

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Kandidaatintyö

**PLANEETTARAJA-AJATTELU BIOMASSAN TUOTAN-
NOSSA**
Planetary boundaries in biomass production

Työn tarkastaja: Tutkijaopettaja, dosentti, MMT Mirja Mikkilä
Työn ohjaaja: Nuorempi tutkija, DI Jukka Luhas

Lappeenrannassa 4.9.2019
Otto Kankaanpää

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Otto Kankaanpää

Planeettaraja-ajattelu biomassan tuotannossa

Kandidaatintyö

2019

31 sivua, 2 taulukkoa ja 1 liite

Työn tarkastaja: Tutkijaopettaja, Dosentti, MMT Mirja Mikkilä

Työn ohjaaja: Nuorempi tutkija, DI Jukka Luhas

Hakusanat: kandidaatintyö, planeettaraja-ajattelu, biomassassa, metsähake, metsäteollisuus
Keywords: bachelor's thesis, biomass, woodchips, planetary boundaries, forest industry,

Metsäbiopolttoaineita pidetään usein ympäristöystävällisenä energiamuotona. Biomassa on määritelty hiilineutraaliksi polttoaineeksi ja se on omiaan luomaan kuvan ympäristöystävällisestä energiamuodosta. Tämän työn tavoitteena on tutkia kriittisesti metsähakkeen energiankäytön ympäristövaikutuksia. Metsähakkeen hyödyntämisen ympäristövaikutuksia arvioidaan Suomen hakkuumäärien ja energiankäyttömäärien kannalta. Työn teoreettisena viitekehyksenä käytetään planeettaraja-ajattelua. Työ on narratiivinen kirjallisuuskatsaus. Aiheen ymmärtämiseksi planeettaraja-ajattelun konsepti, ja Suomen metsien tila, metsähakkuutilastot ja metsäpinta-alan muutokset, sekä energiakäyttöön päätyvät biomassamäärät esitetään perusteellisesti. Ympäristövaikutuksia arvioidaan jokaisen kymmenen planeettarajan näkökulmasta. Ympäristövaikutusten arvioinnissa aineistona käytetään aiheeseen liittyviä tutkimuksia ja päästöjen ympäristövaikutuksiin liittyviä tutkimuksia. Tämän tutkimuksen mukaan kaiken kaikkiaan kuuteen planeettarajaan on selkeitä ympäristövaikutuksia. Ympäristövaikutuksia kohdistuu merten happamoitumiseen, otsonikatoon, typpi- ja fosforikiertoon, aerosolikuormitukseen ja biodiversiteettiin. Kolmeen planeettarajaan ei ole vaikutusta tai vaikutus on hyvin pieni. Nämä planeettarajat ovat makeanvedenkäyttö, kemiallinen saaste, maasysteemimuutos ja metsäkato. Yhden planeettarajan, ilmastomuutoksen ympäristövaikutuksista ei ole varmuutta. Tämän tutkimuksen perusteella Jatkotutkimusaiheiksi ehdotetaan metsähakkeen ilmastovaikutusarviointia, sekä planeettaraja-ajattelun viitekehyksen käyttöä koko Suomen metsäteollisuuden ympäristövaikutusarviointiin tai muiden energialähteiden ympäristövaikutusarviointiin.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	4
2	PLANEETTARAJA-AJATTELU	5
2.1	Ilmastonmuutos	6
2.2	Merten happamoituminen	7
2.3	Otsonikato stratosfäärissä.....	7
2.4	Häiriöt typpi- ja fosforikierrossa.....	7
2.5	Globaali makeanveden käyttö	8
2.6	Maasysteemimuutos ja metsäkato.....	8
2.7	Biodiversiteettikato	8
2.8	Aerosolikuormitus.....	9
2.9	Kemiallinen saaste	9
3	KIIINTEÄN PUUPOLTTOAINEEN TUOTANTO JA HYÖDYNTÄMINEN ENERGIAKÄYTÖSSÄ.....	10
3.1	Puu energiakäytössä.....	10
3.2	Metsien tila Suomessa.....	12
4	KIIINTEÄN PUUPOLTTOAINEEN TUOTANNON PLANEETTARAJA- ARVOT 13	
4.1	Ilmastonmuutos	14
4.2	Merten happamoituminen	17
4.3	Otsonikato stratosfäärissä.....	17
4.4	Häiriöt typpi- ja fosforikierrossa.....	19
4.5	Globaali makeanveden käyttö	20
4.6	Maasysteemimuutos ja metsäkato.....	20
4.7	Biodiversiteettikato	21
4.8	Aerosolikuormitus.....	21
4.9	Kemiallinen saaste	22
5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA KESKUSTELUA	23
6	YHTEENVETO.....	26

LIITTEET

Liite 1. Dityppioksidipäästöjä suomessa

1 JOHDANTO

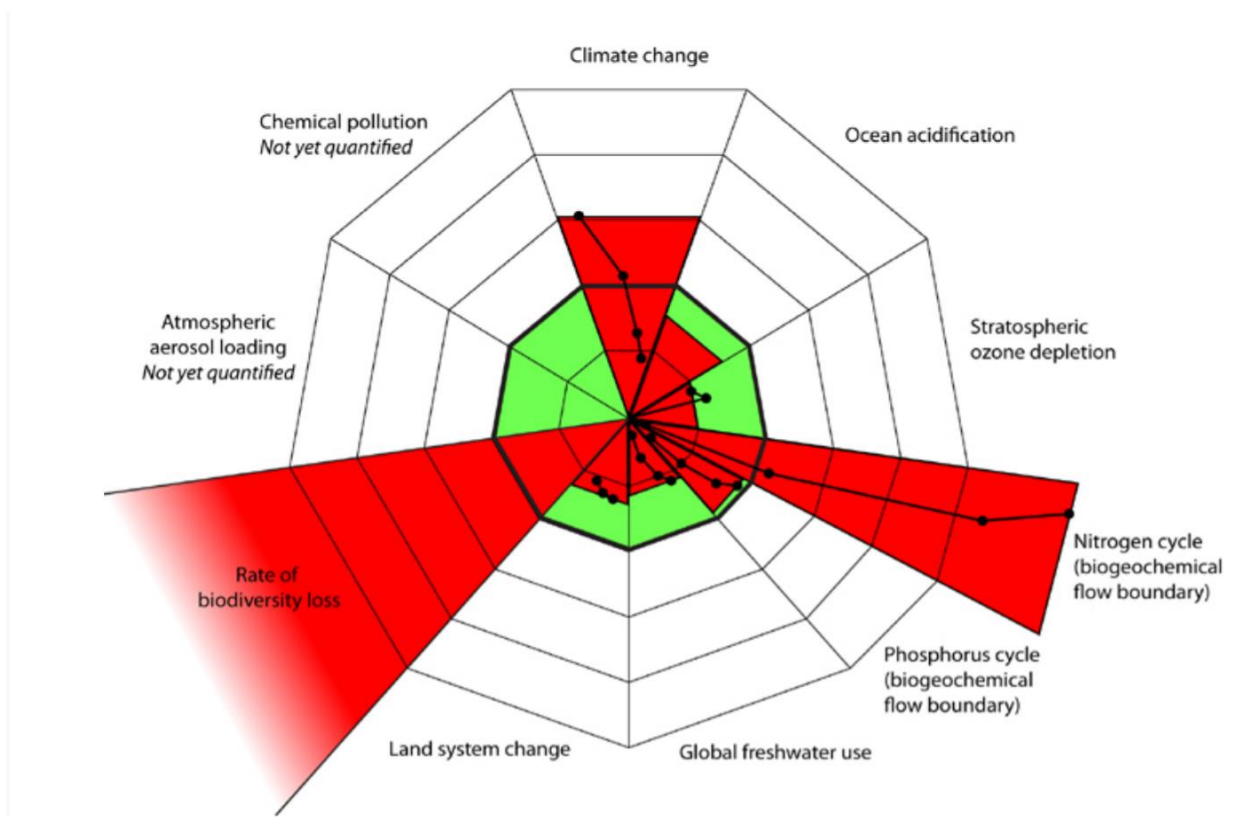
Ilmastonmuutoksen myötä yhteiskunnalla on yhä suurempi tarve vähentää kasvihuonekaasupäästöjään ja siirtyä pois fossiilisten polttoaineiden käytöstä kohti uusiutuvien energialähteiden käyttöä. Suomessa eniten käytössä oleva uusiutuvan energian lähde on biomassa. Suomessa vuonna 2018 kokonaisenergiankulutuksesta noin 27 % (100 TWh) tuotettiin puupolttoaineilla. Puupolttoaineet olivat Suomen suurin yksittäinen energialähde. (Maa- ja metsätalousministeriö a). Suomessa on pohdittu metsähakkuiden lisäämistä. Tätä on perusteltu puupohjaisten tuotteiden korkean kysynnän vuoksi. Lisähakkuista saadulla biomassalla voitaisiin myös korvata fossiilisia polttoaineita. Fossiilisia polttoaineita korvaamalla vähennettäisiin Suomen hiilidioksidipäästöjä ja saavutettaisiin ympäristöhyötyjä. Hiilineutraalisuutensa takia biomassan käyttöä energian tuotannossa pidetään usein ympäristöystävällisenä vaihtoehtona. Biomassan käyttöön liittyvässä keskustelussa harvoin kiinnitetään huomiota sen kokonaisympäristövaikutuksiin.

Tässä työssä tutkitaan kriittisesti, saavutetaanko hakkuiden ja biomassan energiakäytön lisäämisellä ympäristöhyötyjä. Lisäksi tässä työssä tutkitaan energiapuun käytön ympäristövaikutuksia ja arvioidaan tuotannon kestävyyttä planeettaraja-ajattelun konseptin (Rockström et al. 2009) näkökulmasta. Kuhunkin (Rockström et al. 2009) esittelemään planeettarajaan kohdistuvia ympäristövaikutuksia arvioidaan erikseen. Työssä pyritään luomaan kokonaiskuvaa energiapuun käytön ympäristövaikutuksista planeettaraja-ajattelun avulla.

