinlaitteita savukaasun puhdistuksessa, ovat terveysvaikutuksia kuvaavien pienhiukkasten (PM_{2,5}) päästöt puun tuotannosta ja poltosta ovat kuitenkin hieman suuremmat kuin maakaasun vastaavat päästöt ja samaa suuruusluokkaa kuin turpeen vastaavat päästöt.

Pienimuotoisessa lämmityksessä puuperäisen biomassan kasvihuonekaasupäästöt ovat vain murto-osa öljyn päästöistä. Happamoitavissa ja rehevöittämissä ilmapäästöissä ei ole suuria eroja. Toisaalta puunpoltto tulisijoissa ja klapi-kattiloissa aiheuttaa suurempia pienhiukkas-, hiilivety- ja PAH-päästöjä kuin öljykattilat.

Liikenteen biopolttoaineiden ympäristövaikutusten suuruuteen vaikuttavat huomattavasti raaka-aineen alkuperä ja biopolttoaineiden valmistustekniikka. Useimpi-

en kansainvälisten tutkimusten mukaan kasvihuonekaasupäästöt vähenevät jonkin verran myös valmistettaessa ns. ensimmäisen sukupolven prosesseilla etanolia ja biodieseliä. Sen sijaan energiataseiden osalta tulokset ovat osin ristiriitaisia. Tuoreen suomalaisen tutkimuksen mukaan kasvihuonekaasupäästövähennyksiä ei saataisi valmistettaessa etanolia ja biodieseliä nykyisin menetelmin Suomessa, jos olkea ei hyödynnetä samanaikaisesti energia tuottamiseen.

Eri tutkimusten tulosten erot johtuvat muun muassa erilaisista lähtötiedoista, sivutuotteiden käyttöä koskevista oletuksista, satotasoina sekä viljely- ja lannoituskäytännöistä. Esimerkiksi viljaetanolin tuotannon elinkaarisia kasvihuonekaasutaseita arvioitaessa on olennaista, hyödynnetäänkö oljet esimerkiksi lämmön tuotantoon vai jätetäänkö ne pellolle. Lisäksi biokaasun valmistusvaihtoehto puuttui edellä mainitusta suomalaistutkimuksesta.

Ns. toisen sukupolven tekniikat, kuten synteettinen kaasutustekniikka, mahdollistavat raaka-aineen monipuolisen hyödyntämisen biopolttoaineiden valmistuksessa. Suomessa uuden sukupolven tekniikan raaka-ainepotentiaalia löytyy etenkin metsistä. Toisen sukupolven biopolttoaineiden kasvihuonekaasutaseet ovat selvästi paremmat kuin nykyteknologialla valmistettävien liikennepolttoaineiden, minkä takia niiden käyttöönottoa tulisi kiirehtiä. Biojalostamokonseptit tuottavat paitsi biopolttoaineita myös materiaaleja ja kemikaaleja. Mitä paremmin raaka-aine ja jätteet pystytään hyödyntämään lisäämättä tuotannon ympäristökuormitusta, sitä ekotehokkaampaa toiminta on.

Tarkasteltaessa muita ilmaan kohdistuvia päästöjä kuin kasvihuonekaasujen päästöjä, näyttäisi bioenergia olevan hyvä vaihtoehto fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna. Liikenteen pakokaasujen NO_x -, SO_2 -, VOC- ja hiukkaspäästöt ovat uusissa ja tulevaisuuden autoissa polttoaineesta riippumatta alhaiset tiukentuvien EURO-standardien ansiosta. Polttoaineiden tuotanto ja jalostus aiheuttavat tulevaisuudessa merkittävän osan niiden elinkaaren aikaisista ilmapäästöistä. Jalostusprosessien osalta biopolttoaineet ovat fossiilisia vähäpäästöisempiä.

Peltojen lannoitus aiheuttaa vesistöjä rehevöittäviä päästöjä. Bioenergiaksi jalostettava vilja ei sinällään kuormita vesistöjä enempää tai vähempää kuin ruoaksi käytettävä vilja, vaan olennaisia molempien osalta ovat viljelykäytännöt. Esimerkiksi suorakylvöllä voidaan saavuttaa merkittäviä ravinnehuuhtoumien ja eroosion vähenemisiä. Peltojen käyttömuoto vaikuttaa myös kuormitukseen, esimerkiksi muutettaessa nurmia viljanviljelyyn kuormitus kasvaa. Jos taas ruokohelpi saa alaa viljapelloilta, kokonaiskuormitus vähenee merkittävästi.

Intensiivinen energiakasvien viljely voi aiheuttaa maaperän tuotantokyvyn heikkenemistä (maaperän tiivistyminen, orgaanisen aineen väheneminen ja eroosio). Energiakasvit (esim. ruokohelpi) voivat yksipuolistaa peltoekosysteemejä. Energiakasvien pelto/metsäviljely valtaa tilaa muilta ekosysteemeiltä (esimerkiksi Brasiliassa ja Malesiassa).

Suurimittakaavainen metsähakkeen ja erityisesti kantojen korjuu on hyvin uusi ilmiö. Käytännön kokemusta tai tutkimustietoa sen vaikutuksista metsien monimuotoisuuteen, maan ravinnehävikkiin ja humuskerroksen heikkenemiseen sekä maan tuottokykyyneen ei vielä ole. Uhkana on, että erityisesti lahoppuusta riippuvaiset lajit kärsivät ja maan orgaanisen aineksen sekä ravinteiden määrät vähenevät. Yleisesti ottaen suuri osa hakkuutähdepotentiaalista (tässä oksat ja latvukset, ei kannot eikä juuret) voidaan käyttää energiapuunkorjuuseen, mikäli huolehditaan siitä, että ravinnehävikkiä ja haponsitomiskyvyn alenemista kompensoidaan (puu)tuhkalannoituksella. Samanaikaisesti tulee huolehtia siitä, että maisematasolla tuotetaan riittäviä määriä järeää lahoppuuta talousmetsien luonnonhoitotavoitteiden mukaisesti sekä siitä, ettei tätä järeää runkopuuta korjata energiapuuksi kuten eräiden tutkimusten mukaan on tapahtunut.

Raaka-ainevirtojen hallinta on olennaista bioenergian kannattavuudessa. Tarkastelun tasoja tulee olla useita: paikallinen, alueellinen ja kansallinen. Pienimuotoiset ja suuret keskitetyt bioenergiaratkaisut eivät ole vastakkaisia keskenään, vaan molempia tarvitaan. Kansantalouden kannalta on katsottava suuren mittakaavan ratkaisuja, kun taas yksityistalouden kannalta hajautetut ratkaisut voivat osoittautua parhaimmiksi. Kansallisessa tarkastelussa on huomioitava myös tuonti- ja vientivirrat.

Bioenergia rooli osana kestävämpää energiantuotantojärjestelmää

Yksi keskeisimmistä kysymyksistä bioenergian tuotantoon liittyen on, miten rajalliset biomassavarannot tulisi käyttää, jotta saavutetaan mahdollisimman hyvä energiantuotannon hyötysuhde. Asia on ajankohtainen etenkin liikenteen biopolttoaineiden yhteydessä.

Energiatehokkain tapa tuottaa bioenergiaa on käyttää metsistä saatavaa puuainesta ja pelloilta saatavia energiakasveja ja biojätteitä kuten olkea suoraan esimerkiksi yhdistetyssä lämmön ja sähkön tuotannossa. Hakkuutähde, olki, pienpuu ja ruokohelpi ovat tuotettavissa pienemmillä energiapanoksilla kuin fossiiliset polttoaineet bensiini ja diesel. Myös biokaasu on melko lähellä fossiilisten polttoaineiden energiatasetta.

Yleisesti ensimmäisen polven liikennebiopolttoaineiden valmistuksen energiatehokkuus on huono. Toisen polven biopolttoaineiden valmistamista pidetään huomattavasti lupaavampana mahdollisuutena tuottaa biopolttoaineita energiatehokkuuden kannalta. Biojalostamot, joissa tuotetaan muutakin kuin biopolttoaineita, ovat energiatehokkuuden kannalta lupaava mahdollisuus biopolttoaineiden tuottamiseksi.

Myös kustannusten kannalta tehokkain tapa vähentää kasvihuonekaasupäästöjä on puuperäisen biomassan käyttö yhdistetyssä lämmön ja sähkön tuotannossa, jos syntyvällä energialla korvataan esimerkiksi turvetta tai kivihiiltä. Turpeen korvaaminen hakkuutähteellä lämmön ja sähkön tuotannossa voi olla joissakin tapauksissa jopa kannattavaa. Kohtuullisiin kasvihuonekaasupäästöjen alentamiskustannuksiin päästään myös viljaetanolilla, jos olki pystytään hyödyntämään lämmön ja sähkön tuotannossa. Ilman oljen energiahyödyntämistä perinteisesti valmistetut viljaetanoli ja biodiesel eivät ole tehokkaita tapoja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Puuperäisen biomassan (esim. hakkuutähteet, mustalipeä) kaasuttaminen metsäteollisuuteen integroituvissa biojalostamoissa voisi tulevaisuudessa olla yksi kustannustehokkaimmista tavoista vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, kun valmistetaan liikennekäyttöön sopivia biopolttoaineita.

Ilmastonmuutos-, energiatehokkuus- ja muiden ympäristönäkökohtien lisäksi bioenergian elinkaariketjuja arvioitaessa on otettava huomioon myös muut kestävyuden ulottuvuudet. Talouden globalisaation myötä ympäristönsuojelu kytkeytyy erottamattomasti kansainväliseen vastuuseen luonnonvarojen kestävästä käytöstä. Biopolttoaineiden tuotantovaihtoehtoja arvioitaessa tulee ottaa huomioon raaka-aineiden vaihtoehtoiset käyttötavat, kuten ruoka, kemikaalit ja metsäteollisuuden tuotteet.

6.2

Johtopäätökset

Bioenergian tuotantoon ja käyttöön liittyy monia ympäristö-, energia-, työllisyys- ja aluepoliittisia näkökulmia. Bioenergian elinkaariketjuihin liittyen on tehty paljon tutkimusta sekä Suomessa että ulkomailla. Selvitystä siitä, millaiset eri raaka-aineiden ja käyttömuotojen (sähkö, lämpö, liikenne) yhdistelmät ovat kokonaisuutena kestävimpiä ottaen huomioon taloudellisen, ympäristö- ja sosiaalisen ulottuvuuden, ei ole tehty. Tässä selvityksessä tunnistettiin seuraavia bioenergian tuotanto- ja käyttöketjuihin liittyviä tarpeita ja johtopäätöksiä:

- Bioenergian elinkaarietjuja tulisi arvioida kestävyysnäkökulmasta ottaen huomioon taloudellinen, ympäristö- ja sosiaalinen ulottuvuus. Kestävyyden arviointiin tarvitaan näille eri ulottuvuuksille kriteerit. Bioenergiaa tulee tarkastella suhteessa energiantuotannon ja –kulutuksen kokonaisuuteen ottaen huomioon myös energiankäytön tehokkuuden lisäämisen ja energiansäästön tarjoamat mahdollisuudet sekä raaka-ainevirtojen hallinta alueellisella, kansallisella ja globaalilla tasolla.
- Koska kotimainen raaka-aine ei ainakaan lyhyellä tähtämellä pysty täyttämään lisääntyvää bioenergian kysyntää, on raaka-ainetta tuotava ulkomailta. Kestävyyttä arvioidessa ulkomaisia ja kotimaisia raaka-aineita on arvioitava samoin periaattein.
- Bioenergian käytön ensisijaisena tavoitteena on kasvihuonekaasupäästöjen ja fossiilisten raaka-aineiden käytön vähentäminen. Kuitenkin myös muut ympäristövaikutukset tulee ottaa huomioon bioenergian kestävyttä arvioidessa. Tärkeitä ympäristövaikutuksia ovat erityisesti rehevöityminen ja monimuotoisuuden väheneminen sekä maaperän tuottokyky. Myös pienhiukkaspäästöt ilmaan ja toksiset vaikutukset saattavat osoittautua merkittäviksi.
- Bioenergian elinkaarietjujen ympäristövaikutukset tulee arvioida elinkaarinäkökulmasta Suomessa. Arvioinnissa on otettava huomioon koko elinkaarietjun suorat ja välilliset energia- ja raaka-ainepanokset sekä päästöt ja vaikutukset. Ulkomailta tehtyjä elinkaarietjuja ei voida sellaisenaan siirtää suomalaisiin olosuhteisiin. Niissä käytetyt ympäristövaikutusmenetelmät ovat erittäin karkeita ja lähtökohdiltaan keskieuropalaisia eikä niissä ole myöskään mukana kattavasti tuotantoketjun alkupään vaikutuksia, kuten metsämaan ja pellon tuottokyvyn ja monimuotoisuuden säilymistä. Haasteena on kehittää parempia vaikutusarviointimenetelmiä päätöksenteon pohjaksi, etenkin maankäytön vaikutusten arviointiin (mm. luonnon monimuotoisuus ja maaperän tuottokyky).
- Bioenergian käyttöä tukevia innovaatioita edistävien ja estävien tekijöiden nykyistä syvällisempi tuntemus on tarpeen. Tarkastelussa on huomioitava se, kuinka eri toimijat, toiminnot ja prosessit eroavat kansallisella ja alueellisella tasolla.
- Koska tulevaisuudessa ilmastopoliittisia ratkaisuja on tehtävä nykyistä pidemmällä aikajänteellä, on myös bioenergiaratkaisuja tarkasteltava pitkäjänteisesti. Tehtävät päätökset, esimerkiksi suuret teknologiset investoinnit, ohjaavat myös tulevia ratkaisuja. Väärät päätökset saattavat johtaa teknologisesti tehottomiin vaihtoehtoihin.

