Metlan työraportteja 240
http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240.htm
ISBN 978-951-40-2378-1 (PDF)
ISSN 1795-150X

Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät

Antti Asikainen, Hannu Ilvesniemi, Risto Sievänen,
Elina Vapaavuori ja Timo Muhonen (toim.)

METLA www.metla.fi

Working Papers of the Finnish Forest Research Institute publishes preliminary research results and conference proceedings.

The papers published in the series are not peer-reviewed.

The papers are published in pdf format on the Internet only.

http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/
ISSN 1795-150X

Office
Post Box 18
FI-01301 Vantaa, Finland
tel. +358 10 2111
fax +358 10 211 2101
e-mail julkaisutoimitus@metla.fi

Publisher
Finnish Forest Research Institute
Post Box 18
FI-01301 Vantaa, Finland
tel. +358 10 2111
fax +358 10 211 2101
e-mail info@metla.fi
http://www.metla.fi/

Authors
Asikainen, Antti, Ilvesniemi, Hannu, Sievänen, Risto, Vapaavuori, Elina ja Muhonen, Timo (toim.)

Title
Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät

Year	Pages	ISBN	ISSN
2012	211	978-951-40-2378-1 (PDF)	1795-150X

Unit / Research programme / Projects
BIO ja MIL / 3432, 3442

Accepted by
Leena Paavilainen, Tutkimusjohtaja ja Taneli Kolström, Tutkimusjohtaja 28.8.2012

Abstract
Raportissa tarkastellaan bioenergian ja ilmastonmuutoksen yhteisvaikutuksia Suomen metsiin ja metsätalouteen kahden Metsäntutkimuslaitoksen tutkimusohjelman ”Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa” ja ” Bioenergiaa metsistä tutkimus- ja kehittämisohjelma” tulosten pohjalla. Raportissa käsitellään

- Metsien roolia globaalissa ja kansallisessa energiahuollossa
- Ilmastoa Pohjois-Suomessa viimeisen 7500 vuoden aikana lustokronologian perusteella
- Energiapuun korjuun vaikutuksia metsiin ja vesistöihin
- Metsäbiomassan lisääntyvän keruun vaikutuksia metsänhoitoon
- Metsäpuiden ja -kasvien sopeutumista ilmastossa tapahtuviin muutoksiin
- Metsien terveyttä ilmastonmuutoksen oloissa
- Energiapuun korjuun vaikutuksia monimuotoisuuteen
- Uusiutuvan energian tukikeinojen kustannustehokkuutta ja päästölupien hinnoittelua
- Hankinnan teknologiaa, logistiikkaa ja hiilidioksidipäästöjä

Lisäksi esitetään skenaarioita puun ja bioenergian käytöstä ja sen vaikutuksesta metsien puu- ja hiilivaroihin. Raportin johtopäätöksiä ovat:

- Suomen energia- ja ilmastopolitiikassa metsille asetetut korkeat tavoitteet ovat saavutettavissa sekä uusiutuvan energian tuotannon että ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta.
- Puubiomassan tuotantoa ja käyttöä on oikein suunnitellen mahdollista kasvattaa merkittävästi ilman että metsien hiilinielua ja luonnon monimuotoisuutta vaarannetaan.
- Monet näköpiirissä olevat muutokset ovat Suomen metsätalouden kannalta myönteisiä: Ilmastonmuutos lisää metsien kasvua ja parantaa biotalouden raaka-ainepohjaa. Metsiämme voidaan käyttää alueellisesti eri tavoin, ja niitä riittää tulevaisuudessa sekä tehokkaaseen hyödyntämiseen että suojeluun.
- Energiantuotantoon liittyvän biotalouden kehittäminen tarjoaa meille taloudellisia mahdollisuuksia myös globaalisti hyödynnettävissä olevien biomassojen hankinta- ja polttoteknologioiden kehittäjänä ja valmistajana.
- Ilmastonmuutoksen kielteisiin vaikutuksiin, kuten sään ääri-ilmiöistä aiheutuviin riskeihin sekä tauti- ja hyönteistuhoriskeihin, voidaan varautua ja niitä voidaan hillitä käytössä olevia metsänhoito-ohjeita noudattamalla.
- Koska pitkällä aikavälillä tapahtuvia suuriakin muutoksia on vaikea havaita, on myös tulevaisuudessa huolehdittava metsien tilan seurannasta.
- Käytännön toiminnassa on huomioitava lisääntyvästä bioenergian korjuusta aiheutuvat riskit metsien kasvun ja metsätuhojen osalta. Niihin voidaan vaikuttaa oikealla biomassan talteenoton suunnittelulla ja toteutuksella.
- Oikealla hinnoittelulla ja muilla ohjauskeinoilla metsävaramme riittävät metsäteollisuuden ja energiantuotannon raaka-aineeksi, ja oikeat jakeet voidaan kohdentaa oikeaan käyttötarkoitukseen.

Keywords
bioenergia, ilmastonmuutos, metsät, metsätalous

Available at
http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240.pdf

Replaces

Is replaced by

Contact information
Risto Sievänen, Metsäntutkimuslaitos PL 18, 01301 Vantaa. Sähköposti risto.sievänen@metla.fi

Other information

Sisällysluettelo

Kirjoittajat 9

Esipuhe 10

1 Metsät energia- ja hiilitaloudessa

1.1 Ilmastonmuutos ja biomassat 12
Hannu Ilvesniemi

1.1.1 Biomassan rooli energiantuotannossa 14
Metsäbiomassat 14
Maatalousbiomassat 15

1.1.2 Johtopäätökset 15

Kirjallisuus 16

1.2 Suomen metsäala osana globaaleja ilmasto- ja energiakysymyksiä 17
Lauri Hetemäki

1.2.1 Energia- ja ilmastopolitiikka vaikuttaa metsien käyttöön? 17

1.2.2 Bioenergian käytön lisäämisen vaiheet Suomessa 18

1.2.3 Metsien energiakäyttö on monipuolista 18

1.2.4 Metsiin perustuvan energian vientinäkymät 20

1.2.5 Energiatuotannon jalostusarvo kasvussa 20

1.2.6 Uusia välineitä tulevaisuuden arvioimiseen 22

Kirjallisuus 23

1.3 Suomen metsäenergia- ja hiilivarat ja niiden käyttö ilmastonmuutokseen sopeutumisessa 24
Risto Sievänen, Antti Asikainen, Elina Vapaavuori, Hannu Ilvesniemi

1.3.1 Metsien energiakäyttö ja energiavarat 24

1.3.2 Metsien hiilivarat 26

1.3.3 Ilmastonmuutos lisää Suomen metsien kasvua ja hiilivarastoa 27

1.3.4 Näkökulmia metsien energiakäyttöön ja ilmastonmuutoksen hillintään 27

1.3.5 Johtopäätökset 28

Kirjallisuus 29

2 Metsien reagointi energia- ja hiilitaloudessa

2.1 Ilmastonmuutokset ja niiden syyt puulustojen ja muiden proksitietojen pohjalta 32
Kari Mielikäinen, Mauri Timonen ja Samuli Helama

2.1.1 Puut ilmaston ja ympäristönmuutosten tulkkina 34
Puun kasvu ja ilmastosignaali 34
Lustosarjan luonti ja standardointi 34
Divergenssi – ongelma vai mahdollisuus? 37

2.1.2 Mitä lustoaikasarjat kertovat menneestä ilmastosta? 38
Männyn lustokronologiat Lapissa 38
Viimeisten tuhannen vuoden ilmasto puulustoista tulkittuna 39

2.1.3 Pitkäaikaisten ilmaston muutosten syyt ... 41
Aurinko ja avaruusperäiset tekijät ... 41
Termohaliinikierto ... 43
Ilmaston syklisyys ... 44
2.1.4 Onko Suomen ilmasto muuttunut 1900-luvulla? ... 45
Kasvutrenditutkimuksia ... 45
Suomen metsien kasvun lisääntymisen syyt ... 46
Fenologiset havainnot ja puiden kasvun alkaminen ... 47
2.1.5 Ilmastoennusteet ... 47
Ilmaston vaihtelut 1900-luvulla ... 47
Vaihtoehtoisia ilmastoennusteita ... 48
2.1.6 Johtopäätökset ... 49
Kirjallisuus ... 50

2.2 Energiapuun korjuun vaikutukset metsiin ja vesistöihin ... 53
Hannu Ilvesniemi, Markus Hartman, Jyrki Hytönen, Ari Lauren, Annu Kaila, Marjatta Kantola, Oili Kiikkilä, Jiri Kremsa, Eero Kubin, Martti Lindgren, Antti-Jussi Lindroos, Mikko Moilanen, Tanja Murto, Mika Nieminen, Tiina M. Nieminen, Timo Penttilä, Juha Piispanen, Anna Saarsalmi, Aino Smolander, Pekka Tamminen ja Liisa Ukonmaanaho
2.2.1 Miksi energiapuuta korjataan metsistä ... 53
2.2.2 Hakkuutähteiden korjuun vaikutus kivennäismaiden metsien maaperän ravinnevarastoihin ... 54
2.2.3 Hakkuutähteiden korjuun vaikutus puuston kasvuun ... 57
2.2.4 Pystyykö maan mineraalien rapautuminen korvaamaan hakkuutähteiden korjuun aiheuttaman ravinnepoistuman? ... 58
2.2.5 Energiapuun korjuu turvemailta – tietoa vaikutuksista on vielä vähän ... 59
2.2.6 Kasvupaikalta poistuvien ravinteiden korvaaminen lannoituksella ... 61
2.2.7 Hakkuutähteiden ja kantojen korjuun vaikutus ravinteiden ja muiden aineiden huuhtoutumiseen ... 63
Hakkuiden ja hakkuutähteiden korjuun vaikutukset pohjaveteen ... 63
Kannonnoston vaikutus valuma-alueelta huuhtoutuvan veden laatuun ... 65
Hakkuutähteiden määrän vaikutus maaveden ominaisuuksiin ... 65
Kokopuun korjuun aiheuttamat vesistövaikutukset turvemailla ... 67
2.2.8 Bioenergian korjuun vaikutus metsämaan hiilitaseeseen ja maahengitykseen ... 71
Energiapuun korjuun vaikutukset maaperän hiilivuohon ... 72
2.2.9 Yhteenveto ... 75
Kirjallisuus ... 80

2.3 Metsäbiomassan lisääntyvä käyttö muuttaa metsänhoitoa ... 83
Timo Saksa, Jari Hynynen, Jyrki Hytönen ja Pentti Niemistö
2.3.1 Latvusbiomassan ja kantojen energiakäytön vaikutukset metsänuudistamiseen ja taimikon kehitykseen ... 84
Muokkaustyö helpottuu – logistiset haasteet kasvavat ... 84
Etenkin lehtipuun taimettuminen lisääntyy ... 85
2.3.2 Energiapuun kasvatus osana metsänhoitoa ... 86
Energia- ja ainespuun yhdistetty kasvatus ... 86
Energiapuun kasvatus erikoiskohteissa ... 89
2.3.3 Ilmastonmuutoksen huomioon ottaminen metsänhoidossa ... 91
Hiilivarastoja vai ilmastonmuutoksen hillintää ... 91
Metsänhoidon keinoja ilmastonmuutokseen sopeutumisessa ... 94

2.3.4 Johtopäätökset 95

Kirjallisuus 95

2.4 Metsäpuiden ja -kasvien sopeutuminen nyt ja tulevaisuudessa 97
Elina Vapaavuori, Pertti Pulkkinen, Matti Haapanen, Heljä-Sisko Helmi- saari, Hannu Ilvesniemi, Leila Korpela, Eero Kubin, Jaana Leppälammi-Kujansuu, Kari Mikkola, Jorma Pasanen, Jarmo Poikolainen, Pasi Rautio, Tapani Repo, Marja Roitto, Matti Rousi, Maija Salemaa, Markku Tamminen, Pekka Tamminen, Tiina Tonteri ja Saila Varis

2.4.1 Miten metsäpuut sopeutuvat muuttuvaan ilmastoon? 98
Geenivirta edistää sopeutumista 98
Sään vuodenaikaisvaihtelu boreaalisilla alueilla asettaa sopeutumisen raamit 100

2.4.2 Miten sopeutuminen näkyy nykymetsissä? 102
Fenologiahavainnot kertovat lämpenemisestä 102
Miten metsän aluskasvillisuus sopeutuu muutoksiin? 103

2.4.3 Näkökulmia metsäpuiden ja –kasvillisuuden sopeutumiseen tulevaisuudessa 109
Kuivuus ja tulva – riskejä metsien kasvulle 109
Maaperän routaantuminen muuttuu – vaikutuksia puiden juuristoon? 111
Metsänjalostuksen mahdollisuudet ilmastonmuutokseen varautumisessa 114

2.4.4 Johtopäätökset 115

Kirjallisuus 116

2.5 Metsien terveys 121
Michael Müller, Jarkko Hantula, Heikki Henttonen, Otso Huitu, Juha Kaitera, Juho Matala, Seppo Neuvonen, Tuula Piri, Risto Sievänen, Heli Viiri ja Martti Vuorinen

2.5.1 Ilmastonmuutoksen vaikutukset abioottisiin tuhoihin 122
Tuulituhot lisääntyvät ja lumituhot vähentyvät 122
Metsäpalojen määrä riippuu hellejaksoista 122
Yllätykselliset ravinnehäiriöt mahdollisia 122

2.5.2 Ilmastonmuutos suosii monia puiden tauteja 123
Sateet, ilmankosteus ja kaste ovat sienitautien kannalta merkityksellisiä 124
Talven pituus ja lämpötila – nollan tuntumassa muutamankin asteen ero vaikuttaa 124
Kasvukauden lämpösumma ja hellejaksot 125
Juurikääpä – pahin nykyisistä taudeistamme leviää nykyisestä 125
Mesisienivahingot runsastuvat, jos hellejaksot yleistyvät 128
Sateet ja ilman kosteus vaikuttavat surmakan, karisteiden sekä ruosteiden esiintymiseen 128
Heikosti tunnetut endofyyttisienet 130
Tulokas- ja vieraslajien aiheuttama riski kasvaa 130

2.5.3 Ilmastonmuutoksen vaikutukset hyönteistuhoihin 131
Osa lajeista hyötyy ilmastonmuutoksesta, eivät kaikki 131
Hyötyvätkö mäntypistiäiset? 132
Kirjanpainajatuhot lisääntyvät 133
Tukkimiehentäi ja lisääntynyt bioenergian korjuu 134
Lisää uusia tuholaisia tulossa 134

2.5.4 Myyräkantojen vaihtelu saattaa heiketä 135

2.5.5 Hirvieläinten levinneisyys muuttuu 137

2.5.6 Havaittavissa olevat ilmastonmuutoksen seuraukset 138

2.5.7 Tauti- ja tuhoriskien minimointi 139
Puulajiston monipuolistaminen 139
Abioottisten tuhojen torjunta 141
Juurikäävän torjunta yhä tärkeämpää 141
Energiapuunkorjuu edellyttää huolellisuutta jotta juurikääpätuhot eivät lisääntyisi 142

Muiden sienitautien torjunta 144
Vieraslajien torjunta – haaste kansainvälisen taimi- ja puutavarakaupan valvonnalle 144
Hyönteistuhojen torjunta 145
Myyrätuhojen torjunta 145
Hirvieläintuhojen torjunnassa kantojen säätely keskeistä 145

2.5.8 Johtopäätökset 146

Kirjallisuus 147

2.6 Monimuotoisuus 154
Juha Siitonen

2.6.1 Kasvillisuus 154

2.6.2 Lahopuusta riippuvaiset eliöt 156
Metsätalouden vaikutus lahopuulajistoon 156
Hakkuutähteiden ja hakkuukantojen korjuu muuttaa lahopuulajien määrää 157
Riittävästä lahopuun määrästä tulee huolehtia 159

2.6.3 Maaperäeliöstö 159
Metsätalous ja bioenergian korjuu muuttavat maaperäeliöstön elinoloja 160

2.6.4 Johtopäätökset ja suositukset 160

Kirjallisuus 161

3 Metsäenergian tukipolitiikka sekä teknologia ja logistiikka

3.1 Uusiutuvan energian tukikeinon valinnalla on merkitystä 165
Jussi Lintunen, Jussi Uusivuori, Hanna-Liisa Kangas ja Matti Mäkelä

3.1.1 Tuotantotuki kustannustehokas ohjauskeino 165

3.1.2 Tukipolitiikka lisää puun energiakäyttöä 166

3.1.3 Ohjautuuko kuitupuuta energiakäyttöön? 166

3.1.4 Metsäsektorin hiilidioksidipäästöt eivät välttämättä laske tukipolitiikan seurauksena 167

3.1.5 Saattaako tukipolitiikka ajaa kannattamattomiin investointeihin? 167

3.1.6 Hajautettu vs. keskitetty tuotantorakenne 168

3.1.7 Tutkimusta kohdistettava ohjauskeinojen yhteisvaikutuksiin 170

Kirjallisuus 170

3.2 Hankinnan teknologia, logistiikka ja hiilidioksidipäästöt 171
Juha Laitila, Antti Asikainen, Karri Pasanen

3.2.1 Energiapuun haltuunsaanti ja osto 171

3.2.2 Hankinnan, korjuun ja toimitusten ohjaus 172

3.2.3 Metsäenergian korjuu 172
Päätehakkuu 172
Harvennushakkuu 173
Lähikuljetus 174

3.2.4 Metsähakkeen korjuuketjut haketustavan mukaan 174
Käyttöpaikka- ja terminaalihaketus 175
Hajautettu hakkeentuotanto 175
Korjuuketjujen yleisyys 176

3.2.5 Metsäbiomassan kaukokuljetus 176

3.2.6 Metsähakkeen kustannusrakenne ... 177
3.2.7 Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan kehittämistarpeet 2010-luvulla ... 179
3.2.8 Metsähakkeen toimitusketjujen CO_2 –päästöt ... 179
Johtopäätökset ... 182
Kirjallisuus ... 183

4 Skenaariotarkastelu – Puun teollisuus- ja energiakäytön vaikutukset ja ilmasto

4.1 Skenaarioiden lähtökohdat ja kuvaus ... 186
Risto Sievänen, Olli Salminen, Kimmo Ruosteenoja

4.1.1 Puun kysynnän vaihtoehdot ... 186
Ainespuun käyttö ... 186
Energiapuu ... 187
4.1.2 Ilmastonmuutos ... 187
4.1.3 Kolme puun käytön pääskenaariota ... 188
4.1.4 Skenaarioiden tuottaminen MELA-ohjelmistolla ... 189
Kirjallisuus ... 189
Liite 4.1.1Skenaarioiden numeeriset oletukset. ... 190

4.2 Metsävarojen kehitys ja vaikutukset metsätalouteen ... 192
Antti Asikainen, Olli Salminen ja Risto Sievänen

4.2.1 Hakkuukertymä ... 192
4.2.2 Runkotilavuus ja puuston keskitilavuus ... 192
4.2.3 Puuhuolto harvennusleimikoista kasvaa ... 193
4.2.4 Kasvava puuston tiheys aiheuttaa puiden kuolemista ... 196
4.2.5 Skenaariotarkasteluiden yhteenveto ... 196

4.3 Metsien hiilitaseet ... 197
Risto Sievänen, Aleksi Lehtonen, Paavo Ojanen ja Olli Salminen

4.3.1 Menetelmä ... 197
4.3.2 Puunkäyttöskenaarioiden vaikutus ... 198
4.3.3 Kariketuotos ... 200
4.3.4 Energiapuun korjuun vaikutus ... 200
4.3.5 Ilmastonmuutoksen vaikutus ... 201
4.3.6 Tulosten luotettavuudesta ... 202
4.3.7 Päätelmiä ... 203
Kirjallisuus ... 204

4.4 Metsät vuonna 2042 eri skenaariovaihtoehdoissa ... 205
Heikki Henttonen, Otso Huitu, Hannu Ilvesniemi, Juho Matala, Michael Müller, Raisa Mäkipää, Seppo Neuvonen,Timo Saksa, Maija Salemaa, Juha Siitonen, Tiina Tonteri, Elina Vapaavuori ja Risto Sievänen

Kirjoittajat

Matti Haapanen, Jarkko Hantula, Markus Hartman, Heikki Henttonen, Saija Huuskonen, Jari Hynynen, Hannu Ilvesniemi, Annu Kaila, Maarit Kallio, Marjatta Kantola, Oili Kiikkilä, Aleksi Lehtonen, Leila Korpela, Martti Lindgren, Antti-Jussi Lindroos, Tapio Linkosalo, Jussi Lintunen, Kari Mielikäinen, Michael Müller, Raisa Mäkipää, Mika Nieminen, Tiina M. Nieminen, Timo Penttilä, Tuula Piri, Pertti Pulkkinen, Matti Rousi, Anna Saarsalmi, Maija Salemaa, Olli Salminen, Tiina Sauvula-Seppälä, Risto Sievänen, Juha Siitonen, Aino Smolander, Markku Tamminen, Pekka Tamminen, Tiina Tonteri, Liisa Ukonmaanaho, Jussi Uusivuori, Saila Varis

Metsäntutkimuslaitos, Vantaan toimipaikka, PL 18, 01301 VANTAA
sähköposti: etunimi.sukunimi@metla.fi

Perttu Anttila, Antti Asikainen, Juha Laitila, Ari Lauren, Juho Matala, Seppo Neuvonen, Karri Pasanen, Tapani Repo, Marja Roitto, Heli Viiri

Metsäntutkimuslaitos, Joensuun toimipaikka, PL 68 (Yliopistokatu 6) 80101 Joensuu
sähköposti: etunimi.sukunimi@metla.fi

Juha Kaitera, Jiri Kremsa, Eero Kubin, Mikko Moilanen, Tanja Murto, Jorma Pasanen, Juha Piispanen, Jarmo Poikolainen

Metsäntutkimuslaitos, Oulun toimipaikka, PL 413, 90014 Oulun yliopisto
sähköposti: etunimi.sukunimi@metla.fi

Samuli Helama, Kari Mikkola, Pasi Rautio, Mauri Timonen

Metsäntutkimuslaitos, PL 16 (Eteläranta 55), 96301 Rovaniemi
sähköposti: etunimi.sukunimi@metla.fi

Otso Huitu, Timo Saksa, Elina Vapaavuori, Martti Vuorinen

Metsäntutkimuslaitos, Juntintie 154, 77600 Suonenjoki
sähköposti: etunimi.sukunimi@metla.fi

Jyrki Hytönen

Metsäntutkimuslaitos, Kannuksen toimipaikka, Silmäjärventie 2, 69100 Kannus
sähköposti: etunimi.sukunimi@metla.fi

Pentti Niemistö

Metsäntutkimuslaitos, Kaironiementie 15, 39700 Parkano
sähköposti: etunimi.sukunimi@metla.fi

Heljä-Sisko Helmisaari, Jaana Leppälammi- Kujansuu

Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos, PL 27 (Latokartanonkaari 7),
00014 HELSINGIN YLIOPISTO
sähköposti: etunimi.sukunimi@helsinki.fi

Lauri Hetemäki

Euroopan Metsäinstituutti, Torikatu 34, 80100 Joensuu
sähköposti: etunimi.sukunimi@efi.int

Hanna-Liisa Kangas

WWF Suomi, Lintulahdenkatu 10, 00500 Helsinki
sähköposti: hanna-liisa.kangas@wwf.fi

Matti Mäkelä

Maa- ja metsätalousministeriö, Metsäosasto, PL 30 (Hallituskatu 3 A), 00023 Valtioneuvosto
sähköposti: matti.makela@mmm.fi

Esipuhe

Käsillä oleva synteesiraportti pohjautuu kahdessa laajassa Metsäntutkimuslaitoksen tutkimusohjelmassa, Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) ja Bioenergiaa metsistä (BIO), tehtyyn työhön. Näissä vuonna 2007 käynnistyneissä ohjelmissa tutkittiin metsien ja metsätalouden sopeutumista muuttuvaan ilmastoon, metsätalouden keinoja ilmastonmuutoksen hillinnässä sekä metsäenergian käytön vaikutuksia metsien kasvatukseen ja puunhankintaan aina lämpö- ja sähkölaitoksille asti.

MIL –ohjelman tutkimushankkeissa selvitettiin ilmastonmuutoksen biologisia vaikutuksia metsäpuiden ja metsäekosysteemien toimintaan ja niiden kykyä sopeutua muuttuvaan ilmastoon. Tutkimus tuotti biologista perustietoa, jota tarvitaan laadittaessa ohjeita metsien pitkän ajan kestävälle käytölle. Ohjelman tavoitteena oli myös edistää kokonaiskuvan luomista metsäsektorin roolista ilmastoasioissa. Metsävaraennusteita ja metsien kasvihuonekaasutaseita tarkasteltiin kokonaisuutena, jolloin arviointiin otettiin mukaan myös metsäteollisuuden toimet sekä erilaiset metsäpoliittiset ratkaisut ja niiden merkitys.

BIO –ohjelman tavoitteena oli tuottaa tutkimukseen perustuvaa tietoa metsä- ja suobiomassan tuottamisen ja hyödyntämisen perusteista ja seurannaisvaikutuksista metsäluonnonvaraan. Ohjelmassa kehitettiin ekologisesti, taloudellisesti ja sosiaalisesti kestäviä metsänkäsittelymenetelmiä metsäbiomassan tuottamiseksi sekä metsäenergiavarojen kartoitus- ja metsäsuunnittelumenetelmiä ja metsähakkeen hankinnan teknologisia ja logistisia ratkaisuja. Yhteistyössä Metlan muiden tutkimusohjelmien kanssa selvitettiin myös metsäenergian käytön vaikutuksia muun Suomen kasvihuonekaasu- ja energiataseisiin.

Tässä synteesiraportissa tarkastellaan bioenergian keruun ja ilmastonmuutoksen yhteisvaikutuksia BIO ja MIL –ohjelmien tulosten perusteella. Raportissa käsitellään muun muassa

- *Metsien roolia globaalissa ja kansallisessa energiahuollossa*
- *Miten metsät sopeutuvat ilmastonmuutokseen ja bioenergian lisääntyvään korjuuseen ja mitä riskejä näistä aiheutuu metsien terveydelle ja monimuotoisuudelle*
- *Kuinka mennyttä ilmastoa voidaan tarkastella pitkien lustosarjojen avulla*
- *Metsäbiomassan lisääntyvän käytön vaikutuksia metsänhoitoon*
- *Bioenergian tukikeinojen kustannustehokkuutta ja päästölupien hinnoittelua*
- *Metsähakkeen hankinnan teknologiaa ja logistiikkaa*
- *Skenaarioita puun ja bioenergian käytöstä ja sen vaikutuksesta metsien puu- ja hiilivaroihin*

Lyhyt yhteenveto raportista löytyy osoitteesta:
http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/bioenergia-ilmastonmuutos-suomen-metsat.pdf

Ohjelmissa on työskennellyt lukuisa joukko METLAn tutkijoita ja teknistä henkilökuntaa sekä yhteistyökumppaneita eri tutkimusorganisaatioista. Tutkimusohjelmilla on ollut eri alojen asiantuntijoista koostuneet ohjausryhmät, joilla on ollut tärkeä rooli tutkimuksen suuntaamisessa, kehittämisessä ja edistämisessä. Haluamme kiittää kaikkia heitä sekä tutkimustamme rahoittaneita tahoja myötävaikuttamisesta työmme onnistumiseen.

Joensuussa, Suonenjoella ja Vantaalla, syyskuussa 2012

Antti Asikainen, Hannu Ilvesniemi, Risto Sievänen, Elina Vapaavuori ja Timo Muhonen

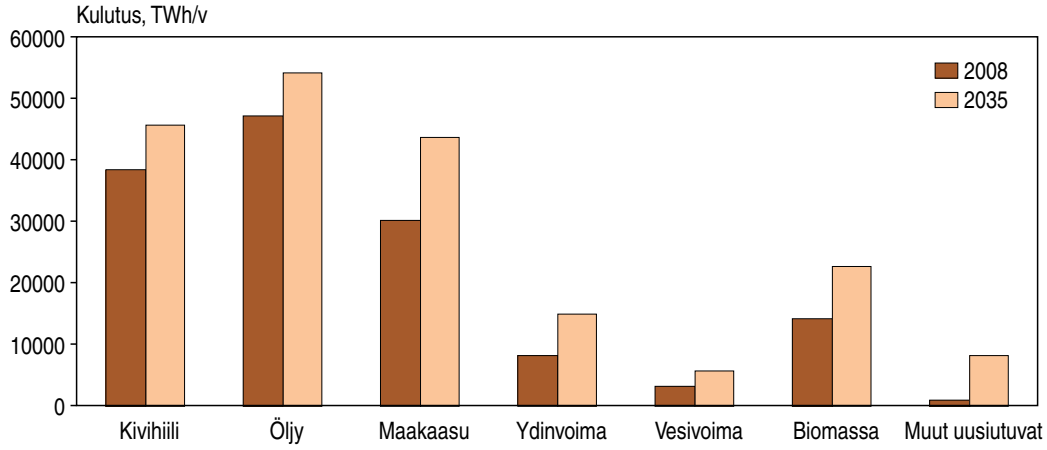
Metsät energia- ja hiilitaloudessa

1

1.1 Ilmastonmuutos ja biomassat

Hannu Ilvesniemi

Maapalloa ympäröivä ilmakehä läpäisee auringon valoa hyvin, mutta pitempiaaltoista lämpösäteilyä, joksi auringon valo muuttuu sen lämmittäessä maan pintaa, huonommin. Ilmakehän kaasuista erityisesti hiilidioksidi, metaani ja typen oksidit ovat tehokkaita lämpösäteilyn pidättäjiä. Tästä syystä sellaiset ihmisen toimet, jotka lisäävät näiden kasvihuonekaasuiksi kutsuttujen yhdisteiden pitoisuutta ilmakehässä, muuttavat myös ilmastoa. Polttamalla tapahtuvassa energiantuotannossa syntyvä hiilidioksidi on määrällisesti ylivoimaisesti suurin ihmistoiminnan tuottama kasvihuonekaasu. Maailman energiantuotannosta noin 80 % tuotetaan fossiilisia polttoaineita, öljyä (29,5 %), kivihiiltä (27 %) ja maakaasua (23,5 %) polttamalla. Tämän lisäksi energiaa tuotetaan polttamalla biomassoja, sekä hyödyntämällä ydinvoimaa ja vesivoimaa. Fossiilisten polttoaineiden käyttö on lisääntynyt koko teollistuneen aikakauden ajan ja ihmiskunnan nykyinen vuotuinen energian käyttö on tällä hetkellä yli 130 000 TWh. Suomen vuotuinen energian kulutus on yli 400 TWh eli 0,3 % vuotuisesta globaalista energian kokonaiskäytöstä. Jos energiankulutus kasvaa nykyisen trendin mukaisesti, vuonna 2050 fossiilisten polttoaineiden vuotuisen käytön on arvioituolevan 165 000 TWh (Kuva 1.1.1). Samassa ajassa biopolttoaineiden käyttö kasvaisi yli 25 000 TWh:iin, ydinvoiman 45 000 TWh:iin, auringon, tuulen ja veden 15 000 TWh:iin (VTT, Energy visions 2050, BP, IEA 2011). Eli vaikka muiden kuin fossilisten polttoaineiden käyttö lisääntyisi merkittävästi, myös fossiilisten polttoaineden vuotuinen käyttö kasvaisi nykyistä käyttötasoa suuremmaksi. Biomassan osuus energian lähteenä on viimeisten vuosikymmenien aikana pysynyt melko vakiona. Jos biomassan käyttö lisääntyy ennustetusti, tämä koko energiahuollon kannalta melko pieni muutos tarkoittaa kuitenkin lähes 60 % lisäystä bioenergian tuotantoon sen nykytasoon verrattuna.



Kuva 1.1.1. Ennuste maailman primäärienergian kysynnän kehityksestä kahden seuraavan vuosikymmenen aikana (World energy outlook 2011).

Suomessa energian tuotannossa käytettävien raaka-aineiden suhteelliset osuudet poikkeavat selvästi globaalista keskiarvosta: Käyttämästämme kokonaisenergiasta fossiilisilla polttoaineilla tuotetaan hieman alle puolet. Puupohjaisien raaka-aineiden osuus energiantuotannostamme on n. 20 %. Valtaosa puupohjaisesta energiantuotannosta syntyy metsäteollisuuden sivutuotteena, mutta myös metsähakkeen käyttö on lisääntynyt voimakkaasti. Ydinvoiman osuus, 18,5 %, on selvästi keskimääräistä suurempi. Vesivoiman osuus puolestaan on melko pieni, vain n. 3,5 %. Kansallinen erikoisuutemme on turpeen energiakäyttö. Turpeen osuus energian tuotannostamme on n. 5 %.

Kansallisesti asettamamme tavoite metsähakkeen vuotuisen käytön kaksinkertaistamisesta 13–15 milj m^3 :iin on energiayksiköissä ilmaistuna noin 30 TWh. Asetetun tavoitteen mittasuhteiden hamottamiseksi voidaan laskea, että 30 TWh on alle kymmenen prosenttia kansallisesta energiantuotannostamme ja noin 0,02 prosenttia globaalista energiantuotannosta.

Mikäli kuluttajat, yritykset ja valtiot sitoutuisivat tavoitteeseen, jonka mukaan maapallon keskilämpötilan nousu pyrittäisiin rajoittamaan 2 asteeseen, energiantuotannosta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen pitäisi vähentyä voimakkaasti. Fossiilisten polttoaineiden käyttö ei voisi nousta nykytasosta lainkaan, vaan päinvastoin niiden käytön pitäisi supistua rajusti. Tämä merkitsisi samalla nykyistä merkittävästi alhaisempaa energian kokonaiskulutusta, koska fossiilisia polttoaineita korvaavien energiamuotojen mahdollisuudet ovat rajalliset. Mitkään merkit eivät kuitenkaan viittaa siihen, että globaalin energiankäytön kasvutrendi olisi taittumassa.