Työssä tarkastellaan planeettarajoihin kohdistuvia ympäristövaikutuksia Suomessa käytössä olevien menetelmien ja Suomessa tuotettujen määrien kannalta. Työssä käsitellään vain energiakäyttöön päätyvän metsähakkeen ympäristövaikutuksia. Metsähakkeen elinkaaresta tarkastelun kohteina ovat puun kasvatus, hakkuut ja käyttö eli poltto. Työssä ei tarkastella kuljetuksiin ja tuotantoprosesseihin (esimerkiksi haketukseen, kuorimiseen, hakkuukoneiden käyttöön), eikä loppukäsittelyyn (esimerkiksi tuhkan loppusijoitukseen) liittyviä ympäristövaikutuksia. Työ on narratiivinen kirjallisuuskatsaus, jossa arvioidaan kvalitatiivisesti, mihin planeettarajoista kohdistuu ympäristövaikutuksia Suomessa energiakäyttöön päätyvän metsäbiomassan takia.

2 PLANEETTARAJA-AJATTELU

Planeettaraja-ajattelu on ensimmäinen konsepti, jolla pyritään arvioimaan ihmiskunnalle turvallisen toiminnan raja-arvot, joiden puitteissa toimia Maan systeemissä ("earth system"). Konseptilla on ensi kertaa pyritty tunnistamaan tärkeimmät Maasysteemin prosessit ja kvantifioimaan jokaisen prosessin raja-arvot, joiden ylittämällä olisi hyväksymiskelvottomia ("unacceptable") seuraamuksia. "Hyväksymiskelvoton" on määritetty suhteessa riskeihin, jotka ihmiskunta kokee muutoksessa holoseenista antroposeeniin. Holoseenin suhteellisen vakaat olosuhteet, jotka alkoivat noin 10 000 vuotta sitten, on antanut mahdollisuuden yhteiskuntien kehitykselle ja menestykselle. Ihmiskunnasta on tullut riippuvainen tämän vakauden aikana tehdyistä investoinneistaan elämäntapoihinsa, järjestäytyneeseen yhteiskuntaansa, ja sitä ympäröivään talouteen. Tämän takia holoseenista on planeettaraja-ajattelun konseptissa tehty vertailukohde tavoiteltavasta systeemin tilasta planeetassamme. (Rockström et al.2009).



Kuva 1. Planeettarajat (Rockström et al. 2009)

Planeettaraja-ajattelun konsepti on ensimmäinen pyrkimys tunnistaa tärkeimmät maasysteemin prosessit, jotka ovat yhteydessä vaarallisiin raja-arvoihin, ja joiden ylittäminen asettaisi planeettamme pois halutusta tilasta, holoseenista. Toistaiseksi on tunnistettu yhdeksän prosessia, joille on asetettava raja-arvot vakavien ja epämieluisien seuraamusten välttämiseksi. Esitetyt planeettaraja-arvot kattavat typen, hiilen, fosforin ja veden maailmanlaajuiset biogeokemialliset syklit; Maan suuret fysikaaliset kiertosysteemit kuten ilmasto, stratosfääri ja valtamerijärjestelmät; Maapallon biofysikaaliset järjestelmät, jotka edistävät itsesäätelykapasiteettia pohjustavaa joustavuutta. Lisäksi on tunnistettu kaksi kriittistä ominaisuutta, aerosolikuormaus ja kemiallinen saastuminen, jotka liittyvät antropogeeniseen globaaliin muutokseen. Seitsemälle raja-arvolle on ehdotettu kvantitatiivinen planeettaraja-arvo olemassa olevan tutkimuksen perusteella. Aerosolikuormituksen ja kemiallisen saasteen planeettarajan kvantifioiminen vaatii vielä lisätutkimusta. (Rockström et al.2009).

2.1 Ilmastonmuutos

Ilmastonmuutos lienee tällä hetkellä puhutuin, ajankohtaisin ja tunnetuin planeettaraja. Poliittisia päätöksiä on tehty maailmanlaajuisesti pysäyttää ilmastonmuutos 2 °C asteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna. Arvolla tarkoitetaan 2 °C keskilämpötilan nousua maan pinnalla. Kahden asteen raja on päätös, jossa on otettu huomioon tieteellisiä näkökulmia ilmastolämpenemisen vaikutuksista, arvovalintoja vaikutusten hyväksyttävyydestä ("acceptability") ja poliittista pohdintaa siitä, mikä on realistista saavuttaa (Rockström et al. 2009).

Ilmasto on tällä hetkellä lämmennyt noin yhden asteen esiteollisesta ajasta. Ilmastonmuutoksen hillintä perustuu kasvihuonekaasupäästöjen hillintään. Merkittävin ihmisperäinen kasvihuonekaasu on hiilidioksidi CO₂. Ilmastonmuutoksen planeettarajaksi on esitetty lämpötilan muutoksen sijaan kaksi muuta arvoa. Ilman hiilidioksidipitoisuudeksi on esitetty 350 ppm ja säteilypakotearvoksi 1W/m² yli esiteollisen ajan. Tämä lähestymistapa ilmastonmuutoksen raja-arvojen määrittämiseksi perustuu tieteelliseen ymmärrykseen siitä, mitä vaaditaan, että vältettäisiin kriittiset kynnsarvot, jotka erottavat eri ilmastosysteemien tilat kvantitatiivisesti. (Rockström et al. 2009).

2.2 Merten happamoituminen

Merten happamoituminen uhkaa meribiiodiversiteettiä ja merten kykyä toimia hiilidioksidinieluna. Tällä hetkellä meret poistavat noin 25 % ihmisen toiminnan hiilidioksidipäästöistä. Ilmakehän hiilidioksidin poistoprosessi sisältää hiilidioksidin liukenemisen meriveteen, ja meriorganismien kyvyn vastaanottaa hiiltä itseensä. (Rockström et al. 2009).

Hiilidioksidin liukeneminen mereen happamoittaa merta. Jotkut eliöt ovat herkkiä veden pH:n muutokselle, etenkin lajit, jotka käyttävät hyväksi veteen liuenneita karbonaatti-ioneja. Merten happamoitumisen nopeus on tällä hetkellä noin sata kertaa nopeampaa kuin kertakaan yli 20 miljoonaa vuoteen. (Rockström et al. 2009).

2.3 Otsonikato stratosfäärissä

Stratosfäärin otsonikadolla tarkoitetaan nimenomaan Maan yläilmakehässä tapahtuvaa otsonikatoa. Otoni on ihmiselle myrkyllinen aine sille altistuttaessa. Yläilmakehässä siitä on hyötyä sen suodattaessa haitallista Auringon UV-säteilyä. Otonikatoa stratosfäärissä aiheuttaa ihmisen toiminnasta, joidenkin otsonille haitallisten yhdisteiden päätyessä yläilmakehään. Globaalille otsonikadolle ei olla asetettu raja-arvoa. Julkaisussa kuitenkin todetaan, että otsonin suhteen on onnistuttu pysymään planeettarajojen puitteissa kansainvälisten sopimusten, kuten Montrealin pöytäkirjan avulla, jossa kiellettiin otsonille erittäin haitallisten aineiden käyttö. (Rockström et al. 2009).

2.4 Häiriöt typpi- ja fosforikierrossa

Ihmisen aiheuttaman typen ja fosforin virtausten lisääntyminen globaalilla ja alueellisella mittakaavalla voi aiheuttaa ei-toivottuja epälineaarisia muutoksia maanpäällisissä ja vesi- ja merijärjestelmissä. Samalla ne vaikuttavat ihmisen aiheuttamaan ilmastonmuutokseen planeettatasolla. (Rockström et al. 2009).

Fosforin ja typen kierto on yhdistetty planeettaraja. Molemmat vaikuttavat monimutkaisesti ja epälineaarisesti ihmisen elämän tukijärjestelmiin ja molemmilla on merkittävät ja laajat

vaikutukset planeetallamme. Se tekee niistä antroposeenin merkittävimpiä prosesseja. Syynä pitää ne yhtenä planeettarajana kyseisessä julkaisussa on ensisijaisesti niiden yhdenkaltainen vaikutus tärkeinä biologisina ravinteina. Toisaalta on tiedostettu, että typpi ja fosforisyklien tulisi olla erilliset planeettarajat toisistaan. (Rockström et al. 2009).

2.5 Globaali makeanveden käyttö

Makean veden kierron globaalit muutokset vaikuttavat biodiversiteettiin, ruoan saatavuuteen, terveyteen, sekä ekologiseen toimintaan, kuten kalojen elinoloihin, hiilen sidontaan ja ilmastonsäätelyyn. Muutokset heikentävät maa- ja vesiekosysteemien kestävyyttä. Ihmisten elinoloja uhkaavia tekijöitä on kolme. Ensimmäinen tekijä on maaperän vesivarat, joiden väheneminen uhkaa hiilen sidontaa ja biomassan kasvatusolosuhteita. Toinen tekijä on vesimäärät ja muutokset valumissa, jotka uhkaavat vesivaroja ja veden saatavuutta. Kolmas tekijä on ilmastosäätelyyn ja sadantaan vaikuttavat veden kiertosysteemit. (Rockström et al. 2009).

2.6 Maasysteemimuutos ja metsäkato

Globaalisti maasysteeminmuutosta ("land system change") ajaa kasvava maatalouden vaatima maa-ala. Kaksi erillistä planeettarajaa, metsäkato ja maasysteemimuutos, on yhdistetty toisiinsa. Tämä on tehty siksi, että kasvava maatalouspinta-ala usein hankitaan hakkaamalla metsää. Vedenkäyttö, biodiversiteettikato, metsäkato, fosforin ja typen kierto ja maasysteemimuutos ovat vahvasti toisiinsa kytköksissä olevia planeettarajoja. Maankäytön planeettarajaksi on asetettu ehto, että jäävapaasta maa-alasta vain 15 % saisi olla maatalouskäytössä. Numeerisen globaalin arvion sijaan on kuitenkin tärkeää tarkastella maasysteemimuutoksen aiheuttamia vaikutuksia muihin planeettarajoihin, kuten biodiversiteettikatoon tai typen- ja fosforin kiertoon. (Rockström et al.).

