



BIOMASSAN ENERGIÄKÄYTTÖ: VAIKUTUKSET HIILINIELUIHIN JA ILMASTOPÄÄSTÖIHIN

Samppo Soimakallio

Bioenergialla voi olla kriittinen rooli ilmastomuutoksen hillinnässä, mutta sen kestävyys ja tehokkuuteen liittyy avoimia kysymyksiä. Näin todetaan arvostetun hallituksen välisen ilmastopaneelin (IPCC) tuoreimman arviointiraportin poliittisille päätöksentekijöille suunnatuissa pääviesteissä. Tutkimustulokset bioenergian ilmastovaikutuksista ovat ristiriitaisia. Joidenkin tutkimusten mukaan bioenergia hillitsee, toisten mukaan taas kiihdyttää ilmastomuutosta. Vastaus riippuu siitä, mistä ja miten bioenergiaa tehdään ja mistä näkökulmasta ja miten asiaa tarkastellaan.

Pois fossiilitaloudesta

Siirtyminen pois fossiilitaloudesta on välttämätöntä. Usulutumattomina luonnonvaroina fossiiliset varannot ehtyvät, mikäli ne käytetään loppuun. Varantojen ehtymistä huomattavasti kiireellisempää on kuitenkin päästä eroon fossiilisten polttoaineiden käytöstä syntyvistä hiilidioksidipäästöistä, jotka ovat pääsyy ihmisen

toiminnan aiheuttamaan ilmastomuutokseen. Pariisin ilmastositoumuksen tavoitteena on rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu alle kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna. Tavoitteen saavuttaminen edellyttää merkittäviä vähennyksiä globaaleissa kasvihuonekaasujen päästöissä lähivuosien ja -vuosikymmenten aikana. Samanaikaisesti hiiltä sitovien nielijien määrää tulee lisätä. Kriittinen kysymys on, miten fossiilitalous voidaan korvata siten, että Pariisin sopimuksen ilmastotavoitteet saavutetaan?

Suomi nojaa metsäbiotalouteen

Suomessa keskeiseksi keinoksi irtautua fossiilitaludesta ja hillitä ilmastomuutosta on esitetty puunkäytön lisäämiseen perustuvaa biotaloutta. Vuonna 2014 julkaistun Suomen kansallisen biotalousstrategian tavoitteena on, että metsien kestävään hyödyntämiseen perustuva biotalous luo teollisia symbiooseja metsä-, energia-, teknologia-, kemian- ja rakennus-alalla. Tavoiteltavaan tuotevalikoimaan kuuluvat esimerkiksi biomuovit ja -komposiitit, puupohjaiset tekstiilit, biopolttoaineet, rakennusmateriaalit ja bioteknisesti tuotetut lääkkeet. Vuonna 2015 julkaistu *Kansallinen metsästrategia 2025* tavoittelee kotimaisen runkopuun hakkuukertymän nousua 80 miljoonaan kuutiometriin vuodessa vuoteen 2025 mennessä. Vuonna 2016 julkaistussa hallituksen

energia- ja ilmastostrategiassa on asetettu tavoitteeksi lisätä metsähakkeen käyttöä sähkön ja lämmön tuotannossa sekä bionesteiden tuotannossa siten, että metsähakkeen kokonaiskäyttö olisi 14–18 miljoonaa kuutiota vuonna 2030. Luonnonvarakuksen arvion mukaan tavoitteen täyttämiseen saattaa edellyttää kuitupuukokoisen runkopuun käytön lisäämistä energiantuotannossa, jolloin kotimaisen runkopuun vuosittainen hakkuukertymä saattaa nousta 83 miljoonan kuution tasolle¹. Vuonna 2015 runkopuun hakkuukertymä oli Suomessa 68 miljoonaa kuutiota².

Metsät toimivat hiilen nettonieluina, mikäli metsiin sitoutuu enemmän hiiltä kuin sieltä poistuu. Tällöin metsien hiilivarasto kasvaa. Suomen metsät ovat jo vuosikymmeniä toimineet hiilen nettonieluina. Suomessa metsien kasvu on kiihtynyt erityisesti puuston määrässä ja metsien rakenteessa tapahtuneiden muutosten sekä ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvun ja ilmaston lämpenemisen myötä³. Puuston kasvun kiihtyminen on metsien hiilivarastoa kasvattava tekijä. Hakkuut ja puunkorjuu puolestaan ovat metsien hiilivarastoa pienentävä tekijä, minkä seurauksena markkinahakkuiden suhdanteet muuttavat metsien hiilinielua vuosittain. Puunkäytön lisäyksellä on siis metsien hiilinielua pienentävä vaikutus.

Suomen strategioissa puunkäytön lisäästä perustellaan sillä, että painopistettä ilmastomuutoksen hillinnässä siirretään hiilinielusta fossiilisten raaka-aineiden korvaamiseen. Bioenergia on osa tätä

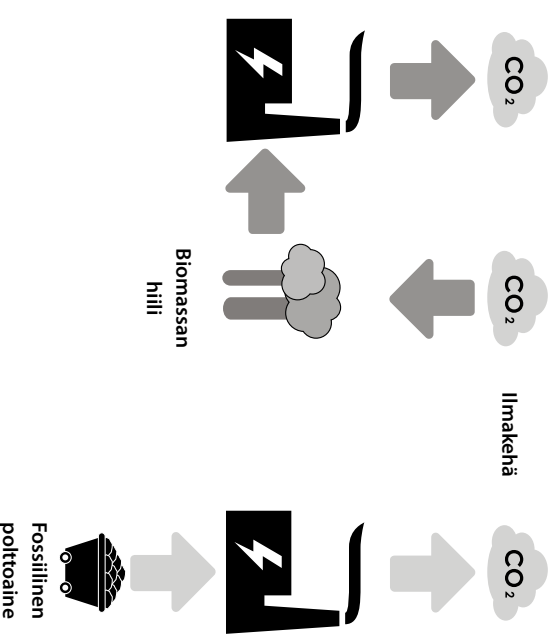
painopisteen muutosta yhdessä teollisen puunkäytön kanssa.

Onko suomalainen metsäbiotalous ja sen osana oleva bioenergia hiilineutraalia, ja mitä tämä painopisteen siirros merkitsee ilmastonmuutoksen hillintäpyrkimysten kannalta? Asiaa kannattaa lähteä purkamaan sitä, miten hiilineutraalius voidaan liittää bioenergiaan ja mistä tekijöistä bioenergian ilmasto-vaikutukset yleisesti koostuvat.

Bioenergia – hiilineutraali energiamuoto?

Biomassan kuivapainosta karkeasti noin puolet on hiiltä. Hiili vapautuu, kun biomassaa poltetaan. Yhtä megajoullea (MJ) kohden esimerkiksi puun poltossa vapautuu noin 110 g CO₂:a. Vastavaa lukuarvo on kivihilille noin 93, kevyelle polttoöljylle 74 ja maakaasulle 55 g CO₂/MJ⁴. Miten bioenergialla voi olla mahdollista hillitä ilmastonmuutosta, jos sen poltosta syntyy päästöjä enemmän kuin fossiilisten polttoaineiden poltosta? Pohjimmiltaan ajatus perustuu mahdollisuuteen käyttää bioenergiaa uusiutuvasti.