Globaalit hiilivarastot ja niiden muutokset

Maapallolla merivesiin sitoutunut hiilidioksidi on ylivoimasesti suurin yksittäinen hiilivarasto, jonka määrän arvioidaan olevan noin 38 000 Gt. Ilmakehässä arvioidaan olevan hiiltä 775 Gt, kasvillisuudessa 550 Gt, maaperässä 1500 Gt, merien pintaosissa 1000 Gt ja meriin liuenneena orgaanisena hiilenä 700 Gt. Ilmakehän ja maakasvillisuuden välinen vuotuinen hiilen vaihto (yhteytys ja hengitys) on suuruudeltaan noin 100 Gt hiiltä vuodessa ja hiilidioksidin sitoutumisen ja vapautumisen välisen tasapainon arvellaan olevan hieman (~1 Gt/v) kasvillisuuteen ja karikkeeseen kertymisen puolella. Merien pintaosissa fotosynteesissä sidotun ja hengityksessä vapautetun hiilen suuruusluokka on vastaava kuin maa-alueilla sidotun hiilen määrä, n. 90 Gt hiiltä vuodessa. Myös merten osalta vuotuisen tasapainon arvellaan olevan noin 1 Gt hiiltä vuodessa meriin kertymisen puolella (www.globalcarbonproject.org). Fossiilisten polttoaineiden käytöstä vapautuu ilmakehään noin 9 Gt hiiltä vuodessa, maankäytön muutosten arvioidaan aiheuttavan noin 1 Gt vuotuiset päästöt. Jos kasvillisuuden ja merien hiilinielut ovat yhteensä alle 3 Gt vuodessa, jää joka vuosi ilmakehään yli 6 Gt hiiltä enemmän kuin siellä aikaisemmin oli. Vuositasolla kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttama nettolisäys ilmakehän nykyiseen hiilivarastoon (775 Gt) nähden on suuri, melkein yhden prosentin.

1.1.1 Biomassan rooli energiantuotannossa

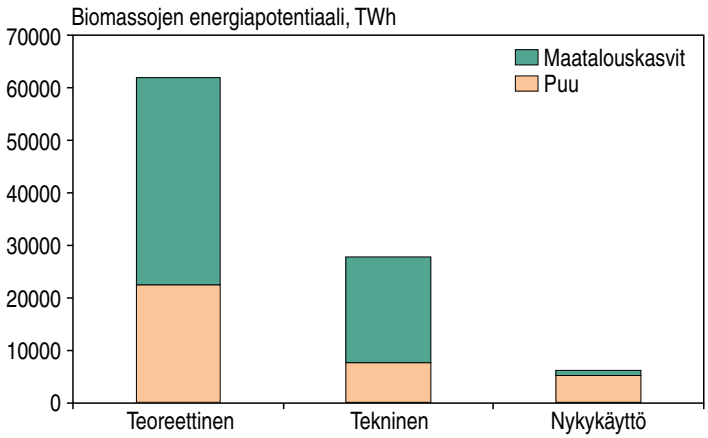
Metsäbiomassat

Metsät peittävät maapallon kokonaispinta-alasta lähes 30 % ja kuutiometreinä ilmaistuna maailman metsävarat ovat kokonaisuudessaan 434 mrd m^3. Vuotuisen puun käytön on arvioitu olevan 3,7 mrd m^3. Tästä yli puolet käytetään etenkin kehittyvissä maissa suoraan energiantuotantoon, loput korjatusta puusta ohjautuu metsäteollisuuden raaka-aineeksi (FAO 2009). On tärkeää huomioida, että myös teollisuuden käyttämästä raakapuustakin noin 40% ohjautuu energiantuotantoon sen sivutuote- ja tähdevirtojen kautta (Hakkila ja Parikka 2002). Siten noin 70 % globaalista puun käytöstä on energian tuotantoa.

Metsien kasvua voidaan lisätä tehostamalla puuntuotantoa esimerkiksi paremman metsänhoidon, tuottavien puualkuperien ja lannoituksen avulla, ja myös hakkuutähteiden ja kantojen käyttöä voidaan lisätä. Lisäksi metsäpinta-alaa voidaan kasvattaa perustamalla istutusmetsiä alueille, joilta metsät on hävitetty tai joiden käyttö muihin tarkoituksiin on vähäistä. Istutusmetsissä (Kuva 1.1.2) voidaan tuottaa paljon biomassaa suhteellisen pienellä maapinta-alalla, joten ne soveltuvat erityisen hyvin teollisen puunkäytön raaka-ainelähteeksi.

Istutusmetsien pinta-alan odotetaan nousevan vuoden 2005 190 miljoonasta hehtaarista 443 miljoonaan hehtaariin vuonna 2020 (Global wood…2007). Jos oletetaan istutusmetsien tuottaman puun kohdistuvan pääosin teollisuuden käyttöön ja kolmanneksen istutusmetsien kasvun lisäyksestä (800 milj. m^3/v) ohjautuvan lähinnä energiabiojalostamoiden raaka-aineeksi, vuotuinen raaka-aineen lisäys energiantuotantoon olisi 270 milj. m^3/v.

Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa puun käyttö sellun ja paperin tuotannossa on vähentynyt. Syntyvien hakkuusäästöjen ohjaaminen energiantuotantoon on mahdollista ilman, että puun kokonaiskäyttö kasvaa.



Kuva 1.1.2. Metsä- ja maatalousbiomassojen energiakäytön potentiaalit ja nykykäyttö.

Maatalousbiomassat

Maataloudessa kasvinviljelyn tuotanto on 6,9 mrd tonnia, ja laidunmaiden tuotannon on arvioitu olevan 12,0 mrd tonnia (kuiva-ainetta) vuodessa. Maatalousbiomassan saatavuus energiakäyttöön voidaan arvioida samoilla periaatteilla kuin metsäbiomassankin. Kuitenkin erityisesti ruuaksi tällä hetkellä käytettävän biomassan ohjaamista energiantuotantoon on kritisoitu voimakkaasti, koska se vaarantaisi erityisesti pienituloisten ihmisryhmien ruokahuollon. Siksi maatalousbiomassan lisäenergiakäytön arvioissa on lähdetty siitä, että energiantuotantoon ohjattaisiin lähinnä sivutuotteita kuten akanoita ja olkia.

Maatalouskasvien teoreettisen energiapotentiaalin arvioidaan olevan 17 000 TWh ja teknisesti korjattavissa tästä olisi 12 000 TWh. Koko tekninen potentiaali ei ole saatavilla joka vuosi, koska sää- ja muut olosuhteet voivat vaikuttaa korjuukelpoisuuteen (Pahkala ym. 2009).

Metsä- ja maatalousbiomassojen teoreettinen (60 000 TWh) ja tekninen potentiaali (28 000 TWh) sekä biomassojen nykyinen energiakäyttö (5 500 TWh) on esitetty kuvassa 2. Metsäbiomassan tekninen potentiaali perustuu metsien nykyiseen energiakäyttöön, johon on lisätty hakkuutähteiden, hakkuusäästön ja energiapuuviljelmien mahdollistama lisätuotanto.

1.1.2 Johtopäätökset

Tehokkaampi metsänhoito, tuottavammat puulajit ja lannoitus voivat lisätä puubiomassan tuotantoa, mutta tehostuvan metsien käytön vaikutukset metsäluonnolle saattavat olla suuria. Esimerkiksi eukalyptusplantaaseilla ja öljypalmuviljelmillä luonnon monimuotoisuus on pientä. Myös sosiaalisessa mielessä tällaiset viljelytavat voivat olla hankalia, koska viljelmät rajoittavat usein paikallisen väestön oikeuksia maan käyttöön. Puun eri osien talteenottoa voidaan tehostaa käyttämällä runkopuun lisäksi puun muita osia eli lehvästöä, kantoja ja juuria. Tällöin kuitenkin riskinä on kasvupaikkojen ravinnevarastojen köyhtyminen, lajistomuutokset ja tulevien puusukupolvien kasvun aleneminen.

Kansallisesti asettamamme tavoite uusiutuvan metsäenergian vuotuisen käytön kaksinkertaistamisesta nykytasolta 13–15 milj m^3 :iin tarkoittaa energiayksiköissä ilmaistuna noin 30 TWh eli hieman alle kymmenesosaa nykyisestä kansallisesta energiankäytöstämme, mutta vain noin 0,02 prosenttia globaalista energiantuotannosta. Kansallisesti tällainen muutos on merkittävä, mutta yksittäisenä toimenpiteenä sillä ei ole vaikutusta ilmastonmuutokseen. Maailmanlaajuisesti tarkasteltuna maapallon biomassavarat ja vuosituotanto, vaikka ovatkin mittasuhteiltaan valtavat, eivät riitä korvaamaan fossiilisten polttoaineiden nykyistä saati ennustettua käyttöä. Jos muita korvaavia, ja ilmaston muuttumisen kannalta haitattomia energianlähteitä ei onnistuta kehittämään, ilmastonmuutoksen ehkäisemisen ainoaksi vaihtoehdoksi jää energian kulutuksen raju leikkaus.

Kirjallisuus

Anttila, P., Karjalainen, T. & Asikainen, A. 2009. Global potential of modern fuelwood. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute. Manuscript. 29 p.

Asikainen, A. 2010. Availability of woody biomass for biorefining. Celluloce Chemistry and Technology, 44(4–6):111–115.

Asikainen, A., Liiri, H., Peltola, S., Karjalainen, T. & Laitila, J. 2008. Forest energy potential in Europe (EU 27). Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 69. 33 p. http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2008/mwp069.htm

BP Statistical Review of World Energy June 2010. http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2010_downloads/statistical_review_of_world_energy_full_report_2010.pdf

Energiatilasto, Finland's annual inventory report on greenhouse gases. Tilastokeskus.

Global Wood and Wood Products Flow. 2007. Trends and Perspectives. Advisory Committee on Paper and Wood Products, 13 p.

Hakkila, P. & Parikka, M. 2002. Fuel resources from the forest. In Richardson, J., Björheden, R, Hakkila, P., Lowe, A. T. & Smith, C. T.(eds.) Bioenergy from Sustainable Forestry. Guiding Principles and Practise", Kluwer Academic Publishers, Forestry Sciences, Vol. 71: 19–48.

Heinimö, J. 2008. Methodological aspects on international biofuels trade: international streams and trade of solid and liquid biofuels in Finland. Biomass and Bioenergy. Volume 32. Issue 8. pp. 702–716.

Heinimö, J. & Junginger, M. 2009. Production and trading of biomass energy – An overview of the global status. Biomass & Bioenergy 33(9): 1310–1320.

Key world energy statistics 2008. IEA. www.iea.org. 82 p.

Pahkala, K., Hakala, K., Kontturi, M. & Niemeläinen, O. 2009. Peltobiomassat globaalina energianlähteenä. (Agrobiomass as a global source of energy). Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. Maa- ja elintarviketalous 137. 53 p.

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. & Wagner, F. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change. p. Available from: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf.html.

Röser, D., Asikainen, A., Stupak, I. & Pasanen, K. 2008. Forest energy resources and potentials. In: Röser, D., Asikainen, A., Raulund-Rasmussen, K. (Eds.), Sustainable use of forest biomass for energy. A synthesis with focus on the Baltic and Nordic region. Springer, Dortrecht, pp. 9–28

Smeets, E.M.W. & Faaij, A.P.C. 2007. Bioenergy potentials from forestry in 2050. An assessment of the drivers that determine the potentials. Climatic Change 81, 353–390.

VTT, Energy visions 2050. VTT Energy. Edita. Helsinki.

Yamamoto, H., Fujino, J. & Yamaji, K. 2001. Evaluation of bioenergy potential with a multi-regional global-land-use-and-energy model. Biomass and Bioenergy 21, 185–203.

www.globalcarbonproject.org

1.2 Suomen metsäala osana globaaleja ilmasto- ja energiakysymyksiä

Lauri Hetemäki

Kun maailman energian tarvetta ja ilmastonmuutoksen syitä ja seurauksia tarkastellaan Suomen näkökulmasta, näyttävät ne valtavilta. Suomen kasvihuonepäästöt vuonna 2008 olivat kaksi promillea koko maailman päästöistä ja Suomen energian kulutus oli seitsemän promillea koko maailman energian kulutuksesta. Suomessa tehtävillä energian ja metsien käytön muutoksilla ei siten ole käytännössä juurikaan suoranaisia vaikutusta ilmaston muuttumiseen tai energian kokonaiskulutukseen, jos asioita tarkastellaan maailman mittakaavassa.

Huolimatta siitä, että Suomen merkitys globaalien ilmiöiden ratkaisemisessa on hyvin pieni, kotimaisten ilmastopäästöjen vähentäminen ja uusiutuvan energiatuotannon tukeminen ovat molemmat tärkeitä tavoitteita. Suomen pitää kantaa oma vastuunsa energia- ja ilmastokysymysten ratkaisuissa osana kansainvälistä yhteisöä. Uudistusten käytäntöön vieminen tarvitsee myös hyviä esimerkkejä sellaisista toimintatavoista, joita muut toimijat voivat soveltaa omaan käyttöönsä. Aktiivisesti toimien Suomi voi myös ajaa omaa etuaan ja hyödyntää ilmasto- ja energiakysymysten ratkaisemisessa tarvittavia muutoksia oman teknoligisen osaamisensa ja taloutensa vahvistamiseksi. Metsiin liittyvissä ilmasto- ja energiakysymyksissä laadukkaalla ja perinteikkäällä suomalaisella tutkimuksella, osaamisella ja koulutuksella on paljon annettavaa myös kansainvälisesti.

Osataksemme sopeutua eri energialähteiden hinnassa ja saatavuudessa tapahtuviin muutoksiin sekä ilmastonmuutoksen aiheuttamiin vaikutuksiin, ja samalla hyödyntää niitä mahdollisuuksia, joita muutosten aikaansaamiseksi tarvitaan, on luonnollisesti tärkeää arvioida muutosten vaikutuksia niin metsäluonnossa kuin yhteiskunnassakin. Tällaisia tarkasteluja kannattaa tehdä eri mittakaavoissa, maailmanlaajuisesti, maanosittain, kansakunnittain ja alueellisesti. Tässä luvussa keskitymme tarkastelemaan globaalien energia- ja ilmastokysymysten ja sen torjumiseksi ja siihen sopeutumiseksi tehtyjen ratkaisujen heijastusvaikutuksia Suomen metsäalalle.

1.2.1 Energia- ja ilmastopolitiikka vaikuttaa metsien käyttöön?

On ilmeistä, että yhteiskuntien riippuvuus energiaresursseista ja riskit niiden saatavuudesta ja kustannusten noususta lisääntyvät tulevaisuudessa. Maailman energiajärjestön IEA:n (2010) perusskenaarion (Current Policies) mukaan maailman energian kysyntä kasvaa 38 prosentilla vuodesta 2008 vuoteen 2030. Erityisesti öljyn niukkuuden arvioidaan lisääntyvän ja raakaöljyn reaalihinnan nousevan selvästi nykytasosta tulevien vuosikymmenien aikana. Öljyn hintakehitys puolestaan heijastuu useisiin muihin energiaraaka-aineiden hintoihin, myös biopolttoaineiden hintoihin.

EU-alueella myös hiilidioksidin päästökauppa nostaa fossiilisten energiaraaka-aineiden käytön kustannuksia. IEA (2010) arvioi perusskenaariossaan CO_2 päästöoikeuden reaalihinnan nousevan nykytasosta (2009 = 22 $/tonni) runsaalla 70 prosentilla vuoteen 2020 (=38 $), ja nousevan edelleen tämänkin jälkeen (vuonna 2030 = 46 $).

Yksi keino sekä polttoaineiden käytön kustannusten että ilmastonmuutoksen hillitsemiseen voi olla bioenergian käytön lisääminen. IEA (2010) arvioi perusskenaarioissaan, että EU:n biomassaan ja jätteeseen perustuvan energiakulutuksen kasvu vuodesta 2008 vuoteen 2030 on peräti 77 prosenttia, kun kokonaisenergian lisäys samaan aikaan arvioidaan olevan vain kolme prosenttia. Kansallisesti bioenergian kasvunäkymien taustalla on ilmastomuutostavoitteiden rinnalla myös voimakas halu lisätä energiaomavaraisuutta ja tukea paikallisiin biomassavaroihin liittyviä elinkeinoja.

Edellä kuvattu kehitys on jo johtanut siihen, että Suomen kaltaisissa valtioissa, joiden metsävarat ovat suuret, on erilaisilla politiikkatoimilla tuettu metsäbiomassaan perustuvan energiatuotannon kehittämistä. Suomessa tukikeinoina ovat olleet mm. syöttötariffi, biopolttoaineiden käyttövaatimus, investointituet uusille biopolttoainelaitoksille, metsähakkeen käytön tukeminen, fossiilisten raaka-aineiden käytön verotuksen kiristäminen ja uuden bioenergiateknologian T&K-panosten lisääminen.

1.2.2 Bioenergian käytön lisäämisen vaiheet Suomessa

Käynnissä olevassa bioenergiakehityksessä on nähtävissä erilaisia vaiheita. Bioenergian käytön lisäämistä tavoitteleva boomi lähti käyntiin toden teolla ja suurin odotuksin vuosituhannen alussa. Osin ylimitoitettujen odotuksien seurauksena bioenergiapolitiikka kohtasi epäonnistumisia ja aiheutti markkinoiden vääristymiä ja alun innostuksen jälkeen esitettiin myös merkittävää kritiikkiä toteutunutta bioenergian käytön kehitystä kohtaan.

Vuosituhannen alun bioenergiainnostuksen ja sitä seuranneiden pettymysten jälkeen ollaan nyt kenties päädytty vaiheeseen, jossa odotukset ja toimet ovat asettuneet niiden toteutumisen kannalta realistisempiin mittasuhteisiin. Nähdään, että bioenergian käytön lisääminen voi olla hyödyllinen osaratkaisu ilmastopäästöjen hillinnässä ja energiaomavaraisuuden kasvattamisessa, kunhan sen käytön lisäämiseen liittyvät vääristymät korjataan.

Koska valtioiden fossiilisten polttoaineiden hankintaan ja käyttöön liityvät riskit ja kustannukset lisääntyvät, myös poliittisen ohjauksen merkitys energiavaihtoehtojen valinnassa ja energiankulutuksen säätelyssä tulee lisääntymään Äänestäjät arvatenkin kokevat ilmastomuutoksen hillitsemisen ja uusiutuvien energiamuotojen tukemisen sitä tärkeämmäksi, mitä enemmän ilmastomuutoksen haittavaikutukset alkavat näkyä ja mitä korkeammaksi fossiilisten polttoaineiden hinta nousee.

1.2.3 Metsien energiakäyttö on monipuolista

Metsäteollisuudella on pitkät perinteet energiatuotannossa, kuten yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa tehtaiden omiin tarpeisiin sekä kaukolämpö- ja sähköverkkoihin. Nyt ne ovat laajentamassa energiantuotantoaan myös nestemäisiin biopolttoaineisiin sekä hyödyntävät uutta teknologiaa energian tuottamisessa. Lisäksi esimerkiksi yhdyskuntien energiayhtiöt, öljyteollisuus ja pääomasijoitusyhtiöt ovat investoimassa puuperusteisen energian tuottamiseen. Puunjalostus onkin tulevaisuudessa todennäköisesti nykyistäkin enemmän myös energiateollisuutta.

Metsien käyttäminen aiempaa enemmän energiatuotannon raaka-aineena näyttää tarjoavan hyvän mahdollisuuden yhdistää yhteiskunnan ja metsäsektorin intressit. Metsäenergiavarat ja tuotantolaitokset sijaitsevat osin kasvukeskusten ulkopuolella ja eri puolilla maata, joten myös aluepolitiikan ja hajautetun energiantuotannon näkökulmasta metsäenergian käytön lisääminen olisi toivottavaa. Lisäksi rakennemuutoksen kanssa kamppailevalla metsäteollisuudella on halua uudistua ja löytää uusia tuotteita ja liiketoimintaa. Tähän metsiin perustuva energia tarjoaa monia mahdollisuuksia.

Metsäenergian käyttöön kohdistunut kysyntä on jo näkynyt tutkimus- ja kehitystyössä, eri toimijoiden strategioissa, uusissa investoinneissa ja metsätähteen käytön kasvussa. Erityisesti näin on tapahtunut viime vuosina Suomessa, Ruotsissa ja Pohjois-Amerikassa, joissa useilla yrityksillä on joko investointiprojekteja tai suunnitelmia liittyen massa- ja paperitehtaiden yhteyteen tulevasta nestemäisten biopolttoaineiden tuotannosta. Biopolttoaineiden valmistus metsäteollisuudessa edellyttää myös yhteisyrityksiä tai liittoutumia biopolttoaineiden jatkojalostuksesta ja jakelusta vastaavien energia-alan yritysten kanssa. Esimerkiksi Stora Enso ja Neste Oil ovat jo yhdessä perustaneet NSE Biofuels Oy -yrityksen tällaista tarkoitusta varten.

Pohdittaessa metsäbiomassan energiakäytön kasvunäkymiä Suomessa vuoteen 2020 mennessä, kenties mittavin kysynnän lisäys tulee kuitenkin nykyisten ja uusien energialaitosten raaka-aineiden käytössä tapahtuvista muutoksista (Pöyry 2007). Teollisuuden ja yhdyskuntien sähkön- ja lämmön tuottajat korvaavat lisääntyvässä määrin hiilen, maakaasun ja turpeen käyttöä metsätähteellä ja kuitupuulla. Mittakaavaltaan tämä trendi vaikuttaa metsäbiomassan käyttöön kenties enemmän kuin mikään muu metsien puunjalostuskäyttö tulevan vuosikymmenen aikana.

Kehitys on jo heijastunut paitsi metsätähteen lisääntyvänä käyttönä, myös monina uusina rakenteellisina muutoksina puumarkkinoilla ja korjuuketjussa. Esimerkiksi puumarkkinoille on tullut uusi toimija, L&T Biowatti, joka on erikoistunut juuri puuraaka-aineen hankintaan energiatuottajille. Tämä lisää kilpailua puumarkkinoilla. Puunhankinnan logistiikkaa on myös kehitetty niin, että metsätähteen ja muun energiapuun korjuun ja kuljetuksen kustannustehokkuutta on voitu lisätä. Tämä puolestaan on merkinnyt tarvetta kehittää puunkorjuun teknologiaa ja varastoinnin logistiikkaa. Tällä hetkellä olemme vielä näiden kehityskulkujen alkuvaiheessa ja tulevan vuosikymmenen aikana on odotettavissa merkittävää kehitystä ja laajentumista energiapuun kasvatuksen, korjuun, kuljetuksen, varastoinnin ja käytön osa-alueilla.

Metsien energiankäytön kehityksen yksi avainsana on moninaisuus. Metsätähdettä, runkopuuta, metsäteollisuuden puubiomassan sivuvirtoja tai jätepaperia ja pakkausjätteitä tulevat hyödyntämään monet eri toimijat (massa- ja paperiteollisuus, puutuoteteollisuus, energiateollisuus), käyttäen useita erilaisia teknologioita ja konsepteja sekä tuottamaan monia erilaisia energialopputuotteita. Ei siis ole olemassa mitään yhtä ”oikeata” tapaa hyödyntää puuta ja tuottaa siitä energiaa. Puun energiakäytön optimaalisuus määräytyy tapauskohtaisesti ja riippuu paikallisista olosuhteista, kuten raaka-aineen saatavuudesta ja hinnasta, synergiaeduista nykyisen tuotannon kanssa, lopputuotemarkkinoista sekä poliittisten toimien vaikutuksista.

Näyttää siis hyvin todennäköiseltä, että Suomen metsäsektorilla puun energiakäyttö näyttelee jatkossa huomattavasti nykyistä suurempaa roolia. Yhtäältä metsäteollisuusyritykset kasvattavat energialiiketoimintaa ja toisaalta energiateollisuus tulee yhä kiinteämmäksi osaksi metsäsektoria. Tällä on puolestaan merkittäviä heijastusvaikutuksia läpi koko sektorin. Vuonna 2020 käsite metsäteollisuus kuvaa todennäköisesti yhä vähemmän silloin olemassa olevaa puunjalostusta. Viime vuosina onkin jo alettu puhumaan metsäteollisuudesta osan laajempaa biotaloutta.

1.2.4 Metsiin perustuvan energian vientinäkymät

Merkittävä epävarmuus liittyy siihen, missä mitassa Suomessa sijaitsevalla metsäbiomassaan perustuvalla energiatuotannolla on mahdollisuus kasvaa laajamittaiseksi vientiteollisuudeksi. On perusteltua suhtautua varauksella siihen, että nestemäisten biopolttoaineiden tuotannosta tulisi yhtä laajamittaista vientiteollisuutta kuin paperiteollisuus on ollut. Tähän vaikuttanee muun muassa kilpailukykytekijät ja raaka-aineen riittävyys.

Metsäteollisuuden Suomeen suunnittelemat suurimmatkin biojalostamot ovat pieniä. Esimerkiksi UPM rakentaa Lappeenrantaan raakamäntyöljystä biopolttoaineita valmistavan biojalostamon, joka tuottaa vuosittain noin 100 000 tonnia toisen sukupolven biodieseliä liikennekäyttöön, kun Neste Oilin Porvoon jalostamon tuotanto on 12 miljoonaa tonnia. Vapo suunnittelee kapasiteetiltaan myös noin 100 000 tonnia biodieseliä vuodessa valmistavaa yksikköä Kemiin. Laitos käyttäisi vuosittain noin puolitoista miljoonaa kiintokuutiometriäpuuta. Arvoltaan 100 000 tonnia biodieseliä olisi nykyhinnoilla noin 100 miljoonan euron luokkaa.

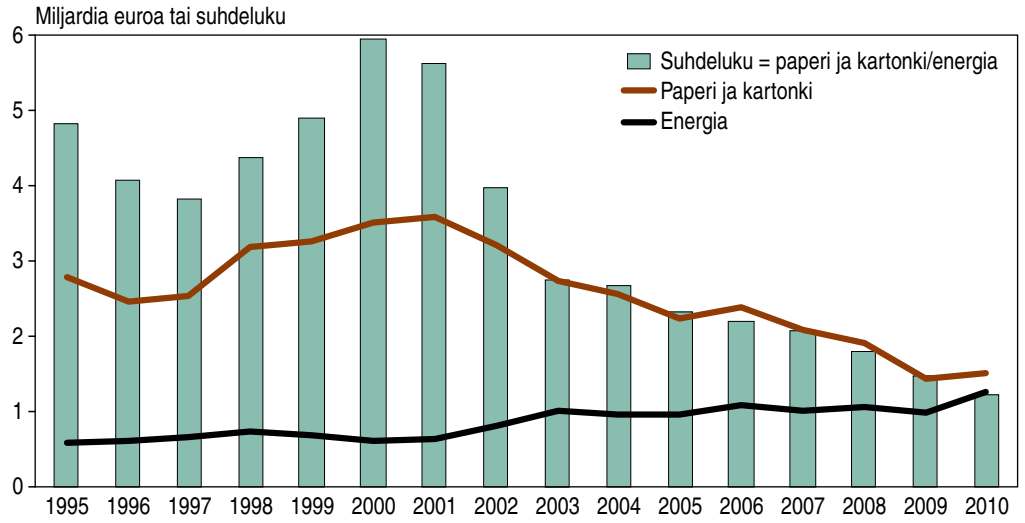
Mikäli UPM:n esittämällä teknologialla valmistettaisiin pelkästään puuraaka-aineeseen perustuen Porvoon jalostamon kapasiteettia vastaava määrä biodieseliä, se edellyttäisi noin 60 miljoonana kiintokuutiometrin puuraaka-aineen käyttöä vuodessa. Tämä on suunnilleen sama määrä kuin metsäteollisuus käytti kotimaista ainespuuta vuonna 2007 (59 milj. m^3).. Jos puuperäisten liikennepolttoaineiden valmistusta lisättäisiin lähemmäs nykyistä kulutuksen tasoa, on toki mahdollista, että kotimaisen raaka-aineen lisäksi esimerkiksi Venäjältä tuotaisiin jatkossa lisääntyvässä määrin haketta ja metsätähdettä biopolttoaineen tuotantoa varten. Suomessa tapahtuvan tuotannon lisäksi esimerkiksi UPM suunnittelee biopolttoainelaitoksiaan myös lähelle muita loppumarkkinoita, kuten Eurooppaan, Pohjois-Amerikkaan ja Etelä-Amerikkaan (Tekniikka & Talous 2012).

Edellä esitetyn perusteella on vielä epäselvää, missä mitassa Suomessa kannattaa investoida vientiin perustuvaan laajamittaiseen biopolttoaineiden tuotantoon. Selvää on, että kotimarkkinoiden kulutusta varten paikallisella tuotannolla on kustannusetuja, tai ei ainakaan kuljetuskustannuksista johtuvaa haittaa. Lisäksi muu energiatuotanto on väistämättä osin paikallista, kuten kaukolämpö ja osa sähkön tuotannosta.

1.2.5 Energiatuotannon jalostusarvo kasvussa

Jalostusarvo on puun energiakäytön ja eri toimialojen puustamaksukyvyn kannalta merkittävä tekijä. Se ohjaa viime kädessä puun käytön kehitystä. Tästä näkökulmasta on merkittävää, että puuta käyttävien toimialojen jalostusarvokehityksessä on tapahtunut perustavaa laatua oleva muutos tällä vuosituhannella.

Kuva 1.2.1 kertoo, että vielä vuonna 2000 paperi- ja kartonkiteollisuuden jalostusarvo oli noin kuusinkertainen verrattuna energiatuotantoon, joka käytti puuta raaka-aineena tai joka olisi voinut sitä käyttää ilman lisäinvestointeja tai lisäinvestointien jälkeen. Massa- ja paperiteollisuuden jalostusarvo on laskenut selvästi viimeisen vuosikymmenen aikana, kun taas energiateollisuuden kehitys on ollut päinvastainen. Vuonna 2010 energiateollisuuden jalostusarvo oli jo lähes sama kuin paperi- ja kartonkiteollisuuden.



Kuva 1.2.1. Suomen paperi- ja kartonkiteollisuuden ja energiatuotannon nimellinen jalostusarvo (mrd. euroa) vuosina 1995–2010 sekä toimialojen jalostusarvojen suhdetta osoittava luku (Tilastot: Tilastokeskus, Teollisuuden alue- ja toimialatilasto).

Todettakoon lisäksi, että paperi- ja kartonkiteollisuuden viime vuosien kapasiteetin vähennykset ovat luonnollisesti vähentäneet näiden teollisuudenalojen absoluuttista jalostusarvoa, mutta kehityksen suunta on ollut myös suhteellisesti samanlainen kuin kuvan 1.2.1 kehitys. Paperi- ja kartonkiteollisuuden jalostusarvo suhteutettuna tuotantomäärään osoittaa, että jalostusarvo tuotettua paperi- ja kartonkiyksikköä kohti oli suurimmillaan 287 euroa/tonni vuonna 2001, kun vuonna 2010 tämä luku oli enää 128 euroa/tonni. Vastaavasti energiateollisuuden jalostusarvo tuotettua yksikköä kohti (GWh/eur) on noussut selvästi kuluneen vuosikymmenen aikana.

Merkittävin yksittäinen syy toimialojen jalostusarvokehityksen muutoksiin on ollut lopputuotteiden erilainen hintakehitys. Suomen paperituotteiden viennin reaalinen yksikköhinta oli 826 euroa/tonni vuonna 2001, josta se on laskenut tasaisesti ja oli enää 617 euroa/tonni vuonna 2010. Samanaikaisesti esimerkiksi Pohjoismaiden sähköpörssin reaalinen spot-hinta Helsingissä oli 26 euroa/Mwh vuonna 2001, mutta on noussut yli kaksinkertaiseksi ja oli 60 euroa/MWh vuonna 2010. Toimialojen jalostusarvot riippuvat tulevaisuudessakin keskeisesti valmistettujen tuotteiden hintakehityksestä.

Kehitys on todennäköisesti sellainen, että Suomen paperituotteiden hinnat vaihtelevat suhdanteiden mukaan, mutta niiden pitkän aikavälin trendi tuskin kääntyy nousevaksi, vaikkakin laskusuunta voi pysähtyä. Tämä käsitys perustuu siihen, että Suomen päävientimarkkinoiden painopapereiden kulutus pienenee ja paperin tarjonnan niukkuus ei lähivuosina muodostune markkinoiden pullonkaulaksi. Toisaalta nousevien talouksien paperin viennin kasvu Länsi-Euroopan markkinoille ja sähköisen viestinnän aiheuttama kilpailu lisäävät paineita alentaa hintoja. Sen sijaan energian hintojen arvioidaan varsin yleisesti edelleen nousevan (IEA 2010).

Ei kuitenkaan ole poissuljettu, että jatkossa tuotteiden hinnoittelussa tapahtuu sellaisia rakenteellisia muutoksia, jotka tasaisivat paperi- ja energiatuotteiden viimeaikaista toisistaan poikkeavaa jalostusarvokehitystä. Näin voisi käydä, jos esimerkiksi tulevaisuudessa paperituotteiden sisältämä energia-arvo pystytään hinnoittelemaan markkinoilla. Tällöin esimerkiksi suomalainen metsäteollisuusyritys, joka myy aikakauslehtipaperia Saksaan, voisi saada paperin ostavalta kustannustalolta sen nykyisen arvon lisäksi myös käytetyn paperin energia-arvon tai ainakin osan siitä. Tämä luonnollisesti lisäisi paperituotteiden jalostusarvoa nykytilanteeseen verrattuna.