2.7 Biodiversiteettikato

Biodiversiteetti tarkoittaa luonnon monimuotoisuutta. Ihmistoiminnan takia, kuten liiallisen metsästyksen ja kalastuksen ja ilmastonmuutoksen takia lajikato on maailmassa kiihtynyt.

Yksittäisten lajien häviämisen voi olla vaikutuksia kokonaisen ekosysteemin toimintaan, ja laajemmin kokonaisten Maasysteemien toimintaan. Esimerkiksi biodiversiteettikadon mukana alueellinen ilmaston, tai meren happamuuden säätely voi olla myös uhattuna. Nykyinen biodiversiteetin nopeus muodostaa maailman historian kuudennen massasukupuuttoaalton. Tämä massasukupuuttoaalto johtuu ihmistoiminnasta. Globaali biodiversiteettikato on tällä hetkellä arvioitu olevan moninkertaista turvalliseen rajaan nähden. (Rockström et al. 2009).

2.8 Aerosolikuormitus

Aerosolit ovat kaasun ja siinä leijuvien nesteiden tai kiinteiden aineiden seos. Planeettarajoja käsittelevässä julkaisussa ihmisperäiset aerosolit on määritetty planeettarajan vaativaksi päästökseen kahdesta syystä. Ensimmäinen syy on, että aerosoleilla on vaikutuksia globaaleihin sääsystemeihin. Toinen syy on, että aerosoleilla on vaikutuksia ihmisen terveyteen sekä paikallisesti, että globaalilla tasolla. Aerosolit ovat hyvin monimutkainen käsite, ja sisältää hyvin laajan kirjon eri aineita, joilla on erilaiset vaikutukset terveyteen, ilmastoon ja ympäristöön. Siksi aerosolien kvantitatiivista planeettarajaa ei olla kyetty määrittämään. (Rockström et al. 2009).

2.9 Kemiallinen saaste

Planeettarajan vaativat kemialliset päästöt voidaan jakaa muutamaaan luokkaan: radioaktiiviset aineet, raskasmetallit, ja orgaaniset ihmistoiminnasta peräisin olevat aineet. Kemialliset päästöt vaikuttavat ihmisten ja ekosysteemien terveyteen. Vaikutukset on havaittu paikallisesti, mutta ne ovat ilmeisiä nyt myös globaalilla tasolla. Kemiallisen saasteen planeettarajalle on selkeä tarve, sillä kemiallisella saasteella on terveydellisten vaikutuksen lisäksi vaikutuksia myös muihin planeettarajoihin, kuten esimerkiksi biodiversiteettiin. Kemiallisen saasteen planeettarajan asettaminen todennäköisesti vaatii useiden erillisten alalohkojen määrittämistä, eri kemiallisille aineille. Kemiallinen saaste on vahvasti yhteydessä aerosoleihin, sillä useat pitkäikäiset kemialliset saasteet kulkeutuvat pitkiä matkoja aerosolien mukana. (Rockström et al. 2009).

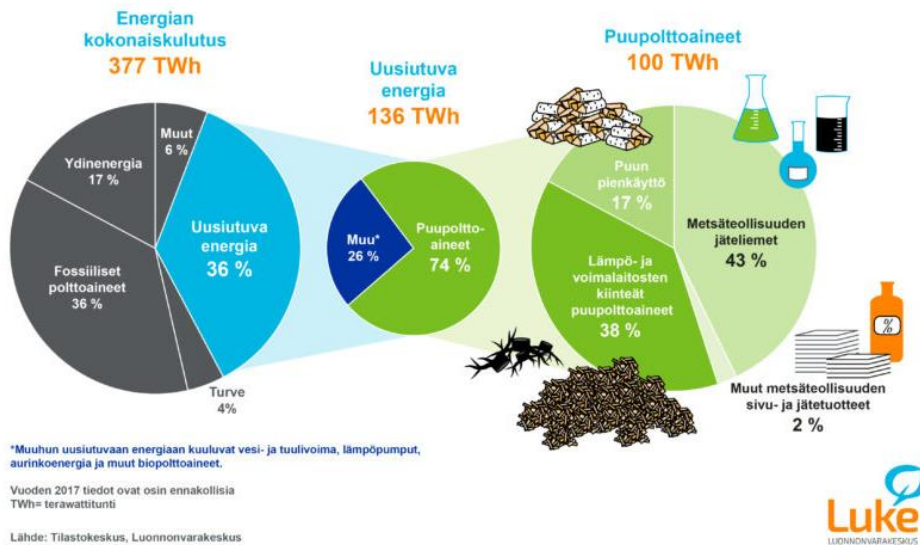
3 KIINTEÄN PUUPOLTTOAINEEN TUOTANTO JA HYÖDYNTÄMINEN ENERGIÄKÄYTÖSSÄ

Tässä kappaleessa käsitellään, miten metsäbiopolttoainetta syntyy metsäteollisuuden prosesseissa, ja miten sitä käytetään. Lisäksi kappaleessa esitetään, miten paljon puuta Suomessa kasvaa, ja käytetään, ja millaisia metsäpinta-alan muutoksia Suomessa tapahtuu.

Metsäteollisuus on erittäin merkittävä hyvinvoinnin tuoja Suomessa. Metsäteollisuus edusti 18 % tehdasteollisuuden tuotannon arvosta. Yli 20 % Suomen vientituloista on peräisin metsäteollisuuden tuotteista. Eniten puuta käytetään sellun tuotannossa ja toiseksi eniten puuta käyttää sahateollisuus. (Maa- ja metsätalousministeriö b)

3.1 Puu energiäkäytössä

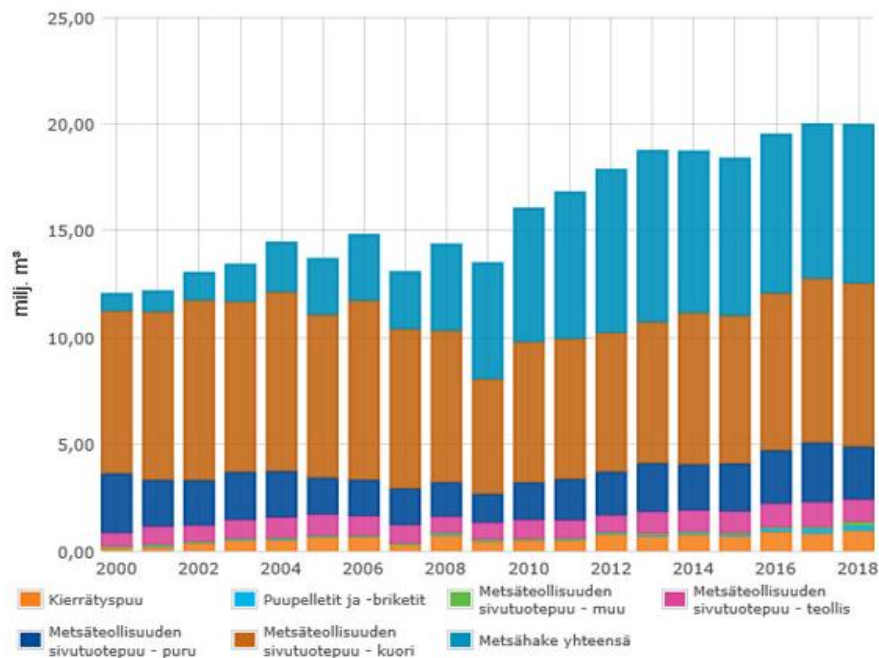
Puuta käytetään energian tuotannossa metsäteollisuuden sivuvirroista, kuten purusta, kuoresta ja sellun valmistuksessa syntyvästä mustalipeästä ja metsähakkeesta, jota valmistetaan metsänhoidon yhteydessä kerättävistä kannoista, latvustoista ja oksista. Vuonna 2018 Suomen kokonaisenergian tuotannosta 27 % oli peräisin puupolttoaineista. Puupolttoaineet ovat Suomen suurin yksittäinen energialähde. Suomessa vuonna 2018 käytettiin metsäteollisuuden sivuvirtoja energiantuotantoon yhteensä 20,1 miljoonaa kuutiometriä, joka vastasi energiasisällöltä 38,7 terawattituntia (TWh). Lämpö- ja voimalaitoksilla käytetty kiinteiden puupolttoaineiden määrä on ollut 2017 ja 2018 ennätystasolla. (Maa- ja metsätalousministeriö a).



Kuva 2. Polttoaineiden kulutus vuonna 2017 (LUKE 2018 a)

Kiinteitä puupolttoaineita käytettiin ennätysmäärä, 26,9 miljoonaa kuutiometriä. Tästä 10,9 miljoonaa kuutiometriä oli raakapuuta. Loput olivat metsäteollisuuden jäte- ja sivutuotepuuta ja niistä valmistettuja jalosteita ja kierrätyspuuta, yhteensä noin 16 miljoonaa kuutiometriä. Lämpö- ja voimalaitoksissa poltettiin 20 miljoonaa kuutiometriä ja pientaloissa poltettiin puuta yhteensä 6,9 miljoonaa kuutiometriä. (LUKE 2018 b, 64.).

Metsähaketta on käytetty viime vuosina keskimäärin energiasisällöltään noin 15 TWh edestä vuosittain. Suomessa metsähakkeena käytetään pääasiassa teolliseen jalostukseen kelpaamattomia puun rungon osia, kuten esimerkiksi metsänhoitotöiden yhteydessä korjattua pienpuuta ja hakkuutähteitä. Niiden yhteistilavuus oli noin 7,5 miljoonaa kuutiometriä. (Maa- ja metsätalousministeriö a).