Jotta bioenergia voisi ylipäänsä hillitä ilmastonmuutosta, täytyy sen poltossa syntyvät hiilidioksidipäästöt sitoa takaisin kasvavaan biomassaan. Mikäli näin tapahtuu, on biomassasta vapautuva ja siihen sitoutuva hiilimäärä tasapainossa. Tähän perustuu yleinen ajatus bioenergian hiilineutraaludesta

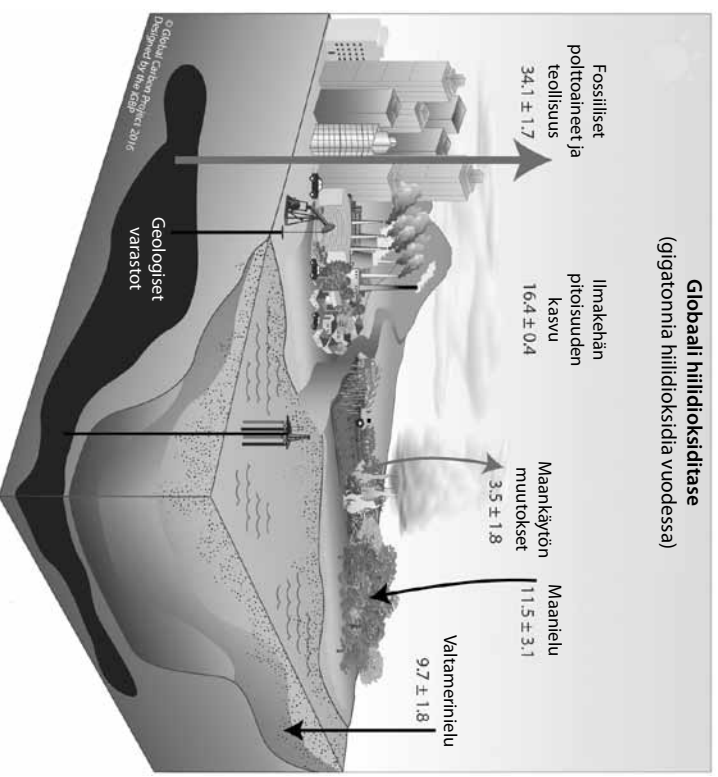


Kuva 1. Havainnollistus biomassan ja fossiilisen hiilen eroista. Biomassasta vapautuva hiili on mahdollista sitoa takaisin kasvavaan biomassaan, kun taas fossiilista varannoista vapautuva hiili siirtyy ilmakehään ilman palauttamekanismia.

(Kuva 1). Biomassan poltossa vapautuva hiilimäärä siis sidotaan takaisin uuden biomassan kasvuun, jolloin hiili kiertää biosfäärin ja ilmakehän välillä ilman, että uutta hiiltä otetaan litosfääristä, kuten fossiilisia polttoaineita käytettäessä. Bioenergia voi siis toimia ilmakehän kannalta absoluuttisesti hiilineutraalina. Tällöin bioenergian käytöstä ei vapaudu ilmakehään enempää hiiltä kuin uuteen biomassan kasvuun sitoutuu. Fossiilisten polttoaineiden kohdalla tällaista palautemekanismia ei ole, vaan osa ilmakehään vapautuvasta hiilestä jää käytännössä pysyvästi ilmakehään.

Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on kasvanut, koska fossiilisten polttoaineiden käytöstä, sementin valmistuksesta ja metsäkadosta syntyvät päästöt ovat ylittäneet hiilen sitoutumisen metsiin, maaperään ja valtameriin (Kuva 2). Hiilinielu tarkoittaa muun kuin ilmakehän hiilivaraiston kasvua. Nykyisellään nielut sitovat yhteensä yli puolet siitä hiilimäärästä, mikä ilmakehään vuosittain pääsee. Nielut ovat seurausta erityisesti ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden noususta ja sitä aiheutuneesta ilmastomuutoksesta⁵. Ihminen vaikuttaa nieluhiin paitsi ympäristömuutoksen myös maankäytön kautta. Maankäytöllä ihmisen voi edesauttaa kasvillisuuden ja maaperän hiilivaraustojen kasvua (nielua) tai pienentämistä (päästöä).

Teoriassa biomassaa tuottava maa-alue voi toimia hiilineutraalisti siten, että biomassan käytössä vapautuva hiili ja biomassan kasvuun sitoutuva hiili ovat jatkuvasti tasapainossa. Puuston hiilimäärään liittyen



Kuva 2. Ihmisen toiminnasta aiheutunut häiriö globaalissa hiilen kierrossa keskimäärin vuosina 2006–2015. Lähde: Global Carbon Project 2016. Fossiilisten polttoaineiden poltosta ja teollisuudesta sekä maankäytön muutoksista aiheutuneet päästöt ovat ylittäneet kasvillisuuteen ja maaperään sekä valtameriin sitoutuneen hiilen määrän, minkä seurauksena ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on kasvanut. Kasvillisuuden ja maaperän lisääntyneet hiilensidonta on sitonut noin kolmanneksen hiilestä, joka fossiilisten polttoaineiden poltosta ja teollisuudesta on aiheutunut.

tällaiseen ajatukseen perustuu niin sanottu *normaali metsä*, jossa joka vuosi puuston kasvuun sitoutuu yhtä paljon hiiltä kuin metsästä puuston korjuun mukana poistuu. Biomassan tuotannollisen kestävyyden näkökulmasta onkin välttämätöntä, että biomassan määrä ei vähene sitä käytettäessä. Jos hiilivarasto pienenee, kuten esimerkiksi metsäkadon yhteydessä, toimii maa-alue päästöjen lähteenä. Jos hiilivarasto kasvaa, kuten esimerkiksi Suomen talousmetsissä, toimii maa-alue hiilinieluna. Käytännössä biomassaa tuottavat maa-alueet ovat joko hiilipositivisia (päästöjen lähteitä) tai hiilinegatiivisia (nieljiä), sillä maa-alueilla oleva hiilivarasto muuttuu jatkuvasti, joko kasvaven tai pienentyen.

Oletetaan, että käytössä on biomassaa tuottava maa-alue, jossa hiilivarasto pysyy jatkuvasti vakiona ja josta joka vuosi korjataan sama määrä biomassaa energiakäyttöä varten. Tällainen järjestelmä on ilmakehän näkökulmasta absoluuttisesti hiilineutraali. Ilmakehän hiilimäärä ei siis absoluuttisesti lisäänny eikä vähene. Voidaanko tällä perusteella siis sanoa, että järjestelmä hillitsee ilmastomuutosta? Ei voida. Jotta järjestelmä hillitsisi ilmastomuutosta, sen täytyisi joko poistaa ilmakehästä hiiltä tai estää hiilen pääsyä ilmakehään. Esimerkiksi hiilinieluna toimiva metsä poistaa ilmakehästä hiiltä ja siten hillitsee ilmastomuutosta toisin kuin hiilineutraali järjestelmä. Entä voiko bioenergia hillitä ilmastomuutosta estämällä hiilen vapautumista ilmakehään? Kyllä voi.