Puukuidun jalostamisen arvojärjestykset ovat muuttuneet historian aikana ja todennäköisesti muuttuvat myös jatkossa. Näyttää siltä, että lämpö, valo ja voima ovat kuluttajille, kansantaloudelle ja myös massa- ja paperiteollisuusyrityksille yhä tärkeämpiä lopputuotteita. Siitä, kuinka itsestään selvinä välttämättömyyshyödykkeinä näitä tuotteita pidetään, kertoo esimerkiksi se, että valoa harvemmin edes mielletään lopputuotteeksi. Näille lopputuotteille näyttää myös olevan kasvavaa kysyntää pitkälle tulevaisuuteen.

Metsiin liittyvän bioenergian taloudelliseen kehitykseen liittyy vielä monia kysymysmerkkejä. Tähän on syynä erityisesti se, että kehitykseen vaikuttavat monet asiat, jotka eivät ole alan toimijoiden itsensä päätettävissä. Keskeisiä muutostekijöitä ovat globaalin energiakulutuksen ja energiaraaka-aineiden tarjonnan kehitys, ilmastomuutoksen kehitys, kansainvälinen ja kotimainen politiikka sekä teknologiakehitys. Bioenergian raaka-aineiden kansainvälisen kaupan odotetaan myös kasvavan merkittävästi, mikä voi muuttaa alueellisia näkymiä (Heinimö ym. 2007). Näiden seikkojen takia on vaikea arvioida esimerkiksi sitä, missä mitassa metsäbiomassa tulee olemaan ”voittaja raaka-aine” verrattuna muihin bioenergiaraaka-aineisiin, kuten sokeriruokoon, jatrophaan, elefanttiheinään, leviin ja jätteisiin. Toisaalta, mikäli EU-maat ja Yhdysvallat pitävät kiinni viime vuosina asettamistaan uusiutuvien energiamuotojen käyttöä koskevista tavoitteistaan, kasvutilaa on useille eri raaka-aineille.

1.2.6 Uusia välineitä tulevaisuuden arvioimiseen

Edellä olevan tarkastelun perusteella keskeinen johtopäätös on, että globaalit energia- ja ilmastokysymykset vaikuttavat jatkossa merkittävästi Suomen metsäalan kehitykseen. Niiden seurauksena metsäalan toimialojen rakenteet ja kehitys muuttuvat. Metsäteollisuus ja osa energiateollisuudesta sulautuvat yhä tiiviimmin toisiinsa.

Usein tunnutaan ajateltavan, että bioenergian ja ilmastokysymysten merkityksen kasvun ja puunjalostuksen uusien tuotteiden kehittämisen myötä Suomessa on jatkossa jopa lisääntyvä puuraaka-aineen kysynnän tarve. Tämä on mahdollista. Ainakin kotimarkkinoiden energiatarpeita varten puuperäinen energiatuotanto tulee mitä ilmeisimmin kasvamaan merkittävästi.

Epävarmuutta liittyy kuitenkin siihen, missä määrin puuraaka-aineen muuntaminen massamittakaavassa energiavientituotteeksi on Suomelle ominainen kilpailuvahvuus jatkossa. Suomen kansantalouden kustannusrakenne, luonnonolosuhteet, maantieteellinen sijainti sekä liiketoimintaketjuja eri alueille pilkkova globaalitalouden kehitys näyttäisivät korostavan pikemminkin osaamisen (tieto-taito) kuin raaka-aineen jalostamisen merkitystä. Mikäli näin olisi, kasvualoja saattaisivat olla erityisesti puun energiatuotantoon liittyvät suunnittelu-, kehittämis- ja tutkimuspalvelut.

Metsäalan integroituessa yhä tiiviimmin osaksi energia- ja ilmastokysymyksiä, tarvitaan myös uudenlaista politiikkaa. Metsiin liittyvä politiikka on yhä enemmän myös energia- ja ilmastopolitiikkaa, tai päinvastoin. Lisäksi tarvitaan uusia välineitä arvioida näihin kysymyksiin liittyvää politiikkaa ja tulevaa kehitystä. Mitkä ovat esimerkiksi päästökaupan ja metsäenergian tuottamiselle asetettujen syöttötariffien yhteisvaikutukset metsä- ja energiasektoreille? Tai mikä olisi tehokkain politiikkakeino tukea uusien biojalostamoiden investointeja? Tällaisiin kysymyksiin vastaaminen, tai jopa niihin liittyvien kysymysten onnistunut tarkempi muotoilu, edellyttää politiikan ja energia-, metsäteollisuus- ja puuntarjontasektorien keskinäistä kytkemistä ja niiden välisten vaikutusten tarkastelua.

Kirjallisuus

Global Subsidies Initiative (GSI). 2010. A How-to Guide: Measuring subsidies to fossil-fuel producers. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: http://www.globalsubsidies.org/en/resources/july-2010-a-how-guide-measuring-subsidies-fossil-fuel-producers.

Heinimö, J., Pakarinen, V., Ojanen, V. & Kässi, T. 2007. International bioenergy trade – scenario study on international biomass market in 2020. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, tuotantotalouden osasto, teollisuustalouden laitos, tutkimusraportti 181. 42 s.

Hetemäki, L. 2008. Puu energiaksi vai paperiksi? BioEnergia 6: 9–11.

Hetemäki, L. 2010. Box 9.1. Forest biorefinery: an example of policy driven technology. Julkaisussa: Mery, G., Katila, P., Galloway, G., Alfaro, R.I., Kanninen, M., Lobovikov, M. & Varjo, J. (toim.). Forests and society – responding to global drivers of change. IUFRO World Series 25. s.160–161.

Hetemäki, L., Niinistö, S., Seppälä, R. & Uusivuori, J. 2011. Murroksen jälkeen. Metsien käytön tulevaisuus Suomessa. Metsäkustannus, Karisto Oy, Hämeenlinna. p. 140.

International Energy Agency (IEA). 2010. World Energy Outlook 2010. OECD/IEA, Pariisi. 731 s.

Kangas, H-L., Lintunen, J., Pohjola, J., Hetemäki, L. & Uusivuori, J. 2011. Investments into Forest Biorefineries Under Different Price and Policy Structures. Energy Economics, 33 (2011) 1165–1176.

Metsäteollisuus ry. 2008. Metsäteollisuus ja energia. Esite.

Pajarinen, M., Rouvinen, P. & Ylä-Anttila, P. 2010. Missä arvo syntyy? Suomi globaalissa kilpailussa. ETLAn kirjasarja B 247.Taloustieto Oy, Helsinki. 165 s.

Pöyry. 2007. Puupolttoaineiden kysyntä ja tarjonta Suomessa 2020 – päivitetty tilannekatsaus. Kauppa- ja teollisuusministeriö, selvitys 10.7.2007. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/All/1C58051B7150A095C2257315004833BC/$file/74642007.pdf .

Sabel, C. & Saxenian, A.-L. 2008. A fugitive success: Finland's economic future. Sitra Reports 80. Helsinki. 127 s.

Stora Enso. 2010. Stora Enso ja Neste Oil aloittavat uusiutuvan dieselin laitoksen ympäristövaikutusten arvioinnin. Tiedote 11.10.2010. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: http://www.storaenso.com/media-centre/press-releases/2010/10/Pages/stora-enso-ja-neste-oil.aspx.

Tekniikka & Talous (2012). UPM havittelee uusiutuvasta dieselistä miljardin euron liikevaihtoa. Tekniikka & Talous -verkkolehti, 13.2.2012.

Valtioneuvoston kanslia. 2010. Biotalous Suomessa — arvio kansallisen strategian tarpeesta. Biotaloustyöryhmän loppuraportti 30.9.2010. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja 15/2010. 40 s.

1.3 Suomen metsäenergia- ja hiilivarat ja niiden käyttö ilmastonmuutokseen sopeutumisessa

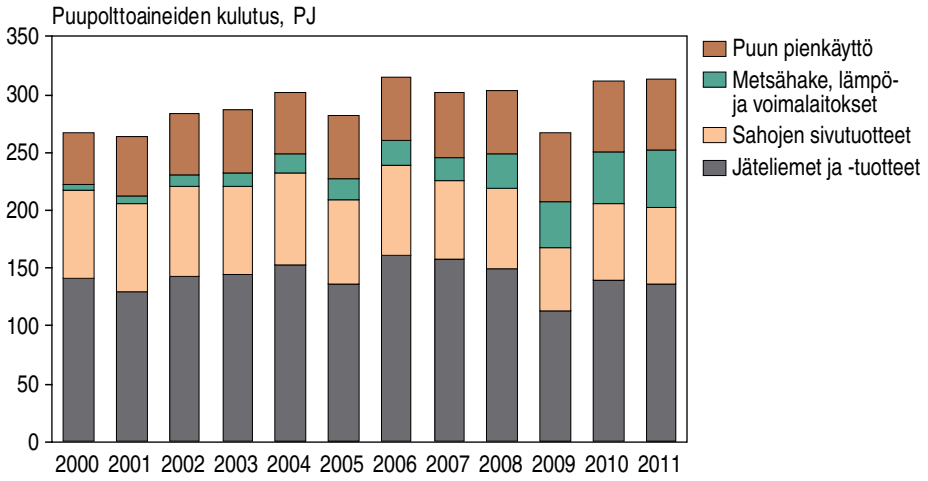
Risto Sievänen, Antti Asikainen, Elina Vapaavuori, Hannu Ilvesniemi

Maapinta-alastamme valtaosa, kolme neljäsosaa, on metsiä, kun maapallon maapinta-alasta vain noin 30 % on metsiä. Olemme erikoisasemassa metsävarojen suhteen: asukasta kohden laskettuna Suomessa on metsäalaa noin 4 hehtaaria ja runkopuuta runsaat 400 m^3, kun maapallolla vastaavien lukujen arvioidaan olevan keskimäärin noin 0.6 hehtaaria ja 80 m^3. Metsissämme kasvaa puuta jokaiselle suomalaiselle vuosittain 18 m^3 ja metsien hiilinielu on keskimäärin 8 tonnia hiilidioksidia per asukas. Vuotuisen kasvun perusteella arvioiden jokainen suomalainen pystyisi hyvinkin kattamaan keskikokoisen omakotitalon lämpöenergiatarpeen.

Suomen metsäpinta-ala, 26 milj. hehtaaria, on kuitenkin vain 0.5 % globaalista metsäpinta-alasta ja nykyinen puuston määrä, 2300 milj. m^3, on noin 0.4 % maailman metsävaroista. Metsiemme puuston kasvu on lisääntynyt jatkuvasti 1970-luvulta lähtien ja on nyt 104 milj. m^3 vuodessa. Myös puuston määrä on lisääntynyt samalla ajanjaksolla. Metsäpinta-alasta talousmetsiä on 82 % ja loput 18 % on joko täysin suojeltu tai osittaisessa puuntuotannossa. Suojelualueet ovat keskimääräistä vähäkasvuisempia: niillä puuston vuotuinen kasvu on vain noin 3 milj. m^3, joten suurin osa kasvusta on talousmetsissä. Vuotuisesta kasvusta on hakattu viime vuosikymmenellä keskimäärin noin 52 milj. m^3. Kokonaispoistuma, joka sisältää hakkuiden lisäksi hakkuutähteet, pientalojen polttopuun, kotitarvepuun ja kuolevat puut (luonnonpoistuma) on runsaat 15 milj. m^3 suurempi kuin kaupalliset hakkuut. Nykyisten suositusten mukaan suurin kestävä talousmetsien hakkuiden taso, jolla hakkuumahdollisuudet eivät tulevaisuudessa laske, on 70 milj. m^3/v. Näin ollen puuston määrässä havaittu kasvu johtuu jatkuvasti kasvua pienemmistä hakkuista viime vuosikymmenien aikana.

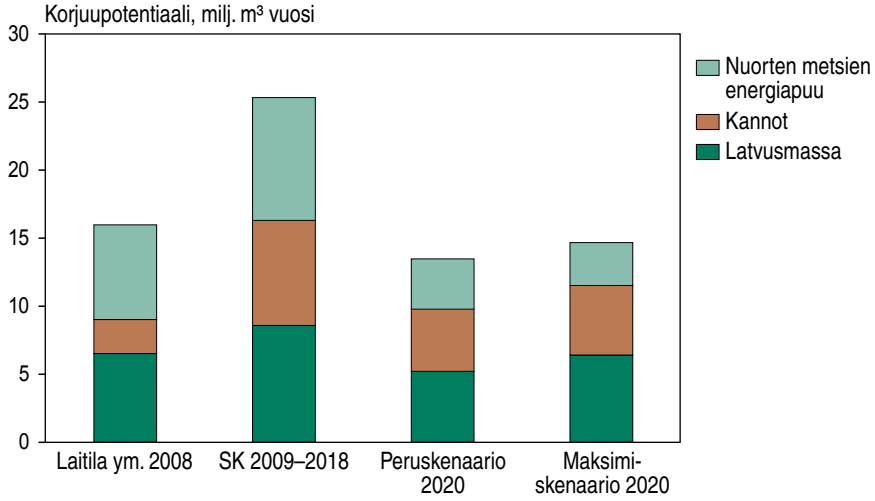
1.3.1 Metsien energiakäyttö ja energiavarat

Suomen energiantuotannossa puuperäisillä polttoaineilla on ollut aina tärkeä rooli. Vielä 1960-luvun alussa Suomi tuotti noin puolet tarvitsemastaan primäärienergiasta puulla. Alimmillaan puun osuus laski 14 prosenttiin 1970 –luvulla lähtien nousuun vasta 1990 -luvun jälkipuoliskolla. 2000 –luvulla puuperäisten polttoaineiden osuus on vakiintunut 20 % tasolle ja on ollut viime vuosina noin 300 PJ (Kuva 1.3.1). Vaikka suoraan energiantuotantoon korjattavan metsähakkeen käyttö on kasvanut jo 7,5 miljoonaan kuutiometriin vuodessa (n. 50 PJ, PJ ≈ 0,28 TWh), puunjalostusteollisuuden sivutuotteiden määrä on vastaavasti laskenut vuosikymmenen puolivälin jälkeen.



Kuva 1.3.1. Puuperäisten polttoaineiden käytön kehitys Suomen energiantuotannossa. Myös puun pienkäyttöön sisältyy noin 10 % metsähaketta (Metsätilastollinen vuosikirja 2011, Ylitalo 2012).

Metsähakkeen käyttöä voidaan edelleen kasvattaa nykytasosta noin kaksinkertaiseksi. Metsähakkeen korjuukelpoisesta potentiaalista on esitetty useita arvioita (Kuva 1.3.2). Tavallisimmin tarkasteluissa on päädytty noin 15 miljoonan kuutiometrin vuositason hankintamääriin, kun ainespuun mitat täyttävänn pienpuun energiakäyttöä on rajoitettu tai laskelmat on perustettu toteutuneisiin ainespuun hakkuutasoihin (Kuva 1.3.2) (Laitila ym. 2008). Mikäli taas lähtökohdaksi on otettu metsiemme suurimman kestävän hakkuutason mahdollistama potentiaali, päädytään 25 miljoonan kuutiometrin vuotuisiin metsäenergian hakkuumahdollisuuksiin (Kuva 1.3.2) (Salminen 2012). Myös laitosten puustamaksukyky ja kilpailu muiden polttoaineiden kanssa otetaan huomioon, on potentiaali arvioitu alle 15 milj. kuutiometriksi vuositasolla (Kärhä ym. 2009).



Kuva 1.3.2. Metsähakkeen tekninen ja teknis-taloudellinen korjuupotentiaali, milj. m³/vuosi. (Laitila ym. 2008, Salminen 2012, Kärhä ym. 2009).

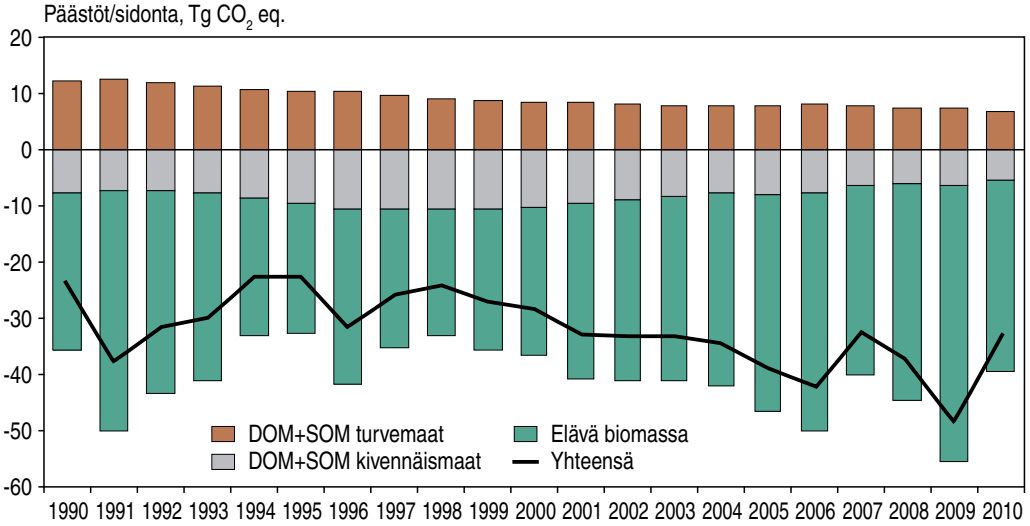
1.3.2 Metsien hiilivarat

Metsien hiilivarat koostuvat puuston ja kasvien biomassan sekä kuolleen orgaanisen aineen hiilestä. Suomen metsissä hiilivarasto puustossa on noin 820 Tg (Liski ym. 2006), kivennäismaiden maaperässä 921 Tg (Ilvesniemi ym. 2003) ja soiden turpeessa 5600 Tg (Minkkinen 1999). Puusto on metsien hiilitaseen määräävä tekijä. Sen kasvussa sitoutuu noin 35 Tg (128 Tg CO_2 ekv.) hiiltä metsiin vuodessa, ja myös maaperän hiilivarat muuttuvat pääasiallisesti puista tulevan karikesyötteen eli kuolleen orgaanisen aineksen ajamana.

Suomen metsät ovat kokonaisuutena Kioton pöytäkirjan piirissä. Siinä tarkastellaan sekä metsien kokonaishiilitasetta että erikseen metsän hävitykseen ja metsitykseen liittyviä kasvihuonekaasutaseita. Suomessa muutetaan metsää muihin käyttömuotoihin mm. pellonraivauksen ja asutuksen laajenemisen kautta runsaat 15000 ha vuosittain. Puuston täydellinen tai osittainen poisto metsänhävityksessä aiheuttaa kasvihuonekaasupäästön. Metsityksen tuottama hiilinielu on pieni verrattuna metsähävityksen päästöön, joten ne yhdessä aiheuttavat päästön, joka on suuruudeltaan 4 miljoonaa hiilidioksiditonnia vuodessa. Se otetaan täysimääräisesti huomioon Kioton 1. velvoitekaudella 2008–2012. Metsien nielulla voi kompensoida metsien hävitykseen ja metsitykseen liittyvän päästön sekä saa pienen hyvityksen (0,6 milj. t hiilidioksidia) nielusta. Suomella metsien avulla saavutettu nieluhyöty on kompensaation ja hyvityksen summa, yhteensä 4,6 milj. t hiilidioksidia esimerkiksi vuonna 2010.

Vuonna 2013 alkavalle Kioton seuraavalle velvoitekaudelle metsänielun laskentamenetelmäksi sovittiin vertailutasomenetelmä. Jos metsänielu on vertailutasoa suurempi, maa saa siitä hyvityksen. Jos metsänielu on vertailutasoa pienempi, maa saa siitä päästörasitteen. Suomen vertailutasoksi määritettiin 20 milj. t CO_2 /v. Näin ollen noin 16 milj. m^3 metsiemme vuotuisesta noin 100 milj. m^3:n kasvusta on varattu nielukäyttöön. Suomen metsänielu oli vuonna 2010 32 milj. t CO_2 (Kuva 1.3.3)

Viimeisen runsaan 20 vuoden aikana puuston hiilivarasto on kasvanut 20–50 miljoonan CO_2 -tonnin vuosivauhdilla (Kuva 1.3.3). Lisäksi kivennäismaiden hiilivaraston arvioidaan kasvaneen ja edelleen orgaanisten turvemaiden pienenneen. Kokonaisuutena metsien ja metsämaiden hiilivaraston arvioidaan kasvaneen jatkuvasti, vaikka metsien käyttö teollisuuden raaka-aineena ja erityisesti suoraan energiana on kasvanut.



Kuva 1.3.3 Hiilen päästöt (positiiviset arvot) ja sidonta (negatiiviset arvot) metsämaalla 1990-2010. DOM=karike ja kuollut puu, SOM=maaperän orgaaninen aines (Greenhouse gas emissions…2012).

1.3.3 Ilmastonmuutos lisää Suomen metsien kasvua ja hiilivarastoa

Lämpenevällä ilmastolla on arvioitu olevan metsien kasvulle suotuisa, kasvua lisäävä vaikutus (Kellomäki ym. 2005). Erityisesti Pohjois-Suomessa metsän kasvun on ennustettu lisääntyvän voimakkaasti. Kellomäki ym. (2008) arvioivat IPCC SRES A2 päästö- ja lämpötilaskenaariota käyttäen (Ruosteenoja ym. 2005) puuston kasvua ja määrää sekä sen ja maaperän hiilivaroja kivennäismailla Suomessa. Tutkimuksen mukaan puuston kasvu lisääntyisi kivennäismailla 44 % 1990 luvun puolivälistä kaudelle 2050–2091. Pohjois-Suomessa lisäys olisi 109 % ja Etelä-Suomessa 12 %. Saman tutkimuksen mukaan hakkuumahdollisuudet lisääntyvät samalla ajalla kasvua enemmän, peräti 168 % Pohjois-Suomessa, 56 % Etelä-Suomessa ja 82 % keskimäärin (Kellomäki et al. 2008). Kasvun pienempi lisääntyminen Etelä-Suomen ennusteissa johtuu kahdesta tekijästä. Ensinnäkin pohjoisessa lämpötilan on ennustettu nousevan enemmän kuin etelässä, lyhyt kasvukausi rajoittaa siellä tehokkaasti kasvua ja lämpötilan nousu lisää voimakkaasti kasvukauden pituutta ja siis kasvua ja toiseksi Etelä-Suomessa ennusteiden mukaan kuivuus lisääntyy, mikä vähentää kuusten ja karuilla kasvupaikoilla myös mäntyjen kasvua. Kuusi menestyy erityisesti Etelä-Suomessa aikaisempaa huonommin, jolloin koivu ja mänty valtaavat alaa kuusen kustannuksella. Runkotilavuudella mitattuna kuusen on arvioitu taantuvan 43 %:sta vuonna 1995 12 %:iin kuluvan vuosisadan lopussa (2070–2099). Koivun osuus lisääntyy vastaavalla ajalla 10 %:sta 20 %:iin ja männyllä 47 %:sta 68 %:iin (Kellomäki et al. 2008).

Puuston sitomat hiilivarat lisääntyvät elävän puuston kokonaiskuutiomäärän kasvaessa. Kellomäki ym. (2008) arvioivat, että vuodesta 1995 vuosisadan loppuun (2070–2099) puustoon varastoitunut hiilimäärä lisääntyy 30 %. Suurempi puuston määrä lisää oletettavasti myös kariketuotosta (Liski ym. 2006), mikä kasvattaa maaperän hiilivarastoa. Toisaalta korkeampi lämpötila lisää orgaanisen aineen hajotusnopeutta pienentäen varaston kokoa (Vanhala ym. 2008). Kellomäen ym. (2008) simuloinneissa kivennäismaiden hiilivarasto kuitenkin lisääntyy läheisessä suhteessa puuston määrään: laskennallinen lisäys maaperän hiilivarastossa oli 26 % vuodesta 1995 kaudelle 2070–2099.

1.3.4 Näkökulmia metsien energiakäyttöön ja ilmastonmuutoksen hillintään

Puuvaroja voidaan käyttää ilmastonmuutoksen hillintään kahdella tavalla: Kasvaessaan metsät sitovat ilmakehän hiilidioksidia puuainekseen sekä pidemmällä aikavälillä myös metsämaahan. Toisaalta puuaine on energiaa sisältävä polttoaine tai erilaisten tuotteiden raaka-aine, jota käyttämällä voidaan korvata fossiilisia polttoaineita tai energiaintensiivisiä raaka-aineita tai esimerkiksi öljypohjaisia tuotteita. Nämä kaksi metsien käyttömuotoa voivat osin kilpailla keskenään. Jos metsien hiilivaraston kasvattamista pyritään maksimoimaan, voidaan puuvarojen energia- ja raaka-ainekäyttöä joutua rajoittamaan ja päinvastoin.

Puuaineen energiasisältö on tavallisesti 18,5–19,5 MJ/kg kuiva-ainetta (Nurmi 1993, 2000). Rauduskoivun kuoressa ja mäntyjen kantopuussa energiasisältö on yli 22 MJ/kg. Polttoainekäytössä puuhun on aina sitoutunut vettä jolloin esimerkiksi Suomessa tyypillisessä 40 % saapumiskosteudessa puun tehollinen lämpöarvo on 10–11 MJ/kg. Siten kuutiometri puuta vastaa energiasisällöltään 200 litraa raskasta polttoöljyä.

Metsä ja metsävarat ovat dynaaminen hiilivarasto, johon metsien kasvun seurauksena kertyy ja hakkuiden sekä luonnonpoistuman kautta poistuu hiltä. Ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta

katsottuna metsät ovat siten merkittävä ja tutkimuskohteenakin kiinnostava mahdollisuus vaikuttaa globaaleihin hiilivirtoihin. Metsien hiilensitomiskykyyn sekä varastojen suuruuteen vaikuttavat kasvuolosuhteet, metsien puulaji- ja ikärakenne sekä metsien hoito, käyttö ja erilaiset metsätuhot. Metsien hiilivaraston kuten kasvunkin muutoksia on tarkasteltu puu-, metsikkö-, alue- ja maatasolla (mm. Routa ym. 2011, Kilpeläinen ym. 2012). Intensiivisellä metsänhoidolla ja puulajivalinnoilla voidaan nostaa metsien hiilensidontaa (Routa ym. 2011). Erityisesti metsikkötason tarkasteluissa on viime vuosina otettu käyttöön ”carbon debt” käsite, jonka mukaan kaikki metsistä poistuva puubiomassa vähentää lähtökohtaisesti metsien hiilivarastoa (Mitchell 2012, Wihersaari 2012). Vasta kun metsikkö on saavuttanut hakkuuta edeltävän puuston (tai hiilen) määrän, on hiilivelka maksettu.

Hiilen kierron tarkastelua on laajennettu myös puunhankintaprosesseihin ja edelleen puutuotteiden elinkaareen ja puuhun perustuvaan energiantuotantoon (Lippke ym. 2011). Alue- ja maatason hiilitasetarkasteluissa tarkastelupinta-alaa laajennetaan, jolloin suuren puujoukon tai useiden metsiköiden kasvun ja poistuman hiilitase otetaan huomioon (mm. Kilpeläinen ym. 2012).

Myös metsähakkeen raaka-aineiden jättämistä metsiin hiilivarastoksi on verrattu energiakäytön kasvihuonekaasupäästöihin (Melin ym. 2009, Palviainen ym. 2010, Zetterberg ja Chen 2011). Metsiin jätetyt hakkuutähteet kuitenkin hajoavat vähitellen. Energiakäytön ero varastoksi jättämiseen on valitun laskentamenetelmän mukaan suurin sillä hetkellä, kun poltto tapahtuu. Päästö pienenee, kun aika kuluu ja yhä suurempi osa metsään jätetystä biomassasta hajoaa vapauttaen hiiltä ilmakehään (Wihersaari 2012). Laskelmien tuloksiin ja tulkintaan vaikuttavat tarkasteluajanjakson pituuden lisäksi biomassaositteiden hajoamismallit ja biomassalla korvattavan polttoaineen ominaisuudet. Tällaisessa tarkastelussa nopeasti hajoavat biomassaositteet (neulaset, pienet oksat) ovat ilmaston lämpenemisvaikutusten kannalta parasta polttoainetta, sillä niiden suurin osa niiden sisältämästä hiilestä vapautuu ilmakehään muutamssa vuodessa. Polttoaineominaisuuksiltaan ne taas ovat huonoimpia ja lisäksi niihin on sitoutunut paljon ravinteita. Vastaavasti hitaammin hajoava runko- ja kantopuu ovat tällä laskentamenetelmällä ilmaston kannalta huonoja polttoaineita, sillä ne hajoavat neulasia ja oksia hitaammin. Runko- ja kantopuun polttoaineominaisuudet taas ovat hyvät ja myös ravinnepitoisuus on alhainen.

Metsien kyky kerryttää ja ylläpitää puustoa ja hiilivarastoa on rajallinen. Kun metsä saavuttaa maksimaalisen puupääoman, sen kasvu hidastuu ja luonnonpoistuma alkaa kasvaa. Samalla hyönteis- ja sienituhojen sekä myrsky- ja metsäpalojen aiheuttamat riskit kasvavat ja hiilivarasto voidaan osittain menettää (Lippke ym. 2011, Mitchell ym. 2012).

1.3.5 Johtopäätökset

Kun metsiä tarkastellaan ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta, on tarkoituksenmukainen tarkasteluyksikön koko alue- tai maataso. Pitkän aikavälin seurannat ovat osoittaneet, että Suomen metsistä voidaan otta puuta energiantuotantoon 300 PJ vuosittain teollisuuden sivutuotevirtojen ja suoran energiapuun hankinnan kautta. Samaan aikaan metsien hiilivarasto kasvaa 30–40 Tg CO_2 ekv. vuosivauhtia. Tämän julkaisun skenaarioluvussa on tarkastellaan koko Suomen metsien metsävarojen ja hiilivarastojen kehittymistä metsien käsittelyn eri intensiteeteillä ja myös muuttuvan ilmaston olosuhteissa. Laskelmat osoittavat, että nykyistä merkittävästi suurempi aines- ja energiapuun hankinta on mahdollista erityisesti lämpenevän ilmaston olosuhteissa metsien nettohiilensidontaa vaarantamatta.

Kirjallisuus

Greenhouse gas emissions in Finland 1990–2010. National inventory report to the UNFCCC and the Kyoto Protocol, 13 April 2012. [Verkkodokumentti]. Statistics Finland Saatavana: http://www.stat.fi/tup/khkinv/unfccc_nir_2012.pdf.

Ilvesniemi, H.; Forsius, M.; Finér, L.; Holmberg, M.; Kareinen, T.; Lepistö, A.; Piirainen, S.; Pumpanen, J.; Rinkinen, K.; Starr, M.; Tamminen, P.; Ukonmaanaho, L. & Vanhala, P. Käyhkö, J. & Talve, L. (ed.) Carbon and nitrogen storages and fluxes in Finnish forest ecosystems Understanding the global system. The Finnish perspective., Finnish Global Change Programme FIGARE, 2002. 69–82.

Kellomäki S., Strandman H., Nuutinen T., Peltola H., Korhonen K.T. & Väisänen H. 2005. Adaptation of forest ecosystems, forests and forestry to climate change. FINADAPT Working Paper 4, Finnish Environment Institute Mimeographs 334. Helsinki, 44 s.

Kellomäki, S.; Peltola, H.; Nuutinen, T.; Korhonen, K. & Strandman, H. Sensitivity of managed borea forests in Finland to climate change, with implications for adaptive management. Phil. Trans. R. Soc. B, 2008, 363: 2341–2351

Kilpeläinen, A., Kellomäki, S. & Strandman, H. 2012. Net atmospheric impacts of forest bioenergy production and utilization in Finnish boreal conditions. Bioenergy. Doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01161.x. 7 s. Saatavana: http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/(ISSN)1757-1707/earlyview. [viitattu 24.4.2012]

Kärhä, K., Elo, J., Lahtinen, P., Räsänen, T. ja Pajuoja, H. 2009. Kiinteiden puupolttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa 2020. TTS tutkimuksen tiedote. Luonnonvara-ala: Metsä 10/2009 (736): 8 s.

Lippke, B., Oneil, E., Harrison, R., Skog, K., Gustavsson, L. & Sathre, R. 2011.Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: knowns and unknowns. Carbon Management 2(3): 303–333.

Laitila, J., Asikainen, A. ja Anttila, P. 2008. Energiapuuvarat. Julkaisussa: Kuusinen, M. ja Ilvesniemi, H. (toim.). Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja. Saatavissa: www.metsavastaa.net/energiapuu/raportti.

Liski, J., Lehtonen, A., Palosuo, T., Peltoniemi, M. Eggers, T., muukkonen, P., Mäkipää, R. 2006. Carbon accumulation in Finland's forests 1922–2004 – an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil. Ann. For. Sci. 63: 687–697.

Melin, Y., Petersson, H. & Nordfjell, T. 2009. Decomposition of stump and root systems of Norway spruce in Sweden : a modeling approach. Forest Ecology and Management. 257(5): 1445–1451.

Metsätilastollinen vuosikirja 2011. Metsäntutkimuslaitos. 472 s.

Minkkinen, K. 1999. Effect of forestry drainage on the carbon balance and radiative forcing of peatlands in Finland. Väitöskirja, Helsingin yliopisto, Metsäekologian laitos, 42 s., ISBN 952-91-1547-4.

Mitchell, S. R., Harmon, M. E. & O'Connell, K. E.B. 2012. Carbon debt and carbon sequestration parity in forest bioenergy production. Bioenergy. Doi: 10.111/j.1757-1707.2012.01173.x. 10 s. Saatavana: http://ncfp.files.wordpress.com/2012/05/carbon-debt-paper.pdf.