Bioenergian tuotantovaihtoehtoja tarkasteltaessa on huomioitava se, että kaikki aiemmat päätökset ja kehitysvaiheet ohjaavat merkittävästi tulevaisuuden vaihtoehtoja. Tästä syystä on mahdollista päätyä teknisesti tehottomiin ratkaisuihin tai tuotanto voi sijoittua "väärin" paikkoihin. Julkinen valta voi vaikuttaa kehitykseen siten, että se omilla toimillaan pitää erilaisia teknisiä ratkaisuja avoimina, kunnes vaihtoehtojen ratkaisujen hyvistä ja huonoista puolista tiedetään riittävästi. Bioenergia on esimerkki ympäristöpolitiikan integroitumisesta muille hallinnonaloille, jolloin eri politiikkasektoreiden yhteisvaikutukset on huomioitava päätöksiä tehtäessä. Bioenergia voi tarjota win-win -mahdollisuuksia niin maatalouden lantaongelmaan, vesistöjen rehevöitymiseen kuin maaseudun työllisyysmahdollisuuksiin ja yritysten vientiin.

Tulevaisuudessa ilmasto- ja energiapoliittisiin kysymyksiin kohdistuu yhä enemmän paineita. Päästöjen vähentäminen vaatii monilla sektoreilla hyvin pitkäjänteistä työtä. Kiristyvien päästövähennysten saavuttaminen lisää edelleen kotimaiseen bioenergiaan kohdistuvia odotuksia. Kansallinen biomassastrategia voisi selkeyttää biomassaan ja niiden tuotantoalueisiin kohdistuvia odotuksia ja tavoitteita mm. energiankäytön,

teollisuuden raaka-aineen ja virkistyskäytön ja suojelun välillä. Myös EU:n biomassaa koskeva toimintasuunnitelma suosittelee kansallisesti laadittavia suunnitelmia.

Koska Suomen bioenergiantuotannon lisäpotentiaali on vähäinen verrattuna nykyiseen energian kokonaiskulutukseen, bioenergialla voidaan vain pieneltä osin torjua ilmastonmuutosta. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä energiankulutuksen vähentäminen on ratkaiseva keino.

LÄHTEET

- Asplund, D., Korppi-Tommola, J. & Helynen, S. 2005. Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet vuoteen 2015. VTT, Jyväskylän yliopisto ja Jyväskylä Science Park. 48 s. Saatavissa: http://ktm.elinar.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/E5063805F1B754D5C22570190028414D/file/34642005.pdf
- Ashford, N.A. 2005. Government and environmental innovation in Europe and North America. Teoksessa: Weber, M. & Hemmelskamp, J. (toim.) Towards environmental innovation systems. Springer, Berlin.
- BABFO (British Association for Bio Fuels and Oils). 2001. Green fuels challenge – submission for biodiesel and bioethanol. www-dokumentti, luettu 2.11.2006. Saatavissa: http://www.biodiesel.co.uk/press_release/submission_for_biofuell_1.htm
- Beer, T. & Grant, T. 2007. Life-cycle analysis emissions from fuel ethanol and blends in Australian heavy and light vehicles. *Journal of Cleaner Production* 15: 833-837.
- Berglund, H. 2006. Helträdsutnyttjande – konsekvenser för klimat och biologisk mångfald. Naturvårdsverket Rapport 5562 Maj 2006, s. 1-89.
- Berglund, M. & Börjesson, P. 2006. Environmental systems analysis of biogas systems – Part I: Fuel-cycle emissions. *Biomass and Bioenergy* 30 (2006): 469-485.
- Bernesson, S., Nilsson, D. & Hansson, P.-A. 2006. A limited LCA comparing large and small-scale production of ethanol for heavy engines under Swedish conditions. *Biomass and Bioenergy* 30(2006): 46-57.
- Boman C. 2005. Particulate and gaseous emissions from residential biomass combustion. PhD Thesis. Umeå University, Energy Technology and Thermal Process Chemistry, Umeå, Sweden. 45 pp. + 7 app. papers.
- Broek, van den, R., Treffers, D.-J., Meeusen, M., Wijk, van A., Nieuwlaar, E. & Turkenburg, W. 2002. Green energy or organic food? A life-cycle assessment comparing two uses of set-aside areas. *Journal of Industrial Ecology* 5(3): 65-87.
- Börjesson, P. & Berglund, M. 2003. Miljöanalys av biogassystem. Rapport 45, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund.
- Carpentieri, M., Corti, A. & Lombardi, L. 2005. Life cycle assessment (LCA) of an integrated biomass gasification combined cycle (IBGCC) with CO₂ removal. *Energy Conversation Management* 46(2005): 1790-1808.
- Concawe, EUCAR & European Commission JRC. 2006. Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Well-to-tank report. Version 2b, May 2006.
- Concawe, EUCAR & European Commission JRC. 2007. Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Well-to-tank report. Version 2c, March 2007.
- Dahlberg, A., Egnell, G., Berg, J., Rytter, L. & Westling, O. 2006. Miljöeffekter av skogsbränsleuttag och askåterföring i Sverige. En syntes av Energimyndighetens forskningsprogram 1997 till 2004. Statens energimyndighet, Sverige. ER2006(44), s. 1-211.
- Dahlberg, A. & Stokland, J. N. 2004. Vedlevande arters krav på substrat - sammanställning och analys av 3600 arter. Skogsstyrelsen, Rapport 7. s. 1-75.
- Dahlbo, H., Laukka, J., Myllymaa, T., Koskela, S., Tenhunen, J., Seppälä, J., Jouttijärvi, T. & Melanen, M. 2005. Waste management options for discarded newspaper in the Helsinki Metropolitan Area – life-cycle assessment report. The Finnish Environment 752. Suomen ympäristökeskus, Helsinki.
- David, P. A. 2006. Path dependence – A foundational concept for historical social science. Working Paper, Stanford University Economics Department, Working Paper 06-005. Forthcoming in *Cliometrica – The Journal of Historical Economics and Econometric History*.
- Donner-Amnell, J. 1995. Puulla parempiin päiviin ja kestävään kehitykseen?. Teoksessa: Massa, I. & Rahkonen, O. (toim.) Riskiyhteiskunnan talous: Suomen talouden ekologinen modernisaatio. Gaudeamus, Helsinki.
- Dornburg, V. & Faaij, A.P.C. 2001. Efficiency and economy of wood-fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies. *Biomass and Bioenergy* 21(2001) 91-108.
- Dornburg, V., Lewandowski, I. & Patel, M. 2004. Comparing the land requirements, energy saving, and greenhouse gas emissions reductions of biobased polymers and bioenergy. *Journal of Industrial Ecology* 7(3-4): 93-116.
- EC (European Commission). 2006. Annex to the communication from the commission. An EU strategy for biofuels. Impact assessment. Commission staff working document. COM(2006) 34 final. Brussels 8.2.2006. SEC(2006) 142.
- EcoInvent Database. 2006. V1.3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Saatavissa: <http://www.ecoinvent.ch>.
- EEA. 2005. Environment and health. European Environment Agency, report 10/2005. Saatavissa: http://reports.eea.europa.eu/eea_report_2005_10/en/EEA_report_10_2005.pdf; luettu 7.12.2006.
- Ericsson K., Huttunen S., Nilsson J. L. & Svenningsson P. 2004. Bioenergy policy and market development in Finland and Sweden. *Energy Policy* 32: 1707-1721.
- Eriksson, O., Finnveden, G., Ekvall, T. & Björklund, A. 2007. Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass- and natural gas combustion. *Energy Policy* 35: 1346-1362
- ESU-services. 2006. Life cycle assessment of bioenergy. www-sivu. Luettu 17.10.2006.
- Euroopan Yhteisöjen Komissio. 2005. Komission tiedonanto. Biomassaa koskeva toimintasuunnitelma. KOM(2005)628.

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2007. Faostat – agriculture. www-sivusto, luettu 7.2.2007. Saatavissa: <http://faostat.fao.org>.
- Farrell, A.E., Plevin, R.J., Turner, B.T., Jones, A.D., O'Hare, M. & Kammen, D.M. 2006. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science* 311: 506-508.
- Finnveden G., Hofstetter P., Bare J., Basson L., Ciroth A., Mettier T., Seppälä J., Johansson J., Norris G. & Volkwein S. 2002. Normalisation, grouping and weighting in life cycle impact assessment. Teoksessa: Udo de Haes, H.A., Joliet, O., Finnveden, G., Goedkoop, M., Hauschild, M., Hertwich, E., Hofstetter, P., Klöpffer, W., Krewitt, W., Lindeijer, E., Mueller-Wenk, R., Olson, S.I., Pennington, D.W., Potting, J. & Steen, B. (toim.) *Life-Cycle Impact Assessment: Striving towards Best Practice*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Pensacola, s. 177-208
- Flyktman, M. & Paappanen, T. 2005. Ruokohelven käyttökapasiteettiselvitys. VTT prosessit, tutkimuslaskutus PRO2105/06.
- Forsberg, G. 2000. Biomass energy transport. Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method. *Biomass and bioenergy* 19(2000): 17-30.
- Fu, G.Z., Chan, A.W. & Minns, D.E. 2003. Life cycle assessment of bio-ethanol derived from cellulose. *Int J LCA* 8(3): 137-141.
- Georghiou, L. 2006. Effective innovation policies for Europe – The missing demand-side. Teoksessa: *Globalisation challenges for Europe. Part 1, Prime Minister's Office Publications 18/2006*, Helsinki, s. 173-193.
- Granberg, L. 1989. Valtio maataloustulojen tasaajana ja takaajana. Suomen tiedeseura, Helsinki.
- Haapanen, R., Antikainen, R., Rankinen, K., Starr, M., Tamminen, P. & Syri, S. 2004. Current stocks and flows of nitrogen and phosphorus in Finnish forests. *Käsikirjoitus*.
- Hakkila, P. 2004. Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood energy technology programme 1999-2003. Tekes. Technology Programme Report 6/2004. Final Report.
- Hautala, H., Jalonen, J., Laaka-Lindberg, S. & Vanha-Majamaa, I. 2004. Impacts of retention felling on coarse woody debris (CWD) in mature boreal spruce forests in Finland. *Biodiversity and Conservation* 13: 1541-1554.
- Heinonen, P., Karjalainen, H., Kaukonen, M. & Kuokkanen, P. 2004. Metsätalouden ympäristöopas. Metsähallitus, s. 159.
- Heller, M.C., Keoleian, G.A., Mann, M.K. & Volk, T.A. 2004. Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass. *Renewable Energy* 29(2004): 1023-1042.
- Helynen, S. 2004. Bioenergy policy in Finland. *Energy for Sustainable Development* 8(1): 36-46.
- Helynen, S., Flyktman, M., Mäkinen, T., Sipilä, K. & Vesterinen, P. 2002. Bioenergian mahdollisuudet kasvihuonekaasujen vähentämisessä. Espoo 2002. VTT Tiedotteita 2145. 110 s. + liitt. 2 s.
- Hemmelskamp, J. 1997. Environmental policy instruments and their effects on innovation. *European Planning Studies* 5(2): 177-194.
- Hetemäki, L., Harstela, P., Hynynen, J., Ilvesniemi, H. & Uusivuori, J. 2006. Suomen metsiin perustuva hyvinvointi 2015. Katsaus Suomen metsäalan kehitykseen ja tulevaisuuden vaihtoehtoihin. *Metlan työraportteja* 26: 1-250.
- Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Polasky, S. & Tiffany, D. 2006. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *PNAS* 103(30): 11206-11210.
- Hoffman, K., Ohlström, M., Hongisto, M., Ruska, M. ja toimituskunta. 2004. Suomen nykyinen energiajärjestelmä. Teoksessa: *Energia Suomessa. Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset*. VTT Prosessit. Edita, Helsinki.
- Hu, Z., Pu, G., Fang, F. & Wang, C. 2004. Economics, environment and energy life cycle assessment of automobiles fueled by bio-ethanol blends in China. *Renewable Energy* 29(2004): 2183-2192.
- Hughes T. 1983. *Networks of power electrification in Western society, 1880-1930*. John Hopkins University Press.
- Huhtinen K., Lilja, R., Runsten, S., Salmenperä, H. & Sokka, L. 2007. Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2016 – Taustaraportti. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=62090&lan=fi>
- Humalisto, N. 2006. Palmuöljystä biopolttoainetta. Viljelmät leviävät Kaakkois-Aasiassa. *Finnwatch*. www-dokumentti, luettu 15.11.2006. Saatavissa: <http://www.finnwatch.org/julkaisut.html>.
- Hänninen, R., Penttilä, R., Punttila, P. & Sievänen, T. 2006. Suojelualueet. Teoksessa: Horne, P., Koskela, T., Kuusinen, M., Otsamo, A. & Syrjänen, K. (toim.). *METSOn jäljillä - Etelä-Suomen metsien monimuotoisuusohjelman tutkimusraportti*. Maa- ja metsätalousministeriö, ympäristöministeriö, Metsäntutkimuslaitos ja Suomen ympäristökeskus. s. 16-39.
- IFEU (Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg). 2004. *CO₂ mitigation through biofuels in the transport sector. Status and perspectives. Main report*. Heidelberg, Germany
- Iломäki, M. & Hildén, M. 2006. Ympäristösuojelun tulevaisuuskaatsaus. Ympäristöministeriön raportteja 14. Ympäristöministeriö, Helsinki
- Informal High-Level Energy Working Group Meeting Helsinki 12-13 October 2006. Presidency Background Paper 3 October, 2006. www-dokumentti, luettu 20.12.2006. Saatavissa: http://www.eu2006.fi/news_and_documents/other_documents/vko41/en_GB/1160553828847/_files/76058060042862921/default/Presidency_background_paper_to_session_2.pdf
- Janulis, P. 2004. Reduction of energy consumption in biodiesel fuel life cycle. *Renewable Energy* 29: 861-871.