Jotta ilmastomuutosta voitaisiin hillitä bioenergian avulla, täytyisi bioenergian käyttömääriä kasvattaa fossiilisten polttoaineiden korvaamiseksi. Mikäli fossiilisten polttoaineiden korvaamisessa välletty hiilivirta on suurempi kuin bioenergian käytön lisämisestä aiheutunut hiilivirta ilmakehään, vähentää bioenergian käytön lisääminen ilmakehään aiheutuvaa kokonaihiilivirtaa.

Kriittisiä kysymyksiä on kaksi. Ensimmäkin: miten paljon bioenergian käytön lisääminen vähentää fossiilisten polttoaineiden käytöstä syntyviä päästöjä? Toiseksi: miten paljon bioenergian käytön lisääminen muuttaa maa-alueen hiilivarastoa ja aiheuttaa ei-fossiilisperäisiä päästöjä ja mahdollisesti muita ilmastovaikutuksia? Nämä tekijät yhdessä ratkaisevat sen, kuinka tehokasta bioenergian käytön lisääminen ilmastomuutoksen hillinnässä on.

Bioenergian kasvihuonekaasutaseiden määrittäminen

Elinkaariviointi avuksi

Bioenergian käytön lisäämisen ilmastovaikutukset voidaan saada selville vain vertaamalla bioenergian käytön lisäämistä tilanteeseen, jossa käyttöä ei lisätä. Keskeistä on pyrkiä kuvaamaan ne tekijät, jotka muuttavat tarkasteltavien tilanteiden välillä, ja määrittellä

niille ilmasto vaikutus. Tähän tarvitaan elinkaari-arviointia, joka on standardoitu menetelmä (ISO 14040, 14044). Siinä määritetään tarkastelun tavoite ja tulosten sovellettavuus ja rajataan tarkastelut niiden mukaisiksi sekä inventoidaan päästöt ja muut ilmasto-vaikutusten kannalta oleelliset tekijät, muunnetaan ne tarkasteltaviksi vaikutuksiksi ja arvioidaan kriittisesti eri vaiheiden johdonmukaisuus.

Päästöt ja nielu

Bioenergian käytön lisääminen voi joko aiheuttaa tai vähentää hiilidioksidin (CO₂), metaanin (CH₄) tai typpioksiduulin (N₂O) päästöjä. Näiden kasvi-huonekaasujen päästöjä aiheutuu muun muassa biomassan korjuussa, kuljetuksessa, varastoinnissa ja jalostuksessa tarvittavista fossiilisista energiapanoksista, synteettisistä lannoitteista ja kemikaaleista sekä biomassan varastoinnissa hajoamisen seurauksena. Kun bioenergialla korvataan fossiilista energiaa, saadaan käyttövaiheessa vähennettyä fossiilisia päästöjä. Ahventuvien ja vällettyjen päästöjen lisäksi biomassan korjuun lisääminen yleensä pienentää kasvillisuuteen ja maaperään sitoutuneena olevan orgaanisen hiilen varastoa ja siten hiilinielua. Yhdessä muutokset päästöissä ja nieluissa vaikuttavat ilmakehän kasvi-huonekaasupitoisuuteen. Päästöjen ja nielujen yhteenlaskettua summaa voidaan kuvata *nettopäästöillä*.

Ilmasto vaikutuksia arvioitaessa on oleellista tunnistaa, miten nettopäästöt muuttuvat, kun bioenergian käyttöä lisätään.

Aikajänneen merkitys

Eri kasvihuonekaasuilla on erilainen elinikä ja ominaissäteilypakote ilmakehässä⁶. Esimerkiksi metaani aiheuttaa 20 vuoden aikana arviolta noin 85 kertaa hiilidioksidia voimakkaamman lämmitysvaikutuksen (kumulatiivisen säteilypakotteen). Koska metaanin keskimääräinen elinikä ilmakehässä on verrattain lyhyt, vain reilu 10 vuotta, on lämmitys vaikutus osittain pysyvästi ilmakehässä pysyvään hiilidioksidin verrattuna sitä pienempi, mitä pidempää ajanjaksoa tarkastellaan. 100 vuoden aikana metaani aiheuttaa noin 30 kertaa hiilidioksidia voimakkaamman lämmitys vaikutuksen. Typpioksiduulin keskimääräinen elinikä ilmakehässä on noin 120 vuotta, ja sen lämmitys vaikutus on sekä 20 että 100 vuoden ajanjaksoilla tarkasteltuna yli 250-kertainen hiilidioksidin verrattuna.

Metaanin ja typpioksiduulin merkitys kasvihuonekaasujen aiheuttamassa lämmitys vaikutuksessa riippuu niiden suhteellisesta osuudesta hiilidioksidipäästöihin verrattuna ja erityisesti metaanin tapauksessa siitä, millä aikavälillä vaikutusta tarkastellaan. Metaanipäästöt voivat olla merkittäviä erityisesti tilanteissa, joihin liittyy biomassan hajoamista

happettomissa olosuhteissa. Typpioksiduulipäästöt puolestaan voivat olla merkittäviä erityisesti sellaisissa biomassan tuotantoketjuissa, joissa käytetään typpi-lannoitteita. Usein kuitenkin hiilidioksidin merkitys kasvihuonekaasujen aiheuttamassa lämmitysvaikutuksessa on suurin. Myös hiilidioksiditaseiden tarkastelussa aikajänne voi olla ratkaisevan tärkeä. Tämä johtuu kasvillisuuden ja maaperän hiilivaraustoihin ja niiden muutoksiin liittyvästä dynamiikasta.

Bioenergian tuotantovaihtoehdot

Biopolttoaineita voidaan tehdä erilaisista biomassoista, erilaisia tekniikoita käyttäen ja erilaisia käyttö-tarkoituksia varten. Raaka-aineet voidaan luokitella esimerkiksi öljykasveihin, sokeri- ja tärkkelyspi-tsiin kasveihin, lignoselluloosaan, biohajaviin jättei-siin ja leviin. Biomassaa voidaan polttaa sellaisenaan ja tuottaa sitä kautta lämpöä tai sähköä yhdyskunnan ja teollisuuden tarpeisiin. Lisäksi biomassaa voidaan muuntaa esimerkiksi kuivattamalla, kaasuttamalla tai käyttämällä erilaisiksi kiinteiksi, nestemäisiksi tai kaasumaisiksi biopolttoaineiksi, joita voidaan hyödyntää muun muassa lämmityksessä tai liikennepolttoaineina. Bioenergian käytön lisäämisen kasvihuonekaasutaset voivat riippua voimakkaasti siitä, mistä raaka-aineesta bioenergiaa tehdään, minkälaista tekniikkaa käyttäen ja minkälaista käyttötarkoitusta varten.