Kuva 3. Kiinteiden puupolttoaineiden käyttö lämpö- ja voimalaitoksissa (LUKE 2019)

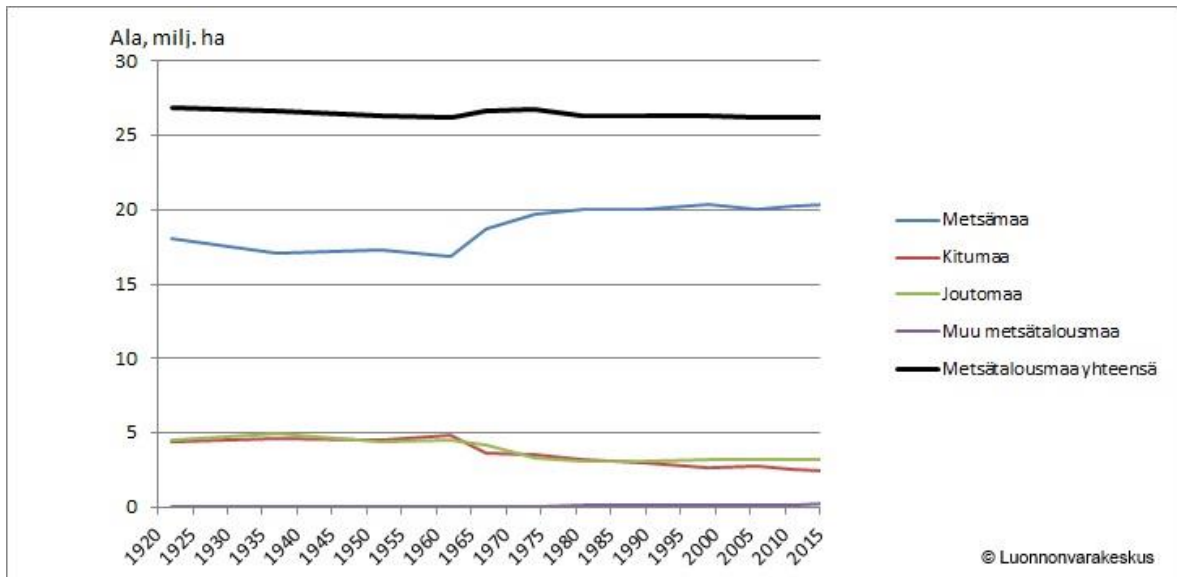
Vuonna 2018 lämpö- ja voimalaitoksissa käytettiin yhteensä 7,5 miljoonaa kuutiometriä metsähaketta. Siitä pienläpimittaista energiapuuta oli 3,9 ja hakkuutähteitä 2,7 miljoonaa kuutiometriä, kantoja 0,4 miljoonaa kuutiometriä. Lahovikaista tai muuten jalostukseen kelpaamatonta runkopuuta 0,5 miljoonaa kuutiometriä. (Maa- ja metsätalousministeriö a).

3.2 Metsien tila Suomessa

Suomessa arvioidaan olevan puuta 2,5 miljardia kuutiometriä. Suomen metsä kasvoi tilastovuonna 2017 noin 107 miljoonaa kuutiometriä. Vuonna 2017 teollisuuspuuta käytettiin enätysmäärä 63 miljoonaa kuutiometriä. Energiantuotantoa varten korjattiin puuta 9 miljoonaa kuutiometriä runkopuuta. Yhteensä hakkuukertymät olivat 72 miljoonaa kuutiometriä. Runkopuun kokonaispoistuma 87 miljoonaa kuutiometriä. Runkopuun kokonaispoistuma oli 20 miljoonaa kuutiometriä vähemmän kuin puuston vuotuinen kokonaiskasvu. Suomessa käytettiin raakapuuta 80,6 miljoonaa kiintokuutiometriä vuonna 2017. (LUKE 2018 b, 72).

Suomessa suurin osa maapinta-alasta on metsää. Suomessa metsätalousmaaksi luokitellaan kaikki sellainen maa, jolla ei ole muuta käyttötarkoitusta, esimerkiksi maatalousmaata tai rakennettua maata. Metsätalousmaahan sisältyy puuntuotantoon käytettävissä oleva maa ja

myös sellainen maa, jolla metsätalouden harjoittaminen ei ole sallittua esimerkiksi lain tai maanomistajan päätöksen mukaisesti. Metsätalousmaa jaetaan puuntuottokyvyn perusteella metsämaaksi, kitumaaksi, tai joutomaaksi. Lisäksi metsämaahan kuuluu muut metsämaat, joita ovat esimerkiksi metsätiet. (LUKE 2018 b, 42).



Kuva 4. Metsäpinta-alojen muutokset Suomessa (LUKE 2018 c)

Suomen koko 30,4 miljoonan hehtaarin maa-alasta 86 % on metsätalousmaata. Tästä 20,3 miljoonaa hehtaaria on metsämaata, kitumaata on 2,5 miljoonaa hehtaaria, joutomaata, 3,2 miljoonaa hehtaaria ja muuta metsätalousmaata 0,2 miljoonaa hehtaaria. Metsäala on pienentynyt jonkin verran muun muassa rakentamisen takia viimeisen sadan vuoden aikana. Suurin osa hakkuista tehdään metsämailla. Kitumailla hakkuista tehdään hyvin vähän. (LUKE 2018 b, 42).

4 KIINTEÄN PUUPOLTTOAINEEN TUOTANNON PLANEETTA-RAJA-ARVOT

Tässä kappaleessa tarkennutaan siihen, mihin planeettarajoihin metsähakkeen energiakäytöllä voi olla vaikutusta. Kappaleessa tarkennutaan erilaisiin päästöihin, tai muihin tekijöihin, jotka saattavat kuormittaa ympäristöä juuri planeettarajoihin vaikuttavalla tavalla. Kukaan planeettaraja on käsitelty erikseen, paitsi typpi-, ja fosforikierron planeettaraja. Tämä

johtuu siitä, että niillä on yhdenkaltainen vaikutus ympäristöön biologisena ravinteena, kuten jo kappaleessa 2.4 mainittiin.

4.1 Ilmastonmuutos

Suomessa metsät kasvavat tilavuudessa vuosittain enemmän, kuin niitä poistuu hakkuiden ja luonnonpoistuman kautta, joten ne toimivat hiilinieluna. Hiilinielu sitoo hiilidioksidia ilmasta, joten sillä on ilmastoa viilentävä vaikutus. Erilaisten metsien hyödyntämistavat ja niiden osuudet vaikuttavat siihen, miten metsien hiilitase kehittyy valtion tasolla. Suomessa hyödynnetään vuosittain vain pientä osaa metsistä, joten metsien hiilivaranto kasvaa. (Seppälä et al. 2015).

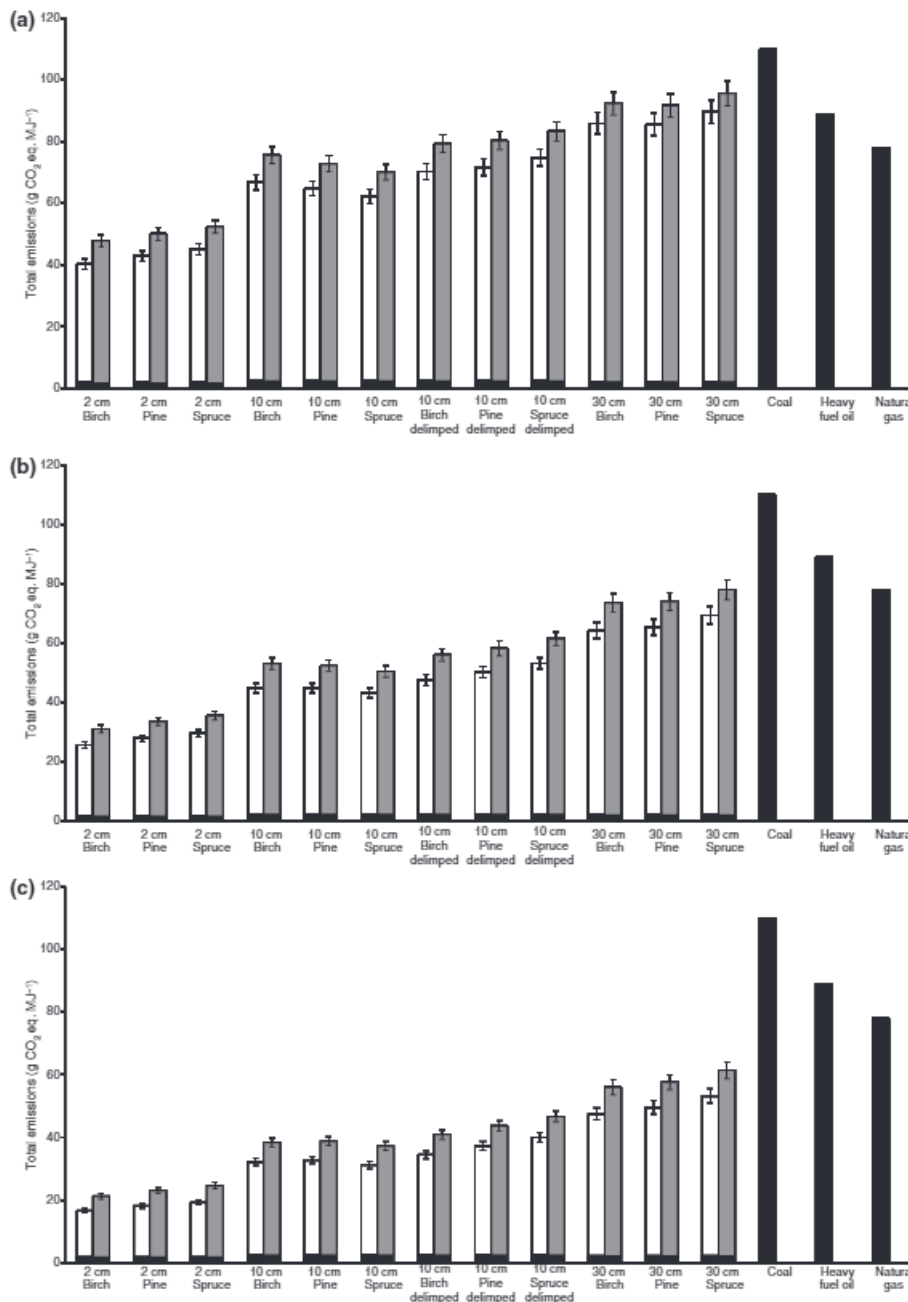
Metsäenergian ilmastovaikutusten arvioinnissa tulee ottaa huomioon niistä saadut korvaushyödyt, kun niillä korvataan esimerkiksi fossiilista polttoainetta. Ilmastovaikutusten arviointi voi siis riippua siitä, mihin sitä verrataan. Mahdolliset ilmastohyödyt tapahtuvat vasta tietyn ajan päästä, kun käytetyt metsävarat kasvavat takaisin. Tätä kutsutaan takaisinmaksuajaksi. Hakuista syntyvän hiilivelan palautumisnopeus ja palautumiseen menevä aika eli takaisinmaksuaika on perustana biomassan hyödyntämisen ilmastovaikutuksille. (Seppälä et al. 2015).