Palviainen, M., Finér, L., Laiho, R., Shorohova, E., Kapitsa, E. & Vanha-Majamaa, I. 2010. Phosphorus and base cation accumulation and release patterns in decomposing Scots pine, Norway spruce and silver birch stumps. Forest Ecology and Management 260: 1478–1489.

Puun energiakäyttö 2011. Metinfo tilastopalvelu. Metsäntutkimuslaitos. http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/puunkaytto/puunkaytto_polttoaineet_t.html

Routa, J., Kellomäki, S., Kilpeläinen, A., Peltola, H. & Strandman, H. 2011. Effects of forest management on the carbon dioxide emissions of wood energy in integrated production of timber and energy biomass. Bioenergy (3):483–497. doi: 10.1111/j.1757-1707.2011.01106.x.

Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Tuomenvirta, H. 2005. Climate scenarios for FINADAPT studies of climate change adaptation . Finnish Environment Institute Mimeographs 345, FINADAPT working paper 15, Helsinki, Finland; Finnish Environment Institute.

Salminen, O. 2012. Hakkuumahdollisuudet 2009-2038 VMI tulosten julkistus 19.6.2012. Saatavana: http://www.metla.fi/tiedotteet/2012/pdf/2012-06-19_vmi_julkistus_hakkuumahdollisuudet.pdf.

Vanhala, P.; Karhu, K.; Tuomi, M.; Björklöf, K.; Fritze, H. & Liski, J. Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in southern and northern areas of the boreal forest zone. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40: 1758–1764

Wihersaari, M. 2012. Biopolttoaineiden hiilineutraalisuudesta uusia arvioita. Bioenergia 1: 41–42.

Ylitalo, E. 2012. Puun energiakäyttö 2011. Metsätilastotiedote (SVT Maa-, metsä- ja kalatalous) 16/2012. 7 s.

Zetterberg, L. & Chen, D. 2011. The time aspect of bioenergy – climate impacts of bioenergy due to differences in carbon uptake rates. Swedish Environmental Research Institute. IVL Reports B 1989. 40 p.

Metsien reagointi energia- ja hiilitaloudessa

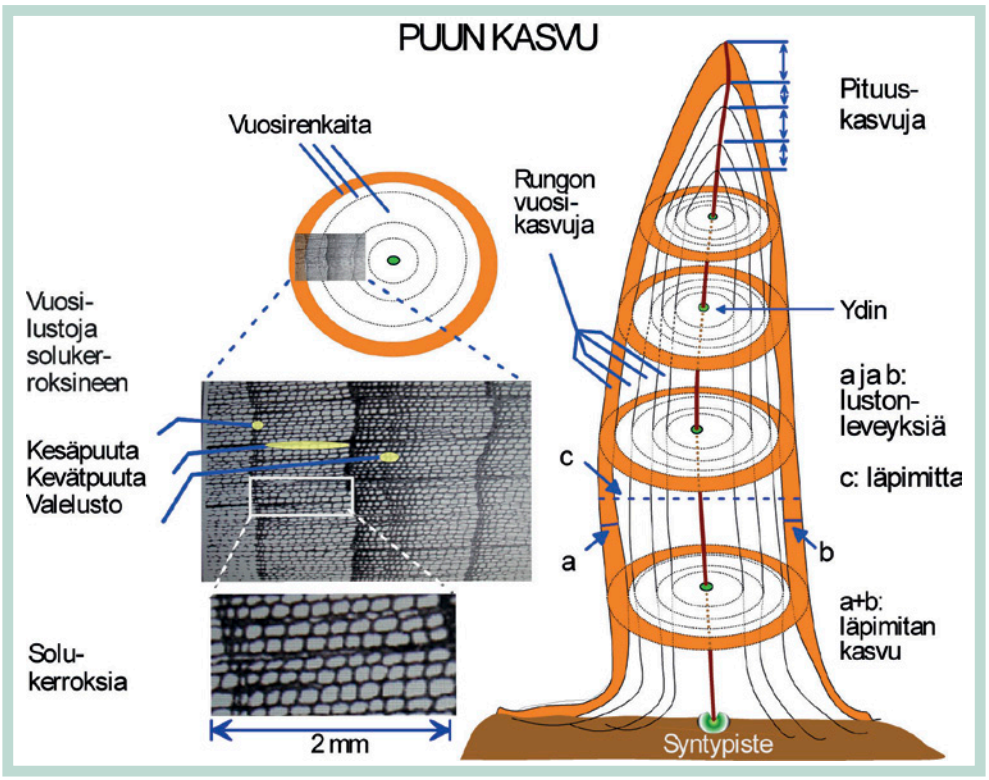
2

2.1 Ilmastonmuutokset ja niiden syyt puulustojen ja muiden proksitietojen pohjalta

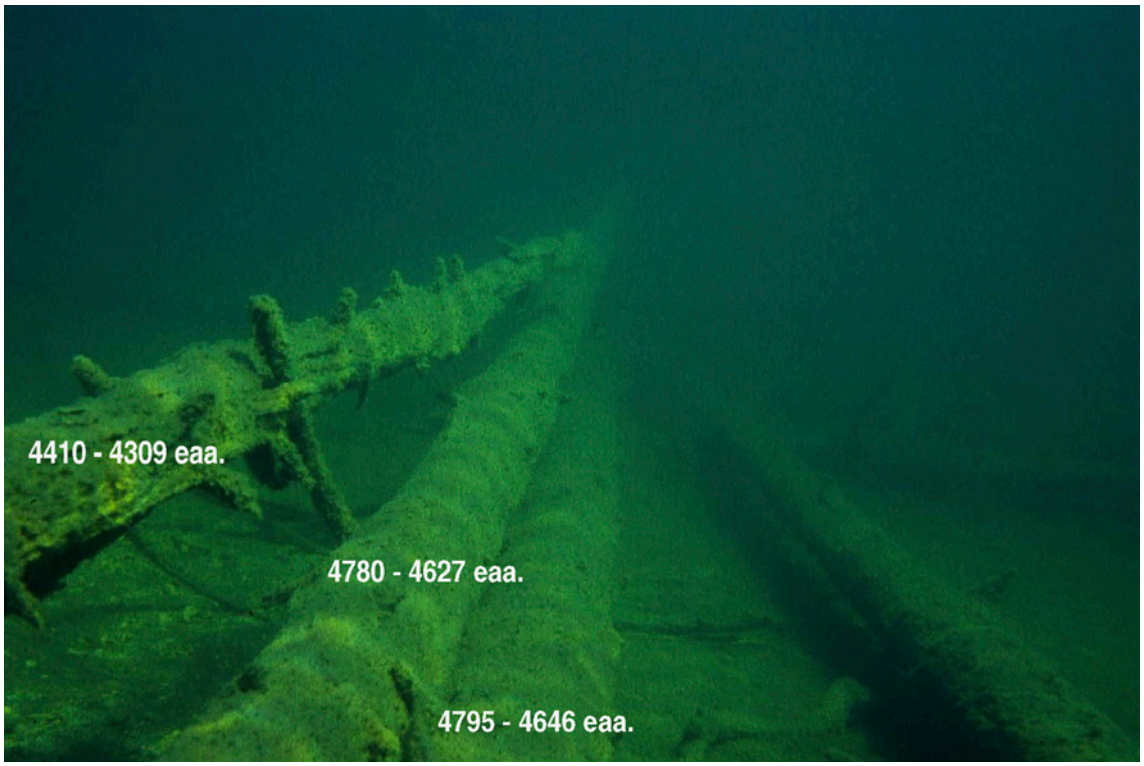
Kari Mielikäinen, Mauri Timonen ja Samuli Helama

Ilmastonvaihtelut jättävät jälkensä moniin kronologisesti tallentuviin rakenteisiin, kuten puiden vuosilustoihin, jää- ja maakerrostumiin, järvisedimentteihin ja merten koralleihin. Tällaisten aikasarjojen perusteella päästään arvioimaan maapallon olosuhteita ajassa jopa vuosimiljoonia taaksepäin (Eronen 1990).

Dendrokronologia on tieteenala, jossa puiden vuotuista kasvua tutkimalla selvitetään ympäristöön liittyviä tapahtumia ja niiden vaikutuksia luontoon ja ihmiskulttuureihin. Dendrokronologian menetelmien ja aineistojen kehittymisen myötä tutkimuksen aikaperspektiivi on tuhansia vuosia, mikä on vahvistanut dendrokronologian asemaa erityisesti ympäristönmuutostutkimuksessa.



Kuva 2.1.1. Puun runko kasvaa vuosittain pituutta ja paksuutta. Vuotuinen paksuuskasvu koostuu kooltaan ja seinämäpaksuudeltaan erilaistuvista soluista ja solukerroksista. Näin syntyvät vuosirenkaat ovat havupuilla nähtävissä rungon poikkileikkauksessa vuosilustoina.



Kuva 2.1.2. Männyn nykyisen metsänrajan yläpuolisista pikku järvistä voi löytyä muinaisia mäntyrunkoja. Nämä Näkkälä–Pöyrisjärvitien vieressä sijaitsevan lammen pohjamudasta pilkistävät männyn megafossiilit elivät vajaat 7000 vuotta sitten. Kuva Metla/Mauri Timonen.

Lapin metsänrajamännyn kasvu ja puuaineen tiheys (Kuva 2.1.1) riippuvat pääosin kesän lämpöoloista. Voimakkaimmat *ilmastosignaalit* löytyvät vuosilustojen leveydestä ja puuaineen maksimitiheydestä (Vaganov ym. 2006), joista ensimmäinen kertoo pääasiassa kesä-heinäkuun (Mikola 1950) ja jälkimmäinen huhti-syyskuun lämpöoloista. Puulustot voivat selittää jopa 80 % tutkittavan ilmastomuuttujan vaihtelusta (Briffa ym. 2001). Kasvuprosessissa lustojen solurakenteisiin tallentuu hiilen, hapen ja vedyn isotooppeja, jotka yhdessä merten pohjasedimenteistä mitattavan tiedon kanssa laajentavat ilmastonmuutosten tarkastelun kasvukausien lämpötiloista ja sademääristä meri- ja ilmavirtojen sekä aurinkoisuuden ja pilvisyyden ilmastovaikutusten arviointiin.

Lapin järvien pohjamudista on löydetty suuri määrä satoja ja tuhansia vuosia sitten kasvaneiden muinaismäntyjen jäänteitä (*megafossiileja*). Puut ovat aikoinaan kasvaneet järvien rantavyöhykkeillä ja suistuneet lopulta vanhuuttaan tai myrskyjen, metsäpalojen ja muiden syiden seurauksena veteen. Jos kylmävetisen järven ranta on syvä ja pehmeäpohjainen, mutaan uponneet rungot säilyvät lahoamattomina jopa vuosituhansien ajan (Kuva 2.1.2). Tässä raportissa esitettävät tutkimustulokset perustuvat Lapin männyistä metsänrajalta laadittuun 7645 vuoden mittaiseen vuodentarkkaan lustosarjaan ja sitä täydentäviin aineistoihin.

2.1.1 Puut ilmaston ja ympäristönmuutosten tulkkina

Puun kasvu ja ilmastosignaali

Cook (1990, s. 98) kuvaa puun kasvuprosessin teoreettisessa kasvumallissaan seuraavasti:

$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t$, jossa [1]

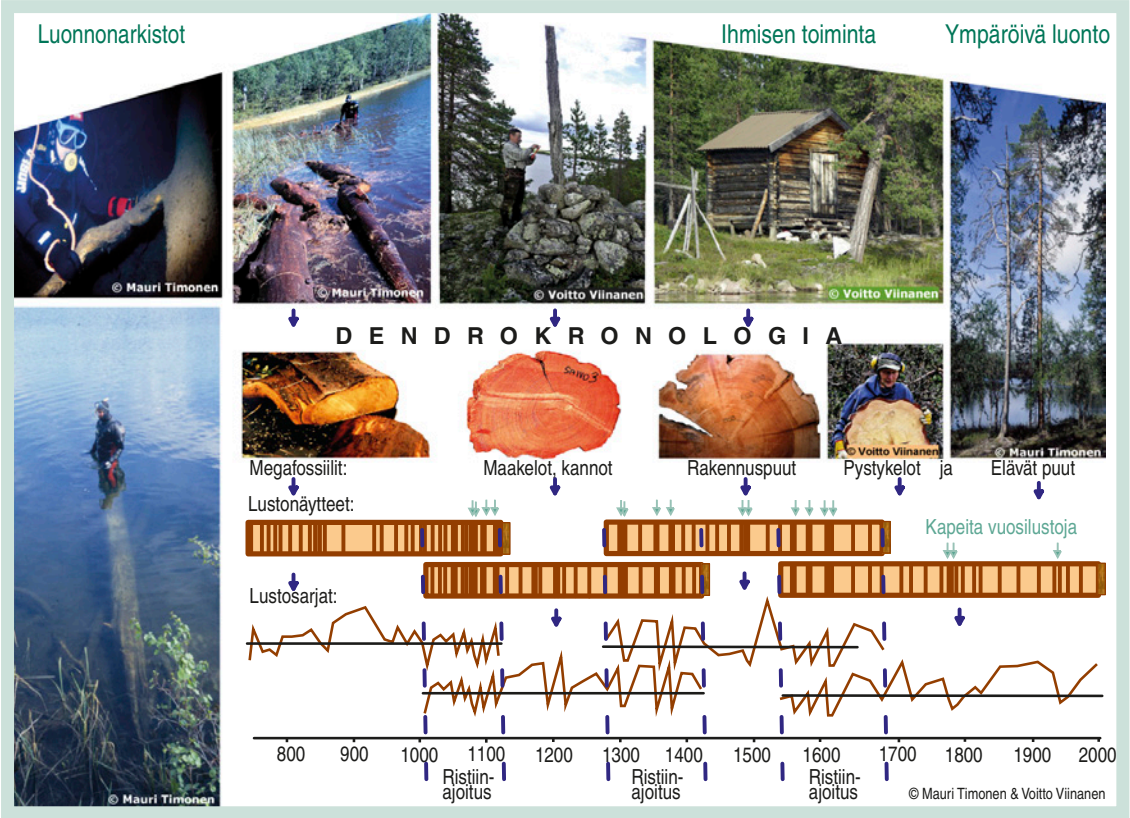
R_t = mitattu kasvu vuonna t;
A_t = luston biologisen iän määräämä osuus kasvusta vuonna t;
C_t = sää- ja ilmastotekijöiden vaikutus kasvuun vuonna t;
$D1_t$ = metsikön sisäisten (endogeenisten) tekijöiden vaikutus kasvuun vuonna t;
$D2_t$ = ulkoisten (eksogeenisten) tekijöiden vaikutus kasvuun vuonna t;
E_t = tuntemattomien tekijöiden vaikutus kasvuun vuonna t.

Nuoruudessa puun paksuuskasvu (A_t) aluksi kohoaa, mutta kääntyy muutaman kymmenen vuoden iässä laskuun. Voimakkaimman kasvun taso ja ajankohta riippuvat kasvupaikasta, maantieteellisestä alueesta, puulajista ja metsikön syntytavasta. Sään ja ilmaston vaikutus (C_t) näkyy sekä pituus- että paksuuskasvussa. Kesän kylmyys voi tyrehdyttää puun paksuuskasvun metsänrajalla joskus niin tyystin, ettei vuosirengasta muodostu lainkaan. Tällaisia puuttuvan kasvun vuosia on ollut Lapissa viimeksi 1830-luvulla ja 1900-luvun alussa. Säätekijät vaikuttavat metsiin vuositasolla, mutta ilmastotekijät pidemmällä aikavälillä. Ilmastotekijöihin sisältyvät myös auringon, merivirtojen ja ihmiskunnan toiminnan vaikutukset. Metsikön sisäisiä kasvutekijöitä ($D1_t$) ovat esimerkiksi puiden välinen kilpailu kasvutilasta ja siementuotanto. Ulkoisia tekijöitä ($D2_t$) ovat hakkuut, metsäpalot, hyönteistuhot, taudit, saasteet, tuulet, tulvat ja myrskyt. Dl_t:n ja $D2_t$:n yhteydessä esiintyvä parametri δ saa arvon 0 tai 1 sen mukaan, onko tekijä voimassa vai ei. Selittämätöntä kasvun vaihtelua (E_t) aiheuttavat muun muassa kasvupaikan viljavuuden pienvaihtelu, rinteiden kaltevuussuunta ja mittausvirheet (Mielikäinen ym. 1996a).

Ilmastosignaalin (C_t) erottaminen kasvumallin muiden tekijöiden (A_t, $D1_t$ ja $D2_t$) vaikutuksista on sitä epävarmempaa, mitä enemmän kasvussa esiintyy sisäisten ja ulkoisten tekijöiden aiheuttamaa vaihtelua eli *kohinaa*. Koska kaikkia kasvuun vaikuttavia tekijöitä ei ole mahdollista selvittää, on jo aineiston keruuvaiheessa pohdittava keinoja vähentää kohinaa siten, että tutkittava signaali saadaan esiin mahdollisimman voimakkaana.

Lustosarjan luonti ja standardointi

Puun ytimestä pintaan mitattua lustoleveystaulukkoa kutsutaan v*uosilustosarjaksi*. Raja-Joosepin läheisyydessä kasvavan 770-vuotiaan männyn vuosilustosarja on tällä hetkellä Suomen pisin elävän puun aikasarja. Tuhansien vuosien pituiset sarjat luodaan yhdistämällä elävien puiden, kelojen, kantojen, rakennushirsien ja megafossiilien ajoitetut lustonäytteet toisiinsa. Ajoittaminen ja näytteiden yhdistäminen tehdään ristiinajoittamalla. Menetelmän perusajatuksena on yhdistää osittain samanaikaisesti eläneiden puiden saman kalenterivuoden lustot. Tämä edellyttää, että näytteissä näkyy jokin yhteinen erityispiirre, esimerkiksi kylmistä kesistä tai hyönteistuhoepidemioista aiheutuneet normaalia kapeammat lustot (Kuva 2.1.3). Lustosarja voi kellua ajan virrassa tai jatkua yhtenäisenä riippuen siitä, onnistutaanko keskenään ristiinajoitetut näytteet yhdistämään vuodentarkasti kalenterivuosiin. Kelluva lustosarja voidaan kytkeä kalenterivuosiin radiohiiliajoittamalla, jolloin päästään parhaimmillaan alle ± 10 vuoden tarkkuuteen.



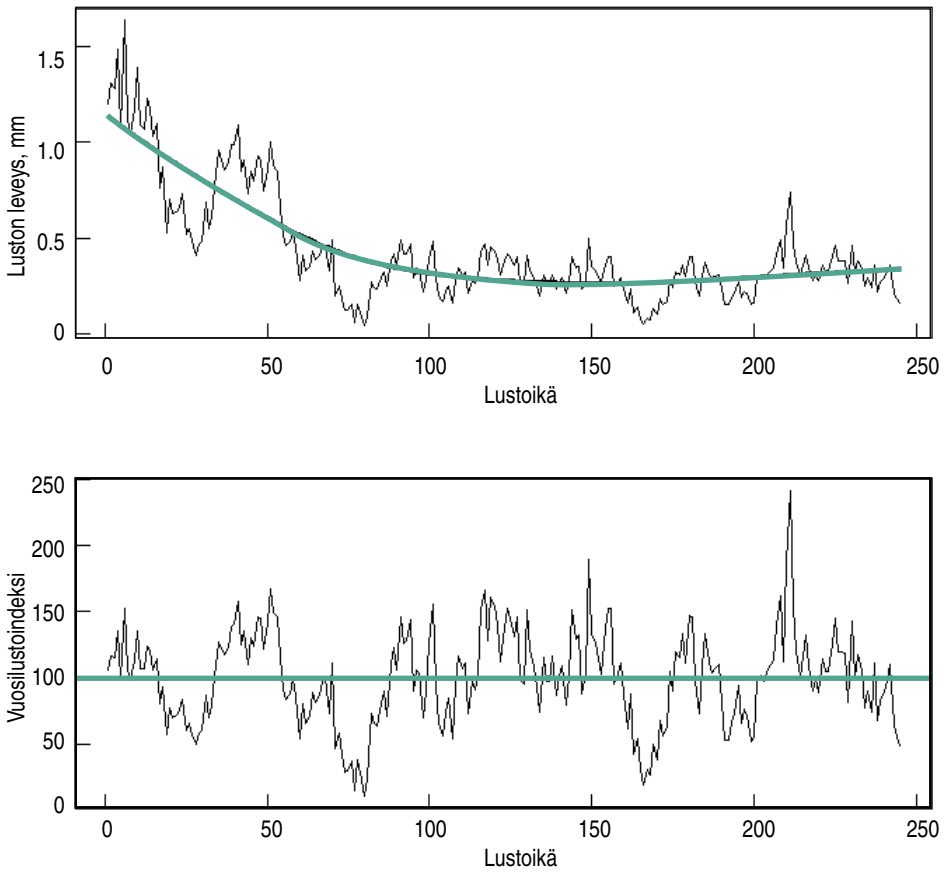
Kuva 2.1.3. Puunäytteiden ristiinajoitus perustuu saman kalenterivuoden lustojen paikallistamiseen eri näytteistä. Lapin kylmät kesät näkyvät männyssä kapeina vuosilustoina muodostaen viivakoodimaisen kuvion, mikä auttaa kohdentamaan näytteiden vastinvuodet toisiinsa. Kuvat Metla/Mauri Timonen ja Voitto Viinanen.

Lustosarjojen *standardoinnissa* vuosilustosarjasta poistetaan puun ikääntymisestä aiheutuva kasvun aleneva trendi ja metsikön sisäisten tekijöiden vaikutukset kasvuun. Tätä varten laaditaan lustonleveyttä iän suhteen kuvaava tilastollinen malli, johon mitattuja arvoja verrataan. Prosenttilukuna ilmaistavan *vuosilustoindeksin* arvo 100 tarkoittaa tutkittavan ajanjakson keskimääräisessä ilmastossa kasvaneen puun kasvun tasoa (Kuva 2.1.4). Kasvukauden suotuisuutta kuvaava männyn vuosilustoindeksi vaihtelee Etelä-Suomessa tyypillisesti välillä 75–125 ja Pohjois-Suomessa välillä 60–140. Vaihtelu on voimakkainta männyn metsänrajalla, jossa vuosilustoindeksi voi nousta yli kahteensataan.

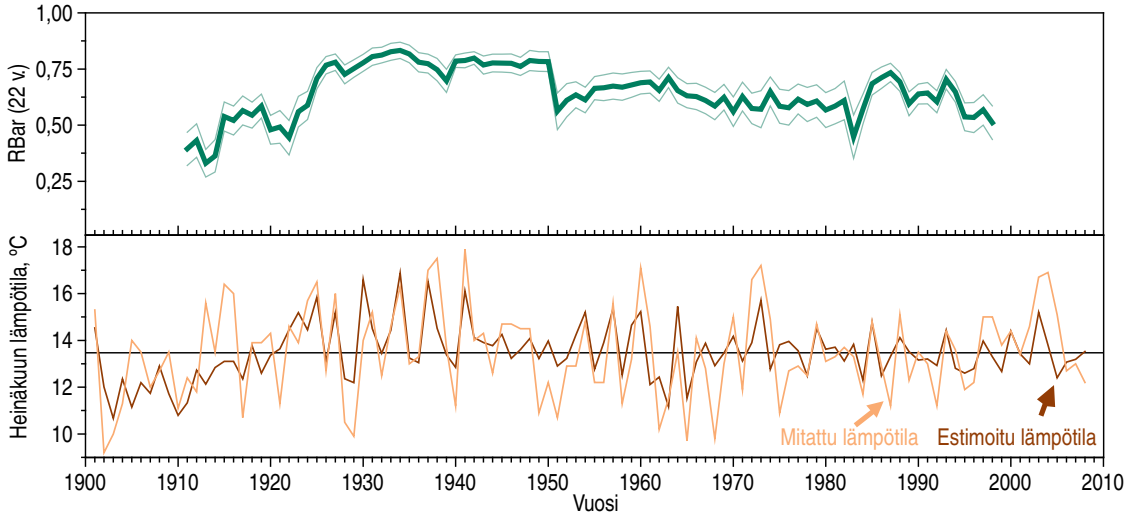
Yhden puun yksittäinen vuosilusto tai vuosilustoindeksi ei vielä kerro paljoakaan kyseisen vuoden säätekijöistä, sillä kasvussa on myös geneettisten ja muiden tekijöiden aiheuttamaa puiden välistä satunnaisvaihtelua. Vaihtelua vähennetään laskemalla useisiin kymmeniin havaintoihin perustuvia keskiarvoja. Jos vuotuisen indeksiestimaatin *tarkkuusvaatimukseksi* asetetaan esimerkiksi ± 10 %, tarvitaan männyn metsänrajalla yli 50 lustohavaintoa kalenterivuotta kohden. Vuotuisia indeksejä laskettaessa on otettava huomioon myös aiempien kesien sääolosuhteiden vaikutus *(autokorrelaatio)* puun kasvuun.

Standardointi tehdään tutkimuksen kysymyksenasettelusta riippuen joko puu- tai aluekohtaisesti. Puukohtaisessa menetelmässä jokaiselle lustosarjalle lasketaan oma lustonleveyttä kuvaava tasoitusmallinsa, jolloin indeksit kuvaavat vuosien ja vuosikymmenten välistä vaihtelua. Satojen tai tuhansien vuosien pitkäaikaisvaihtelut ja trendit selvitetään RCS-menetelmällä (*Regional Curve Standardisation*), jossa tutkimusalueen kaikkien eri aikoina eläneiden puiden lustosarjat yhdistetään yhteisen lustonleveysmallin muodostamiseksi. RCS-menetelmä mahdollistaa pitkäaikaisten lämpö- ja kylmäkausien havaitsemisen.

Vuosilustoindeksi on suhteellinen luku, jonka kertoo muutoksesta vertailukohdan suhteen. Jos tutkittavaa asiaa halutaan tarkastella lämpötila-asteikolla, on laadittava ns. siirtofunktio, joka kuvaa indeksin ja lämpötilan välisen tilastollisen riippuvuuden. Koska säännöllisiä ilmastomittauksia on tehty parhaimmassakin tapauksessa vain muutaman sadan vuoden ajan, on siirtofunktiotkin laadittava sen mukaisesti. Jos siirtofunktioita sovelletaan jopa tuhansien vuosien pituisiin lustosarjoihin, oletetaan entisajan puiden reagoineen ilmastoon samalla tavoin kuin nykyään.



Kuva 2.1.4. Vuosilustosarjan standardoinnissa poistetaan puun ikääntymisestä ja muista tutkimusta häiritsevistä tekijöistä aiheutuva kasvun vaihtelu (ylempi kuva). Standardoidut arvot eli vuosilustoindeksit, ovat lähtökohtana useimmissa lustotutkimusanalyyseissa (alempi kuva).



Kuva 2.1.5. Norjan Karasjoella mitattu heinäkuun keskilämpö verrattuna Inarin Muotkanruoktun mäntyjen vuosilustoindekseistä arvioituun lämpötilaan (alempi kuva). Ylemmän kuvan leveä viiva kuvaa mitatun ja arvioidun lämpötilan välistä korrelaatiota 22 vuoden liukuvissa aikaikkunoissa (Rbar (22 v). Ohuet viivat kuvaavat 95 %:n luottamusvälejä. Korrelaatio on vaihdellut arvon 0,60 molemmin puolin.

Kuvassa 2.1.5 käytetty siirtofunktio laadittiin ennustamalla Karasjoella mitattua heinäkuun kuukausikeskilämpötilaa muutaman kymmenen kilometrin päässä sijaitsevan Muotkanruoktun männyn vuosilustoindeksillä:

$T7_{est} = 9{,}54225 + 0{,}0644 \times Ind_t - 0{,}0248 \times Ind_{t-1}$, jossa

$T7_{est}$	=	Mallilla laskettava heinäkuun keskilämpötila
Ind_t	=	Kuluvan vuoden vuosilustoindeksi
Ind_{t-1}	=	Edeltävän vuoden vuosilustoindeksi

Malli selittää noin 40 % Karasjoen heinäkuun lämpötilan vaihtelusta (Kuva 2.1.5).

Siirtofunktiolla muunnettiin Lapin metsänrajamännyn yli 7600-vuotisen lustokronologian vuosilustoindeksit heinäkuun keskilämpötiloiksi. Puukohtaiseen tasoitukseen ja mallinnukseen perustuvissa lämpötila-arvioissa näkyy vain vuosien ja vuosikymmenten välinen lämpötilavaihtelu (Kuva 2.1.8).

Divergenssi – ongelma vai mahdollisuus?

Vuosilustojen leveyden ja kesä-heinäkuun lämpötilan välistä riippuvuussuhdetta on pidetty hyvin kiinteänä pohjoisen pallonpuoliskon metsänrajametsissä. Viime vuosina asiasta ei ole enää oltu yhtä vakuuttuneita (mm. D'Arrigo ym. 2007). Keskusteluissa esiin nousseella *divergenssiongelmalla* tarkoitetaan viime vuosikymmeninä joissakin tutkimuksissa havaittua lämpötilamittausten ja lustomallitusten kasvavaa poikkeamaa. Ongelman on arveltu liittyvän puiden kyvyttömyyteen reagoida ilmaston nopeaan lämpenemiseen ja ilmakehän CO_2-pitoisuuden nousuun. Kriittisimmissä kannanotoissa on divergenssiin vedoten kyseenalaistettu koko puulustotutkimuksen käyttökelpoisuus ilmastonmuutostutkimuksissa.

Divergenssi voimistuu erityisesti silloin, kun puun kasvua voimakkaimmin rajoittavan ilmastotekijän vaikutus (ilmastosignaali) heikkenee ja jonkun toisen ilmastotekijän vaikutus vahvistuu. Metsänrajalla männyn kasvun vaihtelu kuvaa kesän lämpimyyttä niin kauan, kun lämpötila on kasvun minimitekijä. Lämpötilan kohotessa kuivuudesta saattaa tulla kasvun minimitekijä, jolloin lämpötilasignaali heikkenee tai katoaa kokonaan.

Divergenssi voi joissakin tapauksissa selittyä myös tutkimusaineistojen kyvyttömyydellä kuvata tutkittavaa ilmiötä. Heikkolaatuisen aineiston riski kasvaa merkittävästi, kun eri lähteistä poimittuja aineistoja yhdistellään ilman kattavaa tietoa aineistojen taustamuuttujista. Eri alueilta kerättyjen aineistojen yhdistäminen voi johtaa lämpötilaa ja sademäärää kuvaavien ilmastosignaalien sekaantumiseen. Lämpötilaa tulisi tutkia vain alueilla, jossa se on ainoa kasvua rajoittava ilmastotekijä, kuten metsänrajalla. Etelämpänä vuosilustoista voidaan arvioida kesien sateisuutta tai kuivuutta (Helama ja Lindholm 2003). Metsänrajalla tehdyt tutkimukset eivät ole toistaiseksi viitanneet divergenssiin (Büntgen ym. 2011). Puiden kasvut seuraavat toisin sanoen kasvukauden aikaisten (kesä-heinäkuu) lämpötilavaihteluiden rytmiä kuten ennenkin.

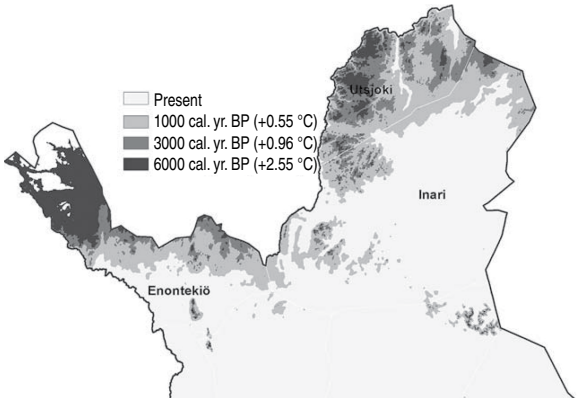
2.1.2 Mitä lustoaikasarjat kertovat menneestä ilmastosta?

Männyn lustokronologiat Lapissa

Professori Matti Eronen aloitti Lapin männyn lustosarjan rakentamisen 1970-luvun alussa ajoittamalla radiohiilimenetelmällä järvistä löytämiään männyn megafossiileja. Laajan ja pitkäaikaisen yhteistyön tuloksena valmistunut 7645-vuotinen sarja (Eronen ym. 2002) on amerikkalaisen 8801 vuotta kattavan vihnemäntykalenterin jälkeen maailman toiseksi pisin havupuukronologia. Lustokalenterin valmistumista pitkään vaikeuttanut näytteetön ajanjakso (“aukko”) välillä 350–170 eaa. saatiin suljetuksi vasta vuonna 1999 yhdeksän maan yhteisessä EU-projektissa.

Järvien pohjamudista nostetut muinaismännyt osoittavat metsänrajan aaltoilleen ilmaston vaihteluiden tahdissa vuosituhansien ajan. Muutokset molempiin suuntiin ovat olleet hitaita kestäen jopa satoja vuosia. Sirénin (1961) mukaan metsänrajametsien uudistuminen ja laajeneminen ovat keskittyneet lämpimiin ilmastojaksoihin viimeisen tuhatvuotiskauden aikana. Mäntymegafossiilien löytöpaikat osoittavat metsänrajan sijainneen vuosituhansia sitten 80 km nykyistä pohjoisempana (Helama ym. 2004). Kultin ym. (2006) tutkimuksen mukaan Lapin kesät olivat 6000 vuotta sitten 2,6 ºC nykyistä lämpimämpiä (Kuva 2.1.6).