- Joki-Heiskala, P., Johansson, M., Holmberg, M., Mattsson, T., Forsius, M., Kortelainen, P. & Hallin, L. 2003. Long-term base cation balances of forest mineral soils in Finland. *Water, Air and Soil Pollution* 150: 255-273.
- Jokinen, V. 2005. Pääkaupunkiseudun palvelualueiden sekajätteen laatu. Toimistot, sairaalat, koulut, ravintolat ja hotellit sekä kaupat. YTV Jätehuolto, Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 2005:1, Helsinki
- Jonsell, M. 2007. The effects of biofuel harvest on biodiversity. Sustainable use of forest biomass for energy – a synthesis with focus on the Nordic and Baltic Region. Teoksessa: Röser, D., Asikainen, A., Raulund-Rasmussen, K. & Stupak, I. (toim.) Sustainable use of forest biomass for energy. A Synthesis with Focus on the Baltic and Nordic Region. *Managing Forest Ecosystems Vol. 12. Painossa.*
- Jonsell, M., Weslien, J. & Ehnström, B. 1998. Substrate requirements of red-listed saproxylic invertebrates in Sweden. *Biodiversity and Conservation* 7: 749-764.
- Kadam, K.L. 2002. Environmental benefits on a life cycle basis of using bagasse-derived ethanol as a gasoline oxygenate in India. *Energy Policy* 30(2002): 371-384.
- Karesuo, A. 2001. Metsäteollisuus ry:n lausunto kansallisesta ilmastostrategiasta, 3.5.2001.
- Karvosenoja N., Klimont Z., Tohka A. and Johansson M. 2006. Fine particle emissions, emission reduction potential and reduction costs in Finland in 2020. *The Finnish Environment* 46. Suomen ympäristökeskus, Helsinki.
- Karvosenoja N., Tohka A. and Hilden M. 2005. The impacts of CO₂ emission trading on air pollution in Finland. *Proceedings of Acid Rain 2005, Prague, June 12-17 2005.* p. 29.
- Katajajuuri J.-M., Grönroos, J., Usva, K., Virtanen, Y., Sipilä, L., Venäläinen, E., Kurppa, S., Tanskanen, R., Mattila, T. ja Virtanen H. 2007. Broilerin fileesuikaleiden tuotannon ympäristövaikutukset ja kehittämismahdollisuudet. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. Maa- ja elintarviketalous 90. Tampere. 118 s. Saatavissa: www.mtt.fi/met/pdf/met90.pdf
- Kemp, R. 1997. Environmental policy and technical change. A comparison of the technological impact of policy instruments. Edward Elgar, Cheltenham.
- Kemp, R. 2000. Technology and environmental policy: Innovation effects of past policies and suggestions for improvement. Teoksessa: *Innovations and the environment, OECD Proceedings, OECD, Paris.*
- Kempainen, J.A. & Shonnard, D.R. 2005. Comparative life-cycle assessments for biomass-to-ethanol production from different regional feedstocks. *Biotechnol. Prog.* 21:1075-1084.
- Kim, S. & Dale, B.E. 2005a. Environmental aspects of ethanol derived from no-tilled corn grain; nonrenewable energy consumption and greenhouse gas emissions. *Biomass and Bioenergy* 28(2005): 475-489.
- Kim, S. & Dale, B.E. 2005b. Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel. *Biomass and Bioenergy* 29(2005): 426-439.
- Kivimaa, P. 2007a. The promotion of sustainable electricity in Finland – history, actors and policy. *Käsi-kirjoitus.*
- Kivimaa, P. 2007b. The determinants of environmental innovation: The impacts of environmental policies on the Nordic pulp, paper and packaging industries. *European Environment* 17(2): 92-105.
- Kivimaa, P., Kautto, P., Oksa, J. & Hildén, M. 2007. Green Markets and Cleaner Technologies (GMCT) report on environmental innovation in the Nordic pulp and paper industry. *Käsi-kirjoitus.*
- Kivimaa, P. & Mickwitz, P. 2004. Driving forces for environmentally sounder innovations: The case of Finnish pulp and paper industry. Teoksessa: Jacob, K., Binder, M. & Wiczorek, A. (toim.). Governance for industrial transformation. *Proceedings of the 2003 Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change. Environmental Policy Research Centre: Berlin.* s. 356-372. Saatavissa: [://web.fu-berlin.de/ffu/ffu_e/Publications/bc2003_proceedings.htm](http://web.fu-berlin.de/ffu/ffu_e/Publications/bc2003_proceedings.htm)
- Koistinen, A. & Äijälä, O. 2006. Energiapuun korjuu. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Hyvän metsänhoidon opas, 1-40.
- Korhonen, P. 2004. Metsätalouden historian vaikutus vanhojen mäntymetsien lahopuukovakuoriaislajistoon. Pro gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto, Bio- ja ympäristötieteiden laitos. s. 1-71 + 13 liites.
- Krahl, J., Bünger, J., Munack, A., Bahadir, M., Schröder, O., Stein, H. & Dutz. 2003. Biodiesel and Swedish low sulfur diesel fuel as ecologically compatible fuels in modern diesel engines. *Fresenius Environmental Bulletin* 12(6): 640-647.
- Kruys, N., Fries, C., Jonsson, B. G., Lämås, T. & Ståhl, G. 1999. Wood-inhabiting cryptogams on dead Norway spruce (*Picea abies*) trees in managed Swedish boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 178-186.
- Kruys, N. & Jonsson, B. G. 1999. Fine woody debris is important for species richness on logs in managed boreal spruce forests of northern Sweden. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 1295-1299.
- KTM. 2002. Uusiutuvan energian edistämishjelma 2003–2006. Työryhmän ehdotus 5.12.2002.
- KTM. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden tuotannon ja käytön edistäminen Suomessa, Työryhmän mietintö, KTM Julkaisuja 11/2006.
- KTM. 2007. Arvio biomassan pitkän aikavälin hyödyntämismahdollisuuksista Suomessa. Asiantuntijatyöryhmän raportti, 12.2.2007.
- Kuittinen, V., Huttunen, M.J. & Leinonen, S. 2005. Suomen biokaasulaitosrekisteri VIII. Tiedot vuodelta 2004. Joensuun yliopisto, Karjalan tutkimuslaitoksen raportteja 3/2005. Saatavissa: <http://www.kolumbus.fi/suomen.biokaasukeskus/docs/rek8.pdf>
- Kuittinen, V., Huttunen, M.J. & Leinonen, S. 2006. Suomen biokaasulaitosrekisteri IX. Tiedot vuodelta 2005. Joensuun yliopisto, Karjalan tutkimuslaitoksen raportteja 3/2006. Saatavissa: <http://www.biokaasuyhdystys.net/docs/Rek9.pdf>
- Körbitz, W., Friedrich, St., Waginger, E. & Wörgetter, M. 2003. Worldwide review on biodiesel production. Saatavissa: <http://www.novem.nl/default.asp?menuId=10&documentId=135528>

- Lampinen, A. & Jokinen, E. 2006. Suomen maatilojen energiantuotantopotentiaalit. Ekologinen perspektiivi. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 84. Jyväskylä.
- Lave, L., MacLean, H., Hendrickson, C. & Lankey, R. 2000. Life-cycle analysis of alternative automobile fuel/propulsion technologies. *Environ. Sci Technol.* 34: 3598-3605.
- Leskinen L.A., Peltola, T. & Åkerman, M. 2006. Puuenergia, metsätalouden toimintakentän muutos ja sosiaalinen kestävyys. *Metsätieteen aikakauskirja* 2: 293-304.
- MacLean, H.L. & Lave, L.B. 2003. Life cycle assessment of automobile/fuel options. *Environ. Sci Technol.* 37: 5445-5452.
- MacLean, H.L., Lave, L.B., Lankey, R. & Joshi, S. 2000. A life-cycle comparison of alternative automobile fuels. *J. Air & Waste Management Assoc.* 50: 1769-1779.
- Marris, E. 2006. Drink the best and drive the rest. *Nature* 444(7): 670-672.
- Meadowcroft, J. 1999. Planning for sustainable development: what can be learned from the critics? Teoksessa: Kenny M. & Meadowcroft J. (toim.) *Planning sustainability*. Routledge, London, New York, s. 12-38.
- METLA (Metsäntutkimuslaitos). 2006a. Metsätalostollinen vuosikirja 2006. SVT, Maa-, metsä- ja kalatalous. Vammalan kirjapaino, Vammala.
- METLA. 2006b. Puupolttoaineiden käyttö energiantuotannossa 2005. Metsätalostotiedote 820. Metsäntutkimuslaitos, metsätalostollinen tietopalvelu.
- Metsäalan tulevaisuusfoorumi. 2006. Uutiskirje 4/2006. Saatavissa: http://www.metsafoorumi.fi/dokumentit/Uutiskirje4_06.pdf
- Metsätalouden kehittämisskeskus Tapio. 2006. Hyvän metsänhoidon suositukset. Metsätalouden kehittämisskeskus Tapion julkaisusarja 22/2006, Helsinki.
- Midttun, A. and L. Koefoed. 2005. Green innovation in Nordic energy industry. Teoksessa: Weber, M. & Hemmelskamp, J. (toim.), *Towards environmental innovation systems*. Springer, Berlin.
- MMM (Maa- ja metsätalousministeriö). 2005. Peltoviljelyn tulevaisuuden linjaukset Suomessa. Työryhmämämuistio 2005:15, Helsinki.
- MMM (Maa- ja metsätalousministeriö). 2006a. Metsäsektorin tulevaisuuskatsaus – Metsäneuvoston linjaukset metsäsektorin painopisteiksi ja tavoitteiksi. Maa- ja metsätalousministeriö 11/2006.
- MMM (Maa- ja metsätalousministeriö). 2006b. Kansallinen viljastrategia 2006-2015. Maa- ja metsätalousministeriö 10/2006.
- MMM (Maa- ja metsätalousministeriö). 2007. Peltobiomassa, liikenteen biopolttoaineet ja biokaasu-jaosto. Loppuraportti. Työryhmämämuistio 2007:2, Helsinki.
- Motiva. 2007. Motiva Oy:n www-sivusto, luettu 22.2.2007. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/fi/>
- Moret, A., Rodrigues, D. & Ortiz, L. 2006. Sustainability criteria and indicators for bioenergy. GT Energia DO FBOMS.
- Murphy, J.D. & McCarthy, K. 2005a. Ethanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in Ireland. *Applied Energy* 82: 148-166.
- Murphy, J.D. & McCarthy, K. 2005b. The optimal production of biogas for use as a transport fuel in Ireland. *Renewable Energy* 30: 2111-2127.
- Myllymaa, T., Tohka, A., Dahlbo, H. & Tenhunen, J. 2006. Ympäristönäkökulmat jätteen hyödyntämisessä energiana ja materiaalina. Valtakunnallinen jättesuunnitelma vuoteen 2016, Taustaselvitys Osa III. Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristökeskuksen raportteja 12/2006, Helsinki.
- Mäenpää, I., Härmä, T., Rytönen, T., Merilehto, K., Sokka, L., Espo J. & Kaplas, M. 2006. Jätevirrat ja jäteintensiteetin muutos Suomen taloudessa 1997–2003. Finwaste-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristö 44/2006. Helsinki.
- Mäkinen, T., Sipilä, K. & Nylund, N.-O. 2005. Liikenteen biopolttoaineiden tuotanto- ja käyttömahdollisuudet Suomessa. Taustaselvitys. VTT Prosessit, VTT Tiedotteita 2288. Espoo.
- Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. & Mikkola, H. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kaviokuonekaasutaset ja uudet liiketoimintakonseptit. VTT Tiedotteita 2357. Espoo
- Nelson, R.G. & Schrock, M.D. 2006. Energetic and economic feasibility associated with the production processing and conversion of beef tallow to a substitute diesel fuel. *Biomass and Bioenergy* 30: 584-591.
- Neste Oil. 2005a. Yhteinen ympäristömme 2005. Porvoon tuotantolaitosten ympäristöraportti. Saatavissa: <http://www.nesteoil.fi/default.asp?path=35,52,108,230>.
- Neste Oil. 2005b. Ympäristömme. Naantalien erikoistuotejalostamon yhteiskuntaraportti 2005. Saatavissa: <http://www.nesteoil.fi/default.asp?path=35,52,108,230>.
- Norberg-Bohm, V. 1999. Stimulating 'green' technological innovation: An analysis of alternative policy mechanisms. *Policy Sciences* 32: 13-38.
- Nordén, B., Ryberg, M., Götmark, F. & Olausson, B. 2004. Relative importance of coarse and fine woody debris for the diversity of wood-inhabiting fungi in temperate broadleaf forests. *Biological Conservation* 117: 1-10.
- Nyroos, H., Partanen-Hertell, M., Silvo, K. & Kleemola, P. (toim.) 2006. Vesiensuojelun suuntaviivat vuoteen 2015. Taustaselvityksen lähtökohdat ja yhteenvedo tuloksista. Suomen ympäristö 55/2006. Suomen ympäristökeskus, Helsinki.
- Nyteknik. 2006. Svarluten halvvägs mot fordonsbränsle. 30.8.2006.
- O'Connell, D., Keating, B. & Glover, M. 2005. Sustainability guide for bioenergy. A report for the RIRDC/L&WA/FWPRDC/MDBC Joint Venture Agroforestry Program. RIRDC Publication No 05/190. 38 s.