Raaka-aineen merkitys

Raaka-aineen merkitys bioenergian kasvihuonekaasutaseissa on usein kriittinen. Maalla kasvavat kasvit tarvitsevat kasvuolosuhteeseen tuottavaa maata. Maalan tarve tuotettua biomassamäärää kohden on sitä pienempi, mitä paremmin maa tuottaa. Tuottavuus puolestaan riippuu kasvista ja kasvuolosuhteista, kuten lämpötilasta sekä veden ja ravinteiden saata-vuudesta. Ilmastotekijöiden lisäksi maaperän laatu ja biomassan viljely- ja korjuumenetelmät vaikuttavat satotasoihin. Satotasoa voidaan parantaa esimerkiksi synteeettisellä lannoituksella. Biomassan keskimääräinen vuotuinen kasvu on usein selvästi alhaisempi vähemmän tyyppä tarvitsevilla kasveilla, kuten puilla, verrattuna viljeltäviin yksivuotisiin kasveihin. Satotaso kasvatamalla voidaan pienentää tiettyyn biomassatuotokseen tarvittavaa maa-alaa. Tällöin kuitenkin viljelystä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt saattavat kasvaa verrattain suuriksi, erityisesti mikäli typpilannoituksen tarve on merkittävä.

Miten vertailutilanne valitaan johdonmukaisesti?

Bioenergian käytön lisäämisen kasvihuonekaasutaseita määritettäessä keskeinen oletus on se, mitä raaka-aineelle tai sen tuottamiseen tarvittavalle maa-alle tapahtuisi vertailutilanteessa, jossa sitä ei käytettäisi

bioenergian tuotantoa varten. Jos raaka-aine oletetaan viljeltäväksi varta vasten bioenergian tuotantoa varten, tarkoitetaan se sitä, ettei raaka-ainetta vertailutilanteessa viljeltäisi lainkaan. Tällainen tilanne voi olla esimerkiksi vilja- tai öljykasvien energiakäytön kohdalla. Tällöin raaka-aineiden viljelyn kasvihuonekaasutaseet aiheuttavat suhteessa tilanteeseen, jossa raaka-ainetta ei viljeltäisi.

Seuraava kriittinen kysymys on, miten maata oletetaan käytettävän, jos raaka-ainetta ei viljeltäisi bioenergian tuotantoa varten. Vaihtoehtoja on periaatteessa lukemattomia, mutta ne voidaan luokitella muutamaan päinvaihtoehtoon. Ensimmäkin maata saatettaisiin käyttää muuhun kasvien tuotantoon, esimerkiksi ruoan tai rehun tuotantoa varten. Toiseksi maata saatettaisiin ottaa kokonaan muuhun käyttöön, esimerkiksi rakennetuksi ympäristöksi. Kolmantena vaihtoehtona on, että maan annettaisiin palautua kohti luonnontilaansa, esimerkiksi raivattujen peltojen soistua tai metsittyä.

Jos bioenergiaa tehdään raaka-aineesta, jota ei oleteta vasten kasvatettu ja korjattu bioenergiaksi, ei bioenergian tuotanto sellaisenaan vaikuta maankäyttömuotoon. Tällainen tilanne syntyy silloin, kun bioenergiaa tuotetaan maa- tai metsätalouden tuotteista tai teollisuuden ja yhdyskuntien jätteistä. Nämä raaka-aineet syntyvät muun toiminnan seurauksena. Koska ne ovat tärkeitä tai jätettä, ei niitä vertailutilanteessa oleteta hyödynnettävän lainkaan, mikäli niistä ei tehtäisi bioenergiaa. Tällöin maankäyttömuoto on sekä

bioenergian tuotannossa että sen vertailutilanteessa sama, sillä primääriset raaka-aineet, joiden sivuvirtana tuotteet ja jätteet syntyvät, oletetaan tuotettavan yhtäläisesti kummassakin tilanteessa.

Sivuvirtoina syntyvien raaka-ainekkeiden määrittelyminen tuotteeksi tai jätteeksi on kuitenkin kaikkea muuta kuin ongelmaton. Itse asiassa raaka-aine periaatteessa menettää statuskseenä tärhteenä tai jätteenä, mikäli se otetaan hyötykäyttöön. Tällöin on loogisempaa puhua sivuvirtojen energiakäytöstä. Suurimman osan nykyisestä modernista bioenergiasta voidaan katsoa perustuvan tällaisten sivuvirtojen hyödyntämiseen. Esimerkkejä ovat mustalipeän polttaminen sellun keiton yhteydessä, puupellettien valmistaminen sahanpurusta ja kutterinlastusta sekä teollisuuspuun korjuun yhteydessä syntyvien metsätärhteiden korjuun energiantuotantoa varten.

Sivuvirtojen energiähyödyntämisen ilmastovaiikutuksia määritettäessä keskeinen kysymys on, mitä sivuvirralle tapahtuisi, jos sitä ei hyödynnettäisi energiaksi. Jos raaka-aine oletetaan tärhteeksi tai jätteeksi, jää se vertailutilanteessa kokonaan hyödyntämättä. Maa- ja metsätalouden sivuvirratt todennäköisesti lahoaisivat pelloilla ja metsissä. Teollisuuden tärhteiden ja yhdyskuntien jätteiden vertailutilanteen määrittäminen on hankalampaa, sillä energiakäytön vaihtoehdot saattavat olla lainsäädännöllisesti rajoitetumpia. Esimerkiksi biohajoavan ja muun orgaanisen jätteen sijoittamista kaatopaikoille on rajoitettu vuodesta 2016 alkaen EU:n kaatopaikkadirektiivin

toimeenpanolla. Tällöin vaihtoehtoiksi energiakäytölle jää käytännössä raaka-aineen hyödyntäminen materiaalina tai tähteiden lahoaminen muualla kuin kaatopaikoilla, esimerkiksi sahanpurun lahoaminen sahojen pihalla.

Raaka-aineiden käytöllä tyydytetään erilaisia yhteiskunnallisia tarpeita, kuten ihmisten ja eläinten ravitsemista, rakentamista, pakkaamista ja muuta materiaalien käyttöä sekä sähkön, lämmön ja liikku-
misen tarvetta. Mikäli biomassaa tai sen tuottamiseen tarvittavaa maa-alaa oletetaan käytettävän vertailutilanteessa jonkun muun yhteiskunnallisen tarpeen tyydyttämiseen, estää biomassan energiakäyttö kyseisen tarpeen tyydyttämismahdollisuuden tarkasteltavalla resurssilla. Tällöin tämä tarve tulee tyydyttää jollain muulla raaka-aineella, teknologialla tai palvelulla, mikä voi olla edelleen pois jonkun muun tarpeen tyydyttämisestä. Vaikutuskeijusta voi muodostua hyvin pitkä ja moniulotteinen.

Mikäli bioenergian käytön lisääminen kohdentuu raaka-aineisiin, jolle on olemassa muuta taloudellista käyttöä, saattaa korvaavien raaka-aineiden hankkiminen aiheuttaa merkittäviä ilmastovaikutuksia. Ehkä tunnetuin esimerkki tämänkaltaisesta vaikutuskeijusta on Kaakkois-Aasiassa palmuöljytuotannon laajenemisen myötä tapahtunut metsäkatko, jonka on arvioitu osittain johtuvan muualla tuotettujen öljykasvien lisääntyvää käytöstä biopolttoaineid^{en} raaka-aineina. Vastaavanlaisia vaikutuskeijuja voi liittyä muidenkin kilpailujen raaka-aineiden

käyttöön, mutta vaikutusarvioita on toistaiseksi esitetty varsin rajallisesti, ja siksi asia on yleisesti huonosti tunnettu.