Noin 2700 vuotta sitten alkoi 500 vuoden viileämpi ja kosteampi ajanjakso, jolloin metsänraja perääntyi nykyistä etelämmäksi ja tuntureilla alemmaksi. Tähän viittaa myös se, että tutkimuksissamme ei löydetty senaikaisia männyn megafossiileita nykyiseltä metsänrajalta tai sen pohjoispuolelta.

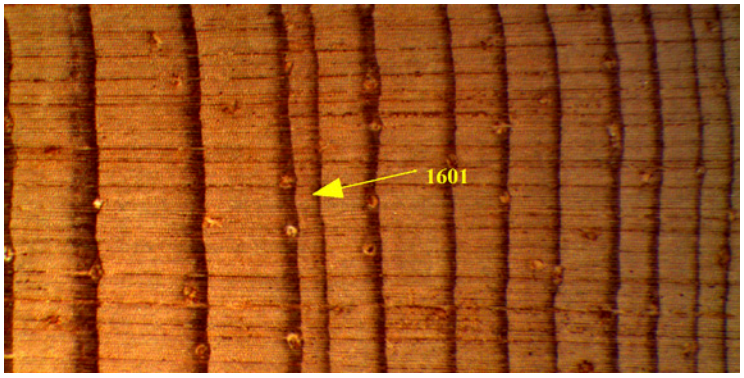


Kuva 2.1.6. Subfossiilisten näytteiden löytöpaikkoihin perustuva arvio mäntymetsien laajuudesta ja sen pohjalta arvioidut heinäkuun keskilämpötilat viime vuosituhansien aikana (Kultti ym. 2006). Vaalea alue kuvaa nykyistä männyn levinneisyysaluetta ja tummin alue mäntymetsien levinneisyyttä noin 6000 vuotta sitten.

Ilmasto lämpeni kylmän jakson jälkeen asteittain. Seuraava lämpöhuippu saavutettiin keskiajan lämpökaudeksi kutsutulla ajanjaksolla 900–1300, jolloin mänty levisi takaisin pohjoisen puuttomille alueille. Lämmin kausi päättyi pikku jääkautena tunnettuun viileään jaksoon (Holopainen ym. 2009), joka kesti meillä 1900-luvun alkuun saakka. Ilmasto ei tuolloinkaan ollut kaiken aikaa kylmä. Lämpimistä vuosikymmenistä kertovat nykyisellä metsänrajalla 1700-luvun puolivälin jälkeen syntyneet puusukupolvet.

Metsänrajalla männyn lustoihin tallentuu sekä paikallisia että globaaleja ilmastosignaaleja. Näistä ensiksi mainittuja aiheuttavat meri- ja ilmavirrat ja jälkimmäisiä auringon aktiivisuuden vaihtelut ja tulivuorten purkaukset. Suuret purkaukset voivat olla vaikutukseltaan maailmanlaajuisia ja ne saattavat viilentää ilmastoa jopa puolen asteen verran muutamaksi vuodeksi (Wanner ym. 2008). Suurista tulivuorten purkauksista jopa 86 % näkyy puiden vuosilustoissa tai jäätikkökerrostumissa (Salzer ja Hughes 2007). Perussa vuonna 1600 purkautunut Huaynaputina kavensi mäntyjen vuosilustot minimiinsä (Kuva 2.1.7) (Helama ym. 2002; Shumilov ym. 2011). Kreikan saaristossa vallinnut minolainen kulttuuri tuhoutui Santorinin rajussa purkauksessa 1600-luvulla eaa. Purkauksen aiheuttama pölypilvi vaikutti dramaattisesti myös Lapin mäntyjen kasvuun (Kuva 2.1.8). Muita lustoista havaittavia esimerkkejä purkauksista ovat Pinatubo Filippiineillä 3550 eaa., Pelée Länsi-Intiassa 2440 eaa., Hekla Islannissa 950 eaa., Etna Italiassa 122 eaa., Rabaul Papua-Uusi-Guineassa 540 jaa., Hekla Islannissa 1104 jaa. ja Huaynaputina Perussa helmikuussa 1600 (Siebert ja Simkin 2002).

Pikku jääkauden syntyyn saattoi myötävaikuttaa vuosien 1275–1300 ja 1450–1482 aktiivinen tulivuoritoiminta, joka yhdessä auringon aktiivisuuden hiipumisen ja eräiden muiden tekijöiden kanssa viilensi ilmastoa vuosikymmeniksi, mikä puolestaan vauhditti jäätiköitymistä ja ilmaston uuteen toimintatilaan (pikku jääkausi) kytkeytymistä (Miller ym. 2012).

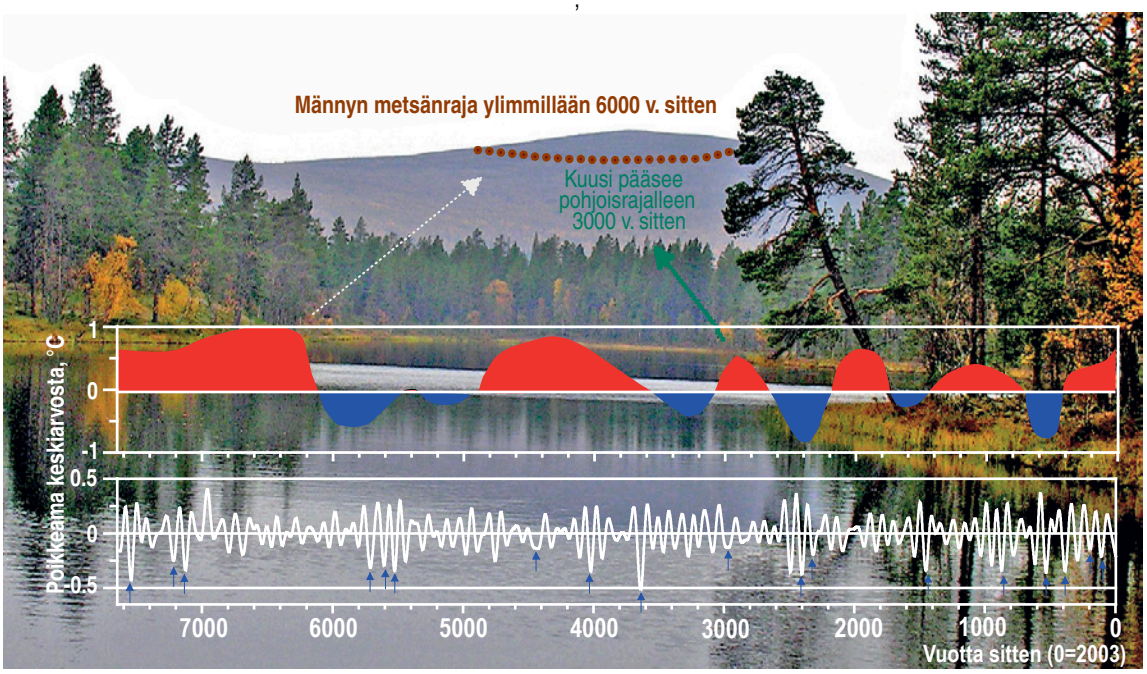


Kuva 2.1.7. Perussa vuonna 1600 purkautunut Huaynaputina-tulivuori pimensi tuhkallaan Lapin taivaan niin, että männyn lusto seuraavana vuonna jäi vain noin puoleen normaalista. Kuva Metla/Mauri Timonen.

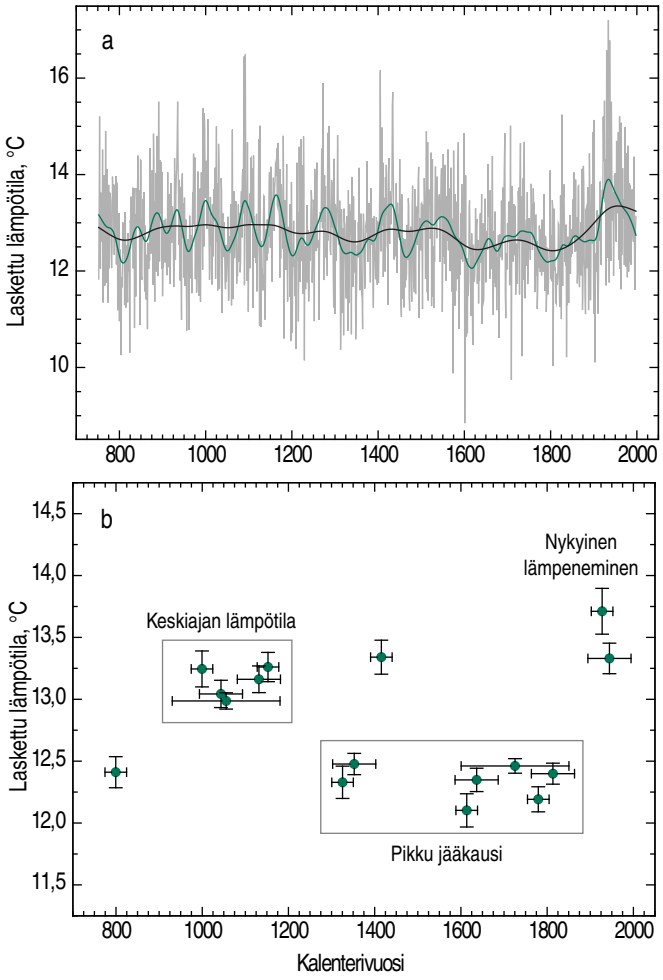
Viimeisten tuhannen vuoden ilmasto puulustoista tulkittuna

Lapin männyn pitkä lustokalenteri tekee mahdolliseksi tutkia yksityiskohtaisesti viimeisimmän tuhannen vuoden ilmastollisia vaihteluita. Pitkäaikaisten ilmastonvaihteluiden analysointiin tarkoitetulla RCS-menetelmällä lasketut tulokset osoittavat, että nykyisen ajanlaskumme lämpimin 250-vuotisjakso vallitsi Lapissa vuosina 931–1180 ja kylmin vuosina 1601–1850 (Kuva 2.1.9, Helama ym. 2009b). Lyhyempiä lämpökausia on ollut 1400-luvulla ja 1900-luvun alkupuolella. Vuoden 1000 tienoilla alkanut kolmatta sataa vuotta kestänyt lämmin jakso tunnetaan myös historian kirjoissa keskiajan lämpökautena. Se innosti grönlantilaiset ja islantilaiset viljelemään maata ja kasvattamaan karjaa sekä englantilaiset tuottamaan viiniä ja kainuulaiset vehnää. Itä-Suomen mäntyjen puulustot sekä jokien, järvien ja valtamerten pohjakerrostumat osoittavat, että lämpökausi oli myös poikkeuksellisen kuiva eri puolilla maailmaa (Helama ja Lindholm 2003, Helama ym. 2009a). Perun rannikon normaalisti tulvivat joet eivät tuolloin tulvineet lainkaan ja Afrikassa nykyisin varsin runsasvetiset järvet olivat tuolloin täysin kuivuneita

Keskiajan lämpökausi päättyi 1300-luvulla keskimääräistä vajaan asteen viileämpään pikku jääkauteen (Moore 1998). Grönlannin elinolosuhteet heikentyivät toistuvien katovuosien vuoksi. Koska viikingit eivät kyenneet omaksumaan eskimoiden kalastus- ja hylkeenpyyntitaitoja, heidän oli muutettava pois. Katovuodet tappoivat lopulta myös suuren osan Suomen kansasta nälkään ja kulkutauteihin. Samanaikaisesti Hollannin kanaalit jäätyivät toistuvasti ja Lontoon kauppiaat järjestivät talvimarkkinoita Thames-joen jäällä 1800-luvun alkupuolelle saakka.



Kuva 2.1.8. Holoseeni-ilmasto on vaihdellut satojen ja tuhansien vuosien aikaskaalassa parin asteen haarukassa (Dansgaard ym. 1969, Schönwiese 1995). Lämpimintä oli noin 7000–6000 vuotta sitten, jolloin myös männyn metsänraja oli ylimmillään. Tämän päätrendin lisäksi lustot osoittavat lyhytaikaisempaa, vuosikymmenten ja vuosien välistä ilmaston vaihtelua. Metsänrajamännyn vuosilustoista Karasjoen lämpötilamallilla laskettu heinäkuun keskilämpötilan poikkeama (valkoinen viiva, 30 vuoden tasoitus) on esimerkki vuosikymmenten välisestä ilmaston vaihtelusta, joka on määrältään asteen luokkaa. Tasoituksessa näkyy myös aktiivisten tulivuorijaksojen vaikutus voimakkaina alaspäin suuntautuneina piikkeinä. Siniset nuolet viittaavat ajanjaksoihin, jotka voidaan liittää tunnettuihin purkauksiin. Voimakkain Lapin männystä löytyvä viilenemispiikki yhdistetään Santorinin tulivuoren pitkäkestoiseen purkautumiseen 1600-luvulla eaa. Kuva päivitetty 17.9.2012.



Kuva 2.1.9. Männyn vuosilustoista arvioitu heinäkuun lämpötila vuosina 750–2000 Lapissa. Yläkuvan aikajaksot vuotuinen (harmaa), 25 vuoden (sininen) ja 75 vuoden (musta) tasoitettu keskiarvo. Alakuvan vaakajanat kuvaavat lämpimimpiä ja viileimpiä 50-, 100- ja 250-vuotisjaksoja. Pystyjanat kuvaavat tulosten kaksinkertaista keskivirhettä. Keskiajan lämpökausi ja pikku jääkausi on kuvattu laatikoilla (Helama ym. 2009b).

2.1.3 Pitkäaikaisten ilmaston muutosten syyt

Aurinko ja avaruusperäiset tekijät

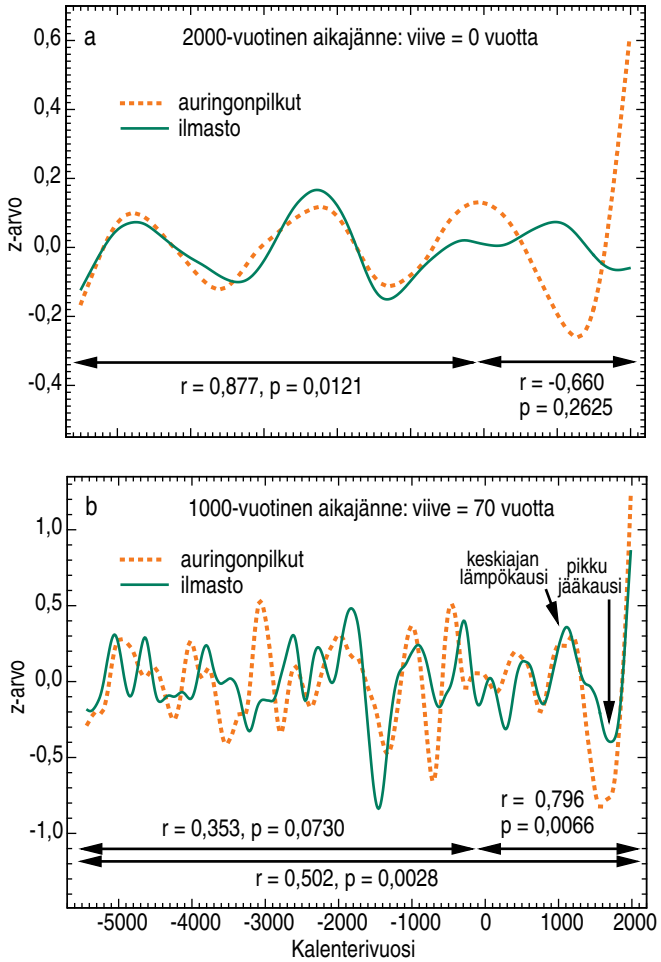
Ilmaston pitkän aikavälin vaihtelut määräytyvät auringon säteilyn sekä maan akselin kallistelun, hyrrämäisen vaappumisen ja kiertoradassa tapahtuvien jaksollisten muutosten (Milanković 1941) yhteisvaikutuksen tuloksena. Vaikutukset näkyvät voimakkaimpina napojen läheisyydessä. Lapin metsänrajamännyn lustotiheysanalyysien perusteella on voitu todeta ilmaston viilenneen viimeisen parin tuhannen vuoden aikana edellä mainituista syistä 0.31 ± 0.03 °C tuhatta vuotta kohti (Esper ym. 2012).

Auringon aktiivisuuden vaihtelu ja erityisesti sen syklinen vaihtelu ovat maapallon tärkeimpiä ilmastotekijöitä (Ogurtsov ym. 2005, Raspopov ym. 2008). Analyyseissä tulevat yleisimmin esiin 80–90 vuoden Gleissberg- ja noin 200 vuoden pituinen de Vries-sykli. Viimeksi mainittua sykliä pidetään merkittävimpänä keskipitkän aikavälin ilmastonmuutosten aiheuttajana pikku jääkausien muodostumiseen liittyvän kytkentänsä vuoksi (Raspopov ym. 2011). Auringon vaikutusmekanismeja Maan ilmastoon tutkitaan edelleen, koska kattavaa selitystä ja yksimielisyyttä ei ole toistaiseksi löydetty (Ogurtsov ym. 2011, Raspopov ym. 2004).

Lapin metsänrajamännyllä on ollut merkittävä osuus auringon ja ilmaston välisten yhteyksien selvittämisessä. Pohtila (1980) havaitsi auringon aktiivisuuden ja Lapin männyn kasvun vaihteluiden välillä selvän yhteyden. Merkittävin ja jopa edellä aikaansa oli hänen havaintonsa auringon aktiivisuutta kuvaavan auringonpilkkuluvun ja pilvisyyden välisestä riippuvuussuhteesta.

Runsas vuosikymmen myöhemmin venäläiset tutkijat onnistuivat selvittämään kosmisen säteilyn yhteyden auringon aktiivisuuteen ja alailmakehän fysikaalisiin ominaisuuksiin (Pudovkin ja Veretenenko 1995). Maahan tulevaa kokonaissäteilyä säätelee heidän mukaansa auringon aktiivisuuteen liittyvän aurinkotuulen ja kosmisen säteilyn välinen vuorovaikutussuhde. Mitä voimakkaampi on aurinkotuuli, sitä pienempi on kosmisen säteilyn vaikutus maassa ja sitä vähemmän muodostuu pilviä taivaalle. Tämä perustuu ajatukseen siitä, että kosmisen säteilyn varaamat hiukkaset toimivat pilvisyyteen vaikuttavien vesipisaroiden tiivistymiskeskuksina. Svensmark ja Friis-Christiensen (1997) vahvistivat kollegojensa tulokset.

Auringon aktiivisuuden vaihtelu ja sen vaikutus ilmaston vaihteluihin on määritettävissä puiden vuosilustojen hiili-isotooppien suhteen perusteella lähes vuoden tarkkuudella. Auringon ollessa aktiivisimmillaan, kosminen säteily ja radioaktiivisen hiili 14-isotoopin määrä ilmakehässä ja puiden vuosilustoissa on alhaisimmillaan. Solanki ym. (2004) on rekonstruoinut auringon pilkkujen määrän puulustoista viimeisten 11000 vuoden ajalle.



Kuva 2.1.10. Auringon aktiivisuus ja Lapin ilmasto ovat vaihdellet samaan tahtiin viimeiset 7500 vuotta (Helama ym. 2010). Auringon suora säteily vaikuttaa viiveettömästi (A) ja merivesien lämpenemisen/viilenemisen kautta 70 vuoden viiveellä (B).

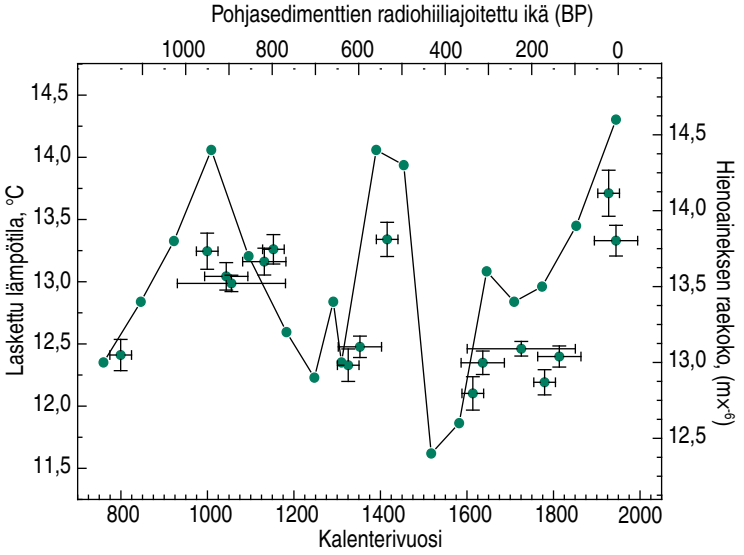
Lapin pitkästä mäntykronologiasta johdettu kesälämpötilojen vertaaminen auringon aktiivisuuden vaihteluihin on tehnyt ensi kertaa mahdolliseksi aktiivisuussyklien ilmastovaikutusten analysoinnin vuoden tai muutaman vuoden tarkkuudella. Helama ym. (2010) mukaan auringon aktiivisuus ja Lapin ilmasto ovat vaihdelleet samaan tahtiin viimeiset 7500 vuotta (Kuva 2.1.10a). Auringon aktiivisuus selittää keskiajan lämpökauden, pikku jääkauden ja 1900-luvun alkupuolen lämpenemisen varsin tarkkaan (R= 0,80). Viimeiset 2000 vuotta auringon vaikutus ilmastoon näkyy usean vuosikymmenen viiveellä (Kuva 2.1.10b).

Termohaliinikierto

Merten vaikutus ilmaston muutoksiin on monivivahteinen, voimakas ja osin tuntematon. Huomattava osa maapallon tuliperäisestä toiminnasta tapahtuu valtamerten pohjassa. Meriveden lämpötilaerot ja suolapitoisuuden vaihtelut saavat aikaan kylmiä ja lämpimiä merivirtoja ja tuulia, jotka siirtävät maapallolle tulevaa auringon lämpöä ja haihtuvaa kosteutta paikasta toiseen. Suomen ja koko Fennoskandian sijainti kostean Atlantin valtameren ja kuivemman Euraasian vaihettumavyöhykkeellä tekee ilmastomme vaihtelusta erityisen vaikeasti ennustettavan.

Meriveden suolapitoisuuden vaihtelusta aiheutuvan termohaliinikierron (Golf-virran) voimistuminen aikaskaaloilla 50–250 vuotta on tuonut Lappiin lämpimiä kesiä. Tämä on selvinnyt, kun on vertailtu merivirran voimakkuutta kuvaavien Atlantin pohjasedimenttien hienoaineskoostumusta ja Lapin puulustoista ennustettua heinäkuun keskilämpötilaa keskenään (Kuva 2.1.11). Termohaliinikierron heikentyessä kesät ovat olleet keskimääräistä viileämpiä vuosikymmenien tai jopa vuosisatojen ajan.

Metsänrajamännyn kasvusta johdettu kesä-heinäkuun keskilämpötila korreloi sekä viiveettömästi että 50–80 vuoden viiveellä auringon aktiivisuusvaihteluiden kanssa (Helama ym. 2010). Ensiksi mainittu aiheutuu auringon välittömästä vaikutuksesta paikallisilmastoon. Jälkimmäinen voi selittyä merivesien hitaalla vuosikymmeniä kestävällä lämpenemisellä ja viilenemisellä.



Kuva 2.1.11. Atlantin sedimenttien hienoaineskoostumuksen (oikea pystyakseli, yhtenäinen viiva) vertailu Lapin puulustokronologian pohjalta ennustettuun heinäkuun lämpötilaan (vasen pystyakseli, vaakaviivat) (Helama ym. 2009b). Sedimenttien ikä määritetty radiohiilimenetelmällä, vuosi 0 =1950.

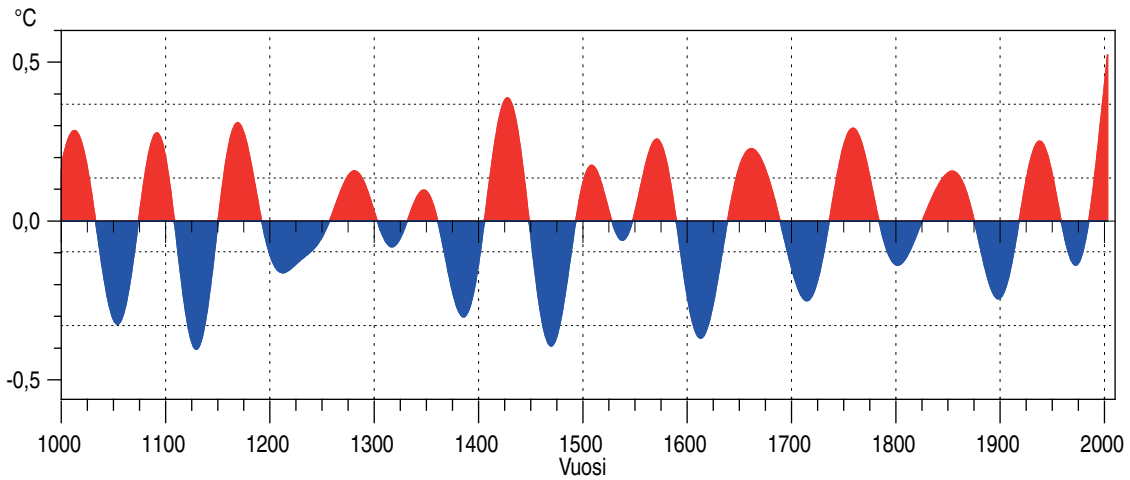
Auringon aktiivisuus oli poikkeuksellisen korkealla 60 vuoden ajan 1940-luvulta 2000-luvun alkuun saakka. Tutkimuksissamme havaitun viiveen perusteella on varsin mahdollista, että merivesiin 1900-luvulla varastoinut lämpö lämmittää ilmakehää lähivuosikymmeninä, vaikka auringon aktiivisuus onkin tasaantunut ja jopa kääntynyt laskuun. Tämä tulisi ottaa huomioon ilmastomalleissa ja niiden tulosten tulkinnassa.

Ilmaston syklisyys

Tämän päivän ilmastonmuutostutkimuksen kiinnostavimmat kysymykset ovat muutostrendit ja jaksolliset vaihtelut (syklisyys). Syklisyyttä tutkitaan spektrianalyysin menetelmiin kuuluvilla Fourier- ja aallokemuunnoksilla. Fourier-muunnokset ovat matemaattisia malleja, joilla voidaan kuvata koko tarkasteltavan ajanjakson samanlaisena kertautuvaa aaltoliikettä. Menetelmä toimii hyvin syklien pituuden pysyessä muuttumattomana. Aikasarjoissa esiintyvät syklit voidaan havainnollistaa myös graafeina Fourier-analyysista johdetulla ns. FFT-tasoituksella (Fast Fourier Transform). Aallokemuunnokset ovat digitaalisen signaalinkäsittelyn uusimpiin menetelmiin kuuluva monipuolinen ja joustava Fourier-analyysin muoto. Niiden avulla on mahdollista paljastaa kaikentaajuisia syklejä vaihtelevan pituisissa aikaikkunoissa (Graps 1995).

Aallokeanalyysin mukaan Lapin yli 7600-vuotisessa lustosarjassa on vuosituhannesta toiseen esiintyvää säännönmukaista 16–128 vuoden sykleissä tapahtuvaa vaihtelua. Fourier-analyysi paljastaa lustosarjasta useita 16–96 vuoden pituisia syklejä, joista vahvimpana esiintyy noin 80 vuoden pituinen sykli (Kuva 2.1.12). Sama sykli näkyy myös Sodankylän, Karesuvannon ja Karigasniemen yli 100-vuotisten ilmastomittausten kesälämpötiloissa.

Sirén (1961) havaitsi syklejä koskevissa tutkimuksissaan puiden syntyneen metsänrajalla pääasiassa suotuisten ilmastovaiheiden aikana, esimerkiksi 1650-, 1750-, 1850-, 1920- ja 1960-luvuilla. Sama havaittiin myös Metlan 1911-vuotisessa lustokronologiassa (Mielikäinen ym. 1998). Metsänrajamänniköiden uudistuminen vain pidempien lämpöjaksojen vallitessa perustuu siihen, että mänty tarvitsee lämpöä useiden vuosien ajan uudistuakseen ja parinkymmenen vuoden verran vakiintuakseen. Ilmaston syklisyys on täten tärkeä tekijä metsänrajan määräytymisessä.



Kuva 2.1.12. Lapin metsänrajamännyn vuosilustoindeksistä johdettu kesä-heinäkuun keskilämpötilan vaihtelut (50 vuoden FFT-tasoitus, syklin pituus noin 85 v).

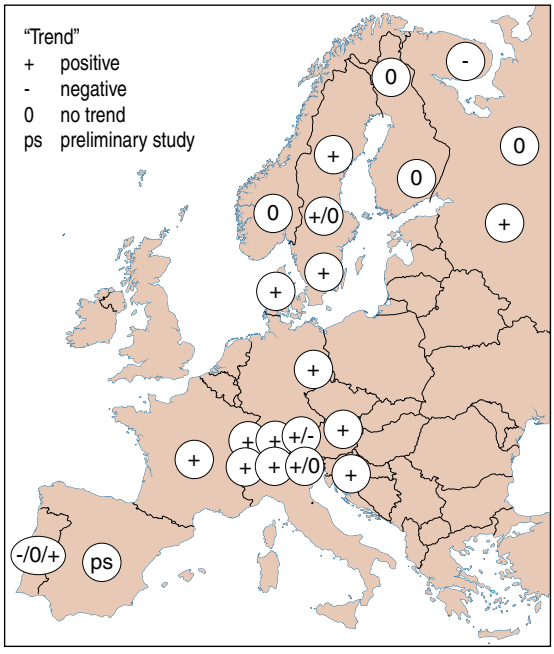
2.1.4 Onko Suomen ilmasto muuttunut 1900-luvulla?

Kasvutrenditutkimuksia

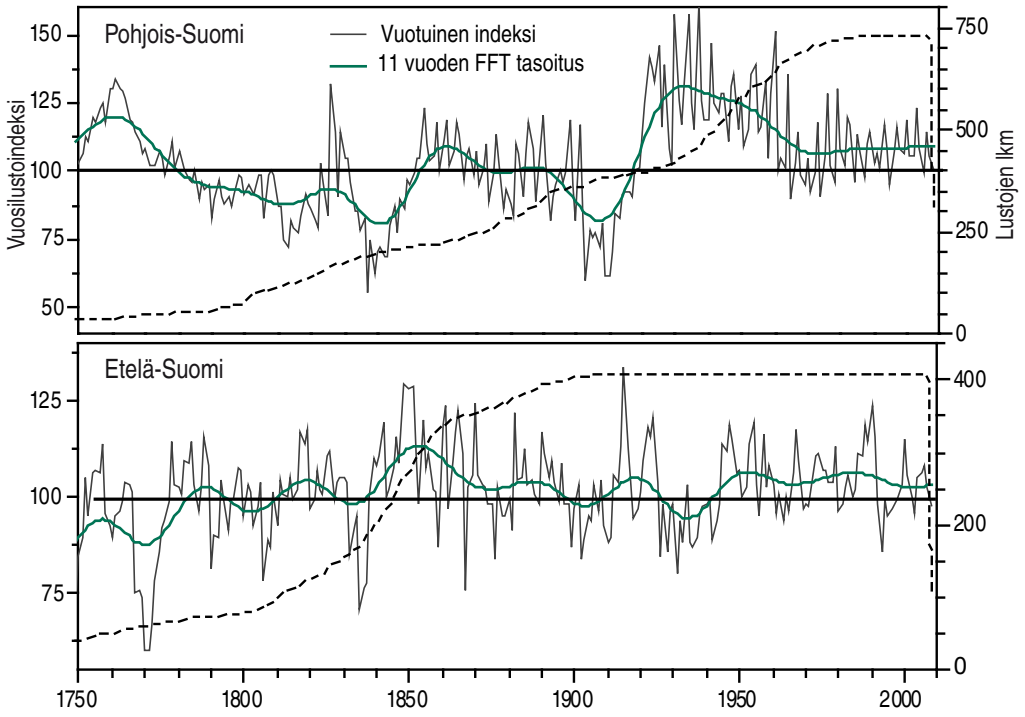
Lähes 50 tutkijaa 12 Euroopan maasta osallistui Metlan aloitteesta 1990-luvun alussa käynnistettyyn tutkimukseen, jonka pääkysymys kuului: “Osoittavatko puut ja metsät eri puolilla Eurooppaa kasvun muutoksia, joita ei voida selittää metsien hoidolla tai metsien rakenteen muutoksilla?” Tutkimusaineistot koostuivat pitkäaikaisista metsänkasvatuskokeista, valtakunnallisista metsäninventoinneista ja luonnonsuojelualueiden vanhoista, metsänhoidolta rauhassa kasvaneista puista.

Vuonna 1996 päättyneen nelivuotisen tutkimushankkeen tulokset (Kuva 2.1.13) olivat selkeät. Keski- ja Etelä-Euroopassa puiden kasvu oli lisääntynyt kiihtyvästi koko 1900-luvun ajan (Spiecker ym. 1996). Pohjoismaissa ja Venäjän Karjalassa metsät eivät osoittaneet minkään suuntaista trendiä, vaan puut kasvoivat kuten samanikäiset puut sata vuotta aiemmin. Keski-Euroopan metsien kasvun kiihtymisen pääsyyksi arvioitiin maataloudesta ja liikenteestä tuleva typpilaskeuma, joka oli 5–10-kertainen Fennoskandian laskeumiin verrattuna. Keski-Euroopan vuotuinen typpilaskeuma, 25–50 kg/ha ylittää suuruusluokaltaan käytännön metsänlannoituksessa käytetyn annoksen (150 kg/ha 6–8 vuoden välein). Kasvun kiihtymiseen on typpilaskeuman lisäksi saattanut vaikuttaa aikoinaan eläinten kuivikkeina käytettyjen karikkeiden jättäminen metsään. Joillakin alueilla Sveitsin ja Ranskan vuoristoissa sateisuuden ja lämpötilojen muutoksilla arvioitiin olleen vaikutusta kasvun lisääntymiseen 1900-luvun jälkipuolella. Keski-Euroopan kuusten kasvussa näkyi myös selviä merkkejä metsätuhokeskustelun kohteena olleista kuivista vuosista 1970-luvun loppupuolella.