- Pahkala, K., Isoolahti, 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, Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus, Jokioinen. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/met/pdf/met1b.pdf>
- Palviainen, M. 2005. Logging residues and ground vegetation in nutrient dynamics of a clear cut boreal forest. *Dissertationes Forestales* 12. University of Joensuu, Faculty of Forestry.
- Partala, A. & Turtola, E. 2000. Biomassanurmi estää tehokkaasti typen huuhtoutumista. *Koetointa ja käytäntö* 57(6): 6-7.
- Patzek, T.D., Anti, S.-M., Campos, R., Ha, K.W., Lee J., Li, B., Padnick, J. & Yee, S.-A. 2005. Ethanol from corn: clean renewable fuel for the future, or drain on our resources and pockets? *Environment, Development, and Sustainability* 7: 319-336.
- Pehnt, M. 2006. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy* 31: 55-71.
- Pelkonen, M., Rauta, E. & Tanskanen, J.-H. 2000. Yhdyskuntajätehuollon päästöjen järjestelmätarkastelu. Teknillinen korkeakoulu, Vesihuoltotekniikan laboratorio. TKK-VHT-21.
- Peltola, T. 2006. Calculating the futures: Stability and change in a local energy production system. Teoksessa: Haila, Y. & Dyke C. (toim.) *How nature speaks: The dynamics of the human ecological condition*. Duke University Press, Durham, s. 218-234.
- Peltola, T. 2007. Paikallisen energiahuollon ympäristöpoliittinen liikkumavara: vaihtoehtoiset teknologiat, poliittiset käytännöt ja toimijuus. *Acta Universitatis Tamperensis*, 1203, Tampere University Press, Tampere
- Piirainen, S. 2002. Nutrient fluxes through a boreal coniferous forest and the effects of clear cutting. Metla, Joensuun tutkimuskeskus. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 859.
- Punttila, P., Virkkala, R., Auvinen, A.-P., Toivonen, H., Kaipainen, H., Söderman, G. & Mannerkoski, I. 2005. Metsät. Teoksessa: Hildén, M., Auvinen, A.-P. & Primmer, E. *Suomen biodiversiteettiohjelman arviointi*. Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristö 770, Helsinki. s. 37-51.
- Purasjoki M. 2006. Sähkön tukku- ja vähittäismarkkinoiden toimivuus – Selvitysmies Matti Purasjoen raportti, KTM Julkaisuja 38/2006, Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö.
- Puustinen, M., Tattari, S., Koskiahho, J., Linjama, J. 2007. Influence of seasonal and annual hydrological variations on erosion and phosphorus transport from arable areas. *Soil & Tillage Research* 93(1): 44-55.
- Puustinen, M., Koskiahho, J. and Peltonen, K. 2005. Influence of cultivation methods on suspended solids and phosphorus concentrations in surface runoff on clayey sloped fields in boreal climate. *Agriculture, Environment & Ecosystems* 105:565-579.
- Quirin, M., Gärtner, S.O., Pehnt, M. & Reinhardt, G.A. 2004. CO₂ mitigation through biofuels in the transport sector. Status and perspectives. Main report. IFEU. Heidelberg. www.dokumentti.luettu 10.10.2006. Saatavissa: http://www.senternovem.nl/mmfiles/149980_tcm24-124368.pdf
- Raitio K. & Rannikko P. 2006. Metsien käyttö ja sosiaalinen kestävyys: Metsähallituksen roolin muuttuminen Lieksassa, *Metsätieteen aikakauskirja*, 2/2006, 271-292.
- Rantanen, K. 2006. Millä tankkaat? Vai tankkaatko vähemmän. *Tiede* 7/2006: 19-24.
- Rantala Olavi. 2006. T&K-panostusten kansantaloudelliset vaikutukset, Keskusteluaiheita – Discussion papers 1028. Elinkeinoelämän Tutkimuslaitos (ETLA), Helsinki.
- Rennings, K. 2000. Redefining innovation – eco-innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics* 32: 319-332.
- Rikkonen, P., Aakkula, J., Grönroos, J., Haapala, H., Manni, J., Pyykkönen, S., Tapio, P. 2006. Ennakoiden kohti kestävää maataloutta. Ympäristöteknologian tulevaisuuden mahdollisuudet maataloudessa vuoteen 2005. Loppuraportti. MTT:n selvityksiä 116.
- Román, M. 2006. What order in progress? Brazilian energy policies and climate change in the beginning of the 21st century. A research report for the Swedish energy agency. December 2006.
- Rosenberg, O. & Jacobson, S. 2004. Effects of repeated slash removal in thinned stands on soil chemistry and understory vegetation. *Silva Fennica* 38(2): 133-142.
- Roström, H. & Uggeldahl, P. 2003. Kotitalouksien ja vähittäiskaupan jätteiden koostumuksen muutos Turussa 1987 – 2002. Lounais-Suomen ympäristökeskuksen moniste 9/2003. Lounais-Suomen ympäristökeskus, Turku. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/palvelut/julkaisu/los/mo092003.htm>
- Rudolph, J. & Gustafsson, L. 2005. Effects of forest-fuel harvesting on the amount of deadwood on clear-cuts. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20: 235-242.
- Schiegg, K. 2001. Saproxylic insect diversity of beech: limbs are richer than trunks. *Forest Ecology & Management* 149: 295-304.
- Sen A. 1999. *Development as Freedom*, New York: Alfred Knopf.
- Sevola, Y., Peltola, A. & Moilanen, J. 2003. Pientalokiinteistöjen polttopuun käyttö lämmityskaudella 2000/2001. *Metsätilastotiedote* 631, Metsäntutkimuslaitos.
- Sheehan, J., Aden, A., Paustian, K., Killian, K., Brenner, J., Walsh, M. & Nelson, R. 2004. Energy and environmental aspects of using corn stover for fuel ethanol. *Journal of Industrial Ecology* 7(3-4): 117-146.
- Skodras, G., Grammelis, P., Kakaras, E. & Sakellariopoulos. 2004. Evaluation of the environmental impact of waste wood co-utilisation for energy production. *Energy* 29: 2181-2193.
- Siitonen, J. 2001a. Energiapuun hankinta ja metsälajiston monimuotoisuus. Teoksessa: Nurmi, J. & Kokko, A. (toim.). *Biomassan tehostetun talteenoton seurannaisvaikutukset metsässä*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 816. s. 66-74.
- Siitonen, J. 2001b. Forest management, coarse woody debris and saproxylic organisms: Fennoscandian boreal forests as an example. *Ecological Bulletins* 49: 11-41.

- Siitonen, J. & Ollikainen, M. 2006. Talousmetsät. Teoksessa: Horne, P., Koskela, T., Kuusinen, M., Otsamo, A. & Syrjänen, K. (toim.), METSON jäljillä – Etelä-Suomen metsien monimuotoisuusohjelman tutkimusraportti. Maa- ja metsätalousministeriö, ympäristöministeriö, Metsäntutkimuslaitos ja Suomen ympäristökeskus. s. 53-85.
- Sustainable production of biomass. 2006. Criteria for sustainable biomass production. Final report of the project group 'Sustainable production of biomass'. 32 s.
- Suunnittelukeskus Oy 2003. Sekajätteen käsittelylaitos. Tekninen hankesuunnitelma. YTV Jätehuolto. Helsinki.
- SYKEN ilmapäästöreisteri. 2007. *Julkaisematon tietokanta*.
- Tan, R.R., Culaba, A.B. & Purvis, M.R.I. 2004. Carbon balance implications of coconut biodiesel utilization in the Philippine automotive transport sector. *Biomass and Bioenergy* 26(2004): 579-585.
- Tilastokeskus. 2007. Energian kokonaiskulutus energialähteittäin. www-dokumentti, luettu 13.2.2007. Saatavissa: <http://www.tilastokeskus.fi/til/ehkh/tau.html>.
- Tilastokeskus. 2005. Energiatilasto 2004. *Energia* 2005:2. Helsinki.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matsons, P.A., Naylor, R. & Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive agricultural practices. *Nature* 418(8): 671-677.
- Tissari J., Raunemaa T., Jokiniemi J., Sippula O., Hytönen K., Linna V., Oravainen H., Vesterinen R., Taipale R., Pyykönen J., Tuomi S., Kouki J. ja Vuorio K. 2005. Puun polton pienhiukkaspäästöt. Loppuraportti 31.8.2005. Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitosten monistesarja 2/2005, Kuopio. 134 pp.
- Tuomisto, H. 2006. Peltobiokaasu liikenteen biopoltoainevaihtoehtona energia-, kasvihuonekaasu- ja ravinnetaseiden kannalta. Pro gradu –tutkielma. Helsingin yliopisto, Soveltavan biologian laitos. Agroekologia. Helsinki
- Tzilivakis, J., Jaggard, K., Lewis, K.A., May, M. & Warner, D.J. 2005. Environmental impact and economic assessment for UK sugar beet production systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 107: 341-358.
- Ulgiati, S. 2001. A comprehensive energy and economic assessment of biofuels: when green is not enough. *Critical Reviews in Plant Sciences* 20(1): 71-106.
- UM/YM (ulkoasianministeriö ja ympäristöministeriö). 1987. Yhteinen tulevaisuutemme, Ympäristön ja kehityksen maailmankomission raportti. Valtion painatuskeskus, Helsinki.
- UPM-Kymmene. 2006. Metsäenergiapuun hankinnan ympäristöohjeet. Sähköposti, Timo Lehesvirta 12.9.2006.
- Vakkilainen, E.K., Kankkonen, S. & Suutela, J. 2004. Advanced efficiency options – Increasing electricity generating potential from pulp mills. 2004 *International Chemical Recovery Conference, Jun 6-10 2004* Technical Assoc. of the Pulp and Paper Industry Press, Norcross, GA, United States, Charleston, SC, United States, s. 1-12.
- Valtakunnallisen jättesuunnitelman uudistamistyöryhmän mietintö. 2006. Jätelainsäädännön uudistamistarpeita ja –mahdollisuuksia. Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristökeskuksen raportteja 19. Helsinki.
- Valtioneuvoston kanslia. 2006a. Suomen vastaus globalisaation haasteeseen. Talousneuvoston sihteeristön globalisaatioselvitys. Osa II. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja 17/2006. Helsinki.
- Valtioneuvoston kanslia. 2006b. Kohti kestäviä valintoja. Kansallisesti ja globaalisti kestävä Suomi. Kansallinen kestävä kehityksen strategia. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja 5/2006.
- Valtioneuvosto. 2005a. Lähiajan energia- ja ilmastopoliittikan linjauksia – kansallinen strategia Kioton pöytäkirjan toimeenpanemiseksi. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 24. päivänä marraskuuta 2005.
- Valtioneuvosto. 2005b. Maatalouspoliittinen selonteko. Saatavissa: http://wwwb.mmm.fi/tiedoteliitteet/051020_SELONTEKO.pdf
- Verbong, G. & Geels, F. 2007. The ongoing energy transition: Lessons from a socio-technical, multi-level analysis of the Dutch electricity system (1960-2004). *Energy Policy* 35(2): 1025-1037.
- Vihma, A., Aro-Heinilä, E. & Sinkkonen, M. 2006. Rypsi biodieselin (RME) maatilatuotannon kannattavuus. MTT:n selvityksiä 115. 43 s. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts115.pdf>.
- YK 2007 New Population Projections Underline Urgency of Family Planning Needs in Developing Nations, at <http://www.unfpa.org/news/news.cfm?ID=943>
- Yusoff, S. & Hansen, S.B. 2005. Feasibility study of performing an life cycle assessment on crude palm oil production in Malaysia. *Int. J LCA (OnLineFirst)*: 1-9.
- YTV. 2004. Pääkaupunkiseudun kotitalouksien sekajätteen määrä ja laatu. Helsinki, YTV Jätehuolto. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 2004:13.
- Åkerman, M. 2006. Tiedon tuotannon käytännöt ja ympäristöpoliittinen toimijuus: rajaamisen ja yhdistämisen politiikka. *Acta Universitatis Tamperensis*, 1139, Tampere University Press. Tampere.