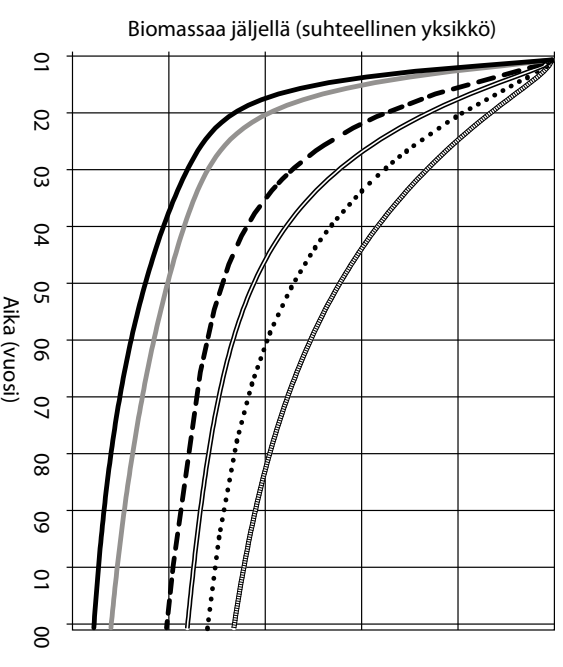
Yhteiskunnan tarpeiden tyydyttämiseen tarvittavien resurssien tuottaminen aiheuttaa käytännössä aina päästöjä. Jotta bioenergian käytön lisääminen ei aiheuttaisi haitallisia epäsuoria vaikutuksia raaka-aineisiin tai niiden tuottamiseen tarvittavan maa-alan kilpailun vuoksi, tulisi bioenergian käytön lisäämisen kohdistua raaka-aineisiin, jolle ei ole muuta käyttöä. Tällöin bioenergian tuotannon vaikutuksia tulee tarkastella siten, että raaka-ainetta tai sen tuottamiseen tarvittavaa maa-alaa ei vertailutilanteessa käytettäisi. Elinkaariarvioinnissa eri toimintojen (funktioiden) väliset taloudelliset syy-seuraussuhteet on yleensä jätetty ottamatta huomioon. Toisin sanoen raaka-aineen tai sen tuottamiseen tarvittavan maa-alan oletetaan jäävän käyttämättä, mikäli sitä ei käytetä bioenergian tuottamiseen. Tällöin vertailutilanne tulee valita oletusta vastaavaksi riippumatta siitä, onko oletus käytännössä realistinen vai ei.

Jos raaka-aineella ei ole muuta kysyntää

Oletetaan seuraavaksi, että bioenergian käytön lisääminen kohdentuu raaka-aineisiin, jolle ei ole muuta käyttöä ja joita ei varta vasten kasvateta bioenergiaksi. Tällöin rajaudutaan sivuvirtoihin ja maalla kasvavaan

biomassaan, jolle ei ole muuta kysyntää. Bioenergian tuotannossa pienimmän ilmastovaikutuksen aiheuttavat sellaiset raaka-aineet, jotka vertailutilanteessa aiheuttaisivat suurimman päästön. Tällaisia voivat olla esimerkiksi nopeasti lahoavat teollisuuden ja yhdyskuntien tähteet ja jätteet, jotka hapettomissa olosuhteissa lahoessaan muodostaisivat metaania. Nopeasti lahoavat maa- ja metsätalouden tähteet, kuten viljan oljet ja pienläpimittaiset oksat vapauttavat lahoessaan suurimman osan niihin sitoutuneesta hiilestä muutamien vuosien kuluessa. Tämän vuoksi tällaisen raaka-aineiden energiahäyödyntäminen aiheuttaa tyyppilisesti selvästi fossiilisia polttoaineita pienemmän ilmastovaikutuksen. Maa- ja metsätalouden tähteiden liian intensiivinen korjuu kuitenkin vähentää maaperän ravinteita ja saattaa siten heikentää biomassan kasvua. Kasvutappioiden välttäminen edellyttää korjuuintensiteetin rajoittamista ja mahdollisesti kompensoivaa lannoitusta. Puunosista kannot ja suuriläpimittaiset oksat lahoavat selvästi hitaammin kuin pieniläpimittaiset oksat, ja tämän vuoksi niiden energiakäyttöä aiheutuu tyyppilisesti myös suurempi ilmastovaikutus (Kuva 3).

Suurin ilmastovaikutus aiheutuu sellaisista raaka-aineista, jotka vertailutilanteessa jatkaisivat hiilensidontaa, säilyttäisivät suuren osan raaka-aineeseen kertyneestä hiilestä tai joiden korjuu heikentää maakosysteemin tulevaa hiilensidontaa. Erityisesti hyvässä kasvuiässä olevista metsistä harvennushakkuissa poistetun kuitupuukokkoisen puuston korjuussa



Kuva 3. Eräiden energiakäyttöön sopivien kuusen biomassaositeiden lahoaminen metsään jätettynä Etelä- ja Pohjois-Suomessa 100 vuoden aikana Yasso07-mallin mukaan. Mallinnuksesta oksien läpimitta oli 2 cm, rankappuun 10 cm ja kantojen 30 cm. Lähde: Lisäi ym. 2011.

menetetään puustossa korjuuhetkellä oleva hiilivarrasto ja puuston kasvun myötä aiheutuva puuston ja maaperän hiilivaraston kasvu jopa vuosikymmeniksi eteenpäin. Jäljelle jäävän puuston kasvu saattaa jonkin verran kiihtyä harvennusten myötä, mutta metsän hiilivarasto jää pienemmäksi kuin harventamattomassa metsässä⁷. Mallilaskelmien perusteella harvennusten aiheuttama hiilivaraston kasvatappio voi olla tällaisissa tapauksissa niin suuri, että metsän hiilivarasto pienenee ainakin muutamaksi vuosikymmeneksi eteenpäin jopa yli kaksi kertaa enemmän kuin metsästä korjataan puun mukana hiiltä⁸.

Puun korjuun metsien hiilinielua pienentävän vaikutuksen suuruus voidaan ymmärtää helpommin, kun se suhteutetaan biomassan energiasisältöön ja tulosta verrataan tyyppillisten fossiilisten polttoaineden elinkaarisien päästöön. Esimerkiksi kivihiihen polton elinkaaripäästöt ovat tyyppillisesti luokkaa 110 g CO₂/Mj, mikä on yhtä paljon kuin puun hiilisisältö ja siten puun poltossa syntyvät päästöt. Jos biomassan korjuu pienentää hiilivarastoa vertailutilanteeseen nähden yhtä paljon kuin biomassan mukana korjataan hiiltä, on korjuusta aiheutuva päästövaikutus siis samaa suuruusluokkaa kuin kivihiihen energiakäytössä. Koska puun korjuu pienentää metsien hiilivarrastoa vertailutilanteeseen nähden välittömästi puun hiilisisällön verran, on välitön vaikutus tätä suuruusluokkaa. Toisin sanoen kaikki puun mukana korjattu hiili olisi aluksi vertailutilanteessa varastoituneena metsässä.