Mahdollisen ilmastonmuutoksen etenemisen selvittämiseksi tutkimus toistettiin Metlan MIL-ohjelmassa vuosina 2007–2008. Tutkimuksen noin 1 000 kairauskoepuun aineisto kerättiin Pohjois-Suomen kuivilta ja kuivahkoilta kankailta (45 metsikköä) ja Etelä-Suomen luonnonsuojelualueilta (24 metsikköä). Alustavien analyysien mukaan Suomen puiden kasvussa ei edelleenkään näy ilmastosta tai muista ympäristön muutoksista aiheutuvaa trendiä (Kuva 2.1.14).



Kuva 2.1.13. Euroopan metsien kasvutrenditutkimus ei osoita Suomessa ympäristön muutoksista aiheutuvia kasvunmuutoksia (Mielikäinen ja Timonen 1996b).

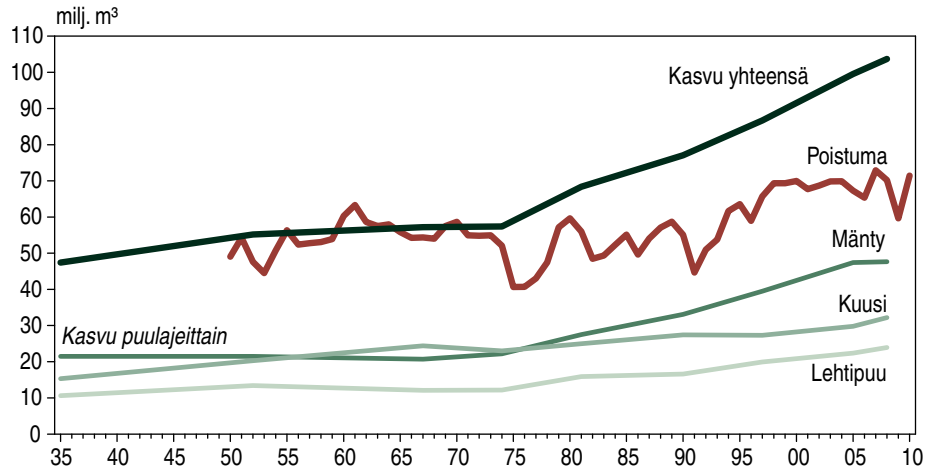


Kuva 2.1.14. MIL –ohjelman kasvutrenditutkimuksen tuloksissa ei näy viime vuosikymmeninä trendinomaista muutosta. Mallit on laskettu trendien paljastamiseen soveltuvan Arstan-ohjelmiston RCS- mallinnuksella (Cook 1985).

Suomen metsien kasvun lisääntymisen syyt

Luonnonmetsissä kasvavien puiden muuttumattomasta kasvusta huolimatta Suomen metsien kokonaiskasvu on lisääntynyt viimeisten 40 vuoden aikana lähes kaksinkertaiseksi (Kuva 2.1.15). Nykyinen vuosikasvu, noin 104 miljoonaa m^3 ylittää vastaavan kokonaispoistuman (hakkuut, latvahukkapuu, luonnonpoistuma) yli 30 miljoonalla kuutiometrillä. Syynä kasvun lisääntymiseen ei edellisen perusteella ole ilmastonmuutos eikä mikään muukaan luontainen tekijä, vaan metsien hoito ja hoidon aiheuttamat metsien rakenteelliset muutokset.

Selkein kasvua lisännyt tekijä on ollut soiden ojitus. Viiden miljoonan suohehtaarin ojittaminen on lisännyt vuotuista kasvua yli 10 miljoonaa m^3. Huomattava merkitys on myös metsien tihentymisellä ja puuston ikärakenteen muutoksilla (metsien nuortumisella).



Kuva 2.1.15. Suomen metsien kasvu ja poistuma 1953–2010 (Metsätilastollinen vuosikirja 2011).

Fenologiset havainnot ja puiden kasvun alkaminen

Fenologia tutkii biologisten ilmiöiden vuodenaikaista ja vuosittaista vaihtelua ja ympäristötekijöiden (ilmaston) vaikutusta siihen. Kevään eteneminen luonnossa on sidoksissa lämpötilaan, mikä tekee mahdolliseksi tarkastella mennyttä ilmastoa fenologisista aikasarjoista (Holopainen ym. 2006). Suomen Tiedeseura aloitti vuoden kiertokulkuun liittyvien fenologisten tapahtumien seurannan vuonna 1846. Fenologiset havainnot (lehtien puhkeaminen, jäiden lähtö, kukkiminen) osoittavat keväiden aikaistuneen 1800-luvulta (Holopainen ym. 2006, 2009; Linkosalo ym. 2009). Viimeisimpien seurantojen mukaan männyn silmujen puhkeaminen on aikaistunut 8–10 päivällä 1960-luvulta 2000-luvulle. Puiden paksuuskasvun alkaminen ei ole päivittäisten seurantojen mukaan aikaistunut merkittävästi. Tornionjoen jäidenlähtö, jota on seurattu vuodesta 1693 alkaen, on aikaistunut noin kaksi viikkoa kolmensadan vuoden aikana. Muutos on pääosin selitettävissä muutoksella pikku jääkauden tasosta, sillä viimeisen sadan vuoden aikana aikaistumista ei ole tapahtunut.

Keväiden aikaistumisen ohella metsät ovat aluskasvillisuuden perusteella arvioiden tuoreutuneet erityisesti Lapissa (Mattila 2006). Tuoreutumisen syynä voivat olla hakkuiden aiheuttamat metsien rakenteen ja valoilmaston muutokset, jotka ovat vaikuttaneet metsätyypittelyssä käytettyyn aluskasvillisuuteen. Muita syitä tuoreutumiseen saattavat olla typpilaskeuma ja maaperän biologisen aktiivisuuden paraneminen pikku jääkautta seuranneen lämpimämmän 1900-luvun aikana.

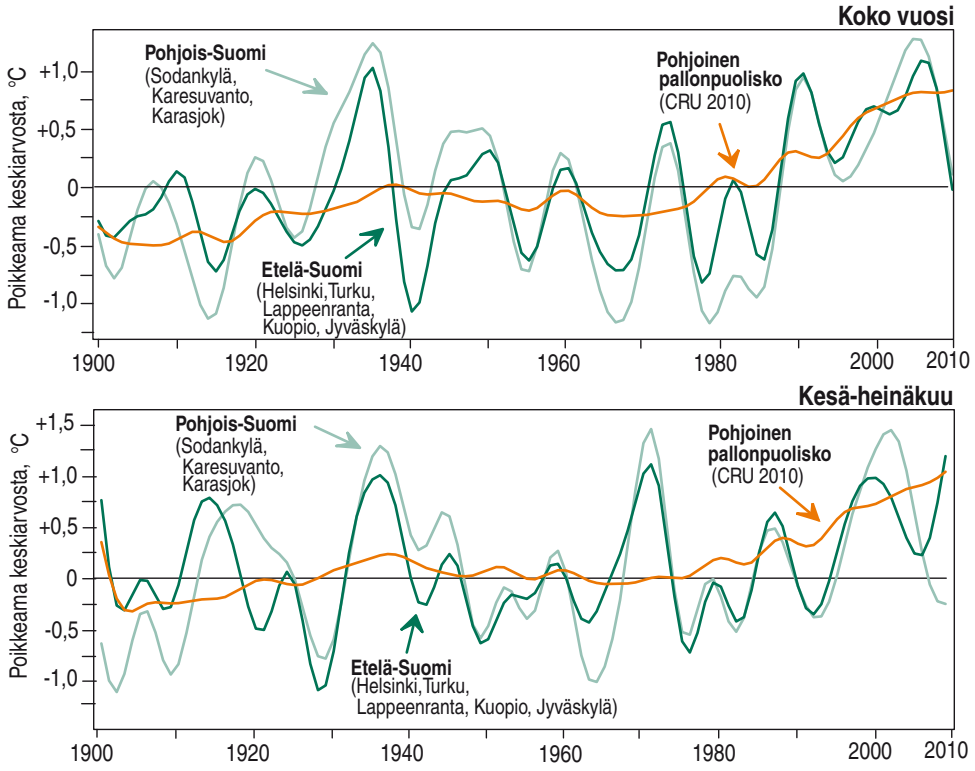
2.1.5 Ilmastoennusteet

Ilmaston vaihtelut 1900-luvulla

Suomen ja koko pohjoisen pallonpuoliskon ilmastokehityksen vertailu auttaa arvioimaan vuosilustoihin perustuvan ilmastotiedon yleistettävyyttä. Ilmatieteen laitoksen säätilastojen mukaan vuoden keskilämpötilan vaihtelu on Lapissa suurempaa kuin Etelä-Suomessa ja se kasvaa pohjoiseen päin mentäessä (Kuva 2.1.16). Pikku jääkauden päätyttyä 1900-luvun alussa ilmasto lämpeni nopeasti 1940-luvulle. Sitä seurannut viileneminen johti Lapissa huomattaviin metsien uudistamisongelmiin osittain ilmastoon sopeutumattomien, liian eteläisten siemen- ja taimialkuperien vuoksi.

Viileää vaihetta seurannut lämpeneminen palautti lämpötilat 1930-luvun tasolle 2000-luvun alkuun mennessä. Viime vuosina Pohjois-Suomen ilmasto on jälleen viilennyt. Koko pohjoisen pallonpuoliskon lämpötilan kehitys näyttää jatkuneen nousujohteisena, joskin lämpeneminen on viime vuosina hidastunut.

Metsänrajamäntyjen vuosilustot antavat myös pohjaa arvioida 1900-luvun lämpenemisen ja lämpövaihteluiden ainutlaatuisuutta. Mittausten mukaan vuoden keskilämpö on kohonnut 1800-luvun lopulta nykypäivään noin 0,7 astetta. Puuaineen tiheyteen perustuvan tuoreen tutkimuksen mukaan (Esper ym. 2012) Rooman lämpökausi (200 eaa. – 400 jaa.) ja keskiajan lämpökausi (900–1300 jaa.) olivat lämpimämpiä kuin 1900-luku. Ajanlaskumme ensimmäinen vuosisata oli Lapissa 0,6 °C lämpimämpi kuin aikaväli 1951–1980, ja yli asteen lämpimämpi kuin viileänä tunnettu 1300-luku. Lämpimin 30-vuotiskausi sattui vuosiin 21–50 jaa. (+1,1 °C) ja kylmin vuosiin 1451–1480 (-1,2 °C). Näiden tulosten perusteella arvioituna 1900-luvun lämpötilamuutokset eivät ole mitenkään poikkeuksellisia.



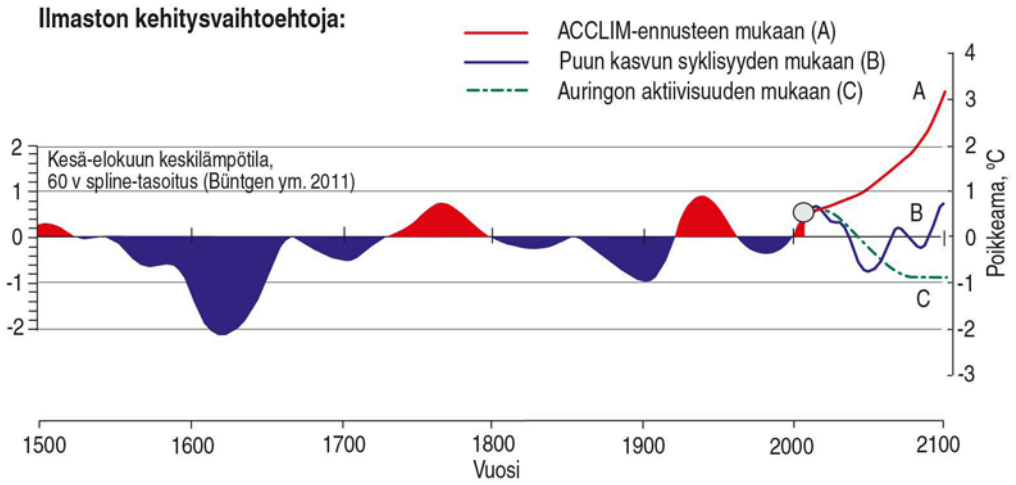
Kuva 2.1.16. Pohjois- ja Etelä-Suomen sekä pohjoisen pallonpuoliskon vuotuisen (ylempi kuva) ja kesä-heinäkuun (alempi kuva) lämpötilapoikkeamat kunkin lämpötilasarjan keskiarvosta viiden vuoden FFT-tasoituksena. (Ilmatieteen laitos ja Climate Research Unit (CRU)). http://www.cru.uea.ac.uk/fi/data

Vaihtoehtoisia ilmastoennusteita

Puulustojen tiheyteen perustuvien ilmastomallien mukaan (Büntgen ym. 2011) kesät olivat pikku jääkauden kylmimmässä vaiheessa 1600-luvulla noin 2 astetta viileämpiä verrattuna viimeisten 2000 vuoden keskiarvoon (Kuva 2.1.17). Myös 1900-luvun alun viileys sekä 1700-luvun puolivälin, 1930-luvun ja 2000-luvun alun lämpöjaksot ovat jättäneet jälkensä Lapin mäntyjen puuaineen tiheyteen.

Ilmaston syklisyys antaa mahdollisuuden arvioida ilmaston tulevaa luontaista vaihtelua myös puulustojen pohjalta. Timosen ym. (2010) alustava ilmastoennuste jaksolle 2010–2100 perustuu 1500-luvulta säännöllisesti 60–95 vuoden jaksoissa vaihdelleen sarjan ekstrapolointiin. Se on samansuuntainen Sirenin (1961) puulustoihin ja Abdussamatovin (2009) aurinkosykleihin perustuvien ennusteiden kanssa. Timosen ym. (2010) ja Abdussamatovin (2009) ennusteet viittaavat 1–2 asteen viilenemiseen noin vuoteen 2060 mennessä. Viileneminen viittaa ankarimmillaan siirtymistä pikku jääkauden tyyppiseen kylmään jaksoon. On syytä korostaa, että ennuste perustuu vuosien ja vuosikymmenten väliseen *luontaiseen* ilmastonvaihteluun ilman ihmisen mahdollista vaikutusta.

Hallitustenvälisen ilmastopaneelin (IPCC) neljännen arviointiraportin (Le Treut ym. 2007) mukaan maapallon ilmaston lämpenemisen päätekijä on ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu. Paneelin tekemät ennusteet perustuvat tietokonemalleihin, jotka pyrkivät jäljittelemään luonnon fysikaalisia prosesseja. Mallit on sovitettu menneiden vuosikymmenten ilmaston vaihteluihin ja ilmakehän mitattuun hiilidioksidipitoisuuteen. ACCLIM –hankkeessa Suomea koskevien ennusteiden mukaan Lapin kesänaikainen lämpötila nousee kuluvan vuosisadan loppuun mennessä 1–5 ºC verrattuna jakson 1971–2000 tilanteeseen (Jylhä ym. 2009).



Kuva 2.1.17. Lapin metsänrajamännyn puuaineen tiheyden pohjalta lasketussa kesä-elokuun keskilämpötilassa (Büntgen ym. 2011) näkyy pikku jääkauden viileys (sininen väritys) ja 1930-luvun lämpimyys (punainen väritys). Ilmasto voi kehittyä seuraavan sadan vuoden aikana seuraavasti: A) Ilmatieteen laitoksen ACCLIM –hankkeessa Pohjois-Suomelle laaditun ennusteen mukaisesti (punainen viiva); B) puun kasvun syklisen vaihtelun mukaisesti (sininen viiva) ja C) Auringon aktiivisuuden mukaan (vihreä pistekatkoviiva). Kaikki tulevaisuuskuvat ovat viitteellisesti suuntaa antavia. Kuva päivitetty 17.9.2012.

2.1.6 Johtopäätökset

Lapin männyn yli 7600-vuotinen lustokronologia on koko maailman pisimpiä havupuuaikasarjoja. Tuhannet nykyisestä Metsä-Lapista ja puuttoman Tunturi-Lapin järvistä löytyneet megafossiilit kertovat lukuisista lämpö- ja kylmäkausista. Puiden löytöpaikan perusteella arvioiden Lapin kesät olivat 6000 vuotta sitten runsaat 2,5 astetta nykyistä lämpimämpiä. Lustoanalyysit viittaavat historian kirjoista tutun, tuhannen vuoden takaisen keskiajan lämpökauden olleen yhtä lämmin tai lämpimämpi kuin 1930-luku. Itä-Suomen mäntykronologia ja eri puolilta maailmaa kerätyt muut tiedot osoittavat keskiajan lämpökauden olleen maailmanlaajuisesti myös poikkeuksellisen kuiva (Helama ym. 2009a).

Keskiajan lämpökautta seurasi pikku jääkautena tunnettu viileämpi jakso, joka päättyi Suomessa vasta sata vuotta sitten. Se oli poikkeuksellisen kylmä koko Pohjois-Euroopassa. Pikku jääkauden kylmin vaihe osui 1400-luvun jälkipuoliskolle, jolloin lämpötila oli kolmenkymmenen vuoden keskiarvona puolitoista astetta alhaisempi kuin 1900-luvun alkupuoliskolla. Ainakin osa 1930-luvulla kulminoituneesta lämpenemisestä on ollut normaalia ilmaston vaihtelua.

Ilmastonmuutoksesta käytävä keskustelu on keskittynyt maapallon keskilämpötilan muutokseen ja ihmisen osuuteen sen aiheuttajana. Olipa muutoksen syy mikä tahansa, sopeutumisen kannalta tärkeintä olisi ennakoida maapallon keskiarvon sijaan paikallisilmastojen todennäköisiä muutoksia.

Ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksiin pohjautuvien ilmastoennusteiden heikkoutena on auringon ja merten syklisten pitkäaikaisvaikutusten puutteellinen käsittely ja mallien hyvyyden arviointiin käytetyn ajanjakson lyhyys. Jaksollisten vaihteluiden huomiotta jättäminen voi johtaa puutteellisiin tulkintoihin. On mahdollista, että 1850-, 1930- ja 1990-luvuilla alkaneet lämpenemiset sekä niiden väliin sattuneet viilenemiset ovat pääosin ilmaston luontaista vaihtelua.

Luontaista ilmastohistoriaa koskevan katsauksemme pääsanoma on, ettei muutaman vuosikymmenen tai viimeisen vuosisadan ilmastokehitys anna riittävää kuvaa paikallisilmastomme tule-

vasta suunnasta tai muutoksen suuruudesta. Merellisen Atlantin ja mantereisen Siperian vaihettumavyöhykkeellä sijaitsevassa Suomessa on uhkarohkeaa tehdä metsänhoitoa koskevia päätöksiä yksinomaan lämpenevän ilmaston pohjalta. Tulevaisuuden luontaiset ilmaston vaihtelut tulevat todennäköisesti tapahtumaan osin samoilla aikajänteillä kuin menneisyydessäkin. Puulustojen paljastamilla kahden asteen lämpötilan muutoksilla vuosisatojen välillä on historiatiedon perusteella arvioiden dramaattisia vaikutuksia ihmisyhteisöihin erityisesti asutuksen äärirajoilla.

Pohjoisen pallonpuoliskon ilmaston pitkän ajan luontainen pääsuunta on ollut Milankovićin (1941) teorian mukainen vähittäinen viileneminen noin 0,3 ºC vuosituhannessa kohti seuraavaa jääkautta. Maapallon akselikulman ja kiertoradan vaihteluiden aiheuttaman tasaisen kylmenemisen ohella ilmastoa ovat säädelleet vuosikymmenten ja vuosisatojen aikaskaalassa tapahtuneet auringon aktiivisuuden ja merivirtojen vaihtelut. Suomen ja koko Fennoskandian paikallisilmaston ratkaisevia tekijöitä ovat tulevaisuudessakin Atlantin valtameri ja sen aikaansaamat tuulet. Se, missä määrin ihminen voi näihin luonnon trendeihin ja vaihteluihin vaikuttaa ja kuinka muutoksiin sopeudutaan, vaatii vielä paljon monitieteistä tutkimusta.

Kirjallisuus

Abdussamatov, K. I. 2009. The Sun defines the climate. Nauka i Zhizn (“Science and Life”) 1: 34–42. http://www.gao.spb.ru/english/astrometr/abduss_nkj_2009.pdf

Briffa, K.R., Osborn, T.J., Schweingruber, F.H., Harris, I.C., Jones, P.D., Shiyatov, S.G. & Vaganov, E.A. 2001. Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network. Journal of Geophysical Research 106: 2929–2941.

Büntgen, U., Raible, C.C., Frank, D., Helama, S., Cunningham, L., Hofer, D., Wilson, R., Nievergelt, D., Verstege, A., Timonen, M., Stenseth, N. C. & Esper, J. 2011. [Verkkojulkaisu]. Causes and consequences of past, present and projected Scandinavian summer temperatures. PLoS ONE 6(9): e25133. doi:10.1371/journal.pone.0025133. Saatavissa: http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0025133.

Cook, E.R. 1985. A Time Series Approach to Tree-Ring Standardization. PhD Dissertation. University of Arizona, Tucson, AZ, USA.

– 1990. A conceptual linear aggregate model for tree rings. Julkaisussa: Cook, E. R. & Kairiukstis, L. A. (toim.). Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences. Kluwer Academic publishers. International Institute for Applied Systems Analysis. s. 98–104. ISBN 0-7923-0586-8.

Dansgaard, W., Johnsen S.J. & Moller, J. 1969. One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland Ice Sheet. Science 166(3903): 377–381.

D’Arrigo, R., Wilson, R., Liepert, B. & Cherubini, P. 2007. On the ‘Divergence Problem’ in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes, Global and Planetary Change 60: 289–305.

Eronen, M. 1990. Muuttuva ilmasto (The changing climate). Terra 102: 220–238.

– , Zetterberg, P., Briffa, K.R., Lindholm, M., Meriläinen J. & Timonen, M. 2002. The supra-long Scots pine tree-ring record for Finnish Lapland: Part 1. Chronology construction and initial references. The Holocene 12: 673–680.

Esper, J., Frank, D. C., Timonen, M. & Büntgen, U. 2012. Variability and extremes of northern Scandinavian summer temperatures over the past two millennia. Verkkoversio: http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.01.006

Graps, A. 1995. An Introduction to Wavelets. IEEE Computational Science and Engineering 2(2): 50–61. IEEE Computer Society Press. 10662 Los Vaqueros Circle, Los Alamitos, CA 90720, USA.

Helama, S., Lindholm, M., Timonen, M., Eronen, M. & Meriläinen, J. 2002. Part 2: Interannual-to-centennial variability in summer temperatures in northern Fennoscandia during the last 7500 years extracted from tree-rings of Scots pine. The Holocene 12(6): 681–687.

– & Lindholm, M. 2003. Droughts and rainfall in south-eastern Finland since AD 874, inferred from Scots pine ring-widths. Boreal Environment Research 8(2): 171–183.

– , Lindholm M., Timonen M. & Eronen M. 2004. Dendrochronologically dated changes in the limit of pine in northernmost Finland during the past 7.5 millennia. Boreas 33(3): 250–259.

– , Meriläinen, J. & Tuomenvirta, H. 2009a. Multicentennial megadrought in northern Europe coincided with a global El Niño–Southern Oscillation drought pattern during the Medieval Climate Anomaly. Geology 37(2): 175–178.

– , Timonen, M., Holopainen, J., Ogurtsov, M.G., Mielikäinen, K., Eronen, M., Lindholm, M. & Meriläinen, J. 2009b. Summer temperature variations in Lapland during the Medieval Warm Period and the Little Ice Age relative to natural instability of thermohaline circulation on multi-decadal and multi-centennial scales. J. Quaternary Sci. 24: 450–456.

– , Macias Fauria M., Mielikäinen K., Timonen M. & Eronen M. 2010. Sub-Milanković Solar Forcing of Past Climates: Mid and Late Holocene Perspectives. Geological Society of America, Bulletin 122: 1981–1988.

Holopainen, J., Helama S. & Timonen M. 2006. Plant phenological data and tree-rings as palaeoclimate indicators since AD 1750 in SW Finland. International Journal of Biometeorology 51: 61–72.

– , Helama, S., Kajander, J.M., Korhonen J., Launiainen J., Nevanlinna H., Reissell A. & Salonen V.-P. 2009. A multiproxy reconstruction of spring temperatures in south-west Finland since 1750. Climatic Change 92: 213–233.

Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. & Seitola, T., 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. (The changing climate in Finland: estimates for adaptation studies. ACCLIM project report 2009.) Ilmatieteen laitos, Raportteja 2009(4). 102 s. (In Finnish, abstract, extended abstract and captions for figures and tables also in English.)

Kultti, S., Mikkola, K., Virtanen, T., Timonen, M. & Eronen, M. 2006. Past changes in the Scots pine forest line and climate in Finnish Lapland: a study based on megafossils, lake sediments, and GIS-based vegetation and climate data. The Holocene 16: 381–391.

Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather, 2007: Historical Overview of Climate Change. Julkaisussa: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller (toim.). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Linkosalo, T., Häkkinen, R., Terhivuo, J., Tuomenvirta, H. & Hari, P. 2009. The time series of flowering and leaf bud burst of boreal trees (1846–2005) support the direct temperature observations of climatic warming. Agricultural and Forest Meteorology 149: 453–461.

Mattila, E. 2006. Porojen talvilaitumien kunto poronhoitoalueen etelä- ja keskiosien merkkipiireissä 2002–2004 ja kehitys 1970-luvun puolivälistä alkaen. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 27. 76 s.

Metsätilastollinen vuosikirja 2011. Skogsstatistisk årsbok. Finnish Statistical Yearbook of Forestry. Suomen virallinen tilasto: Maa-, metsä- ja kalatalous. 472 s.

Mielikäinen, K., Timonen, M. & Nöjd, P. 1996a. Männyn ja kuusen kasvun vaihtelu Suomessa 1964–1993. Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja 1996(4): 309–320.

– & Timonen, M. 1996b. Growth trends of Scots pine in unmanaged and regularly managed stands in Southern and Central Finland. Julkaisussa: Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M. & Skovsgaard, J.P. (toim.). Growth trends of European forests. Springer-Verlag, Heidelberg-Berlin. EFI Research Report 5: 41–59.

– , Nöjd, P., Pesonen, E. & Timonen, M. 1998. Puun muisti. Kasvun vaihtelu päivästä vuosituhanteen. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 703, 71 s. ISBN 951-40-1644-0, ISSN 0358-4283.

Mikola, P. 1950. Puiden kasvun vaihteluista ja niiden merkityksestä kasvututkimuksissa. Summary: On variations in tree growth and their significance to growth studies. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 38(5): 1–131.

Milanković, M. 1941. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem, Königlich Serbische Akademie, Belgrad, Spezialband 132.

Miller, G. H., Geirsdóttir, Á., Zhong, Y., Larsen, D.J., Otto-Bliesner, B.L., Holland, M.M., Bailey, D.A., Refsnider, K.A., Lehman, S.J., Southon, J.R., Anderson, C., Björnsson, H., Thordarson, T. 2012. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks, Geophysical Research Letters 39, L02708, doi:10.1029/2011GL050168.

Moore, T. G. 1998. Climate of Fear: Why We Shouldn't Worry about Global Warming. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. CATO institute. ISBN 1-882577-64-7, ISBN 1-882577-65-5.

Ogurtsov, M.G., Helama, S., Eronen, M. & Lindholm, M. 2005. Centennial-to-millennial fluctuations in July temperatures in North Finland as recorded by timberline tree rings of Scots pine. Quaternary Research 63: 182–188.

– , Jungner, H., Helama, S., Lindholm, M. & Oinonen, M. 2011. Paleoclimatological evidence for unprecedented recent temperature rise at the extratropical part of the northern hemisphere. Geografiska Annaler 93: 17–26.

Pohtila, E. 1980. Climatic fluctuations and forestry in Lapland. – Holarct. Ecol. 3: 91–98.

Pudovkin, M.I. & Veretenenko, S.V. 1995. Cloudiness decreases associated with Forbush-decreases of galactic cosmic rays. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics 57(11): 1349–1355. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0021916994001092

Raspopov, O.M., Dergachev, V.A. & Kolström, T. 2004. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeoclimatic data in high latitudes. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 209: 127–139.

– , Dergachev,V.A., Esper, J., Kozyreva, O.V., Frank, D., Ogurtsov, M.G., Kolström, T. & Shao, X. 2008. The influence of the de Vries (~200-year) solar cycle on climate variations: Results from the Central Asian Mountains and their global link. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 259: 6–16.

– , Dergachev, V. A., Ogurtsov, M. G., Kolström, T., Jungner, H. & Dmitriev, B. P. 2011. Var-iations in climate parameters at time intervals from hundreds to tens of millions of years in the past and its relation to solar activity. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 73: 388–399.

Salzer, M.W. & Hughes, M.K. 2007. Bristlecone pine tree rings and volcanic eruptions over the last 5000 yr. Quaternary Research 67: 57–68.

Schönwiese, C. 1995. Klimaänderungenaten, Analysen, Prognosen. 224 s. ISBN: 978-3-540-59096-5.

Shumilov, O.I., Kasatkina, E.A., Mielikäinen, K.J., Timonen, M.I. & Kanatjev, A.G. 2011. Palaeovolcanos, Solar activity and pine tree-rings from the Kola Peninsula (northwestern Russia) over the last 560 years. Int. J. Environ. Res. 5: 855-864. ISSN: 1735–6865

Siebert, L. & Simkin, T. 2002. [www-sivusto]. Volcanoes of the World: an Illustrated Catalog of Holocene Volcanoes and their Eruptions. Smithsonian Institution, Global Volcanism Program Digital Information Series, GVP-3. Saatavissa: http://www.volcano.si.edu/world/.

Siren, G. 1961. Skogsgränstallen som indikator för klimatfluktuationerna i norra Fennoskandien under historisk tid. Commun. Inst. For. Fenn. 54(2). 66 p.

Solanki, S.K., Usoskin, I.G., Kromer, B., Schüssler, M. & Beer, J. 2004. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years: Nature 431: 1084–1087, doi: 10.1038/nature02995.

Spiecker, H., Köhl, M., Mielikäinen, K. & Skovsgaard, J.P. (eds.) 1996. Growth trends of European forests. Springer-Verlag, Heidelberg-Berlin. EFI Research Report 5. 372 s.

Svensmark, H. & Friis-Christiensen, E. 1997. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationship. J.Atm.Solar-Terrestr.Physics 59: 1225–1232.

Timonen, M., Helama, S. & Mielikäinen, K. 2010. [Verkkojulkaisu]. Studies with the Finnish 7644-year pine chronology. Julkaisussa: Mielikäinen, K., Mäkinen, H. & Timonen, M. (toim.). 2010. WorldDendro 2010. Abstracts of The 8th International Conference on Dendrochronology, June 13–18, 2010, Rovaniemi, Finland. 379 p. ISBN 978-951-40-2235-7. p. 247. Saatavissa: http://www.metla.fi/tapahtumat/2010/WD2010/abstraktikirja.pdf.

Vaganov, E.A., Hughes, M.K. & Shaskin, A.V. 2006. Growth Dynamics of Conifer Tree Rings. Ecological Studies 183. ISBN-10 3-540-26086-2 Springer Berlin Heidelberg New York.

Wanner, H., Beer, J., Bütikofer, J., Crowley, T. J., Cubasch, U., Flückiger, J., Goosse, H., Grosjean, M., Joos, F., Kaplan, J.O., Küttel, M., Muller, S.A., Prentice, I.C., Solomina, O., Stocker, T.F., Tarasov, P., Wagner, M. & Widmann, M. 2008. Mid- to Late Holocene climate change: an overview. Quaternary Science Reviews 27: 1791–1828. doi:10.1016/j.quascirev.2008.06.013.

2.2 Energiapuun korjuun vaikutukset metsiin ja vesistöihin

Hannu Ilvesniemi, Markus Hartman, Jyrki Hytönen, Ari Lauren, Annu Kaila, Marjatta Kantola, Oili Kiikkilä, Jiri Kremsa, Eero Kubin, Martti Lindgren, Antti-Jussi Lindroos, Mikko Moilanen, Tanja Murto, Mika Nieminen, Tiina M. Nieminen, Timo Penttilä, Juha Piispanen, Anna Saarsalmi, Aino Smolander, Pekka Tamminen ja Liisa Ukonmaanaho

2.2.1 Miksi energiapuuta korjataan metsistä

Uusiutuvien biomassojen käytön lisääminen energianlähteenä on yksi keino vähentää fossiilisten polttoaineiden aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Fossiilisten polttoaineiden korvaamisen ja näin saavutettavien ilmastohyötyjen lisäksi metsäbiomassojen hyödyntäminen lisää merkittävästi kansallista huoltovarmuutta ja työllisyyttä. Puun käyttäminen energianlähteenä lisää puuvarojen käyttöä sekä ohjaa sitä, mitä puun osia hyödynnetään.