Energian hyödyntämisen ilmastovaikutusten arviointiin vaikuttavat vertailutilanne, johon hiilitasemuutosta verrataan ja laskentatapa. Ilmastovaikutuksista tai ilmastohyödyistä ei ole olemassa yksiselitteistä johtopäätöstä, sillä tarkastelun voi suorittaa joko alueellisten, esimerkiksi yhden metsikön hakkuiden näkökulmasta, tai suuren alueen, esimerkiksi valtion näkökulmasta. Metsikkötason tarkastelu antaa tuloksia yksittäisen toimenpiteen ilmastovaikutuksista. Valtakunnantasolla tehdyt tarkastelut antavat tuloksia käyttötason muutosten ilmastovaikutuksista. Vertailukohteen valitseminen vaikuttaa metsätähteen hyödyntämisessä paljon. Jos lähtökohdaksi valitaan, että hakkuut on tehty, on tähteen hyödyntäminen perustellumpaa. Toisaalta jos vertailukohteeksi metsän luonnollinen kasvu ilman hakkuuta, saavutetaan tapaus, jossa pitää laskea hakuista syntyvän hiilivajeen takaisinmaksuajan kautta

ilmastohyödyt eri ajankohdilla. Luonnontieteellinen näkökulma on tarkastella vertailutilanteena sitä, ettei hakkuita suoriteta. Silloin tutkitaan ihmistoiminnan vaikutusta ilmastoon. (Seppälä et al. 2015).

Repo et al. (2012) tutkimuksessa vertailtiin erilaisten metsähakeraaka-aineiden ja fossiilisten polttoaineiden hiilidioksidipäästöä 20 vuoden tarkastelujaksolla. Tarkastelussa vertailtiin sekä koivusta, että männystä tuotetun metsähaketta. Hakelajeissa vertailun kohteina oli oksat, lyhytläpimittainen ranka ja järeästä 30cm läpimittaisesta rungosta valmistetusta hakkeesta. Näitä tarkasteltiin Etelä-Suomen ja Pohjois-Suomen kasvuolosuhteissa. Tutkimus oli teoreettinen case-mallinnus.

Suomen olosuhteista johtuvan suhteellisen hitaan kasvunopeuden vuoksi metsien hakkuilla on suhteellisen pitkä takaisinmaksuaika. Vertailussa maakaasu pärjäsikin melko hyvin metsähaketta vastaan. Lähtökohtaisesti tämä johtuu kasvuolosuhteiden lisäksi siitä, että puupolttoaineilla on suurempi hiilidioksidin päästökerroin energiayksikköä kohden, kuin esimerkiksi kivihiehellä tai maakaasulla. Kahdenkymmenen vuoden vertailussa vain lyhytläpimittaisesta puusta valmistetun hakkeen hyödyntämisen aiheuttama hiilivaje oli selvästi maakaasun hiilidioksidipäästöä alhaisempi. 50 vuoden tarkastelujaksolla tukkipuun hiilijalanjälki oli edelleen samaa luokkaa maakaasun kanssa. Sadan vuoden teoreettisen tarkastelun jälkeen hiilidioksidipäästö oli selvästi alhaisempi, kuin fossiilisilla polttoaineilla. (Repo et al. 2012).



Kuva 5. Metsähakkeen hyödyntämisen hiilijalanjälki 20, 50 ja 100 vuoden tarkastelujaksolla teoreettisessa mallinnuksessa (Repo et al. 2012)

Tutkimuksen tuloksena oli, että Metsähakkeen energiakäytöstä aiheutuvan hiilidioksidipäästön takaisinmaksuaikaa voi ainakin teoriassa pienentää muutamalla tekijällä. Ensimmäinen tekijä ohutläpimittaisen puun valitseminen paksun puun sijaan. Toinen tekijä on etelässä kasvavan puun suosiminen pohjoisessa kasvaneen puun sijaan. Kolmas tekijä on parhaan mahdollisen puulajin valinnalla. (Repo et al. 2012).

Tämäntyyppisen mallinnuksen vertaaminen todellisuuteen on epävarmaa etenkin pidemmillä aikaväleillä, sillä epävarmuustekijät kasvavat ajan myötä. Mallinnus antaa kuvaa puupolttoaineiden takaisinmaksuajasta, etenkin lyhyellä aikavälillä.

4.2 Merten happamoituminen

Merten happamoitumisen pääsyynä pidetään hiilidioksidipäästöjä, joita vapautuu ilmakehään ihmistoiminnan kautta. Kun hiilipitoisia polttoaineita poltetaan energiaksi, hiilidioksidi vapautuu ilmakehään. Osa tästä hiilidioksidista absorboituu meriin. Hiilidioksidin absorboituminen meriin vähentää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta, mutta samalla happamoittaa meriä. Merten pintaveden happamuus on keskimäärin 30 % suurempi, kuin esiteollisella ajalla. Merten happamoituminen vaikuttaa muun muassa merten biodiversiteettiin. (AMAP).

Metsäbiomassan polttamisesta aiheutuu hiilidioksidipäästöjä. Hiilidioksidi sitoutuu ajan myötä takaisin puuainekseen. Tämä saattaa kuitenkin viedä Suomessa vuosikymmeniä (Sepälä et al. 2015).

4.3 Otsonikato stratosfäärissä

Metsäteollisuudella on joitakin päästöjä, joilla on vaikutuksia yläilmakehän otsonikatoon. Metsämaasta on todettu vapautuvan dityppioksidia biologisten prosessien seurauksena (Riikonen, Vapaavuori 2005). Dityppioksidi on otsonikatoa aiheuttava aine (Portmann et al. 2009). Myös puun poltosta voi syntyä dityppioksidia (Tsupari et al. 2006)

Dityppioksidipäästöt ovat suuremmat lannoitetuilla ja avohakatuilla ja mätätetyillä kangasmetsämailla. Etenkin ojitetulla, ja metsitetyllä suomaalla dityppioksidipäästöt ovat huomattavasti suuremmat, kuin kangasmetsillä. Tuhkalannoitus lisää ojitetun ja sekä ojitetun, että metsitetyn maan dityppioksidipäästöjä. (Riikonen, Vapaavuori 2005).

Tilastokeskus löytyy tilastointia LULUCF-sektorin kasvihuonekaasujen, mukaan lukien dityppioksidin CO₂-ekv. päästölukemia (liite I). Alla olevassa taulukossa tilastokeskuksen ar-

vot muutettuna takaisin massayksikköön ”tuhatta tonnia” jakamalla tilastoitu arvo typpidioksidin GWP-arvolla (”global warming potential”) eli ilmastolämmittämispotentiaaliker-toimella 298 (Tilastokeskus 2018a). Alkuperäinen taulukko on liitteissä (liite I). Taulukkoon 1. on lisätty rivit, joissa on laskettu kokonaisdityppioksidipäästöt LULUCF sektori mukaan luettuna ja metsämaan päästöjen osuus kokonaispäästöistä. Tilastokeskus (2018a) on asetta-nut 2016 vuoden tulosten epävarmuudeksi 51 %. Tuottamismenetelmistä vuoden 2016 tilas-toon Tilastokeskus (2018a) maininnut, että maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsäta-lous (LULUCF) tilastossa raportoidaan puutuotteiden, maastopalojen ja metsäkulotuksen päästöt sekä pellonraivauksen, metsälannoituksen, ojitettujen metsämaiden ja turvetuotanto-alueiden N₂O-päästöt.

Taulukko 1. Suomen dityppioksidipäästöjä (Tilastokeskus 2018b).

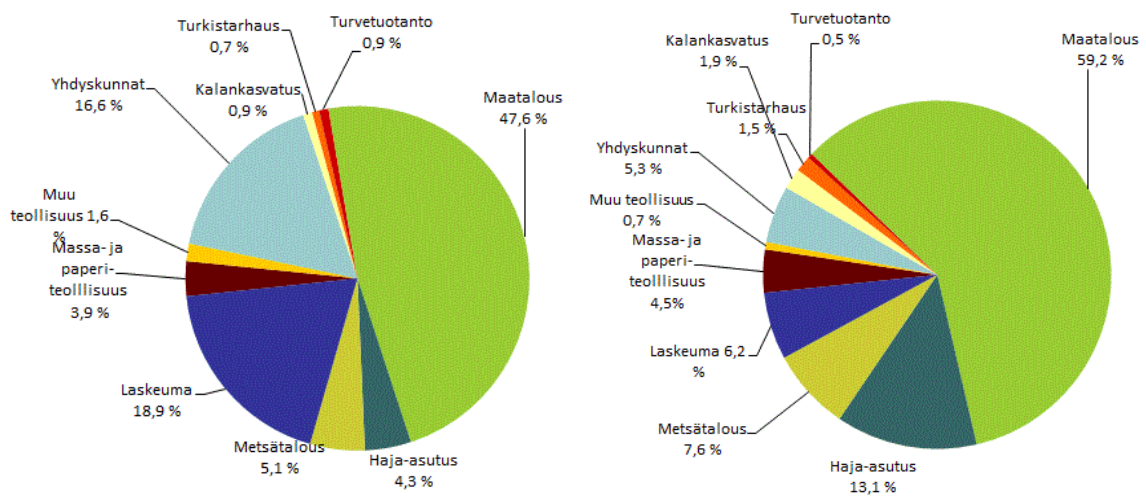
Dityppioksidi (N₂O)

	Päästö, tuhatta tonnia					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Päästöt yhteensä pl. LULUCF-sektori	15,45	15,65	15,78	15,77	15,63	15,73
1 Energiasektori	1,96	1,95	1,87	1,81	1,92	1,88
1A1 Energiateollisuus	0,98	0,99	0,92	0,84	0,89	0,84
1A4c Maa-, metsä- ja kalatalous	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04
3 Maatalous	12,42	12,47	12,68	12,58	12,49	12,58
4 Maankäyttö, maan-käytön muutokset ja metsätalous (LULUCF)	7,02	7,03	7,03	7,02	7,03	7,06
4A Metsämaa	6,59	6,59	6,59	6,58	6,60	6,63
Päästöt yhteensä ml. LULUCF-sektori	22,47	22,68	22,81	22,79	22,66	22,80
Metsämaan osuus ko-konais päästöstä	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29

Tämän laskelman perusteella metsämaat aiheuttavat noin 29 % Suomen dityppioksidipääs-töistä. Suurin päästölähde, eli maatalous kattaa kokonaisdityppioksidipäästöistä yli puolet. Energiasektorin dityppioksidipäästöt ovat pieniä ja metsäenergian osuus siitä tuntematon.