Kun aika korjuuhetkestä kuluu eteenpäin, puun energiakäytön nettopäästövaikutus muuttuu. Lahoavien hakkuutihteiden kohdalla vaikutus pienenee (Kuva 3). Esimerkiksi pieniläpimittaisten oksien energiakäytön nettopäästö on 20 vuoden jälkeen enää noin 20–30 prosenttia kivihiihen elinkaaripäästöistä. Oksia selvästi hitaammin lahoavilla kannoilla nettopäästö on 20 vuoden kohdalla vielä luokkaa 70–80 prosenttia kivihiihen elinkaaripäästöistä. 100 vuoden kuluttua oksien energiakäytön päästö on alentunut noin 10 prosenttiin ja kantojen noin 40 prosenttiin kivihiihen elinkaariin päästöihin verrattuna. Kasvavien puiden energiakäytön päästövaikutus voi olla menetystä hiilensidonnasta johtuen jopa kaksinkertainen kivihiihen elinkaariin päästöihin verrattuna korjuuta seuraavien ensimmäisten vuosikymmenten ajan. Voi viedä useita vuosikymmeniä ennen kuin kasvavien puiden energiakäytön ilmasto vaikutus on samalla tasolla kuin kivihiihen ja vielä pidempään ennen kuin se on selvästi kivihiihen tasoa alhaisempi.

Mihin raaka-aineisiin bioenergian käytön lisääntyminen kohdentuu?

Bioenergian käytön lisääntyminen riippuu monesta eri taloudellisesta ja yhteiskunnallisesta tekijästä. Bioenergialle asetetut velvoitteet ja tuotannon hintasuhteet kilpailuviin energiamuotoihin nähden vaikuttavat

investointipäätöksiin. Raaka-aineiden tarve ja taloudellinen saatavuus vaikuttavat siihen, mihin raaka-aineisiin käytön lisääntyminen kohdentuu. Suomessa hallituksen energia- ja ilmastostrategian⁹ tavoitteena on lisätä bioenergian käyttöä siten, että metsähakkeen vuotuinen käyttö kasvaisi nykyisestä noin kahdeksasta miljoonasta kiintokuutiosta noin 18 miljoonaan kiintokuutiioon vuoteen 2030 mennessä. Luonnonvarakeskuksen tekemien arvioiden mukaan lisäys kohdentuisi hakkuutähteisiin, kantoihin ja runkopuuhun, josta merkittävä osa olisi kiutupuukokoista puuta¹⁰.

Jotta bioenergian käytön lisäys kohdentuisi vain sellaisiin sivuvirtoihin, joilla ei ole muuta taloudellista käyttöä, täytyisi bioenergian tuotantomäärien joustaa muun teollisuuden suhdanteiden mukaan. Joustavuutta hankaloittaa kuitenkin se, että tahde- ja jäteraaka-aineet ovat hajallaan ja niiden saatavuus vaihtelee. Lisäksi erityisesti suurten bioenergian tuotantolaitosten raaka-aineen tarve voi ylittää tahde- ja jäteraaka-aineiden taloudellisen saatavuuden. Tämän vuoksi bioenergiaksi ohjautuu todennäköisesti myös muita kuin tahde- ja jäteraaka-aineita. Bioenergian käytön lisäämisen tavoitteiden taitava mitoittaminen ja toimenpiteiden joustavuus ovatkin avainasemassa määrittämässä sitä, kuinka paljon bioenergia tulee tulevaisuudessa perustumaan tahde- ja jäteraaka-aineisiin.

Tekniikan merkitys

Biomassan korjuu, varastointi, jalostaminen, jakelu ja muuntaminen loppuenergiaksi vaativat energiapainoksia, jotka joko kuluttavat osan biomassan energiasällöstä tai vaativat ulkopuolista, usein fossiilista energiaa. Tyypillisesti biomassan kuljetuksissa, varastoinnissa ja jakelussa tarvittavat fossiiliset energiapainokset ovat suhteellisen vähäisiä, vain muutaman prosentin luokkaa biomassan energiasisältöön nähden. Sen sijaan biomassan jalostamisessa ja muuntamisessa loppuenergiaksi tarvittavat energiapanokset tai -häviöt voivat olla merkittäviä.

Sähkön ja lämmön tuotannossa biomassan muuntohyötysuhde on usein jonkin verran alhaisempi kuin fossiilisilla polttoaineilla, johtuen biomassan suuremmasta kosteuspitoisuudesta. Biomassan koosteutta voidaan alentaa kuivauksella, joka kuitenkin vaatii energiaa. Biomassan poltto-ominaisuuksia sekä varastointiin ja kuljetuksiin liittyvää logistiikkaa voidaan parantaa jalostamalla biomassaa erilaisiksi biopolttoaineksi, esimerkiksi pelletiksi, synteettiseksi biokaasuksi tai liikenteen bionesteiksi. Pellettien ja synteettisen biokaasun valmistuksessa kuluu tyypillisesti vajaa 20 prosenttia ja liikenteen bionesteiden valmistuksessa noin 50 prosenttia biomassan energiasällöstä. Bionesteiden valmistuksessa syntyy lämpöenergiaa, ja mikäli se saadaan hyötökäyttöön teollisuudessa tai kaukolämpönä, voi jalostuksen kokonaisenergiähäviö alentua noin 20 prosenttiin.

Energiahäviöt vaikuttavat bioenergian nettopäästöjä kasvattavasti.

Käyttötarkoituksen merkitys

Biopolttoaineita käytetään teollisuuden ja yhdyskuntien sähkön ja lämmön tuotannossa, kotitalouksien lämmityksessä ja ruoanlaitossa sekä liikenteen energianlähteinä polttomootoreissa. Eri käyttökohteissa biomassalla on erilaisia mahdollisuuksia korvata fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa biomassaa voidaan käyttää päästöintensivisimpien polttoaineiden, kuten kivihiilen, tilalla. Syneteettistä biokaasua voidaan käyttää maakaasun tilalla. Lämmitys- ja liikennekäyttöön jalostettuja bionesteitä voidaan puolestaan käyttää erityisesti fossiilisten raakaöljypohjaisten tuotteiden, kuten dieselöljyn sekä kevyen ja raskaan polttoöljyn, tilalla. Maakaasun elinkaariset päästöt ovat tyypillisesti noin 30 prosenttia ja raakaöljypohjaisten tuotteiden noin 20 prosenttia kivihiilen elinkaari päästöjä alhaisemmat.

Ilmaston kannalta on siis tehokkaampaa korvata kivihiilen käyttöä kuin öljyn ja maakaasun käyttöä. Tätä tukee myös se, että erityisesti liikenteen bionesteiden jalostuksessa aiheutuu energiahäviöitä enemmän kuin sähkön ja lämmön tuotannossa käytettävien biopolttoaineiden jalostuksessa fossiilisten

polttoaineiden käyttöön verrattuna. Esimerkiksi jos liikenteen biopolttoaineiden jalostuksen hyötysuhde on 50 prosenttia ja raaka-aineena käytettävän met-sähteen hiilinielua pienentävä vaikutus on jollain ajanjaksolla 20 prosenttia kivihiileen verrattuna, on tuotettavan biopolttoaineen nettopäästö kyseisellä ajanjaksolla vähintään noin 50 prosenttia fossiilisen öljyn päästöistä. Toisaalta sähkön ja lämmön tuotannossa on enemmän vaihtoehtoja fossiilisten polttoaineiden korvaamiseksi kuin liikenteen energiäkäytössä.