Energiapuun kysyntä on kasvanut tasaisesti koko 2000-luvun. Suomessa asetettujen ilmastopoliittisten tavoitteiden ja kansainvälisten sopimusvelvoitteiden saavuttamiseksi metsähakkeen vuotuinen käyttö pyritään nostamaan vuoteen 2020 mennessä nykyisestä 6–7 miljoonasta kuutiometristä 13–15 miljoonaan kuutiometriin. Energiapuuta korjataan tällä hetkellä niin riukuvaiheen metsiköiden perkauksen, ensiharvennuksien kuin päätehakkuidenkin yhteydessä.

Puubiomassan kysynnän lisääntyessä metsistä kerättävän bioenergian määrän kasvattaminen on suunnattu erityisesti sellaisiin puun osiin, joita ei ole aikaisemmin korjattu, eli oksiin, latvuksiin ja kantoihin. Varttuneiden kuusikoiden kokonaisbiomassasta noin 40 % on oksissa, neulasissa ja latvahukkapuussa, männyllä näiden ositteiden osuus on noin 15 %. Kummankin puulajin kannoissa ja isoissa juurissa on noin 20 % puun kokonaisbiomassasta (Marklund 1988, Petersson ja Ståhl 2006, Repola 2008 ja 2009).

Aikaisemmin korjaamatta jääneiden puun osien käyttö energianlähteenä ei ole ongelmatonta. Ravinnerikkaiden puun osien korjuu lisää kasvupaikalta poistuvien ravinteiden määrän moninkertaiseksi runkopuun korjuuseen verrattuna. Kantojen nosto puolestaan rikkoo maan pintaa voimakkaasti. Kannot ovat myös merkittävä osa suuriläpimittaisesta puusta, joka on aiemmissa hakkuutavoissa jäänyt hakkualoille ylläpitämään maan hiilivarastoja ja metsien monimuotoisuutta, tarjoten ravintoa ja asuinpaikkoja eliölajeille, jotka käyttävät kuollutta puuta ravinnonlähteenään.

Tutkittua tietoa kokopuun korjuun, erityisesti kantojen noston, pitkäaikaisvaikutuksista metsiin on vähän. Seuraavassa kerromme, mitä lähinnä Suomessa ja muissa pohjoismaissa tehdyn tutkimuksen perusteella tiedämme kokopuun korjuun vaikutuksista metsiin ja missä asioissa tietomme ovat vielä puutteellisia. Esittelemme myös Metsäntutkimuslaitoksessa aloitettuja uusia kenttäkokeita, joiden avulla saamme tulevaisuudessa lisää uutta tietoa tehostuneen puun käytön vaikutuksista metsiin (ks. tietotaulut ss.76-79).

2.2.2 Hakkuutähteiden korjuun vaikutus kivennäismaiden metsien maaperän ravinnevarastoihin

Maan ravinnevarastot ovat suuret, mutta kasvit pystyvät hyödyntämään vain osaa näistä varastoista. Maan kiviaineksen ravinteet ovat osa mineraalien kemiallisia yhdisteitä, ja monet näistä yhdisteistä ovat hyvin vaikeasti hajoavia. Myös maassa olevasta orgaanisesta aineksesta suuri osa muodostuu sellaisista yhdisteistä, joiden hajoaminen on hyvin hidasta. Tästä syystä maan ravinnevarastojen kokonaismäärä ei ole kovin hyvä vertailukohta arvioitaessa kokopuun korjuun aiheuttamia ravinnepoistumia ja niiden vaikutuksia.

Erilaisilla uuttomenetelmillä määritettävät kasveille käyttökelpoisten ravinteiden määrät kuvaavat ravinteiden saatavuutta ravinteiden kokonaismäärää paremmin (Taulukko 2.2.1). Esimerkiksi käyttökelpoisen typen määrä on sadasosa tai tätä pienempi kokonaismäärään verrattuna.

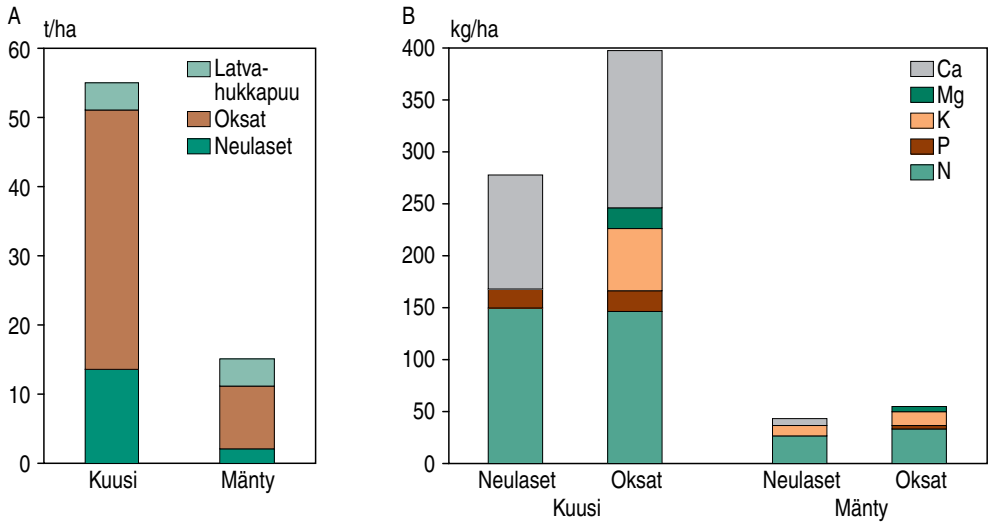
Harvennushakkuissa syntyvän hakkuutähteen määrä ja hakkuutähteen sisältämät ravinnemäärät ovat melko pieniä (Taulukko 2.2.2). Kuusikon avohakkuussa syntyvien hakkuutähteiden määrä ja hakkuutähteiden sisältämien ravinteiden määrä on harvennushakkuisiin verrattuna suuri (Kuva 2.2.1).

Taulukko 2.2.1. Metsämaan kokonaistypen sekä kasveille käyttökelpoisen fosforin, kaliumin, kalsiumin ja magnesiumin määrät Etelä-Suomessa. Esitetyt luvut ovat humuksen ja kivennäismaan ylimmän pintakerroksen (0–20 cm) sisältämiä keskimääräisiä lukuja. Lähde:Tamminen, P. ja Kukkola, M. 2003.

	Kuiva kangas	Kuivahko kangas	Tuore kangas	Lehtomainen kangas
	kg/ha			
N_{kok}	980	1210	1440	2340
P	12.5	13.5	16.4	14.1
K	32	48	62	73
Ca	62	120	160	330
Mg	10	19	27	52

Taulukko 2.2.2. Ensiharvennuksen yhteydessä poistuva biomassa ja biomassan sisältämät ravinteet. Lähde: Mälkönen, E. ym. 2001.

	Ikä	Tilavuus m^3/ha	Poistuma m^3/ha	Biomassa t/ha	Hakkuutähde Ravinnesisältö				
					N	P	K	Ca	Mg
							kg		
Männiköt (8 kpl)	44	163	49	8,4	41	4	15	21	4
Kuusikot (4 kpl)	40	259	81	15,5	94	11	33	81	10

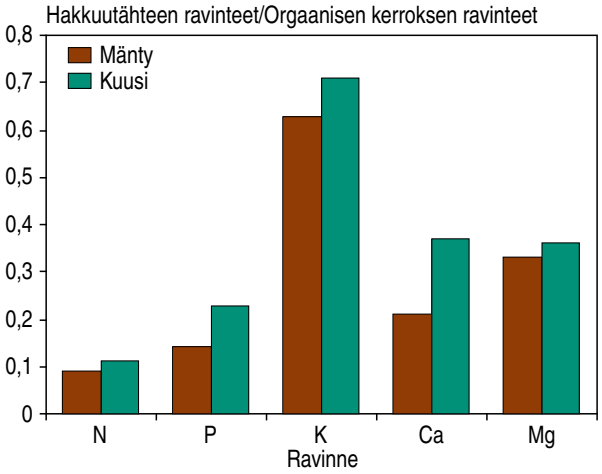


Kuva 2.2.1. Kuusen ja männyn hakkuutähteiden biomassa (a) ja hakkuutähteiden sisältämät ravinnemäärät päätehakkuussa.

Metsähakkeen saatavuutta tarkastelevissa laskelmissa oletetaan, että latvusmassan tekninen korjuupotentiaali on 70 % latvuksen kokonaismassasta (Laitila ym. 2008). Bioenergiaa metsistä- tutkimusohjelmassa Längelmäellä, Anjalankoskella ja Paltamossa toteutetuissa kokeissa, joissa tavoitteena oli kerätä 70 % latvusmassasta, saatiin talteen keskimäärin noin 40 % laskennallisesta kokonaislatvusmassasta. Kun tavoitteena oli kerätä pois kaikki latvusmassa, talteen saatiin noin 72 %, eli hakkuualueelle jäi vielä lähes 30 % latvusmassasta. Myös myös muissa aiemmissa tutkimuksissa on todettu, että korjuussa saadaan latvusmassasta keskimäärin kaksi kolmasosaa talteen (Nurmi 1997, Hakkila ym. 1998, Hynynen 2001, Saksa ym. 2002). Jäljelle jäävä biomassa on yleensä pienempikokoista, mistä johtuen sen ravinnepitoisuus on keskimääräistä hakkuutähdettä korkeampi.

Maahan karikkeena tai hakkutähteinä palautuvista ravinteista osa vapautuu hajotuksen seurauksena nopeasti kasvien saataville. Nykyisen käsityksen mukaan ravinteiden vapautuminen neulasista tapahtuu joidenkin vuosien kuluessa neulasten varisemisesta. Oksista ja puumaisesta karikkeesta ravinteet vapautuvat hitaammin, näistäkin kuitenkin pääosin parinkymmenen vuoden kuluessa.

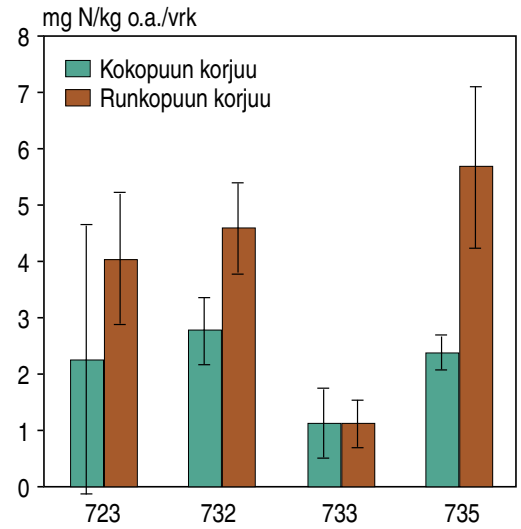
Hakkuutähteiden korjuulla on melko vähäinen vaikutus maan ravinteiden kokonaismääriin. Humuskerroksen ravinnevarastojen kokoon suhteutettuna kokopuun korjuussa poistuu eniten kaliumia, kalsiumia ja magnesiumia (Kuva 2.2.2).



Kuva 2.2.2 . Hakkuutähteen sisältämien ravinteiden suhde maaperän orgaanisen kerroksen ravinteisiin 7 männikön ja 4 kuusikon ensiharvennuskohteella (Tamminen ym. 2012). Lyhenteiden selitykset: N = typpi, P = fosfori, K = kalium, Ca = kalsium, Mg = magnesium.

Kahdessa avohakkuun yhteydessä perustetussa kokeessa hakkuutähteen korjuu ei aiheuttanut 24 vuoden seurantajakson aikana mittauksin havaittavia muutoksia maan orgaanisen aineen, hiilen ja ravinteiden määriin (Saarsalmi ym. 2010b). Myöskään harvennus¬hakkuiden yhteydessä (11 koetta) hakkuutähteiden korjuu ei näyttänyt oleellisesti vaikuttavan maan orgaanisen aineen, hiilen ja ravinteiden kokonaismääriin (Tamminen ym. 2012).

Vaikka kokopuun korjuulla ei ole havaittu vaikutuksia maan ravinnevarastojen kokoon, maaekosysteemissä tapahtuu muunlaisia muutoksia. Osalla kasvupaikoista harvennushakkuiden yhteydessä tehty hakkuutähteen korjuu heikensi kasveille käyttökelpoisen typen vapautumista orgaanisesta aineksesta hajotuksen yhteydessä (Kuva 2.2.3). Lisäksi hakkuutähteen korjuu aiheutti pitkäaikaisia muutoksia maan orgaanisen aineen koostumuksessa alentamalla esimerkiksi joidenkin terpeenien pitoisuuksia.



Kuva 2.2.3. Mineraalitypen vapautumisnopeus (mg typpeä / kg orgaanista ainetta / vrk) neljän kahdesti harvennetun hakkuutähdekokeen humuskerroksessa (Smolander ym. 2008, 2010). Kokeen 733 kasvupaikka oli muita kohteita selvästi viljavampi.

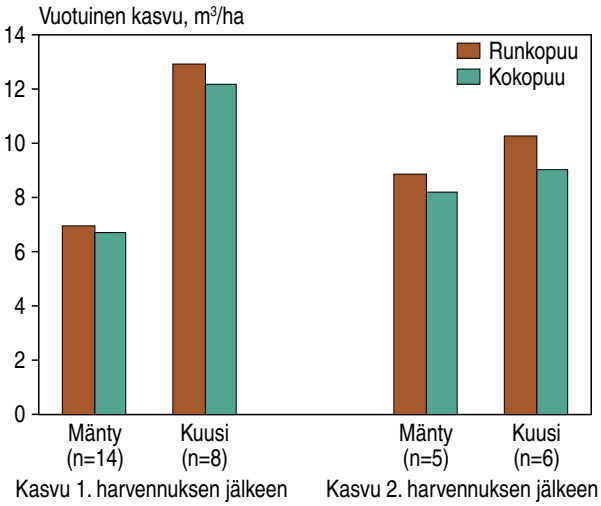
2.2.3 Hakkuutähteiden korjuun vaikutus puuston kasvuun

Hakkuutähteiden mukana kasvupaikalta poistuu ravinteita moninkertaisesti pelkkään runkopuun korjuuseen verrattuna. Neulasten ja oksien mukana menetetään varsinkin typpeä. Koska typpi on lähes kaikissa kangasmetsissämme puuston kasvua rajoittava ravinne, typen menetys merkitsee aina kasvuolosuhteiden heikkenemistä ja todennäköisesti kasvutappioita ennemmin tai myöhemmin.

Harvennushakkuun yhteydessä tehty hakkuutähteen korjuu alensi puiden tilavuuskasvua pohjoismaisessa tutkimuksessa, jossa tutkittiin erilaisten korjuutapojen vaikutuksia Etelä-Ruotsista Rovaniemen korkeudelle ulottuvalla alueella (Helmisaari ym. 2011). Kymmenen vuoden seurantajakson aikana männiköiden kasvu väheni keskimäärin 4 ja kuusikoiden 5 prosenttia ainespuun korjuuseen verrattuna (Kuva 2.2.4). Kuudessa kuusikossa ja viidessä männikössä harvennus ja kokopuun korjuu toistettiin 10-vuoden kuluttua ensimmäisestä harvennuksesta. Toistettu kokopuun korjuu alensi männiköiden tilavuuskasvua kahdeksan ja kuusikoiden kasvua 13 prosenttia toista harvennusta seuranneen 10-vuotisjakson aikana (Kuva 2.2.4). Kasvun väheneminen johtui todennäköisesti hakkuutähteiden mukana poistuneiden ravinteiden, erityisesti kasveille käyttökelpoisen typen, määrän pienenemisestä.

Edellä mainitussa tutkimuksessa hakkuutähteet poistettiin koealalta mahdollisimman tarkasti. Käytännön korjuukohteilla koneellinen kokopuun korjuu alentaa todennäköisesti puiden kasvua vähemmän kuin tässä koesarjassa mitattiin, sillä koneellisessa kokopuun korjuussa saadaan kerättyä vain 60–70 prosenttia hakkuutähteiden kokonaismäärästä. Runkopuun korjuun jälkeen hakkuutähteiden sisältämien ravinteiden saatavuus ei ole tasaista, koska hakkuutähteet jätetään ajourille ja kasoihin ajourien varrelle, eikä niitä levitetä tasaisesti koko alueelle, kuten kokeissa tehtiin.

Avohakkuualoilla hakkuutähteen korjuun vaikutuksista taimikoiden alkukehitykseen on niukasti tietoa. Saarsalmen ym. (2010) tutkimuksessa hakkuutähteen korjuulla ei ollut vaikutusta männyn kasvuun ensimmäisten 22 vuoden aikana. Kokeissa maa muokattiin auraamalla, jolloin hakkuutähteen korjuun vaikutus on voinut peittyä voimaperäisen muokkauksen aiheuttamiin vaikutuksiin. Todennäköisesti myös taimien pieni ravinnetarve tyydyttyy helposti, vaikka hakkuutähteet



Kuva 2.2.4. Kymmenen vuoden vuotuinen keskimääräinen tilavuuskasvu ensimmäisen ja toisen harvennuksen jälkeen, kun harvennuksissa korjattiin vain runkopuu tai runkopuu ja hakkuutähteet. Tulokset ovat keskiarvoja koesarjasta, jonka aineistona olivat pohjoismaiset hakkuutähdekokeet (Helmisaari ym. 2011).

ja niiden sisältämät ravinteet korjataankin päätehakkuussa. Ruotsalaisessa tutkimuksessa kuusen taimikoiden pituuskasvu oli 15-vuotisen tutkimusjakson aikana alentunut erityisesti viljavilla kasvupaikoilla, joilta hakkuutähteen korjuussa poistuu eniten ravinteita (Egnell ja Lejon 1999). Kasvun taantuma alkoi näkyä vajaan 10 vuoden kuluttua päätehakkuusta ja vastasi keskimäärin kahden vuoden pituuskasvua. Hakkuutähteiden korjuulla on ruotsalaisen tutkimuksen mukaan ollut lievä negatiivinen vaikutus myös männyn pituuskasvuun, mutta vaikutus on ollut nähtävissä männyllä myöhemmin kuin kuusella (Egnell ja Valinger 2003).

Jotta maan ravinnemäärät eivät alenisi, energiapuun korjuumenetelmien on hyvä olla sellaisia, joissa mahdollisimman suuri osa hakkuutähteiden neulasista varisee hakkuualalle. Saadut tulokset kokopuun korjuun vaikutuksista kasvuun tukevat käytännön toimijoille jo annettua suositusta, jonka mukaan puun vihreät osat kannattaa jättää metsään ja kolmannes hakkuutähteistä jätetään korjaamatta.

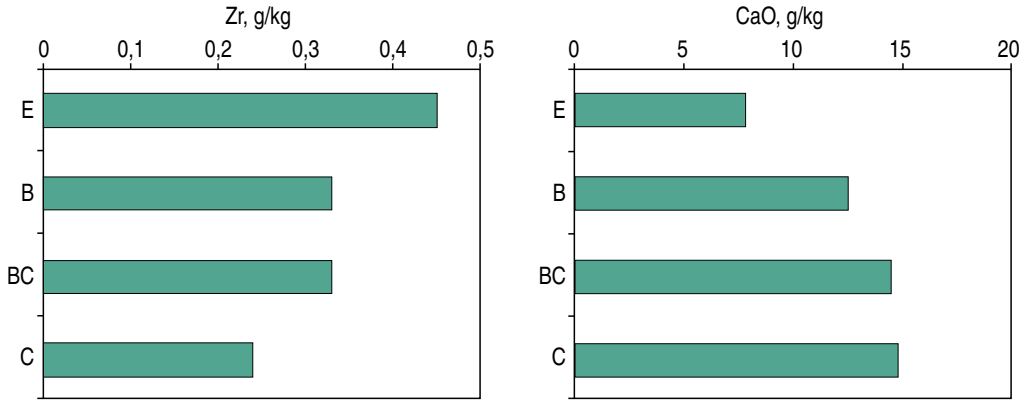
2.2.4 Pystyykö maan mineraalien rapautuminen korvaamaan hakkuutähteiden korjuun aiheuttaman ravinnepoistuman?

Kasvien tarvitsemista ravinteista kaikki muut ravinteet, paitsi typpi, ovat peräisin maaperän mineraaleista, joista ne ovat vapautuneet kasveille käyttökelpoiseen muotoon rapautumalla. Siksi rapautumisella on keskeinen asema metsäekosysteemin aine- ja ravinnekierrossa. Lisäksi mineraalien rapautuminen toimii myös puskuroijana maaperän happamuuden lisääntymistä vastaan.

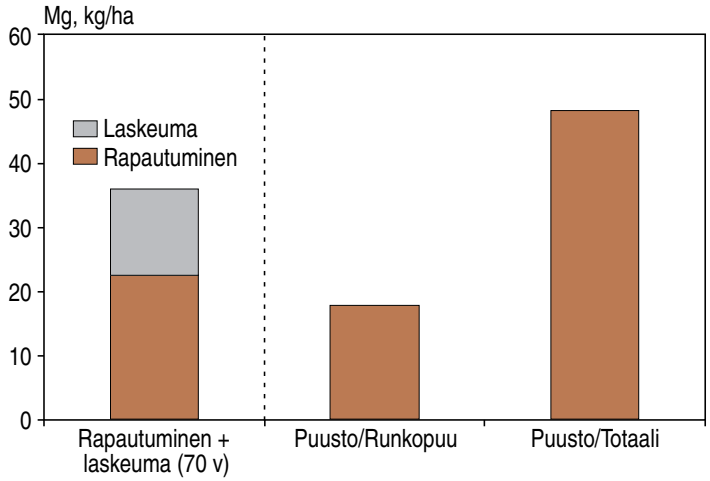
Eloperäisen aineen hajoamisessa syntyvät orgaaniset hapot ohjaavat ja nopeuttavat rapautumista. Koska kokopuukorjuun jälkeen maahan jää vähemmän hakkuutähteitä ja jäljelle jäävien hakkuutähteiden ominaisuudet muuttuvat, kokopuun korjuu voi vähentää myös rapautumisnopeutta. Arvioitaessa kokopuukorjuun aiheuttaman ravinnehävikin merkitystä metsien käytön ekologiseen kestävyyteen, yksi käyttökelpoinen kestävyyden kriteeri on verrata rapautumisessa kiertoajan kuluessa vapautuvia ravinnemääriä kokopuun korjuun yhteydessä poistuvien ravinteiden määrään.

Maaperän mineraaliaineksen rapautumisnopeutta voidaan arvioida mittaamalla maan mineraaliaineksen alkuainekoostumusta eri syvyyksillä maan pinnasta (Kuva 2.2.5). Rapautuminen havaitaan zirkoniumpitoisuuden (Zr) kasvuna sekä kalsiumin (Ca) pitoisuuksien laskuna ylimmässä maakerroksessa. Tällaisia mittauksia on tehty vasta muutamia, ja tällä hetkellä metsämaiden rapautumisarviot perustuvat kallioperäkartoitukseen ja mallitarkasteluihin (Johansson ja Tarvainen 1997).

Jos puuston kiertoajaksi oletetaan 70 vuotta, tänä aikana metsämaasta rapautuneen magnesiumin määrä yhdessä kertyneen magnesiumlaskeuman kanssa on samaa suuruusluokkaa kuin puuston biomassaan kertyneen magnesiumin määrä. (Kuva 2.2.6). Jos puusto korjattaisiin kokopuukorjuuna, puuston mukana poistuva ravinnehävikki olisi jonkin verran suurempi kuin maahan 70 vuoden laskeuman ja rapautumisen mukana tulleen uuden kasveille käyttökelpoisen magnesiumin määrä. Kokopuun korjuu muuttaisi siis tällä esimerkkikohteella kasvupaikan ravinnetaloutta varsin voimakkaasti. Vaikka muutos ei näkyisikään lyhyellä aikavälillä maaperän ravinnevarastojen vuoksi, muutoksia voisi ilmetä pitkällä ajanjaksolla edellyttäen, että tulevaisuudessakin metsien käyttö on yhtä intensiivistä.



Kuva 2.2.5. Eri maannoshorisonteista mitatut Zr- ja Ca- pitoisuudet Anjalankosken koealueella. Kuvan pitoisuusmuutoksien ja jääkauden loppumisesta kuluneen ajan avulla voidaan laskea arvio vuotuisesta rapautumisnopeudesta. Kuvan tulokset on esitetty Suomen metsämaissa yleisen podsolimaannoksen horisontteihin jaettuna: E = humuksen alla sijaitseva, voimakkaasti rapautunut ja väriltään vaalea huuhtoutumiskerros B = punaruskea tai kellertävä rikastumiskerros, johon kertyy erityisesti rauta- ja alumiiniyhdisteitä, BC = heikommin värjäytynyt pohjamaan ja rikastumiskerroksen välinen vaihtumisvyöhyke ja C = muuttumaton pohjamaa.



Kuva 2.2.6. Maaperän rapautumisessa 70vuoden aikana vapautuvan ja maahan sateen mukana tulevan magnesiumin määrä (vasen pylväs) sekä saman ikäisen kuusikon pelkästään rungossa (keskimmäinen pylväs) ja koko puussa (oikea pylväs) olevan magnesiumin määrä (Ukonmaanaho ym. 2008).

2.2.5 Energiapuun korjuu turvemailta – tietoa vaikutuksista on vielä vähän

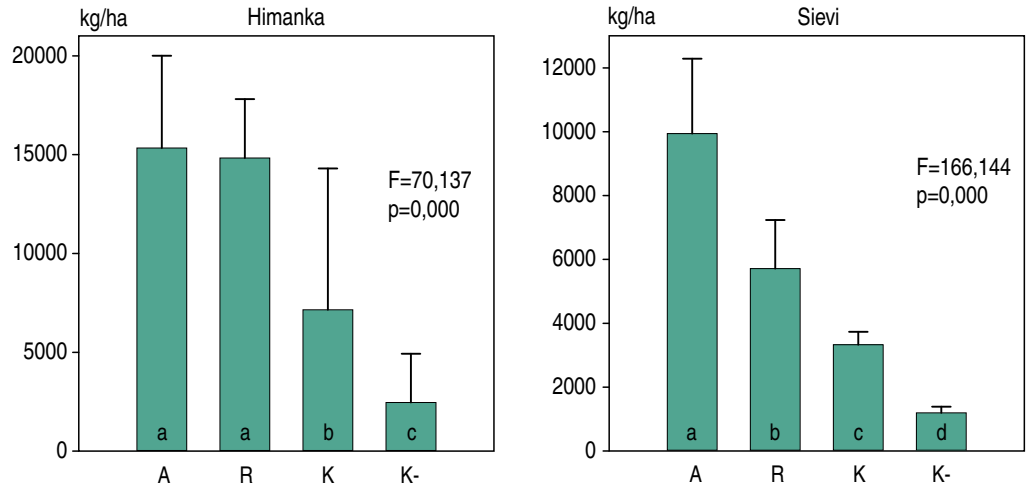
Suomessa on noin 4,9 milj. ha puuntuotantoa varten ojitettuja turvemaita, joista noin 4 milj. ha on arvioitu olevan kelvollisia metsän kasvatukseen. Runsaalla puolella ojitettujen puuntuotantosoiden pinta-alasta on nuoria kasvatusmetsiä. Näistä noin 1 milj. ha on nyt tai lähitulevaisuudessa sopivia harvennushakkuukohteita ja saman verran tulee harvennusvaiheeseen 10–30 vuoden kuluessa. Päätehakkuuvaiheessa suometsiä on tällä hetkellä noin 0,5 milj. ha ja lisäksi noin 1 milj. ha varttuneita kasvatusmetsiä tulee päätehakkuuvaiheeseen 30 vuoden kuluessa. Kansallisten metsäenergian käytön lisäämistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa on kiinnostuttu myös suometsien nykyisin vielä vähän hyödynnetyistä energiapuuvaroista. Kokopuukorjuu soilla on nähty myös yhtenä keinona parantaa suometsien harvennusten kannattavuutta (Heikkilä 2007).

Myös puuston kasvultaan heikkotuottoisiksi arvioiduille, valtaosin Pohjois-Suomessa sijaitseville noin miljoonalle suohehtaarille on ojituksen jälkeen kertynyt puustobiomassaa. Jos nämä alueet jäävät jatkossa pois metsätalouskäytöstä, ja jos niitä halutaan palauttaa lähemmäksi luonnontilaa, tätä kehitystä voidaan jouduttaa poistamalla puustobiomassa osittain tai joissain tapauksissa kokonaan. Näin saatavan puumäärä ei kuitenkaan ole suuri.

Energiapuun korjuun vaikutuksia turvemaiden ravinnetalouteen on aiemmin arvioitu vertaamalla turpeeseen ja puustoon sitoutuneita ravinnemääriä keskenään (Finér 1992, Laiho 1997). Tällaiset ravinnetasetarkastelut ovat osoittaneet, että kivennäismaista poiketen turvemailla kriittisiä ravinteita ovat typen sijasta kalium ja boori. Erityisesti alun perin märillä nevasyntyisillä ja paksuturpeisilla sekatyypin soilla kaliumin niukkuus voi muodostua puuston kasvun kannalta minimitekijäksi, mutta tämä voi tapahtua myös ilman, että ravinteita poistuu runko- tai energiapuun mukana kasvupaikalta. Typen ja orgaanisen aineen poistuminen energiapuun mukana ei ole ensisijainen huolenaihe turvemailla.

Myöskään turvemailla hakkuutähteiden korjuun todelliset vaikutukset kasvupaikan ravinnetalouteen eivät ole käytännössä niin suuria kuin suoraan puuston latvusmassaa ja latvusten ravinnemääriä tarkastelevat laskelmat kuvaavat. Käytännössä noin kolmasosa hakkuutähteistä jää etenkin talviaikana tehtävän korjuun yhteydessä kivennäismaiden tapaan myös suometsien kokopuukorjuukohteilla kasvupaikalle. Suometsien harvennukset toteutetaan huonon kantavuuden takia pääasiassa talvella (Hytönen ym. 2010). Kokopuun korjuussa poistuvan biomassan määrää selvittävässä kokeessa edes korjuun jälkeen käsin tehdyllä hakkuutähteiden lisäkeräyksellä ei päästy tilanteeseen, jossa kaikki hakkuutähteet olisivat tulleet korjatuksi (kuva 2.2.7). Erityisen runsaasti jäljelle jää pienikokoisinta hakkuutähdettä, joka usein on myös ravinnepitoisempaa kuin isompiläpimittainen, lähinnä puuaineksesta koostuva hakkuutähde. Kokopuukorjuuna tehdyssä harvennushakkuussa kasvupaikalta poistuu 2–5 kertaa enemmän ravinteita kuin ainespuukorjuussa (Taulukko 2.2.3). Kokopuukorjuussa poistuneet typpi- ja fosforimäärät ovat melko pieniä verrattuna pintaturpeen varastoihin. Sen sijaan kaliumin ja boorin lisäpoistuma ainespuukorjuuseen verrattuna voi edustaa noin kymmenettä osaa turpeen pintakerroksen ravinnevaroista.

Suometsiin perustetut kokeet, joissa tutkitaan energiapuukorjuun ekologisia vaikutuksia, ovat vasta muutaman vuoden ikäisiä. Tästä johtuen eri hakkuutapojen vaikutuksia suopuustojen kasvuun voidaan tarkastella vasta myöhemmin. Koska osassa suometsiä ravinnetalous on epätasapainoinen ilman energiapuukorjuun aiheuttamia ravinnemenetyksiäkin, lannoittamisen tarvetta on usein syytä harkita erityisesti energiapuun korjuun jälkeen. Hyvälaatuinen puutuhka on osoittautunut perinteisen PK-lannoituksen ohella lukuisissa maastokokeissa erinomaiseksi pitkävaikutteiseksi lannoitteeksi suometsissä (esim. Moilanen ym. 2005).



Kuva 2.2.7. Hakkuutähteen kuivapaino kahdessa suometsien ensiharvennusmännikössä eri tavoin tehdyn korjuun jälkeen, esimerkkeinä metsiköt Himangalta ja Sievistä. A = ainespuukorjuu, R = ainespuukorjuu ja ranka, K = kokopuukorjuu ja K- = kokopuukorjuu, jota on täydennetty käsin tavoitteena poistaa kaikki hakkuutähteet (Hytönen ym. 2010).

Taulukko 2.2.3. Harvennushakkuussa kasvupaikalle jääneen hakkuutähteen sisältämät ravinnemäärät ainespuukorjuun (RPK) ja kokopuukorjuun (KPK) jälkeen. Luvut ovat viiden mitatun kohteen keskiarvoja ($\bar{x}$). Lisäksi taulukossa on esitetty pintaturpeen (0-20 cm) ravinnemäärät (T).