4.4 Häiriöt typpi- ja fosforikierrossa

Typen ja fosforin päätyminen vesistöihin aiheuttaa rehevöitymistä. Rehevöityminen taas aiheuttaa muutoksia vesieliöiden elinolosuhteissa ja siten niillä voi olla vaikutuksia myös alueelliseen biodiversiteettiin. Merenpohjan happipitoisuuden laskua ja muutoksia pohjaeläinyhteisön lajistossa ja runsaudessa mitataan. Niitä pidetään rehevöitymisen epäsuorina seurauksina. (SYKE 2017).



Kuva 6. ja **Kuva 7.** Itämeren typen (vasen) ja fosforin (oikea) päästölähteet (SYKE 2013)

Metsähakkuista aiheutuu typpi- ja fosforikuormitusta vesistöihin. Vesistökuormitus on hajakuormitusta, eli kuormitus leviää laajalle alueelle (Joensuu et al. 2012). ”Metsätaloutta harjoitetaan laajoilla alueilla koko maassa, mikä tekee metsätalouden kuormituksesta merkittävän sen suhteellisen pienestä kuormitusosuudesta huolimatta” (Joensuu et al. 2012). ”Kuormituksen suuruuteen vaikuttavat etäisyys vesistöön, toteutettu toimenpide, kohdealueen ominaisuudet (esim. maaperä ja maan pinnanmuotojen vaihtelut) sekä eroosioon ja virtaamiin vaikuttavat tekijät kuten sademäärä” (Joensuu et al. 2012). Suomen typpivalumista Itämereen noin 5 % ja fosforivalumista noin 8 % oli peräisin metsätaloudesta (SYKE 2013). Joensuu et al. (2012) mukaan metsäenergian korjuulla voidaan vähentää hakkuista johtuvaa ravinnehuuhtoumaa. Kun hakkuutähteet kerätään pois hakkuualueelta, puuaineksessa oleva ravinne ei huuhtoudu pois (Joensuu et al. 2012).

4.5 Globaali makeanveden käyttö

Suomessa on runsaat vesivarat. Suomessa ei ole pulaa makeasta vedestä, sillä sateet ylläpitävät Suomen vesivaroja. Teollisuus käyttää vettä 2,3 km³ suurimpana veden kuluttajana. Koko Suomi käyttää kasteluun vuosittain vain noin 3 % koko maan vedenkulutuksesta. Suomen keskimääräinen sadanta vuodessa on 181 km³. Metsäteollisuus käyttää vettä sellun valmistuksen prosesseissa. Metsien kastelu tapahtuu luonnollisen sadannan avulla. Metsäistutuksia saatetaan joskus kastella. Suomessa vettä käytetään varoihin nähden maltillisesti. (LUKE 2015).

4.6 Maasysteemimuutos ja metsäkato

Suomessa Metsäpinta-ala on pysynyt suurin piirtein samana viimeisen sadan vuoden aikana. Metsäpinta-alan muutokset ovat pieniä koko Suomen metsäpinta-alaan nähden. (LUKE 2018 b, 42).

Maankäytön muutoksella, ja tarkemmin metsämaan poistamisella muuhun käyttöön on merkittävät ympäristölliset vaikutukset. Metsän hakkuut voivat vaikuttavaa paikallisesti biodiversiteettiin. Metsänmaan muuttaminen hiiltä sitovasta metsämaasta kasvihuonekaasulähteeksi tai hiilidioksidia ja metaania ei-sitovaksi vaikuttaa ilmastonlämpenemiseen. Suomessa metsämaata on poistettu, rakentamisen, maatalouden ja turvemaiden tieltä (Kärkkäinen et al. 2019, 69).

Metsämaasta muuhun käyttöön siirtyneiden maiden uusia käyttötarkoituksia pinta-aloittain ei kyetty tähän tutkimukseen löytämään, mutta Suomen LULUCF-sektorin, eli maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous- sektorin kasvihuonekaasupäästöt inventoidaan. Vuosina 2007- 2016 metsäkadosta aiheutuneet kasvihuonekaasupäästöt ovat olleet noin 3,6 milj. t CO₂-ekv vuodessa. 1,9 milj. t CO₂-ekv peräisin viljelysmaaksi muuttamisessa, 1,3 milj. t CO₂-ekv rakennetuksi maaksi, ja 0,2 milj. t CO₂-ekv turvetuotantoon. Metsityksestä on sen sijaan syntynyt alle 0,5 milj. t CO₂-ekv. (Kärkkäinen et al. 2019)

Metsähakkuilla tai metsäteollisuudella ei varsinaisesti ole tekemistä metsämaan muuttumiseen, sillä Suomessa metsäkatoa tapahtuu vain, kun metsämaata muutetaan johonkin muuhun käyttöön (Kärkkäinen et al. 2019).

4.7 Biodiversiteettikato

Suomessa on tehty poliittinen päätös pysäyttää biodiversiteettikato 2020 mennessä. Suomessa joka kymmenes eliölaji on uhanalainen, ja 2020 tavoitteessa pysyminen katsotaan olevan vaikeaa. (SYKE 2015).

Luonnonsuojelualuetta ja erämaata on Suomen pinta-alasta noin 9 %. Se on kansainvälisessä vertailussa lähellä keskiarvolukemaa (SYKE 2015). Luonnon monimuotoisuuden liittyvien tavoitteiden saavuttamiseksi olisi tärkeää, että myös talousmetsissä suojelualueiden lisäksi otettaisiin luonnon monimuotoisuuden turvaaminen paremmin huomioon. (Hyvärinen et al. 2019).

Suomen metsissä merkittävin monimuotoisuuden liittyvä uhkatekijä on vanhan metsän ja kookkaiden puiden väheneminen. Se on ensisijainen syy uhanalaisuudelle ja uhkatekijä noin viidennekselle uhanalaisista metsälajeista. Se on myös tärkein syy neljäsosalle hävinneistä metsälajeista. Niin kutsutuista silmällä pidettävistä lajeista kolmasosalle heikon tilanteen tai tulevaisuuden uhan syynä on vanhan metsän ja kookkaan puun väheneminen. Lahopuun puute on lähes yhtä yleinen uhkatekijä ja syy uhanalaisuudelle, kuin vanhan metsän ja kookkaan puun väheneminen. Muita syitä on muun muassa rakentaminen, joidenkin lehtipuiden kannan väheneminen ja ilmastonmuutos. (Hyvärinen et al. 2019).

Uhanalaisuustekijäraportissa mainittiin metsätaloustoimien ja etenkin vanhan puuston ja lahoppuun vähenemisen olevan uhka ja syy uhanalaisuudelle myös suolla elävillä lajeilla, kallioilla elävillä lajeilla ja jäkälillä. Jäkälille ja kallioilla eläville lajeille metsätaloustoimet olivat ensisijainen uhanalaisuuden syy. (Hyvärinen et al. 2019).

4.8 Aerosolikuormitus

Puun poltosta, etenkin pienpoltosta vapautuu pienhiukkasia, jotka ovat terveydelle haitallisia. Terveyshaittoja muun muassa hengityssairaudet, sydän- ja verenkiertoelimistösairaudet. (THL 2016).

Suurin pienhiukkasten päästölähde Suomessa on muun muassa kotitalouksissa tapahtuva puun pienpoltto. Biomassan poltto vaikuttaa ympäristön pienhiukkaspäästöihin kolmeen ryhmään luokituvilla aineilla, joita on savukaasuissa. Ensimmäinen ryhmä pitää sisällään hiilipitoisen kiinteän aineksen eli noen. Toinen ryhmä koostuu kondensoituvista orgaanisista yhdisteistä eli tervasta. Kolmas ryhmä koostuu epäorgaanisista yhdisteistä, jotka ovat yleensä suoloina. Primääristen päästöjen lisäksi, sekundäärisiä orgaanisia aerosoleja (SOA) voi muodostua ilmakehässä haihtuvista orgaanisista yhdisteistä (VOC). Palamisolosuhteet vaikuttavat merkittävästi orgaanisten aerosolien muodostumiseen. Mitä täydellisempää palaminen on, sitä vähemmän orgaanisia aerosoleja muodostuu. (Nussbaumer 2017). Savukaasujen puhdistustekniikalla ja polttotekniikan valitsemisella voidaan vaikuttaa aerosoli- ja pienhiukkaspäästöihin (Sippula 2010).

Metsät tuottavat haihtuvia hiiliyhdisteitä (VOC), jotka vaikuttavat aerosolien muodostumiseen. Aerosolit vähentävät maapallon pinnan lämpösäteilyä heijastamalla auringon säteilyä takaisin avaruuteen ja vaikuttamalla pilvien muodostumiseen. (Kalliokoski 2015).