Bioenergia osana biotaloutta

Jätteitä ja tähteitä ei voida käyttää määräänsä enempää, eikä niitä synny ilman primäärituotantoa. Met-sähteiden ja metsäteollisuuden sivuvirtojen määrää voidaan lisätä vain lisäämällä ainespuun käyttöä, mikä edellyttää lisähakkuita. Lisähakkuut pienentävät metsien hiilinielua riippumatta siitä, käytetäänkö ainespuun hankinnassa, jalostuksessa ja käytössä syntyvät jätteet ja tähteet energiaksi vai ei. Ilmakehän kannalta vain päästöjen ja nielujen suuruudella on merkitystä, ei sillä, missä ja minkä toiminnan seurauksena ne syntyvät. Ilmastomuutoksen hillinnän kannalta bioenergian irrottaminen erilliseksi osaksi biotaloudesta ei ole välttämättä tarkoituksenmukaista. Olennaisempaa voi olla tarkastella esimerkiksi puunkäyttöä kokonaisuutena.

Hallituksen energia- ja ilmastostrategian vaikutusten arvioinnin mukaan tavoiteltu puunkäytön lisäys pienentää metsien hiilinielua niin paljon, etteivät Suomen nettopäästöt käytännössä vähene vuoteen 2030 mennessä vuoden 2014 tasosta¹¹. Puunkäytön lisäyksellä tavoitellaan kuitenkin ensisijaisesti vientiteollisuuden kasvua, minkä seurauksena vaihtoehtoisten materiaalien korvausta tapahtuu merkittävästi myös Suomen rajojen ulkopuolella. Korvauksessa välletyjen päästöjen suuruus riippuu siitä, mitä puusta tehdään ja miten puu käytetään. Monet uudet biotalouden sovellukset korvaisivat raakaöljypohjaisten tuotteiden käyttöä, jolloin korvausvaikutus on samaa suuruusluokkaa kuin tehtäessä puusta liikenteen biopolttoaineita. Rakennusmateriaaleina puu voi korvata esimerkiksi betonia ja terästä. Monien tutkimusten mukaan puulla saadaan rakennusmateriaaleina yleensä suurempi korvausvaikutus aikaiseksi kuin puun energiakäytössä, mutta tämä on hyvin tapauskohtaista¹².

Hakkuuiden lisääminen Suomen strategioiden mukaisiksi pienentää metsien hiilinielua verrattuna tilanteeseen, jossa hakkuutaso pidettäisiin alhaisemmalla, esimerkiksi nykytasolla. Nielun pieneneminen on mallilaskelmien mukaan ainakin vuoteen 2050 saakka niin merkittävää, että hakkuuiden lisäyksen kokonaisvaikutus on ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta lisäävä¹³. Näin sitä huolimatta, että osa metsien hiilitaseseen laskettavasta hiilestä säilyy vuosikymmeniä pitkäikäisissä puutuotteissa ja puunkäytöllä voidaan

korvata uusitumattomia materiaaleja ja energiaa sekä välttää niiden käytöstä aiheutuvia päästöjä.

Nykyisellään noin neljä viidesosa hakkuukertymän hiilestä vapautuu ilmakehään muuttaman vuoden kuluessa korjuusta puun energiakäytössä ja lyhytikäisten puutuotteiden lahotessa. Myös monet biotalouden uusista suunnitelluista tuotteista ovat lyhytikäisiä, joten näköpiirissä ei ole merkittävää muutosta puutuotteiden hiilivaraston kasvuun.

Näin ollen hakkuumäärien kasvattaminen lisää hiilen virtaa metsästä ilmakehään. Koska hakkuuiden lisäys myös pienentää metsien kasvua vuosikymmeniksi¹⁴, vähentyy hiilen virtaus ilmakehästä metsiin. Näiden tekijöiden seurauksena metsien hiilivaraston kasvu (hiilinielu) pienenee. Epävarmuudet huomioiden, suunnitellulla puunkäytöllä vältettävissä olevat fossiiliset päästöt eivät ole riittävän suuria. Tämän seurauksena kestää vuosikymmeniä ennen kuin puunkäytön lisäyksestä aiheutuneet nettopäästöt ilmakehään ovat edes samalla tasolla kuin ilman puunkäytön lisäystä ja vielä pidempään, että ne ovat selvästi alhaisemmalla tasolla¹⁵.

Suomen strategioissa tavoiteltu painopisteen siirtäminen hiilinielusta uusitumattomien raaka-aineiden korvaamiseen ei siis tutkimusten mukaan näytä auttavan ilmastonmuutoksen hillinnässä useisiin vuosikymmeniin. Jotta puunkäyttö voisi tuottaa merkittävä vähennyksiä nettopäästöissä lähi-vuosikymmenten aikana, pitäisi koko puun käyttöketju optimoida tämän tavoitteen mukaisesti. Se

edellyttäisi uudenlaista ajattelua ja hyvin tehokkaita uusia innovaatioita, jotka minimoisivat hiilen vapautumisen puuttotteista ja maksimoisivat puunkäyttöä vältettävät fossiiliset päästöt. Tavoitteen täyttämiseen hyvin vaikeaa, jos valtaosa puunkäytöstä suuntautuu lyhytikäisiin puuttotteisiin ja energiaksi.

Kokonaisilmastovaikutukset ovat epävarmoja

Biomassan ja bioenergian käytön lisäämisen ilmastovaikutukset ovat erittäin laaja ja monimutkainen kokonaisuus. Tulokset riippuvat voimakkaasti olettuksista, joihin liittyy monenlaisia ja -tasoisia epävarmuuksia ja herkkyyksiä. On mahdotonta tietää varmasti, mitä bioenergian raaka-ainelle tai niiden tuottamiseen käytetylle maa-alalle olisi tapahtunut vertailutilanteessa. Varmuutta ei myöskään ole siitä, miten bioenergian käytön lisääminen vaikuttaa energiarjestelmän kehitykseen ja kuinka paljon ja mitä fossiilisia polttoaineita käyttö lopulta korvaa.

Biomassan ja maan käyttöön liittyy myös muita ilmastoon vaikuttavia tekijöitä kuin kasvihuonekaasutaseet¹⁶. Tällaisia ovat erityisesti biomassan epätydellisessä palamisessa syntyvän mustan hiilen päästöt sekä biomassan peitteessä tapahtuvien muutosten vaikutus maapinnan heijastusominaisuuksiin, haiduntaan ja pilvien muodostumiseen vaikutusten hiukkasten päästöihin¹⁷. Näiden tekijöiden

ilmastovaikutukset tunnetaan vielä huonosti, mutta ne voivat joko kasvattaa tai vähentää biomassan ja bioenergian käytön lisäämisen ilmastovaikutusta. Mustan hiilen ilmasto lämmittävä vaikutus on erityisen suuri lumipeitteelle päätyessään. Suomessa merkittävin mustan hiilen päästölähde on puun pienpolto¹⁸.