LIITE I

Liikenteen biopolttoaineiden tuotannon kansainvälinen kehitys

Etanolin suurimmat tuottajat ovat Brasilia ja Yhdysvallat. Brasilia valmistaa etanolin sokeriruo'osta ja Yhdysvallat käyttää maissia. Brasilian oma etanolin kulutus oli vuonna 2005 14 milj. m³ (noin 7 Mtoe) ja vienti noin 2 milj. m³ etanolia (noin 1 Mtoe). Etanolin kulutus Yhdysvalloissa oli vuonna 2005 noin 14 milj. m³ (noin 7 Mtoe), ja tuotanto hieman alhaisempi. Etanolin tuotanto EU:ssa oli vuonna 2004 0,7 milj. m³ (noin 0,3 Mtoe). Vaikka Euroopan oma tuotanto kaksinkertaistui vuodesta 2004 vuoteen 2005, etanolin tuonti Eurooppaan vuonna 2005 oli noin 0,5 milj. m³ (noin 0,25 Mtoe). (KTM 2006, 21)

Palmuöljyn käyttö biopolttoaineen tuotannossa on nopeassa kasvussa. Malesia ja Indonesia ovat palmuöljyn johtavat tuottajamaat. 80-85 prosenttia palmuöljystä tuotetaan Indonesiassa ja Malesiassa. Vuodesta 1995 vuoteen 2006 tuotanto Malesiassa on kasvanut kaksinkertaiseksi ja Indonesiassa nelinkertaiseksi. Kysynnän ennustetaan kaksinkertaistuvan 2020 mennessä. Palmuöljyn suurimmat tuojat vuonna 2004 olivat Euroopan Unioni (17%), Intia (15%) ja Kiina (15%). Suurin osa palmuöljystä menee edelleen elintarviketuotantoon, mutta Malesia ja Indonesia ovat päättäneet kuitenkin varata biodieselin (myös kotimaiseen) tuotantoon 12 miljoonaa tonnia. Hyvin hallintoituna ja kestävästi tuotettuna palmuöljyllä voisi olla osa globaalissa biopolttoaineiden käytössä, mutta kysynnän kasvulla on myös haitallisia seurauksia, kuten metsien ja luonnon monimuotoisuuden häviäminen. 12 miljoonan tonnin osuus biopolttoainetuotannolle johtaa kilpailuun ruoantuotannon kanssa, mikä puolestaan nostaa palmuöljyn hintaa ja lisää voimakkaasti paineita tuotannon lisäämiselle (Humalisto 2006). Palmuöljyn käytön lisääminen on herättänyt myös laajenevaa vastustusta.

Euroopassa tuotetut biopolttoaineet eivät pysty taloudellisesti kilpailemaan esimerkiksi Brasiliassa tuotetun etanolin kanssa. Siitä huolimatta biopolttoaineiden tuotanto on EU:ssa voimakkaassa kasvussa ja kysynnän ja tarjonnan muutokset voivat vaikuttaa biopolttoaineiden hintoihin kansainvälisillä markkinoilla. Vuonna 2004 biopolttoaineiden kokonaistuotanto oli EU:ssa noin 2 Mtoe, josta biodieselin osuus oli 1,7 Mtoe ja etanolin 0,3 Mtoe. (KTM 2006, 22)

EU:n jäsenmaiden väliltä löytyy erilaisia painotuksia. Ruotsissa käytetään etenkin Brasiliassa valmistettua etanolia ja sen seoksia yhdistettynä fossiilisiin polttoaineisiin. Lisäksi Ruotsissa käytetään biokaasua metaanikäyttöisissä ajoneuvoissa. Biodieseliä käytetään lähinnä Saksassa, Ranskassa ja Italiassa. EU:n voimakkaasti kasvavat biodieselin markkinat ovat varmasti vaikuttaneet siihen, että Neste Oil Oyj on sanonut tähtäävänsä maailman johtavaksi biodieselin valmistajaksi (Neste Oil Oyj:n pörssitiedote 27.9.2006). Yhtiö rakentaa tulevana vuosina useita biodiesellaitoksia eri markkina-alueille itse tai yhdessä kumppaneiden kanssa. Lisäksi yhtiö panostaa merkittävästi biopolttoaineiden tutkimukseen ja kehitykseen erilaisten uusiutuvien raaka-aineiden hyödyntämiseksi.

LIITE 2 Bioenergian tuotannolle ja käytölle asetettuja tavoitteita

Euroopan unionin bioenergian tavoitteet ja sääntely

Euroopan Unionin energiapolitiikan keskeisiä tavoitteita ovat energiatarpeen vähentäminen, uusiutuvien energialähteiden käytön lisääminen, energialähteiden monipuolistaminen sekä kansainvälisen yhteistyön lisääminen ja tehostaminen. Poliittikka tähtää siihen, että Eurooppa voi vähentää riippuvuuttaan tuontienergiasta, lisätä energijärjestelmiensä kestävyyttä sekä edistää kasvua ja työpaikkojen luomista (Euroopan Yhteisöjen Komissio 2005, 2). Bioenergian lisäämiselle on luotu lukuisia kannustimia. Esimerkiksi useat energia-, ilmasto-, maatalous- ja liikennepoliittiset tavoitteet ja direktiivit koskettavat suoraan tai välillisesti bioenergiaa. Seuraavassa on tiiviisti käsitelty eri politiikkasektoreiden tärkeimpiä bioenergiaan liittyviä tavoitteita.

Energiapolitiikka

Energiapolitiikan osalta RES-E-direktiivi (2001/77/EC) asettaa jäsenmaille vähimmäistavoitteet uusiutuvilla energiamuodoilla tuotetulle sähkölle. Direktiivin ohjeellisen kokonaistavoitteen mukaan vuoteen 2010 mennessä 22,1 prosenttia yhteisön kokonaissähkönkulutuksesta olisi uusiutuvista energialähteistä tuotettua sähköä. Suomen ohjeellinen tavoiteosuus vuonna 2010 on 31,5 prosenttia, mikä tarkoittaa 6,8 prosenttina lisäystä vuoden 1997 tasosta. Yhdistettyä lämmön- ja sähköntuotantoa koskeva ns. CHP (Combined Heat and Power)-direktiivi (2004/8/EC) puolestaan ohjaa sähkön ja lämmön yhteistuotantoa erityisesti pienessä kokoluokassa. Direktiivi pohjautuu CHP-edistämishjelmalle, jonka tavoitteena on lisätä CHP:llä tuotetun sähkön osuutta EU:ssa 18 %:iin vuoteen 2010 mennessä.

Euroopan energiahuoltostrategian (KOM 2000/769) tavoitteena on lisätä kotimaisten energialähteiden käyttöä sekä edistää hajautettua energiantuotantoa. Siinä todetaan, että ilman toimenpiteitä EU:n riippuvuus tuontienergiasta saattaa seuraavien 20-30 vuoden kuluessa kasvaa nykyisestä 50 %:sta 70 %:iin. Ratkaisuksi tarjotaan pitkän aikavälin energiansäästösuunnitelmaa, jolla energian kysyntä suunnataan hallitumpaan ja ympäristöä säästävempään kulutukseen. Keskeisen sijan saavat uusien ja uusiutuvien energiamuotojen kehittäminen.

Uusiutuvia energialähteitä koskevan valkoisen kirjan (KOM/97/599) tavoitteena on uusiutuvien energiamuotojen osuuden kaksinkertaistaminen energiankulutuksesta vuoden 1996 6 %:sta 12 %:iin vuoteen 2010 mennessä. Valkoinen kirja ei sisällä maakohtaisia tavoitteita eikä kuvausta varsinaisista primäärilähteistä. Pelto-, metsä- ja yhdyskuntajättepohjainen biomassa ovat lähes yhtä merkittäviä lähteitä tavoitellulle lisäkäytölle.

Biomassaa koskevassa toimintasuunnitelmassa (Euroopan Yhteisöjen Komissio 2005) esitetyillä toimilla on merkittävä sija EU:n tavoitellessa uusiutuvan energian lisäämistä. Tällä hetkellä noin puolet EU:ssä käytetyistä uusituvista energialähteistä pohjautuu biomassan käytölle. Toimintasuunnitelma kattaa kaikki biomassalajit eli puun, jätteet sekä viljelykasvit. Energiatuotannon lisäämisen kohteita ovat niin lämmitys, sähköntuotanto kuin liikennekin. Suunnitelmalla halutaan kohdentaa ja optimoida yhteisön rahoitusmekanismeja, suunnata uudelleen eri osa-alueiden toimia sekä poistaa biomassan energiankäytön esteitä. EU:n seitsemäs tutkimuksen puiteohjelma saa toimintasuunnitelmassa merkittävän sijan.

Liikennepolttoaineiden osalta mielenkiintoista on Komission kannattama oman tuotannon ja tuonnin tasapaino. Komissio aikoo mm. tarkastella biopolttoainedirektiivin muuttamista siten, että ainoastaan ne biopolttoaineet, joiden viljelyssä nou-

datetaan ekologista kestävyyttä koskevia vähimmäisvaatimuksia, luetaan mukaan tavoitemääriin.

Toimintasuunnitelmassa Komissio ehdottaa myös kansallisten biomassatoimintasuunnitelmien laatimista, joissa arvioitaisiin eri biomassatyyppien (puun ja puutähteiden sekä jätteiden ja viljakasvien) fyysistä ja kaupallista saatavuutta, määriteltäisiin käytettäviä biomassatyyppiejä koskevia painopisteitä ja biomassaresurssien kehittämistapoja sekä yksilöitäisiin kansalliset toimenpiteet biomassan käytön edistämiseksi. Lisäksi myös mm. energiatehokkuusdirektiivillä (COM(95)682) ja rakennusten energiatehokkuusdirektiivillä (2002/91/EC) on vaikutuksia bioenergiaa koskeviin linjauksiin.

Uusiutuvien energiatuotantomuotojen kehitystä hidastavat mm. erilaiset taloudelliset ja hallinnolliset tekijät. Näiden tekijöiden takia Euroopan Komissio on valmistelemassa pitkän aikavälin uusiutuvan energian tiekarttaa, joka julkistettaneen alkuvuodesta 2007. (Informal High-Level Energy Working Group Meeting Helsinki, October 2006) Maaliskuussa 2006 julkaistun Vihreän paperin (COM (2006) 105 final) mukaan tiekartta pitäisi sisältää mm. aktiivisen ohjelman ja toimenpiteet, joilla taataan asetettujen tavoitteiden saavuttaminen sekä arvioita tavoitteista, jotka ovat tarpeellisia vuoden 2010 jälkeen. Mielenkiintoista tiekartassa tulee olemaan yksityiskohtainen lyhyen, keski- ja pitkän aikavälin suunnitelma siitä, kuinka EU:n riippuvuutta tuontiöljystä vähennetään.

EU on hyväksynyt sitovan tavoitteen uusiutuvien energialähteiden lisäämisestä 20 prosenttiin alueellaan vuoteen 2020 mennessä. Tällä hetkellä uusiutuvien energialähteiden osuus unionin energiankulutuksesta on alle seitsemän prosenttia.

Ilmastopolitiikka

Euroopan unioni on asettanut tavoitteeksi, että lämpötilan nousu jää alle kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna. Kioton pöytäkirja velvoittaa EU:n (EU 15) vähentämään kasvihuonekaasujen päästöjä 8 prosenttia vuoden 1990 päästötasosta 2008–2012. Vähennysvelvoite on jyvitetty yhteisössä jäsenvaltiokohtaisiksi velvoitteiksi.

Euroopan komission käynnistämässä Euroopan ilmastonmuutosohjelmassa (ECCP) on kartoitettu ja valmisteltu Euroopan unionin laajuisia kustannustehokkaita toimia päästöjen vähentämiseksi. Osa ECCP:n määrittelemistä toimista on jo tullut osaksi yhteisön lainsäädäntöä. Lisäksi valmisteilla on lukuisia toimenpide-esityksiä. Komissio käynnisti lokakuussa 2005 ECCP:n toisen vaiheen, jonka aloituskokouksessa pohjustettiin uusien työryhmien työtä. Niiden aihepiirit ovat ensimmäisen vaiheen arviointi, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi, sopeutuminen, lentoliikenne sekä autoliikenne.

Euroopan unionin päästökauppa alkoi vuoden 2005 alussa. Sitä säädellään päästökauppadirektiivillä (2003/87/EC), joka koskee yli 20MW energiatuotantolaitoksia. Päästökaupan todelliset vaikutukset bioenergian lisäämiseen riippuvat sekä direktiivin kansallisesta toimeenpanosta että bioenergian kilpailukyvyistä suhteessa muihin uusiutuvan energian lähteisiin.

Maatalouspolitiikka

Bioenergian tuotanto kytkeytyy läheisesti EU:n yhteisen maatalouspolitiikan (CAP) tavoitteisiin. CAP pyrkii maatalouden ylituotannon leikkaamiseen sekä markkinaohjautuvuuden parantamiseen. Vapautuvan peltoalan toivotaan reagoivan hintasuhteisiin ja ohjautuvan parhaiten tuottavaan käyttöön rehun, energian ja kesantoalan kesken. Samalla bioenergian toivotaan palvelevan ympäristön tilaan, yrittäjyyteen, työllisyyteen ja maaseutualueiden yleiseen elinvoimaisuuteen liittyviä tavoitteita ruoantuotannon vähetessä. (Vihma ym. 2006, 8)

Maatalouspolitiikan rahoitussäännöksen mukaan energiakasveilla voidaan monipuolistaa maaseudun elinkeinorakennetta. Vuoden 2003 maatalousuudistuksessa otettiin käyttöön erityinen energiakasvituki ja säilytettiin velvoitekesantoalan käyttö. Myös EU:n biomassasuunnitelma korostaa maatalouden roolia bioenergian tuotannossa.

Liikennepolitiikka

Liikenteen polttoainedirektiivillä (2003/30/EC) pyritään kasvattamaan biopolttoaineiden ja muiden uusiutuvien energialähteiden käyttöä liikenteessä. Biopolttoaineiden tavoiteosuus liikenteen kulutuksesta on 5,75 % vuonna 2010. Vuonna 2001 julkaistu EU:n liikennestrategia (COM(2001)370) sisältää biopolttoaineiden 20%:n kokonaistavoitteen vuodelle 2020.

Jättopolitiikka

EU:ssa on käynnissä jätedirektiivin uudistamistyö Komission 23.12.2005 tekemän ehdotuksen pohjalta (KOM(2005)667 lopullinen). Komissio antoi samassa yhteydessä ehdotuksen EU:n uudeksi jätestrategiaksi (KOM(2005)666 lopullinen). Komissio on tässä yhteydessä painottanut elinkaariajattelun tärkeyttä jätehuollossa, ja end-of-waste -käsitteen lieventämistä, mikä helpottaa jätteen energiakäyttöä.