Metsänhoidolla vaikutetaan myös ilmasto viilentävien aerosolien muodostumiseen muun muassa ikärakennetta ja puulajisuhteita muuttamalla. Rehevämpiä kasvupaikkojen lehtipuumetsiköt lisäävät aerosolien muodostumista. Lehtipuut viilentävät ilmasto havupuita enemmän, vaikka havumetsät sitovat enemmän kiertoajan aikana enemmän hiilidioksidia. Metsien aerosoli ja albedo vaikutuksiin liittyvä tieteellinen ymmärrys on kuitenkin vasta kehittymässä. (Seppälä et al. 2015).

4.9 Kemiallinen saaste

Suomen merkittävimmät raskasmetallipäästöt johtuvat fossiilisten polttoaineiden poltosta.

Puuaineksen poltosta ei vapaudu ei ole käytännössä lainkaan raskasmetalleja, eikä radioaktiivisia aineita (Antikainen et al. 2007). Metsien tuhkalannoituksessa voi vapautua raskasmetalleja maaperään. Tuhkalannoitteen raskasmetallipitoisuudelle on kuitenkin asetettu raja-arvo lailla ja asetuksilla (Huotari 2012). ”Tuhkalannoituksen vaikutukset maan raskasmetallipitoisuuksiin riippuvat sekä tuhkassa olevista pitoisuuksista että käytetystä tuhkamäärästä. Myös eri raskasmetallien liukoisuus vaihtelee suuresti” (Huotari 2012).

Ihmisperäisiä orgaanisia yhdisteitä ei olla (Rockström et al. 2009.) julkaisussa määritelty tarkemmin, joten niiden osalta ei olla löydetty tietoa, jota voisi tähän tutkimukseen soveltaa. Joitakin haihtuvia orgaanisia yhdisteitä syntyy puun epätäydellisessä palamisessa, mutta ne on käsitelty jo kappaleessa 4.8

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA KESKUSTELUA

Metsähakkeen kokonaisilmastovaikutukset selviävät tulevaisuudessa, kun esimerkiksi metsien aerosolivaikutuksiin saadaan enemmän selvyyttä. Metsähakkeen ja puupolttoaineen ilmastotarkastelussa olisi hyvä ottaa huomioon asetetut valtiolliset tavoitteet olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä, ja niitä vasten pohtia onko puupolttoaineiden käytöllä, tai niiden käytön lisäämisellä tarpeeksi suuria ilmastohyötyjä esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden käyttöön nähden, kun huomioidaan metsähakkeen verrattain pitkä 20-50 vuoden takaisinmaksuaika. Ei voida myöskään yksiselitteisesti väittää, että puupolttoaineiden lisäämisellä korvattaisiin yksinomaan fossiilisia polttoaineita. Metsähakkeen hiilineutraalisuuden määritelmä on syystäkin kyseenalaistettu viime aikoina. Lähtökohtaisesti metsähake on hiilineutraalia Suomen valtiollisesta näkökulmasta pitkällä tarkasteluvälillä. Alueellisen hiilivajeen takaisinmaksuaika on kuitenkin Suomessa melko suuri esimerkiksi nykyisiin ilmastotavoitteisiin nähden. Biomassan osuuden lisääminen tuskin tuo suuria kasvihuonekaasupäästösäästöjä juuri lyhyen aikajakson tarkastelussa. Johtopäätöksiin siitä, onko metsähakkeen käytöllä vaikutuksia ilmastomuutokseen ei kyetty yksiselitteisesti todistamaan tässä työssä. Metsähakkeen käytön kokonaisilmastovaikutuksiin liittyvä tutkimus on vielä kesken.

Puun poltosta syntyvän hiilidioksidin sitoutuminen pois ilmakehästä saattaa viedä jonkin verran aikaa ja on todennäköistä, että kuten muistakin maailman hiilidioksidipäästöistä,

myös metsähakkeen polton hiilidioksidipäästöistä osa päätyy meriin. Tämä aiheuttaa merten happamoitumista. Metsähakkeen käytöllä voidaan siis ajatella olevan vaikutusta merten happamoitumiseen.

Dityppioksidin merkittävyys stratosfäärin otsonikadon kannalta jäi tämän työn tarkastelussa epäselväksi. Dityppioksidi tiedetään olevan merkittävä kasvihuonekaasu, mutta nyt se on todettu olevan myös merkittävin otsonikatoa aiheuttava ihmisen toiminnasta syntyvä päästö. Metsäteollisuuden toiminta, etenkin metsänhoitotoiminta, kuten esimerkiksi ojitus kasvattaa metsämaan dityppioksidipäästöjä. Tämän takia metsähakkeen käytöllä, osana metsän käytön kokonaisuutta, voidaan ajatella olevan vaikutusta stratosfäärin otsonikatoon.

Metsäteollisuus kattaa noin 8 % Suomen Itämereen päätyvästä fosforikuormituksesta ja noin 5 % Suomen Itämereen päätyvästä typpikuormituksesta. Päästöt ovat peräisin muun muassa hakkuista, ja lannoituksesta. Hakkuiden osalta voidaan ajatella, että polttoainebiomassalla on ainakin pieni vaikutus typen ja fosforin kiertoon. On kuitenkin todettu, että metsätähteen korjuulla voidaan vähentää hakkuista johtuvaa ravinnekuormitusta. Kaiken kaikkiaan metsähakkuilla on vaikutusta typpi- ja fosforikuormitukseen, joten myös metsähakkeen käytöllä on vaikutusta siihen.

Suomessa on suuret makean veden varannot ja maanlaajuinen vedenkäyttö on maltillista käytössä oleviin vesivaroihin nähden. Metsähakkeen elinkaaren aikana vettä ei juurikaan käytetä. Tämän takia makeanveden käyttöön suomalaisella metsähakkeen käytöllä ei ole vaikutusta. Suomen vesivarat, eivät ole uhattuna metsähakkeen käytön takia. Täten myöskään makeanveden käytön planeettaraja ei ole uhattuna.

Suomen metsäteollisuuden toimista ei aiheudu metsäkatoa. Suomessa metsäkatoa tapahtuu, kun metsämaita muutetaan johonkin muuhun käyttöön, esimerkiksi rakennetuksi maaksi, tai maatalousmaaksi. Siten voidaan ajatella, että metsäkadon aiheuttajana on jokin muu tekijä, kuin metsäteollisuus tai metsähakkeen tuotanto. Metsähakkeen tuotannolla tai hyödyntämisellä ei ole vaikutusta maasysteemimuutokseen tai metsäkatoon Suomessa.

Metsäteollisuudella on vaikutuksia biodiversiteettiin. Suomessa on puutetta vanhasta metsästä ja lahoppuusta, joita useat Suomessa uhanalaiset ja silmälläpidettävät lajit suosivat. Tämä johtuu siitä, että metsiä hakataan Suomessa suhteellisen intensiivisesti ja varhaisessa vaiheessa, ennen kuin ne ovat ehtineet ikääntyä kunnolla. Biodiversiteetin kannalta olisi tärkeää, että Suomessa olisi enemmän ikääntynyttä metsää, ja että myös talousmetsissä huomioidaisiin luonnon monimuotoisuus paremmin. Biodiversiteetti on selkein metsähakkeen tuotannon uhkaama planeettaraja.

Metsähakkeen polttoainekäytöllä voi olla suuret aerosolipäästöt. Etenkin puupolttoaineen pienpoltolla, eli esimerkiksi kotitalouksissa ja pienissä voimaloissa poltetulla puupolttoaineella aerosoli- ja pienhiukkaspäästöt ovat suuret. Metsähakkeen polttamisesta syntyvien aerosolien terveysriski on suuri. Pienhiukkasten määrää vähenee, kun palamisolosuhteet paranevat. Metsistä vapautuvien aerosolien vaikutusta esimerkiksi sääsystemeihin tai ilmastomuutokseen ei vielä tiedetä. Puun polton pienhiukkas-, ja aerosolipäästöjen osalta on kuitenkin selvää, että metsähakkeen poltolla on vaikutuksia aerosolien planeettarajaan

Metsäteollisuudella ei ole suuria raskasmetallipäästöjä tai radioaktiivisen aineiden päästöjä. Suurin riski raskasmetallien suhteen on tuhkanlannoitteen käytössä. Lannoitteen raskasmetallipitoisuuksia kuitenkin valvotaan. Orgaanisia kemiallisen saasteen osalta ei voida sanoa, sillä julkaisussa (Rockström et al. 2009) ei olla määritelty, mitä nämä aineet tarkalleen ottaen ovat. Metsälannoituksen raskasmetallipäästöt ovat niin vähäisiä, että tässä työssä on päätelty, etteivät ne uhkaa kemiallisen saasteen planeettarajaa.

Metsähakkeen käytöllä on tämän työn perusteella vaikutuksia Merten happamoitumiseen, otsonikatoon stratosfäärissä, häiriöihin typpi- ja fosforikierrossa, biodiversiteettikatoon, ja aerosolikuormitukseen. Metsähakkeen käytöllä ei ole vaikutuksia makeanveden varoihin, maasysteemimuutokseen tai metsäkatoon, eikä kemialliseen saasteen planeettarajaan. Ilmastomuutoksen osalta ei päästy tässä työssä yksiselitteisiin johtopäätöksiin.

6 YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen lähtökohtana oli planeettaraja-ajattelun soveltaminen Suomessa käytetyn metsähakkeen ympäristövaikutusten arvioinnissa. Tutkimuksessa pyrittiin kirjallisuutta tutkimalla kvalitatiivisiin arvioihin siitä, mihin eri planeettarajoihin metsähakkeen hyödyntämisellä on vaikutusta, ja mihin sillä ei ole vaikutusta. Työssä valittiin biomassan lajiksi metsähake. Kasvatus, hakkuut, ja poltto valittiin arvioitaviksi elinkaaren osiksi. Työn tavoitteena oli saada kokonaisvaltaisempaa kuvaa metsähakkeen kokonaisympäristövaikutuksista. Lisäksi työssä oli tarkoituksena arvioida, kuinka kestävä metsähakkeen energiakäyttö Suomessa on.