Tarkastelujen aikajänteen merkitys biomassan käytön ilmastovaikutuksissa on usein kriittinen. Nyrtkissäntönä on, että mitä pidemmällä aikavälillä vaikutuksia tarkastellaan, sitä pienemmät ovat biomassan käytön lisäämisen ilmastovaikutukset. Tämä johtuu erityisesti biomassan korjuun maakekosysteemien hiilinielua pienentävän vaikutuksen vähenemisestä ajan myötä vertailutilanteeseen nähden. Mitä pidempää aikaväliä tarkastellaan, sitä suurempia epävarmuuksia arvioihin liittyy. Erityisesti maakekosysteemien hiilivarastojen pysyvyys ja biomassan tuotto/kyky muuttuvassa ilmastossa ovat hyvin epävarmoja pitkillä aikavälillä. Hiilidioksidin kasvillisuuden kasvua kiihdyttävä vaikutus saattaa heikentyä tulevaisuudessa, ja kuivuudet, tulvat, ravinteiden puute ja eroosio voivat myös heikentää satotasoa. Varmuutta ei ole myöskään siitä, jäävätkö biomassan käytöllä korvatut fossiiliset polttoaineet pysyvästi käytämättä.

Koska kaikkia muuttuvia tekijöitä on mahdotonta ottaa ilmastovaikutusten arvioinnissa huomioon, ovat arviot aina vähintään jossain määrin subjekttiivisia. Päätöksentekijöillä onkin hankala tehtävä arvioida, kuinka lyhyen ja pitkän aikavälin vaikutusarvioita

pitäisi painottaa ja miten arvioiden epävarmuuksiin pitäisi suhtautua.

Parisin ilmastopöytäkirjan tavoitteisiin pääsemisen edellyttää fossiilisten polttoaineiden käyttöä syntyvien päästöjen nopeaa ja huomattavaa vähentämistä mutta myös todennäköisesti negatiivisten päästöjen eli nielujuen huomattavaa lisäämistä¹⁹. Biomassan käytön lisääminen voi osaltaan auttaa vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä, mutta samalla se tekee nielujuen lisäämisestä hankalampaa.

Biomassan käyttöön liittyvien päätösten hyvyys tai huonous riippuu luonnollisesti myös siitä, miten muita kuin ilmastonmuutokseen liittyviä ekologisia, taloudellisia ja sosiaalisia vaikutuksia painotetaan ja mitä muita vaihtoehtoja fossiilisten polttoaineiden korvaamiseksi sekä päästöjen vähentämiseksi ja nielujuen lisäämiseksi lähtöleveysuudessa on käytettävissä.

Sampo Soimakallio

Soimakallio on Suomen ympäristökeskuksen erikoistutkija ja Nesslingin Säätiön apurahatutkija.

Kirjallisuus

- Anderson, K., Peters, G. 2016. The trouble with negative emissions. *Science* 354(6309), 182–183.
- Campbell, J. E., Berry, J. A., Seibt, U., Smith, S. J., Montzka, S. A., Lamnis, T., Belviso, S., Bopp, L., Laine, M. 2017. Large historical growth in global terrestrial gross primary production. *Nature* 544, 84–87.
- Chais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C. Le Quéré, C., Myneni, R.B., Piao, S. and Thornton, P. 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Creutzig, F., Ravindranath, N. H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., et al. 2015. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *GCB Bioenergy*, 7(5), 916–944.
- Global Carbon Project 2016. www.globalcarbonproject.org/index.htm
- Henttonen, H. M., Nöjd, P., Mäkinen, H. 2017. Environment-induced growth changes in the Finnish forests during 1971–2010 – An analysis based on National Forest Inventory. *Forest Ecology and Management*, 386, 22–36.
- Hynninen, J., Huuskonen, S., Kojola, S. 2017. *Metsänkasvatuksen keinot lisätä puuntuotantoa kestävästi ja kannattavasti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 16/2017. 89 s.
- Koljonen, T., Soimakallio, S., Asikainen, A., Lanki, T., Anttila, P., Hildén, M., Honkarukka, J., Karvosenoja, N., Lehtilä, A., Lehtonen, H., Lindroos, T.J., Regina, K., Salminen, O., Savolahi, M., Siljander, R., Tiittanen, P. 2017. *Energia- ja ilmastostrategian*

vaikutusarviot: Yhteenvetoraportti. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 21/2017. 106 s.

Laaksonen, A., Kupiainen, K., Kerminen, V.-M., Karvosenoja, N., Pietikäinen, J.-P., Savolahi, M., Paunu, V.-V., Savolainen, I., Atrakainen, M., Järvelä, M., Kokko, K., Kulmala, M., Seppälä, J., Taalas P. 2014. Muusta hiili ilmastopakotteena: Päästöjen ja mahdollisten päästövähennysten globaalit ja alueelliset vaikutukset. Suomen Ilmastopaneeli, Raportti 3/2014.

Lehtonen, A., Salminen, O., Kallio, M., Tuomainen, T., Sievänen, R. 2016. Skenaariolaskelmiin perustuva puuston ja metsien kasvihuonekaasutaseen kehitys vuoteen 2045. Selvitys maa- ja metsätalousministeriölle vuoden 2016 energia- ja ilmastostrategian valmistelua varten. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 36/2016. 27 s.

Liski, J., Repo, A., Känkänen, R., Vanhala, P., Seppälä, J., Antikainen, R., Grönroos, J., Karvosenoja, N., Lähinen, K., Leskinen, P., Paunu, V.-V., Tuovinen, J.-P. 2011. Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset Suomessa. Suomen ympäristö 5/2011.

Luke 2017. Hakkuukertymä ja puuston poistuma alueittain 2015. Luonnonvarakeskus. Metsätilastot. stat.luke.fi/

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T. and Zhang, H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Sathre, R., O'Connor, J. 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy* 13 (2), 104–114.

Seppälä, J., Kanninen, M., Vesala, T., Uusivuori, J., Kallio-koski, T., Lintunen, J., Saikku, L., Korhonen, R., Repo, A. 2015.

Metsien hyödyntämisen ilmastovaikutukset ja hiilinielujen kehittyminen. Suomen Ilmastopaneeli, Raportti 3/2015.

Soimakallio, S., Saikku, L., Valsta, I., Pingoud, K. 2016. Climate change mitigation challenge for wood utilization – the case of Finland. *Environmental Science and Technology* 50(10), 5127–5134.

Tilastokeskus 2017. Polttoaineluokitus 2017. www.stat.fi

Valtioneuvosto 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017. 119 s.

Viitteet

- 1 Koljonen ym. 2017
- 2 Luke 2017
- 3 Henttonen ym. 2017
- 4 Tilastokeskus 2017
- 5 Ciais ym. 2013, Campbell ym. 2017
- 6 Myhre ym. 2013
- 7 Hyynnen ym. 2017
- 8 Soimakallio ym. 2016
- 9 Valtioneuvosto 2017
- 10 Lehtonen ym. 2016, Koljonen ym. 2017
- 11 Koljonen ym. 2017

- 12 Sathre & O'Connor 2010
- 13 Koljonen ym. 2017
- 14 Lehtonen ym. 2016
- 15 Soimakallio ym. 2016
- 16 Creutzig ym. 2015
- 17 Seppälä ym. 2015
- 18 Laaksonen ym. 2014
- 19 Anderson & Peters 2016