Jätteen hyödyntämisen ja loppukäsittelyn välinen rajanveto on johtanut joissakin tapauksissa siihen, että ympäristönsuojelutavoite ei toteudu parhaalla mahdollisella tavalla. Jätteen polton kohdalla on epäselvyyttä aiheuttanut se, onko jätteen polton pääasiallinen tarkoitus tuottaa energiaa, jolloin kysymys on hyödyntämisestä vai syntyykö energiaa vain oheistuotteena, jolloin toiminta määrittyy loppukäsittelyksi (Valtakunnallisen jätesuunnitelman uudistamistyöryhmän mietintö 2006, s. 32).

Suomen bioenergian tuotannolle asetettuja kansallisia tavoitteita

Suomalaisen bioenergiatuotannon tulevaisuutta on linjattu useissa eri yhteyksissä:

- **Peltoviljelyn tulevaisuuden linjaukset Suomessa -työryhmä**, Maa- ja metsätalousministeriö, asetettu 9.3.2005 (MMM 2005)
- **Kansallinen viljastrategia 2006–2015** (MMM ja Vilja-alan yhteistyöryhmä 2006) (MMM 2006b)
- **Peltobiomassa, liikenteen biopolttonesteet ja biokaasu -työryhmä** (MMM 2007)
- **Liikenteen biopolttoaineiden tuotannon ja käytön edistäminen Suomessa -työryhmä** (KTM 2006),
- **Uusiutuvan energian edistämishjelma 2003–2006** (KTM 2002)
- **Ilmasto- ja energiapoliittinen selonteko 24.11.2005** (Valtioneuvosto 2005a)
- **Maatalouspoliittinen selonteko 20.10.2005** (Valtioneuvosto 2005b)

Näiden lisäksi maa- ja metsätalousministeriö on asettanut työryhmän selvittämään ministeriön tehtäviä bioenergian edistämiseksi. Ryhmän on tarkoitus saada työnsä valmiiksi 30.6.2007 mennessä. Kauppa- ja teollisuusministeriö puolestaan nimitti Jyväskylän yliopiston professori Jukka Rintalan johtamaan selvitysryhmää, joka tarkensi tutkimus- ja kehitystyön suuntaviivoja kaikkien biomassavirtojen tehokkaaksi hyödyntämiseksi. Selvitys valmistui tammikuussa 2007 (KTM 2007).

Peltoviljelyn tulevaisuuden linjaukset Suomessa -työryhmä (MMM)

Maa- ja metsätalousministeriö asetti 9.3.2005 työryhmän, jonka tehtävänä oli laatia tulevaisuuden linjaukset Suomen peltoviljelylle. Työryhmä tarkasteli peltoviljelyä teollisuuden raaka-ainetuotannon, energiantuotannon, kotieläintuotannon, ympäristön sekä muun maankäytön tarpeiden kannalta. Tulevaisuuden tarkastelu ulottui vuoteen 2012. Työryhmä laati tulevaisuuden tarkastelemiseksi kolme vaihtoehtoista skenaariota: perusskenaario, kesantoskenaario ja bioenergiaskenaario.

Bioenergiaskenaarion mukaan vuonna 2012 nykyisin käytössä olevasta peltoalasta käytetään liikenteen biopolttoaineiden tuotantoon 150 000 hehtaaria ja ruokohelpin tuotantoon 50 000 hehtaaria. Työryhmän arvio oli, että Suomessa on riittävästi peltoa sekä

teollisuuden raaka-ainekysynnän tyydyttämiseen että muihin tarkasteltuihin käyttömuotoihin. Nykyisestä peltoalasta voitaisiin noin 500 000 hehtaaria ottaa peltoenergian tuotantoon, mikä edellyttäisi koko kesantoalan olevan peltobioenergian tuotannossa.

EU:n vuodelle 2010 asettaman liikenteen biopolttoainevelvoitteen täyttäminen kotimaisella tuotannolla edellyttäisi noin 410 000 hehtaarin viljan ja rypsin yhteisalaa. Bioetanolit tuotantoon tarvittava ohra-ala olisi 160 000 hehtaaria ja biodieseltuotantoa varten viljeltäisiin rypsiä tai rapsia 250 000 hehtaarella (MMM 2005, 36-37). Työryhmä totesi myös, että ”mikäli Suomessa lisätään biopolttoaineiden käyttöä liikenteessä tai muilla energiasektoreilla, tulisi käytön perustua ensisijaisesti kotimaisiin raaka-aineisiin ja tuotantoon. Bioenergian tuotannon ja käytön edistämistoimissa on etsittävä sellaisia keinoja, joiden avulla pystytään parantamaan kotimaisen biopolttoaineen ja sen raaka-ainetuotannon kilpailukykyä ulkomaiseen tuontiin nähden. Maatalouden rakenneohjelmissa on kiinnitettävä huomiota bioenergian ja biopolttoaineiden tuotannon kannustamiseen. Biopolttoaineiden valmistuksen käynnistymiseen kotimaisista raaka-aineista tulee valmistautua niin, että prosesseissa syntyvät vilja- ja valkuaisivujakeet pystytään hyödyntämään tehokkaasti rehukäytössä.” (MMM 2005, 43)

Kansallinen viljastrategia 2006–2015 (MMM)

Maa- ja metsätalousministeriön sekä Vilja-alan yhteistyöryhmän laatimassa viljastrategiassa vuosille 2006–2015 on esitetty bioenergiaskenaario, joka pohjautuu pellonkäyttöstrategiaraportin vastaavaan skenaarioon (MMM 2005). Strategian mukaan viljataseissa on otettava huomioon nykyisten viljantuottajien ja -käyttäjien maantieteellisen jakautuman lisäksi viljan ja öljykasvien tulevaisuuden mahdolliset käyttömuodot kuten nonfood- tai bioenergiakäyttö sekä näiden tuottamien sivutuotteiden markkinoiden läheisyys. Investointitukia myönnettäessä tulee ottaa huomioon myös se, että uudet tuotantolaitokset sijoittuvat raaka-aineen saatavuuden ja tuotteiden markkinoiden kannalta mahdollisimman tarkoituksenmukaisesti. (MMM 2006b).

Peltobiomassa, liikenteen biopoltonesteet ja biokaasu –työryhmä (MMM)

Maa- ja metsätalousministeriön asettama ”Peltobiomassa, liikenteen biopoltonesteet ja biokaasu” -jaosto asetettiin toteuttamaan Uusiutuvan energian edistämishelman tavoitteita peltoenergian, biopohjaisten liikenteen biopoltonesteiden sekä eloperäisistä kasvi- ja eläinjätteistä tuotetun biokaasun osalta (MMM 2007). Metsäenergia ja turve rajattiin jaoston toimialan ulkopuolelle.

Tehtyjen selvitysten pohjalta jaosto asetti vuoden 2015 ruokohelpin viljelypinta-alatavoitteeksi 100 000 ha, vaikka viljelypinta-alojen kasvua saattavat rajoittaa erilaiset tuotantotekniset ongelmat kuten suuri sadonkorjuuhävikki. Peltoenergian tuotannon kokonaispinta-alan arvioitiin vuonna 2015 olevan n. 500 000 ha.

Nykyisin käytössä olevista liikennebiopolttoaineista työryhmän mukaan on biokaasu ympäristövaikutuksiansa kannalta selvästi paras. Sen ongelmana on kuitenkin vaadittava kaasutankilla varustettu auto ja nykyjärjestelmästä poikkeava jakelujärjestelmä. Nyt käyttöön otettavat biopolttoainelaitokset ovat välivaihe ennen niin kutsuttuja toisen sukupolven laitoksia. Ensimmäisen sukupolven liikennebiopolttoaineiden viljely- ja jalostusketjun kehittämistyö on kuitenkin vielä alussa. Muun muassa elinkaaritarkasteluiden avulla voidaan tuotantoketjun eri osa-alueiden vaikutuksia arvioida tarkemmin ja jatkokehittää tuotantotekniikoita energiataseiden ja ympäristövaikutusten kannalta nykyistä edullisemmiksi.

Maatalousperäisen bioenergian tuotanto ja käyttö kattaa laajan kentän erilaisia tuotantomuotoja ja energiatuotteita. Alasta on nopeasti tulossa merkittävä vaihtoehto suomalaisille maataloustuottajille ja energiayrityksille, ja sen kehitys on vakiintumassa alkuaikojen kiihkeätahtisuudesta rauhallisempaan ja tasaisempaan suuntaan. Lähiaikojen haasteena onkin sovittaa tämä uusi energiantuotannon sektori omalle

sijalleen energiakentässä ja sovittaa maatalousenergia saumattomasti muihin tuotantomuotoihin, erityisesti puu- ja turve-energiaan.

Liikenteen biopolttoaineiden tuotannon ja käytön edistäminen Suomessa -työryhmä (KTM)

Kauppa- ja teollisuusministeriön asettama työryhmä arvioi, että biopolttoaineiden EU:n asettama biopolttoaineiden 5 %:n tavoiteosuus on teoriassa mahdollista saavuttaa vuoteen 2010 mennessä, mutta tavoite on erittäin haastava (KTM 2006). Työryhmän mukaan käyttövelvoite on ensisijainen biopolttoaineiden käytön edistämiskeino. Vuonna 2010 käyttövelvoitteesta aiheutuva lisäkustannus on arvioilta 50–80 milj. euroa vuodessa ja vaikutus polttoaineiden hintoihin suuruusluokaltaan noin 3 senttiä/litra. Työryhmän mukaan kotimaisista raaka-aineista tuotetuilla biopolttoaineilla voitaisiin kattaa noin 2–3 %:n osuus liikenteen polttoaineiden kulutuksesta vuonna 2010. Työryhmä ehdotti kehitysohjelman käynnistämistä uusien, toisen sukupolven biopolttoaineiden tuotantoteknologioiden kehittämiseksi ja uusien biopolttoaineiden saamiseksi markkinoille vuoteen 2015 mennessä. Näin olisi mahdollista puolittaa biopolttoaineiden aiheuttamat lisäkustannukset kansantaloudelle ja saavuttaa liikenteen biopolttoaineilla jopa 7–8 %:n energiasuus vuoteen 2020 mennessä. Työryhmän mukaan ei kuitenkaan ole mahdollista edellyttää, että tarvittava biopolttoainemäärä tuotettaisiin kotimaassa ja kotimaisista raaka-aineista.

Uusiutuvan energian edistämisohjelma 2003-2006 (KTM)

Uusiutuvan energian edistämisohjelmassa 2003–2006 on asetettu tavoitteet erikseen puun pienkäytölle (kiinteistöjen puulämmitys), metsähakkeelle, kierrätyspolttoaineille, biokaasulle ja peltobiomassalle. Suhteellisesti suurimmat lisäystavoitteet nykyisin jo käytössä olevista polttoaineista on asetettu metsähakkeen, kierrätyspolttoaineiden ja biokaasun käytölle. Tavoitteen mukainen metsähakkeen käyttö olisi vuonna 2010 noin 5 milj. m³. Metsäteollisuuden jätehiemien ja puupolttoaineiden käytön lisääminen ei suoranaisesti ole edistämiskohteena, koska niiden käyttö riippuu metsäteollisuuden tuotannosta ja tuotantorakenteesta. Liikenteen biopolttonesteille ohjelma esitti tavoitteeksi kahta prosenttia vuonna 2010.

Ehdotetut toimenpiteet sisältävät niin teknologian kehittämistä, kaupallistamista ja käyttöönottoa, kuin myös taloudellisia ja hallinnollisia sekä tiedollisia ohjauskeinoja.

Ohjelman kokonaistaloudellisia ja työllisyysvaikutuksia ei arvioitu tiukan aikataulun takia. Edellisen ohjelman ja ilmastostrategian yhteydessä esitettyjen arvioiden mukaan uusiutuvien energialähteiden tuotanto- ja käyttötekniikan viennin on arvioitu lisääntyvän voimakkaasti vuoteen 2010 mennessä, jolloin viennin arvo voisi olla toista miljardia euroa. Tämän energiateknologiasektorin välitön työllistävyys voisi vuonna 2010 nousta 10 000 henkilötyövuoteen. Vastaava työpanos tarvittaisiin lisääntyvään polttoaineen tuotantoon ja laitosten rakentamiseen ja käyttöön. (KTM 2002)

Ilmasto- ja energiapoliittinen selonteko 24.11.2005

Marraskuussa 2005 eduskunnalle annetun ilmasto- ja energiapoliittisen selonteon linjauksissa ja tavoitteissa painotettiin Suomen eurooppalaista keskiarvoa suurempaa bioenergian osuutta sekä primäärienergiassa että sähkössä. Selonteon mukaan uusiutuvien energialähteiden ja biopolttoaineiden osuutta primäärienergian kokonaiskulutuksesta pyritään merkittävästi lisäämään tulevien 10–15 vuoden aikana. Erityisen voimakkaasti tulisi lisätä metsätähteestä tehdyn hakkeen, peltobiomassojen, kierrätyspolttoaineiden ja biokaasun käyttöä. Tavoitteena on, että näiden osuus primäärienergiasta ainakin kolminkertaistuu vuoden 2004 noin 2 prosentista yli 6 prosenttiin 15-20 vuoden aikana. (Valtioneuvosto 2005a, 20).