Metsähakkeen energiakäytöllä on vaikutuksia kuuteen planeettarajaan. Nämä planeettarajat ovat merten happamoituminen, otsonikato stratosfäärissä, aerosolikuormitus, häiriöt typpi- ja fosforikierrossa ja biodiversiteettikato. Kolmeen planeettarajaan, eli maasysteemimuutokseen ja metsäkatoon, makeanveden käyttöön tai kemialliseen saasteeseen metsähakkeen käytöllä ei ole vaikutusta, tai vaikutus on hyvin pieni. Metsähakkeen käytön vaikutuksia ilmastomuutokseen on hyvin vaikea määrittää. Metsähakkeen käytön ilmastovaikutusten arviointi vaatii vielä lisätutkimusta. Hiilineutraalisuuden määritelmään etenkin biomassan tapauksessa vaikuttaa hyvin monta eri tekijää. Lopputulosta ei olla ilmastomuutoksen osalta tehty tässä tutkimuksessa.

Jatkotutkimusta tarvitaan metsähakkeen kokonaisilmastovaikutusten arvioinnissa. Lisäksi planeettaraja-ajattelun viitekehyksellä voisi tutkia myös muita energialähteitä. Tämä tekisi sijaa energialähteiden kokonaisympäristövaikutusten vertailulle. Myös planeettaraja-ajattelun viitekehystä voisi kehittää ympäristövaikutusarviointiin sopivammaksi. Planeettaraja-ajattelun hyödyntäminen ei tämän työn pohjalta vaikuta kovin tehokkaalta menetelmältä arvioida yksittäisen valtion yksittäisen energiantuotantomuodon ympäristövaikutuksia. Planeettaraja-ajattelu sopii nimensäkin mukaisesti paremmin globaalin mittakaavan tarkasteluihin.

LÄHTEET

AMAP. Arctic Ocean Acidification Assessment: Key Findings. [verkkoaineisto]. [viitattu: 3.9.2019]. Saatavissa: [https://www.ymp.fi/fi-FI/Kansainvalinen_yhteistyö/Arktisen_ja_Barentsin_alueen_yhteistyö/Arktiset_meret_happamoituvat\(10091\)](https://www.ymp.fi/fi-FI/Kansainvalinen_yhteistyö/Arktisen_ja_Barentsin_alueen_yhteistyö/Arktiset_meret_happamoituvat(10091))

Antikainen et al. 2007. Bioenergian tuotannon uudet haasteet Suomessa ja niiden ympäristönäkökohdat – Nykytilakatsaus. [verkkoaineisto]. [Viitattu: 31.8.2019] Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/39770/SYKEra_11_2007.pdf?sequence=1

Huotari Noora. 2012. Tuhkan käyttö metsälannoitteena. [verkkoaineisto]. [viitattu: 2.9.2019]. Saatavissa: http://www.metla.fi/julkaisut/isbn/978-951-40-2371-2/tuhkan_kaytto-metsalannoitteena.pdf

Hyvärinen et al. 2019. Suomen lajien uhanalaisuus – Punainen kirja 2019. [verkkoaineisto]. Suomen ympäristöministeriö & Suomen ympäristökeskus [viitattu: 2.9.2019]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/299501>

Joensuu et al. 2012. Metsätalouden vesiensuojelu -Metsätalouden vesiensuojelu -kouluttajan aineisto. [verkkoaineisto]. [viitattu: 4.9.2019]. Saatavissa: https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/metsatalouden_vesiensuojelu_kouluttajan_aineisto.pdf

Kalliokoski Tuomo. 2015. Ilmastonmuutos ja biotalous – Metsäsektorilla vaaditaan paradigman muutosta. [verkkoaineisto]. [Viitattu: 30.8.2019]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/aika-kauskirja/full/ff15/ff154247.pdf>

Kärkkäinen et al. 2019. Maankäyttösektorin toimien mahdollisuudet ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. [verkkoaineisto]. [viitattu: 4.9.2019]. Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161339/67-2018-MISA.pdf>

LUKE. 2019. Puun energiakäyttö. [verkkoaineisto]. [viitattu: 3.9.2019]. Saatavissa: <https://stat.luke.fi/puun-energiakaytto>

LUKE. 2018a. Puun energiakäyttö uuteen ennätykseen. [verkkoaineisto]. [viitattu: 3.9.2019]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/uutiset/puun-energiakaytto-uuteen-ennatykseen-2017/>

LUKE. 2018b. Ruoka- ja luonnonvaratilastojen e-vuosikirja 2018. [E-kirja]. [viitattu: 3.9.2019]. Saatavissa: <http://jukuri.luke.fi/handle/10024/543214>

LUKE. 2018c. Metsätalousmaan kehitys 1920-luvulta lähtien nykyisen Suomen pinta-alalle laskettuna. [verkkoaineisto]. [viitattu: 3.9.2018]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/metsa/metsavarat-ja-metsasuunnittelu/metsavarat/>

LUKE. 2015. Metsä: monikäyttö ja ekosysteemipalvelut. [verkkoaineisto] [viitattu: 4.9.2019] Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/520558>

Maa- ja Metsätalousministeriö a. Puupolttoaineet energian tuotannossa. [verkkoaineisto]. [viitattu: 3.9.2019]. Saatavissa: <https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/puun-energiakaytto>

Maa- ja Metsätalousministeriö b. Metsäteollisuus Suomessa. [verkkoaineisto]. [viitattu: 3.9.2019]. Saatavissa: <https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/metsateollisuus-suomessa>

Nussbaumer Thomas. 2017. Aerosols from Biomass Combustion. [verkkoaineisto]. Julkaistu: 14.7.2017. [Viitattu: 2.9.2019] Saatavissa: http://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/07/Nussbaumer_IEA_T32_Aerosol-Report_2017_07_14.pdf

Portmann et al. 2009. Stratospheric ozone depletion due to nitrous oxide: influences of other gases. Julkaistu: Philosophical Transaction of The Royal Society. 367, 1256–1264. [Viitattu: 3.9.2019] Saatavissa: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstb.2011.0377>

Repo et al. 2012. Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. Julkaistu: GCB Bioenergy, 4, 202–212. [Viitattu: 3.9.2019]. Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1757-1707.2011.01124.x>

Riikonen Johanna, Vapaavuori Elina. 2005. Ilmasto muuttuu - mukautuvatko metsät. [verkkoaineisto]. [viitattu: 3.9.2019]. Saatavissa: <http://jukuri.luke.fi/handle/10024/521578>

Rockström et al. 2009. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and society* VOL. 14, NO. 2, ART. 32. Saatavissa: <https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>

Seppälä et al. 2015. Metsien hyödyntämisen ilmastovaikutukset ja hiilinielujen kehittyminen. [verkkoaineisto]. [Viitattu 3.9.2019]. Saatavissa: <https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2018/10/Metsien-hyodyntamisen-ilmastovaikutukset-ja-hiilinielujen-kehittyminen.pdf>

Sippula Olli. 2010. Fine particle formation and emissions in biomass combustion. [verkkoaineisto]. University of Eastern Finland [Viitattu: 2.9.2019]. Saatavissa: <http://www.atm.helsinki.fi/FAAR/reportseries/rs-108.pdf>

SYKE. 2017. Rehevöityminen. [verkkoaineisto]. Päivitetty: 12.1.2018. [viitattu: 4.9.2019]. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Meri/Mika_on_Itameren_tila/Rehevoityminen

SYKE. 2015. Luonnon monimuotoisuus. [verkkoaineisto]. Julkaistu 9.11.2015. [Viitattu 2.9.2019]. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Ympariston_tilan_indikaattorit/Luonnon_monimuotoisuus

SYKE. 2013. Vesistöjen kuormitus ja luonnon huuhtouma. [verkkoaineisto]. Päivitetty: 12.6.2019. [viitattu: 4.9.2019]. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Vesistojen_kuormitus_ja_luonnon_huuhtouma

THL. 2016. Pienhiukkasten vaikutusmekanismit. [verkkoaineisto]. Päivitetty: 25.2.2016. [Viitattu: 3.9.2019]. Saatavissa: <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ilmansaasteet/pienhiukkasten-vaikutusmekanismit>

Tilastokeskus. 2018 a. Laatuseloste: Kasvihuonekaasut. [verkkoaineisto]. [viitattu: 3.9.2019]. Saatavissa:

http://www.stat.fi/til/khki/2016/khki_2016_2018-03-27_laa_001_fi.html

Tilastokeskus. 2018 b. Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa, 1990-2017. [online-tietokanta]. [viitattu: 4.9.2019]. Saatavissa: http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ymp__khki/statfin_khki_pxt_111k.px/

Tsupari et al. 2006. Dityppioksidin (N₂O) ja metaanin (CH₄) päästökertoimia Suomen voimalaitoksille, lämpökeskuksille ja pienpoltolle. [verkkoaineisto]. Viitattu: 3.9.2019. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W43.pdf>

Taulukko 2. Dityppioksidipäästöjä Suomessa (Tilastokeskus 2018b).

	Päästö, tuhatta tonnia CO ₂ -ekv.					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Dityppioksidi (N ₂ O)						
Päästöt yhteensä pl. LULUCF-sektori	4 603	4 664	4 702	4 698	4 659	4 689
1 Energiasektori	583	582	558	539	572	559
1A1 Energiateollisuus	293	296	273	250	264	250
1A4c Maa-, metsä- ja kalatalous	15	15	14	13	14	13
3 Maatalous	3 701	3 715	3 780	3 750	3 721	3 750
4 Maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous (LULUCF)	2 093	2 094	2 094	2 092	2 095	2 104
4A Metsämaa	1 963	1 963	1 963	1 961	1 966	1 977
4B Viljelysmaa	7	8	8	7	7	7
4C Ruohikkoalueet	1	1	1	1	1	1
4D Kosteikot	97	98	98	98	97	95
4G Puutuotteet
4(IV) Epäsuorat N ₂ O päästöt	2	2	2	2	2	2