Maatalouspoliittinen selonteko 20.10.2005

Valtioneuvoston eduskunnalle 20.10.2005 antamassa maatalouspoliittisessa selonteossa bioenergian todetaan olevan varteen otettava vaihtoehto elintarviketuotannossa ja tämä on huomioitava myös maatalouspolitiikassa (Valtioneuvosto 2005b). Varsinaiset bioenergiaa koskevat linjaukset jätettiin kuitenkin tehtäväksi osana kansallista ilmasto- ja energiapoliittista strategiatyötä.

Selonteossa arvioidaan, että energian hinnan nousu johtaa maataloustuotannon osittaiseen siirtymiseen energiaraaka-aineiden tuotantoon. Tällä kehityksellä saattaa olla huomattava vaikutus markkinoihin ja varsinkin maataloustuotteiden hintoihin. Vaikka elintarviketuotanto on jatkossakin maatalousmaan tärkein käyttötarkoitus, voi uusiutuvan energian tuotanto olla esimerkiksi elintarvike- tai energia-alan markkina-tilanteen tai tilan omien tavoitteiden näkökulmasta kannattava vaihtoehto. Energia- kasveilla voidaan lisäksi turvata pellon viljelykelpoisuus sen mahdollisesti jäädessä tilapäisesti pois elintarviketuotannosta.

Selonteon mukaan maaseudun ja alueellisen kehityksen turvaamisessa bioenergian tuotannolla on Suomessa huomattava merkitys. Peltoenergiakasvien viljely pitää peltomaiseman avoimena ja pellot viljelykunnossa, jolloin ne on tarvittaessa mahdollista ottaa takaisin ruoantuotantoon. Tavoitteeksi tulee selonteon mukaan asettaa koko peltoalan hyödyntäminen joko ravinnon tai energian tuotannossa. Lannan energiakäytön mahdollisuuksia lisäävät eläintuotantoyksiköiden kasvu ja keskittyminen tietyille alueille, jolloin suuren kokoluokan laitoksissa sähkön ja lämmön yhteistuotanto ja myynti tarjoavat myös kaupallisia mahdollisuuksia. Bioenergian tuotannon kestävä kehittäminen edellyttää pitkäjänteisiä maatalouspolitiikan ratkaisuja, joilla tuetaan alan tutkimusta ja mahdollisia investointeja. Kasvinjalostuksen tavoitteena on ollut tähän saakka jalostaa ihmisravinnoksi tai rehuksi sopivia lajikkeita. Jatkossa on syytä suunnata tutkimusta ja jalostusta myös energian tuotannon lähtökohdista.

LIITE 3

Ympäristövaikutusten huomioon ottaminen bioenergian elinkaarinäkökulmaan perustuvissa tutkimuksissa, tarkastellut vaikutusluokat ja indikaattorit.

Tutkimus	Ilmastonmuutos	Happamoituminen	Ilman laatu, alailmakehän otsonin muodost.	Yläilmakehän otsonikerroksen oheneminen	Rehevytyminen	Erosio	Monimuotoisuus	Haitalliset aineet/ Toksisuus	Muu	Viite
Vehnäetanolin tuotanto kolmessa eri kokoisessa jalostuslaitoksessa	+	+	+	-	+	-	-	-	-	Bernesson ym. 2006
Energiapajun, perinteisen talvi- ja luomuvehnän LCA Hollannissa	+	+	+	+	+	-	-	Ekotoksisuus makeissa vesissä, merivedessä, merisedimentissä ja maaperässä, toksisuus ihmiselle (1,4-diklooribentseeni-ekv)	Haju, uusiutumattoman energian kulutus, muiden abioottisten raaka-aineiden kulutus	Broek van den ym. 2002
Biomassan integroitu kaasutus ja CO ₂ poisto	+	+	+	+	+	-	-	Raskasmetallit (Pb-ekv), karsinogeeniset yhdisteet (bentso(a)pyreeni -ekv.), pestisidit act.s.)	Kiinteä jäte, energian kulutus	Carpentieri ym. 2005
Sähkötuotantanto puusta ja metsähakeesta (paalittettuna tai pelletteinä), ml. kuljetus Ruotsista Hollantiin (LCI tarkastelu)	+	+	+	-	(+)	-	-	-	Biomassan määrä, sähkönkulutus, polttoaineen kulutus	Forsberg 2000
Bioetanoli (10 % bensiinin seassa)	+	+	+	+	+	-	-	Raskasmetallit (Pb-ekv), karsinogeeniset yhdisteet (bentso(a)pyreeni -ekv.)	Kiinteät jätteet, energian kulutus	Fu ym. 2003

Tutkimus	Ilmastonmuutos	Happamoituminen	Ilman laatu, alailmakehän otsonin muodost.	Yläilmakehän otsonikerroksen oheneminen	Rehevoityminen	Eroosio	Monimuotoisuus	Haitalliset aineet/ Toksisuus	Muu	Viite
Maissietanoli ja soijadiesel	+	-	-	-	(+)	-	-	(+)	Energiatase, lannoitteiden ja pestisidien käyttö	Hill ym. 2006
Bensiiniauton ja etanoliauton (benssiini ja maniokkietanoli) elinkaaritarkastelu	+	+	+	-	-	-	-	-	Kokonaisenergian kulutus, fossiilisten polttoaineiden kulutus	Hu ym.
Rypsidiesel									Energiatase	Janulis
Maniokkietanoli	+	+	+	-	+	-	-	+	Energiataseet, uusiutumattomien raaka-aineiden väheneminen, jätemäärä	Kadam
Bioetanoli puusta ja jätepaperista	+	+	+	+	-	-	-	+ (humaanitoksisuus/hengitys, ravinnonotto, karsinogeenien hengitys; toksisuus kaloille)	Energiatase	Kemppainen & Shonnard
Maissietanoli, soijadiesel	+	+	-	-	+	-	-	-	Uusiutumattoman energian kulutus	Kim & Dale 2005b
Etanoli (maissi, ruohokasvipohjainen, puupohjainen)	+	+	+	-	-	-	-	-	Energian ja lannoitteiden kulutus	MacLean ym. 2000
Biomassan ja muiden uusiutuvien käyttö voiman ja lämmön tuotannossa	+	+	-	-	+	-	-	-	Energian ja muiden resurssien kulutus	Pehnt 2006
Maissietanolin ja benssiinin LCA	+	+	+	-	-	+	laadullinen arvio maankäytön muutoksista	-	Fossiilisten polttoaineiden kulutus, benssiinin kulutus, maaperän org-C	Sheehan ym.
Jätepuun yhteispoltto hiilen kanssa	+	+	-	-	+	-	-	+ (humaanitoksisuus ilmassa, maaperässä ja vedessä), toksisuus terrestrisille ja vesi-eläille	Kiinteän jätteen määrä (tuhka)	Skodras ym.

LIITE 4

Bioenergian vaikutus vesistöjen rehevöitymiseen, eroosioon ja luonnon monimuotoisuuteen

Bioenergian tuotannon ja käytön elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia ei ole Suomessa kattavasti selvitetty. Tässä selvityksessä mahdollisia ympäristövaikutuksia on kuvattu kirjallisuuteen perustuen. Lisäksi esitetään asiantuntijanäkemyksiin perustuvat laadulliset arviot vaikutuksista vesistöjä rehevöittäviin päästöihin, eroosioon ja luonnon monimuotoisuuteen.

Bioenergian elinkaaresta on tässä tarkasteltu vain tuotanto, jota verrataan vaihtoehtoihin käyttömuotoihin. Esimerkiksi ohrasta valmistettua bioetanolia verrataan tuotantovaiheessa nurmiviljelyyn.

Ympäristövaikutusten muutoksen suuntaa on kuvattu laadullisella neliportaisella asteikolla:

- 0 = ympäristövaikutuksessa **ei muutosta** siirryttäessä vertailutilanteesta bioenergiaan
- + / - = **vähäinen vaikutus** (< 10 %); tilanne paranee tai huononee
- ++ / -- = **merkittävä vaikutus** (10 – 30 %); tilanne paranee tai huononee
- +++ / --- = **suuri vaikutus** (> 30 %); tilanne paranee tai huononee

Esimerkiksi siirryttäessä nurmen viljelystä ohran tuotantoon kylvömenetelmällä etanolin valmistusta varten tyyppipäästöt lisääntyvät eli ympäristön kannalta tilanne huononee paljon (---).

Tarkastelu on tehty tuotantovaiheessa pinta-alayksikköä (hehtaari) kohti.

Taulukko 4.1: Bioenergian tuotannon vaikutukset vesistöjä rehevöittävään kuormitukseen ja eroosioon (ks. tarkempi selitys yllä). Asiantuntijat ovat peltoenergian osalta Markku Puustinen ja Petri Ekholm ja metsäenergian osalta Sirkka Tattari ja Ahti Lepistö (SYKE).

Raaka-aine	Lähtötilanne	Eroosio	PP (veteen)	DRP (veteen)	Kok-N (veteen)	Nit-N (veteen)	Kommentteja
Ohra (kyntö)	Nurmi	---	---	+(+)	---	---	Jyrkillä pelloilla riski suuri, tasaisilla pieni
	Vilja (kyntö)	0	0	0	0	0	
Ohra (suorakylvö)	Nurmi	-/0	-/0	-/0	-/0	-/0	Pitkäaikainen suorakylvö, muutos = 0
	Vilja (kyntö)	+++	+++	+(+)	+++	+++	
Sokerijuurikas	Nurmi	---	---	-	---	---	
	Vilja (kyntö)	0	0	0	0	0	
Rypsi (kyntö)	Nurmi	---	---	+(0)	---	---	
	Vilja (kyntö)	0	0	0	0	0	
Rypsi (suorakylvö)	Nurmi	-/0	-/0	-/0	-/0	-/0	Pitkäaikainen suorakylvö, muutos = 0
	Vilja (kyntö)	+++	+++	+(+)	+++	+++	
Ruokohelpi	Nurmi	+	+	+	+	+	
	Vilja (kyntö)	+++	+++	+	+++	+++	
	Käytöstä poistettu turvetuotantoalue	++	++	+	++	++	
Hakkuutähde (latvukset ja oksat)	Runkopuuhakkuu, tähteet jää metsään	+	+	+	0	?	Oletus 1: lannoitus ei lisääny (saattaa olla tarve lisätä lannoitusta, jos hakkeen ja lehvästön mukana viedään pois paljon ravinteita) Oletus 2: hakkuutähteet korjataan samalla kerralla kuin runkopuu. Jos metsään mennään useamman kerran raskaalla laitteistolla, fyysinen eroosio lisääntyy
Hakkuutähde (myös kannot)	Runkopuuhakkuu, tähteet jää metsään	--	--	?	--	-	
Lanta (biokaasu)	Lannan peltolevitys	0	0	0	0	0	Ei vaikutusta, koska ravinteet jää mädätyksessä lietteeseen ja käytetään peltolannoitteena

Taulukko 4.2: Peltobioenergian tuotannon vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen (ks. tarkempi selitys yllä). Asiantuntijat ovat peltoenergian osalta Mikko Kuussaari, Janne Heliölä, Juha Pykälä ja Anna Schulman (SYKE), Terho Hyvönen (MTT) ja Juha Tiainen (RKTL).

Raaka-aine	Lähtötilanne	Kokonais-BD	Lajien määrä				Taantuneiden ja uhanalaisten lajien määrä				Maisema-rakenne
			Putkilokasvit	Perhoset	Kovakuoriaiset	Linnut	Putkilokasvit	Perhoset	Kovakuoriaiset	Linnut	
Ohra (kyntö)	Rehunurmi	0	++	0	++	?	0	0		0	-
	Monivuotinen nurmi	--	0/+	-	++	-	0	0		-	--
	Vilja (kyntö)	0	0	0	0	0	0	0		0	0
Ohra (suorakylvö)	Rehunurmi	0	++	0	++	?	0	0		0	-
	Monivuotinen nurmi	--	0/+	-	++	-	0	0		-	--
	Vilja (kyntö)	0/+	0/+	0	0	0	0	0		+	0
Sokerijuurikas	Rehunurmi	-	0	0/-	++	-	0	0		0	-
	Monivuotinen nurmi	--	0	-	++	---	0	0		-	--
	Vilja (kyntö)	-	-	-	-	--	0	0		-	0
Rypsi (kyntö)	Rehunurmi	+	++	+	++	-	0	0		0	0/+
	Monivuotinen nurmi	-	0/+	0/-	++	--	0	0		-	-
	Vilja (kyntö)	+	0	+	-	-	0	0		-	+
Rypsi (suorakylvö)	Rehunurmi	+	++	+	++	-	0	0		0	0/+
	Monivuotinen nurmi	-	0/+	0/-	++	--	0	0		-	-
	Vilja (kyntö)	+	0	+	-	-	0	0		-	+
Ruokohelpi	Rehunurmi	-/0	-	-/0	---	---	0	0		0	0
	Monivuotinen nurmi	--	-	-	---	---	0	0		--	-/+
	Vilja (kyntö)	-/+	--	0	---	---	0	0		-	+
	Käytöstä poistettu turvetuotantoalue	+	-	+	+	+(---)	0	0		+(---)	+/0

Taulukko 4.3: Metsähakkeen tuotannon vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen (ks. tarkempi selitys yllä). Asiantuntijat ovat Jukka-Pekka Jäppinen, Pekka Punttila, Juha Pöyry ja Harri Tukia (SYKE).

Raaka-aine	Lähtötilanne	Kokonais-BD	Lajien määrä								Taantuneiden ja uhanalaisten lajien määrä										
			Putkilokasvit	Perhoset	Lahopuukova-kuoriaiset	Linnut	Kääväkäät	Suursienet	Epifyyttijäkalät	Epiksyylisammaleet	Putkilokasvit	Perhoset	Lahopuukova-kuoriaiset	Linnut	Kääväkäät	Suursienet	Epifyyttijäkalät	Epiksyylisammaleet	Lahopuun määrä	Maan orgaanisen aineksen määrä	Maan viljavuus ja tuottokyky
Metsähake (oksat, latvukset)	Runkopuuhakkuu (uudistushakkuu), hakkuutähde jää metsään	-?	+	+	--	-	--	?	?	?	?	?	--		--	?	?	?	--	--	--
Metsähake (oksat, latvukset, kannot)	Vrt. yllä	-?	+	+	---	-	---	?	?	?	?	?	---		---	?	?	?	---	---	---

KUVAILOLEHTI

Julkaisija	Suomen ympäristökeskus			Julkaisu-aika	Toukokuu 2007
Tekijä(t)	Riina Antikainen, Jyrki Tenhunen, Mika Ilomäki, Per Mickwitz, Pekka Punttila, Markku Puustinen, Jyri Seppälä ja Lea Kauppi				
Julkaisun nimi	Bioenergian tuotannon uudet haasteet Suomessa ja niiden ympäristönäkökohdat. Nykytilakatsaus				
Julkaisusarjan nimi ja numero	Suomen ympäristökeskuksen raportteja 11/2007				
Julkaisun teema	Ympäristönsuojelu				
Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut	Julkaisu on saatavana myös internetissä: www.ymparisto.fi/julkaisut				
Tiivistelmä	<p>Suomi on yksi bioenergian käytön kärkimaita EU:ssa. Bioenergian osuus kokonaisenergiankulutuksestamme on lähes neljännes. Pääasiallisin käyttötapa on sähkön ja lämmön yhteistuotanto metsäteollisuuden puuperäisillä sivutuotteilla kuten metsähakkeella, kuorella, sahanpurulla ja jäteliemillä. Suomen tavoitteena muiden EU-maiden tavoin on, että bioenergian käyttöä lisätään edelleen.</p> <p>Tämän selvityksen tarkoituksena oli kartoittaa bioenergian tuotannon uusia haasteita ja analysoida sitä, mitä bioenergian tuotannon ja käytön ympäristövaikutuksista sekä niihin kytkeytyvistä taloudellisista ja sosiaalisista vaikutuksista tiedetään. Lisäksi työn tavoitteena oli käsitellä kysymyksiä liittyen bioenergian rooliin kestävämmässä energiantuotantojärjestelmässä. Lisäksi tarkasteltiin bioenergian elinkaariketjujen energiatehokkuutta ja taloudellisuutta sekä sitä, miten poliittiset prosessit ohjaavat bioenergiasta käytävää keskustelua ja päätöksentekoa. Selvitys tehtiin kirjallisuuteen ja asiantuntijankemyksiin perustuen.</p> <p>Suomessa on mahdollisuus lisätä edelleen bioenergian tuotantoa ja käyttöä. Bioenergian tuotannosta saadaan suurimmat ympäristöhyödyt käyttämällä biomassaa yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa kaupungeissa ja teollisuudessa. Liikenteen biopolttoaineiden tuotantoa on lisättävä EU:n tavoitteiden mukaisesti. Tätä varten raaka-ainetta tullaan tuomaan ulkomailta. Kestävyttä arvioitaessa ulkomaisia ja kotimaisia raaka-aineita on arvioitava samoin periaattein elinkaarinäkökulmasta ottaen huomioon koko elinkaariketjun suorat ja välilliset energia- ja raaka-ainepanokset sekä päästöt. Ilmastonmuutosta aiheuttavien päästöjen (kasvihuonekaasupäästöjen) lisäksi tärkeimpiä ympäristövaikutusluokkia ovat happamoittavat, rehevöittävät, hiukkas- ja alailmakehän otsonia muodostavat sekä toksiset päästöt ja vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen ja maaperän tuottokykyyn.</p> <p>Bioenergian käyttöä tukevia innovaatioita edistävien ja estävien tekijöiden nykyistä syvällisempi tuntemus on tarpeen. Bioenergia on esimerkki ympäristöpolitiikan integroitumisesta muille hallinnonaloille. Bioenergia voi tarjota win-win -mahdollisuuksia niin maatalouden lantaongelmaan, vesistöjen rehevöitymiseen kuin maaseudun työllisyysmahdollisuuksiin ja yritysten vientiin.</p>				
Asiasanat	Bioenergia, energiantuotanto, sähköntuotanto, lämmöntuotanto, biopolttoaineet, liikenne, ympäristövaikutukset, ilmastonmuutokset, energiatehokkuus, kestävä kehitys, taloudelliset vaikutukset				
Projektihankkeen nimi ja projektinumero					
Rahoittaja/toimeksiantaja	Ympäristöklusterin tutkimusohjelma				
	ISBN 978-952-11-2666-6 (nid.)	ISBN 978-952-11-2667-3 (PDF)	ISSN 1796-1718 (pain.)	ISSN 1796-1726 (verkkoj.)	
	Sivuja 98	Kieli suomi	Luottamuksellisuus julkinen	Hinta (sis. alv 8 %) —	
Julkaisun myynti/ jakaja	Edita Publishing Oy, PL 800, 00043 Edita, vaihe 020 450 00 Asiakaspalvelu: puh. 020 450 05, telefaksi 020 450 2380 Sähköposti: asiakaspalvelu@edita.fi , www.edita.fi/netmarket				
Julkaisun kustantaja	Suomen ympäristökeskus (SYKE), PL 140, 00251 Helsinki				
Painopaikka ja -aika	Edita Prima Oy, Helsinki 2007				

PRESENTATIONSBLAD

Utgivare	Finlands miljöcentral		Datum Mai 2007	
Författare	Riina Antikainen, Jyrki Tenhunen, Mika Ilomäki, Per Mickwitz, Pekka Punttila, Markku Puustinen, Jyri Seppälä ja Lea Kauppi			
Publikations titel	Produktion av bioenergi i Finland – Nya utmaningar och deras miljökonsekvenser			
Publikationsserie och nummer	Suomen ympäristökeskuksen raportteja 11/2007			
Publikationens tema	Miljövård			
Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt	Publikationen finns tillgänglig på internet: www.ymparisto.fi/julkaisut			
Sammandrag	<p>Finland är ett av de EU-länder som använder mest bioenergi. Bioenergins andel av hela Finlands energikonsumtion är nästan 25%. Bioenergi används främst för samproduktion av värme och elektricitet från skogsindustrins sidoprodukter, såsom pellets, bark, sågspån och svartlut. Finland har såsom många andra EU-länder som målsättning att klart öka användningen av bioenergi.</p> <p>Syftet med denna utredning var att identifiera de nya utmaningarna som är förknippade med en ökad produktion av bioenergi, samt att kartlägga vad som är känt om miljökonsekvenserna och de relaterade ekonomiska och sociala aspekten av produktion och konsumtion av bioenergi. Dessutom granskar utredningen bioenergins potentiella roll som en del av ett mera hållbart energisystem. Ytterligare analyseras energieffektiviteten och kostnaderna förknippade med livscyklerna för olika bioenergialternativ. De politiska och administrativa processerna som ansluter till debatten och beslutsfattande om bioenergi studerades också. Utredningen bygger på en litteraturöversikt samt på olika experters kunskap.</p> <p>Det är möjligt att öka produktionen och konsumtionen av bioenergi. De främsta miljöfördelarna uppnås då biomassa används för samproduktion av värme och elektricitet i samhällen och industrin. Andelen biobränsle inom trafiken borde också öka i enlighet med de målsättningar EU har godkänt. Detta kommer att leda till en ökad import av råvaror. När man bedömer olika biobränselns hållbarhet borde samma principer användas för inhemska och importerade råvaror, beaktande såväl de direkta som de indirekt energi- och råvaruinsatserna samt utsläppen. Vid sidan av klimat förändring (växthusgaser) är också försurning, övergödning, ozonbildning i troposfären, utsläpp av partiklar och giftiga ämnen, samt effekterna på naturens mångfald och jordmånens produktivitet viktiga miljöaspekter.</p> <p>Ytterligare forskning behövs om innovationer som stöder bioenergi. Det är också viktigt att förstå hur olika aktörers och processers roll varierar från den nationella till den regionala nivån. Bioenergi är ett bra exempel på hur miljöpolitik binder samman olika sektorer. Bioenergi kan resultera i "win-win" lösningar i fråga om till exempel miljö, regional sysselsättning och export företag.</p>			
Nyckelord	Bioenergi, energiproduktion, samproduktion av värme och elektricitet, miljöeffekter, biobränslen, trafik, klimatförändringar, energieffektivitet, hållbar utveckling, ekonomiska konsekvenser			
Projekt namn och nummer				
Finansiär/ uppdragsgivare	Miljöklustrets forskningsprogram			
	ISBN 978-952-11-2666-6 (hft.)	ISBN 978-952-11-2667-3 (PDF)	ISSN 1796-1718 (print)	ISSN 1796-1726 (online)
	Sidantal 98	Språk finska	Offentlighet Offentlig	Pris (inneh. moms 8 %) —
Beställningar/ distribution	Edita Publishing Oy, PB 800, 00043 Edita, Finland, växel 020 450 00 Postförsäljningen: Telefon + 358 20 450 05, telefax + 358 20 450 2380 Internet: www.edita.fi/netmarket			
Förläggare	Finlands miljöcentral, PB 140, FI-00251 Helsingfors, Finland			
Tryckeri/tryckningsort och -år	Edita Prima Oy, Helsinki 2007			

DOCUMENTATION PAGE

<i>Publisher</i>	Finnish Environment Institute			<i>Date</i> May 2007
<i>Authors</i>	Riina Antikainen, Jyrki Tenhunen, Mika Ilomäki, Per Mickwitz, Pekka Punttila, Markku Puustinen, Jyri Seppälä ja Lea Kauppi			
<i>Title of publication</i>	Bioenergy production in Finland – new challenges and their environmental aspects			
<i>Publication series and number</i>	Suomen ympäristökeskuksen raportteja 11/2007			
<i>Theme of publication</i>	Environmental protection			
<i>Parts of publication/ other project publications</i>	The publication is available on the internet: www.ymparisto.fi/julkaisut			
<i>Abstract</i>	<p>Finland is one of the EU's leading countries in terms of bioenergy use. The share of bioenergy in Finland's energy consumption is almost 25%. The main method of producing bioenergy in Finland is by the co-production of heat and power using the forest industries' wood based by-products, such as wood chips, bark, sawdust and black liquor. Finland, in line with many other EU countries, aims to significantly increase its use of bioenergy.</p> <p>The aim of this survey was to identify the new challenges of bioenergy, to investigate what is known about its environmental impacts and also its related social and economic aspects. In addition to this, the survey considers the role of bioenergy in a more sustainable energy production system. Furthermore, the energy and economic efficiency of different bioenergy life cycles were investigated. Finally, the policy processes related to the bioenergy debate and the decision making procedures were also considered. The survey is based on literature sources and expert knowledge.</p> <p>In Finland, it is possible to further increase the production and consumption of bioenergy. The best environmental benefits are achieved when biomass is utilized in the co-production of heat and power for municipalities and industry. The use of biofuels in road vehicles also needs to increase according to targets set by the EU. This will lead to increased raw material imports. When assessing the sustainability of biofuels, the same principles need to be applied for both domestic and foreign raw-materials, taking into account both direct and indirect energy and raw-material inputs and emissions. In addition to climate change (greenhouse gases), acidification, eutrophication, tropospheric ozone formulation, particle and toxic emissions, biodiversity impacts and soil production capacity are other important environmental factors.</p> <p>Further research is needed into innovations that support and promote bioenergy. Understanding how different actors and processes vary at national and regional levels is also important. Bioenergy is a good example of how environmental policy can integrate different sectors. Bioenergy can offer win-win solutions to, for example, environmental problems, rural employment and the export business.</p>			
<i>Keywords</i>	bioenergy, energy production, co-production of heat and power, biofuels, traffic, environmental impacts, climate changes, energy efficiency, sustainable development, economic effects			
<i>Project name and number, if any</i>				
<i>Financier/ commissioner</i>				
	ISBN 978-952-11-2666-6 (pbk.)	ISBN 978-952-11-2667-3 (PDF)	ISSN 1796-1718 (print)	ISSN 1796-1726 (online)
	<i>No. of pages</i> 98	<i>Language</i> finnish	<i>Restrictions</i> Public	<i>Price (incl. tax 8 %)</i> —
<i>For sale at/ distributor</i>	Edita Publishing Ltd. , P.O.Box 800, 00043 Edita, Finland, Phone + 358 20 450 00 Mail orders: Phone + 358 20 450 05, Telefax + 358 20 450 2380 Internet: www.edita.fi/netmarket			
<i>Financier of publication</i>	Finnish Environment Institute (SYKE), P.O.Box 140, FI-00251 Helsinki, Finland			
<i>Printing place and year</i>	Edita Prima Oy, Helsinki 2007			

Suomi on yksi bioenergian käytön kärkimaita EU:ssa ja tavoitteena on muiden EU-maiden tavoin bioenergian käytön lisääminen edelleen. Tämä asettaa bioenergian tuotannon uusien kestävyysaasteiden eteen. Tässä selvityksessä bioenergiaketjuja tarkastellaan elinkaarinäkökulmasta ja useiden ympäristövaikutusten kannalta. Lisäksi pohditaan bioenergian roolia osana kestävämpää energiantuotantojärjestelmää.



ISBN 978-952-11-2666-6 (nid.)

ISBN 978-952-11-2667-3 (PDF)

ISSN 1796-1718 (pain.)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