Käsittely		Ravinteita hakkuutähteissä, kg/ha			
		Typpi	Fosfori	Kalium	Boori
RPK	$\bar{x}$	55,2	5,2	14,2	0,07
KPK	$\bar{x}$	24,8	2,2	5,6	0,026
T	$\bar{x}$	5610	321	82	0,6

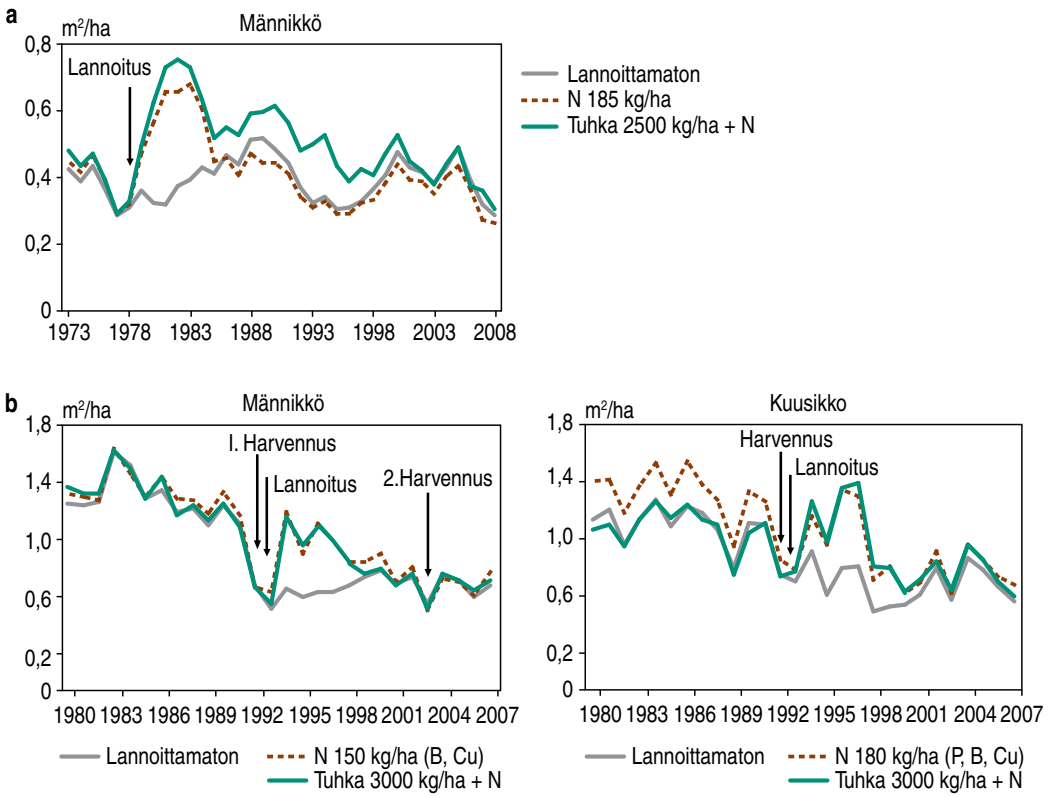
2.2.6 Kasvupaikalta poistuvien ravinteiden korvaaminen lannoituksella

Puuta polttavissa energialaitoksissa syntyy vuosittain 150 000–200 000 tonnia puuntuhkaa. Jos metsähakkeen käyttö lisääntyy suunnitelmien mukaan, puutuhkaa tuotetaan lähitulevaisuudessa aikaisempaan verrattuna lähes kaksinkertainen määrä.

Tuhka sisältää muun muassa kalsiumia, magnesiumia, kaliumia, fosforia ja booria. Koska tuhka ei sisällä typpeä, tuhkalannoitus ei lisää puuntuotosta kasvupaikoilla, joilla kasvua rajoittaa typen puute. Tämän vuoksi tuhkaa ei ole tähän asti suositeltu lannoitteeksi kangasmaille eikä hyvin niukkatyppisille turvemaille, vaan lähinnä sellaisiin suometsiin, joissa on niukkuutta erityisesti fosforista ja kaliumista.

Puutuhka sisältää typpeä lukuun ottamatta muita ravinteita likimain samoissa suhteissa kuin niitä on puuston biomassassa. Monipuolisen ravinnesisältönsä lisäksi tuhkalla on voimakas kalkitusvaikutus eli se neutraloi maaperän happamuutta. Palauttamalla energiantuotannossa puusta syntyvä tuhka takaisin metsään, korvataan samalla puunkorjuussa syntyviä ravinnemenetyksiä ja hidastetaan maan luontaista happamoitumista. Näin toimien saadaan tuhka hyötykäyttöön, huolehditaan kestävän metsätalouden periaatteiden mukaisesta ravinteiden kierrätyksestä ja vähennetään samalla tuhkan energialaitoksille aiheuttamia jäteongelmia.

Tuhkalannoituksella voi karuillakin kangasmailla olla ravinnekiertoa vilkastuttava ja puiden kasvua lisäävä vaikutus, jos tuhkan ohella lannoitteena annetaan myös typpeä. Tuhkan ja typpilannoitteen kasvua lisäävä yhteisvaikutus voi kestää kauemmin kuin pelkän typpilannoitteen vaikutus. Kun kanervatyypin männikköä lannoitettiin joko pelkästään typellä tai typellä ja tuhkalla, niin pelkän typpilannoituksen kasvua lisäävä vaikutus loppui alle 10 vuodessa, mutta yhdistetty typpi-tuhkalannoitus paransi mäntyjen kasvua huomattavasti pidemmän ajan (Kuva 2.2.8a). Puolukkatyypin männikössä ja mustikkatyypin kuusikossa, joissa niin ikään oli annettu tuhkan ohella typpeä, puuston kasvussa ei ollut oleellista eroa riippumatta siitä, oliko typpi annettu tuhkan kanssa tai yksinään (Kuva 2.2.8b).



Kuva 2.2.8. Puuston pohjapinta-alan vuotuinen kasvu kanervatyypin männikössä (a) sekä puolukkatyypin männikössä ja mustikkatyypin kuusikossa (b), kun lannoitteena on annettu pelkkää typpeä (ruskea viiva) tai typpeä ja puuntuhkaa (vihreä viiva). Kanervatyypin männikkökohteella tuhkalannoitus pidensi typpilannoituksen vaikutusaikaa merkittävästi (a), puolukkatyypin männikkökohteella ja kuusikkokohteella (b) tällaista vaikutusta ei havaittu. Kuvassa esitetään myös lannoittamattoman vertailualueen puuston vuotuinen kasvu (harmaa viiva) (Saarsalmi ym. 2010a, Saarsalmi ym. 2012).

2.2.7 Hakkuutähteiden ja kantojen korjuun vaikutus ravinteiden ja muiden aineiden huuhtoutumiseen

Metsät ovat tärkeä osa veden ja siihen liuenneiden aineiden kiertoa. Suomessa vallitsevassa ilmastossa vuosittainen sadanta on suurempaa kuin kasvillisuuden ja maanpinnan haihduttaman veden määrä. Tämä tarkoittaa, että kasvupaikoilta poistuu vettä ja siihen liuenneita aineita maassa ja uomissa liikkuvan veden mukana. Metsät pidättävät monia sateen mukana tulevia yhdisteitä, kuten esimerkiksi kasveille käyttökelpoisia ravinteita hyvin tehokkaasti. Metsistä valuva vesi myös kuljettaa liukoisia orgaanisia yhdisteitä ja niiden kanssa yhdessä liikkuvia ravinteita pois metsäekosysteemeistä.

Metsien hakkuu vähentää haihduttavan puuston määrää, ja sen seurauksena huuhtoutuvan veden määrää lisääntyy 15–20 % . Maanpinnan käsittely sekä kohteella liikkuminen rikkovat maan pintaa ja tekevät maahan vettä helposti kuljettavia uomia. Lisääntynyt liikkuvan veden määrä yhdessä maan pinnan rikkoontumisen ja urittumisen kanssa lisäävät veden liikenopeutta ja samalla veden mahdollisuuksia kuljettaa mukanaan myös kiinteitä partikkeleita. Tämä lisää kiintoainekuormituksen, ja joissain tapauksissa myös eroosion, todennäköisyyttä.

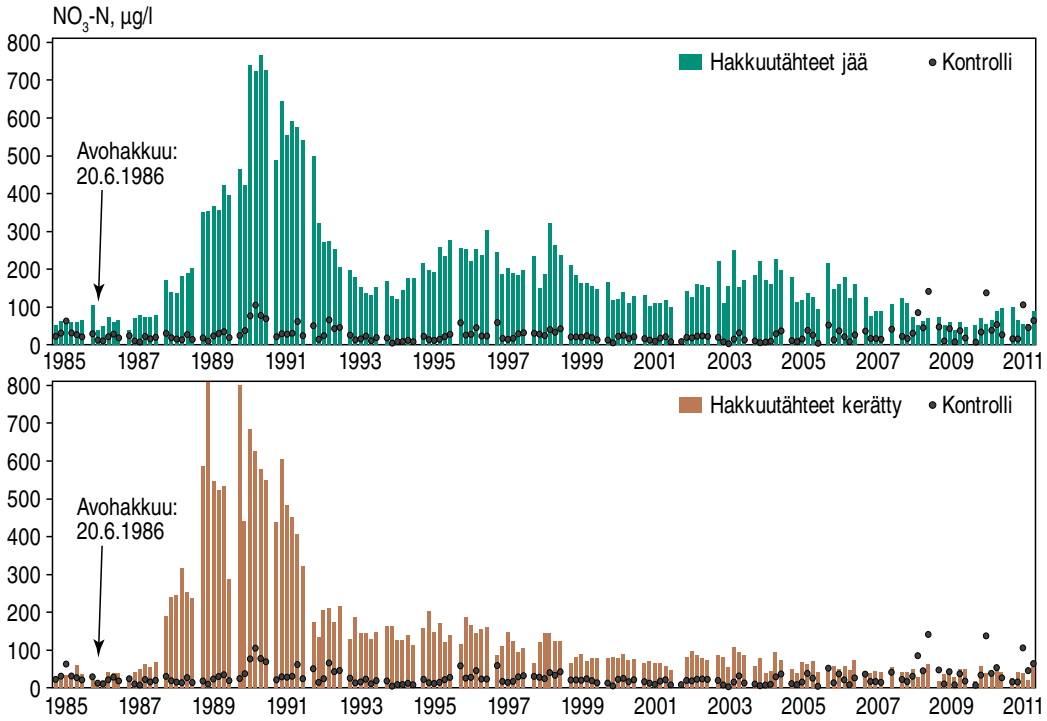
Huuhtoutuminen on osa ravinteiden luontaista kiertokulkua, mutta metsien voimakas käsittely voi lisätä erityisesti toimenpidealueiden lähistössä huuhtoutumista niin paljon, että ne muuttavat vesistöjen ominaisuuksia. Tästä syystä metsien käsittelyn yhteydessä on tärkeää huomioida myös käytettävien erilaisten toimenpideketjujen aiheuttamat vesistövaikutukset.

Metsätalouden aiheuttamia vesistövaikutuksia on tutkittu jo pitkään. Kokopuun korjuun aiheuttamia vesistövaikutuksia sen sijaan on tutkittu vähän, turvemailla vielä kivennäismaakohteitakin vähemmän. Bioenergiaa metsistä tutkimusohjelmassa on perustettu intensiivisiä koealoja, joilla tutkitaan energiapuun korjuun vesistövaikutuksia kivennäismailla ja turvemailla (Tietotaulut ss. 76-78). Tällaisille kokeille on luonteenomaista, että niiden avulla voidaan seurata käsittelyjen vaikutuksia pitkän ajan kuluessa.

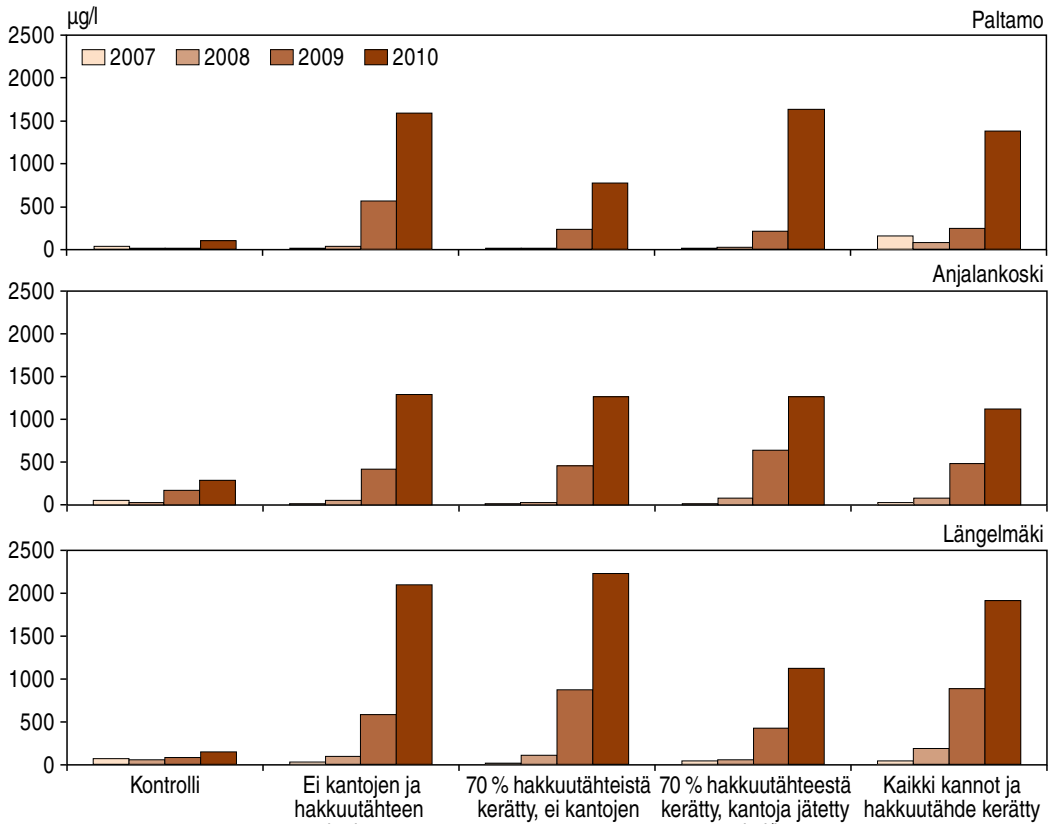
Hakkuiden ja hakkuutähteiden korjuun vaikutukset pohjaveteen

Päätehakkuu ja maanmuokkaus vaikuttavat selkeästi ravinteiden huuhtoutumiseen. Paltamon Kivesvaarassa 1980-luvun puolivälistä lähtien seuratussa kenttäkokeessa päätehakkuu ja maanmuokkaus aiheuttivat erityisesti nitraattitypen huuhtoutumista sekä pinta- että pohjavesiin. Tausta-arvoja korkeampi huuhtoutuminen pintavesiin kesti noin viisi vuotta. Pohjavesivaikutukset ovat olleet pitkäaikaisempia. Pohjaveden pitoisuudet olivat korkeimmillaan 3–5 vuoden kuluessa hakkuusta, ja kohonneita pohjaveden nitraattipitoisuuksia mitattiin vielä 20 vuotta toimenpiteen jälkeen. Ensimmäisinä vuosina pohjaveden pitoisuusmuutokset olivat samanlaiset ainespuun ja kokopuun korjuussa. Kokopuun korjuussa pohjaveden nitraattipitoisuudet kuitenkin alenivat nopeammin kuin ainespuuhakkuissa (kuva 2.2.9). Pohjavedestä mitatut nitraattipitoisuudet olivat korkeimmillaankin ollessaan selvästi talousvesien laatuvaatimuksen raja-arvon 25 mg / l alapuolella.

Uudemmilla, vuonna 2007 perustetuilla kokeilla (ks. Tietotaulu s. 76) tulokset ovat olleet samansuuntaisia. Pohjaveden nitraattipitoisuudet ovat kohonneet käsittelyiden jälkeen kaikilla koealueilla ja käsittelyillä (Kuva 2.2.10).



Kuva 2.2.9. Avohakkuun ja hakkuutähteiden talteenoton vaikutus pohjaveden nitraattipitoisuuteen Hautalan koekentällä Paltamon Kivesvaarassa 23 vuoden aikana avohakkuun jälkeen. Ylemmässä kuvassa pohjaveden nitraattipitoisuudet on mitattu avohakatulta alueelta, jonne hakkuutähteet on jätetty maahan. Alemassa kuvassa olevat tulokset ovat kohteelta, josta hakkuutähteet on kerätty.



Kuva 2.2.10. Nitraattitypen (NO_3-N) määrä pohjavedessä Paltamon, Anjalankosken ja Längelmäen koealueilla vuosina 2007–2010. Koealueiden hakkuut tehtiin syksyllä 2007, kantojen nosto ja maanmuokkaus vuoden 2008 aikana.

Kannonnoston vaikutus valuma-alueelta huuhtoutuvan veden laatuun

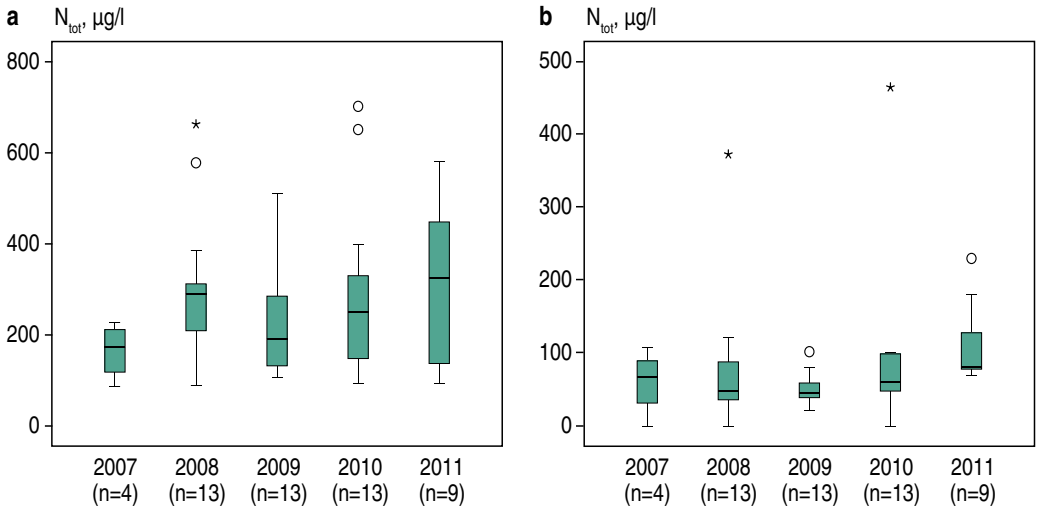
Kuusamon Oijusluoman ja Taivalkosken Katajavaaran valuma-alueilla tutkitaan kantojen noston vaikutuksia ravinteiden huuhtoutumiseen alueilla oleviin puroihin. Heti kantojen noston (2010) jälkeen kokonaistypen, kaliumin, magnesiumin ja mangaanin pitoisuusuudet olivat hieman kohonneet molempien valuma-alueiden ulosvirtaavasta purosta otetuissa vesinäytteissä. Kiintoainepitoisuuksissa havaittiin Katajavaaran alueella hetkellinen kohoaminen heti hakkuun ja kantojennoston jälkeen. Oijusluomassa, jossa puron ja käsitellyn alueen välille jätettiin suojakaista, ei tällaista kohoamista havaittu (Kuva 2.2.11).

Uusien kokeiden seuranta-aika on metsien kiertoaikaan verrattuna vielä lyhyt. Näissä kokeissa saatujen tulosten perusteella ei siten voida vielä esittää kokonaisvaltaisia johtopäätöksiä eri tavoin tehtyjen hakkuutähteiden keruun ja kantojen noston aiheuttamien ravinne- ja kiintoainehuuhtoutumien kestosta ja käsittelyjen välisistä eroista, vaan kohteiden seurantaa on jatkettava edelleen.

Hakkuutähteiden määrän vaikutus maaveden ominaisuuksiin

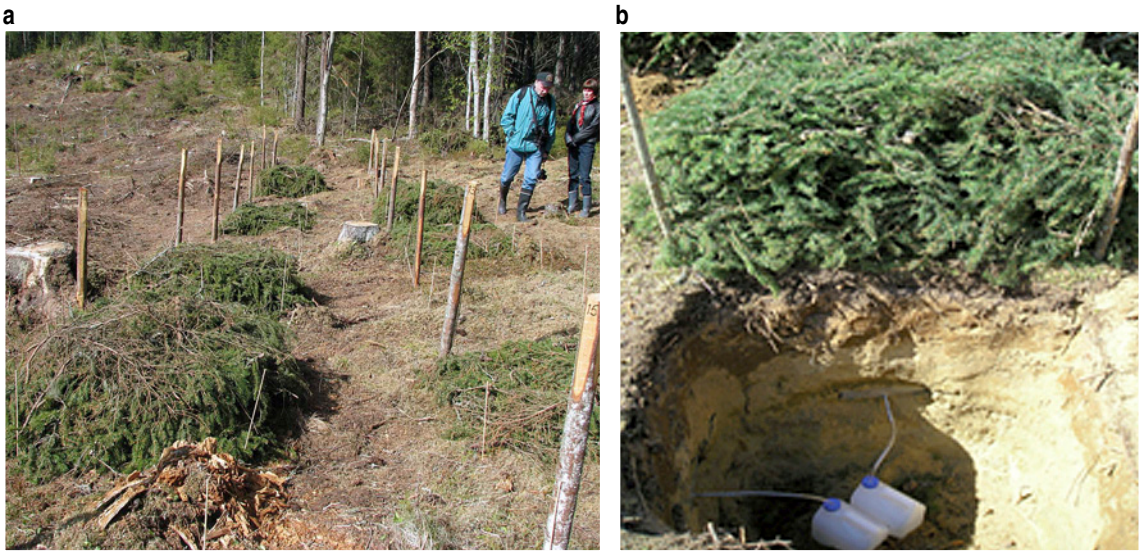
Hakkuutähteiden määrän vaikutuksia maaveden ominaisuuksiin tutkittiin koesarjassa, jossa maan pinnalta oli poistettu kaikki hakkuutähteet, punnittu tuoreita kuusen oksia joko 100 t/ha (10 kg/m^2) tai 400 t/ha (40 kg/m^2) tai levitetty hakkuutähteiden poiston jälkeen 3 t/ha tuhkaa. Ainespuuhakkuuna tehtävillä kuusen päätehakkuualoilla hakkuutähteiden määrä on usein lähellä sataa tonnia hehtaarilla. Maaveden ominaisuuksia seurattiin läheltä maan pintaa sekä 40 cm syvyydestä maan alta kerätyistä vesinäytteistä (Kuva 2.2.12).

Hakkuutähteistä vapautui heti hakkuutähdekasan alta kerättyyn veteen runsaasti liukoista orgaanista hiiltä (DOC) jo toisena vuonna hakkuun jälkeen. Koska kivennäismaa sitoo orgaanisia yhdisteitä pinnoilleen voimakkaasti, liukoisen hiilen huuhtoutuminen 40 cm:n syvyyteen oli vähäistä riippumatta siitä, oliko tutkittavalla ruudulla hakkuutähteitä tai ei, tai oliko alueelle levitetty puun tuhkaa. Mikäli hakkuutähteet korjataan bioenergiaksi, tällaista hiilivirtaa maaperän pintaosaan ei synny (Kuva 2.2.13).

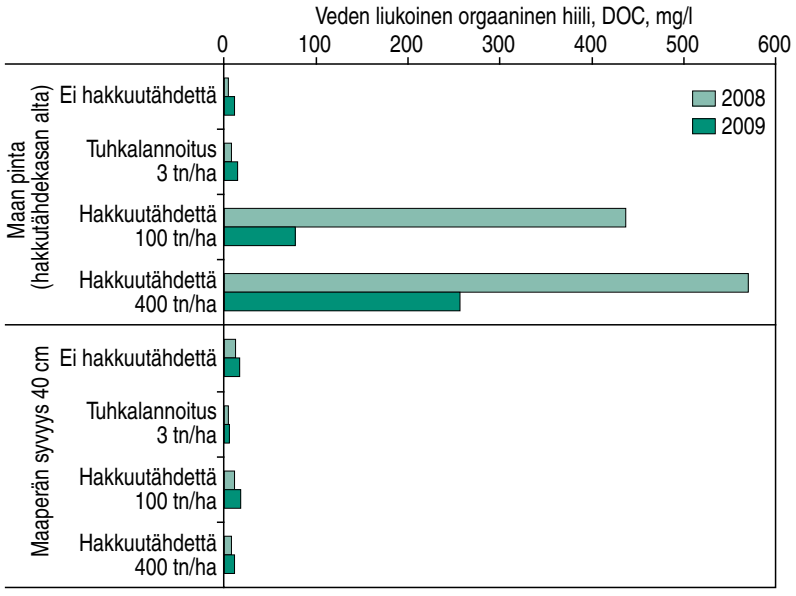


Kuva 2.2.11. Kokonaistyppipitoisuus Oijusluoman (a) ja Katajavaaran (b) kantojen nostoalueiden valuma-alueilta kerätyissä vesinäytteissä 2007–2011. Alueiden hakkuut ja kantojennosto suoritettiin syksyllä 2010 (Kubin ym. 2012). Kuvassa mitattujen havaintojen keskiarvo esitetään laatikon sisällä olevana poikkiviivana. Laatikko ja pystyviivat kuvaavat eri mittauskerroilla saatujen tulosten välistä hajontaa.

Hakkuutähteiden korjuu tai jättäminen paikalleen vaikutti myös nitraattitypen huuhtoutumiseen. Toisin kuin liuennutta orgaanista hiiltä, nitraattia huuhtoutui myös juuristovyöhykkeen alapuolelle 40 cm:n syvyyteen. Päätehakkuun jälkeen kohonneet nitraattipitoisuudet olivat korkeampia, kun hakkuutähteitä ei korjattu. Kaikkein korkeimmat nitraattitypen huuhtoutumismäärät mitattiin, kun hakkuutähdettä jätettiin maahan isoina kasoina (40 kg/m^2).



Kuva 2.2.12. Hakkuutähteiden määrän – 0, 100 ja 400 t/ha – ja tuhkalannoituksen – 3 tn/ha – vaikutuksia maahan valuvan veden ominaisuuksiin tutkittiin 1 m^2 pienruuduilta e (a). Kuvan (b) koeruudulla on 400 t/ha hakkuutähteitä (= 40 kg/m^2). Vettä kerättiin maahan asennetuilla vajovesikeräimillä suoraan hakkuutähdekasan alta ja 40 cm:n syvyydeltä maasta. Kuvat Metla/Martti Lindgren.



Kuva 2.2.13. Veden liukoisen hiilen pitoisuus maan pinnassa (Pinta) ja 40 cm:n syvyydellä maassa vuosina 2008 ja 2009.

Kokopuun korjuun aiheuttamat vesistövaikutukset turvemailla

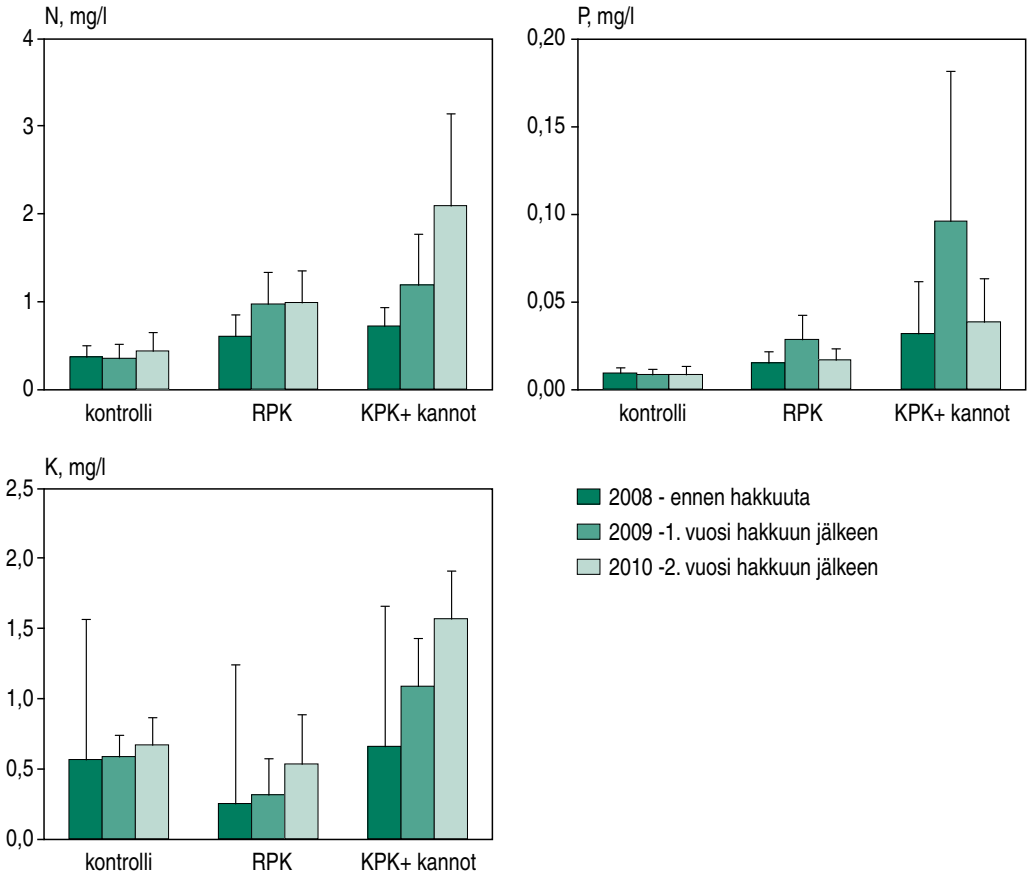
Suometsissä tehtävät metsätalouden toimenpiteet yleensä lisäävät vesistöjen ainekuormitusta enemmän kuin toimenpiteet kangasmaiden metsissä. Haihdunnan vähentyessä hakkuiden jälkeen valunta lisääntyy, jolloin pohjaveden pinnan nouseminen johtaa hapettomuuteen ja sen seurauksena turpeen heikentyneeseen ravinteiden pidätyskykyyn. Tämä altistaa vesiekosysteemit hakkuita edeltänyttä tilannetta suuremmalle ravinteiden, orgaanisen hiilen, happamuuden, metallien ja kiintoaineen kuormitukselle. Myös metsäkoneiden aiheuttamat ajourat ja kantojen nostosta syntyneet kuopat voivat vedellä täyttyessään toimia hapettomina painanteina, jotka luovat otolliset olosuhteet esimerkiksi elohopean metyloitumiselle ja raskasmetallien liukenemiselle.

Kokopuukorjuussa vesistöön huuhtoutuvien aineiden määrä voi vähentyä runkopuukorjuuseen verrattuna. Näin siksi, että hakkuutähteen talteenotto pienentää hakkuualueelle jäävän hajoavan karikkeen määrää ja siten hajoamisessa vapautuvia aineita. Toisaalta puun korjuun yhteydessä tapahtuva maanpinnan rikkoutuminen voi lisätä kiintoaineen ja ravinteiden huuhtoutumista. Tämä koskee erityisesti kokopuukorjuuta, jossa metsäkoneiden käyntikertoja kohteella on useampia eikä hakkuutähteitä voi käyttää hyväksi korjuukoneiden kantavuuden parantamiseksi. Lisäksi kantojen nosto lisää maanpinnan rikkoutumista.

’Bioenergiaa metsistä’ – tutkimusohjelmassa runko- ja kokopuun korjuun vesistövaikutuksia turvemailla on tutkittu valuma-aluetasoisesti Lapinjärvellä, Vilppulassa ja Sotkamossa. Käsittelyjen vaikutukset ekosysteemien toimintaan ovat pitkäaikaisia, ja suokohteilla toimenpiteiden vaikutukset ovat erilaisia sen mukaan, minkälaisista soista tarkasteltavat metsät ovat syntyneet. Energiapuukorjuun vaikutuksia on tutkittu turvemailla vasta muutaman vuoden ajan, ja siksi tarvitaan vielä lisäseurantaa erilaisten toimenpiteiden kokonaisvaikutusten selvittämiseksi erilaisilla kasvupaikoilla.

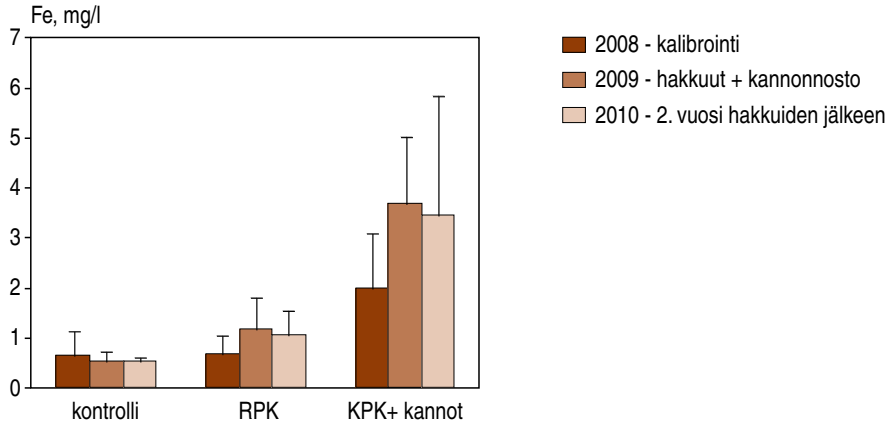
Kuva 2.2.14. Sotkamon turvemaakoealalla on toteutettu kantojen nosto. Kuva Metla/Marita Turunen.

Kokeista tällä hetkellä käytettävissä olevien tulosten mukaan typpeä huuhtoutui enemmän kokopuukuin runkopuukorjuukohteilta (Kuva 2.2.15). Vilppulassa muutokset typpikuormituksessa olivat vähäisiä todennäköisesti siksi, että alueet olivat viljavuudeltaan karuja ja turpeen typpipitoisuudet olivat alhaisia. Sotkamon aloilla myös fosforia huuhtoutui enemmän kokopuukorjuukohteilta, mutta typen huuhtoutumisesta poiketen fosforin huuhtoutuminen oli lähellä hakkuuta edeltävää tasoa jo toisena vuotena hakkuiden jälkeen. Vilppulassa sen sijaan fosforia huuhtoutui enemmän runkopuukorjuukohteilta, mutta myös kokopuukorjuu lisäsi huuhtoumia. Turvemaakasvupaikkojen ravinnetalouden kannalta kaliumin huuhtoutuminen voi olla merkityksellistä etenkin sellaisilla kohteilla, joilta korjataan myös neulasbiomassaa, sillä kaliumin huuhtoutuminen lisääntyi selkeästi viimeistään toisena vuotena hakkuiden jälkeen riippumatta hakkuutavasta. Kaliumin huuhtoutuminen oli vähäisintä ohutturpeisilla korpikohteilla (Lapinjärvi).

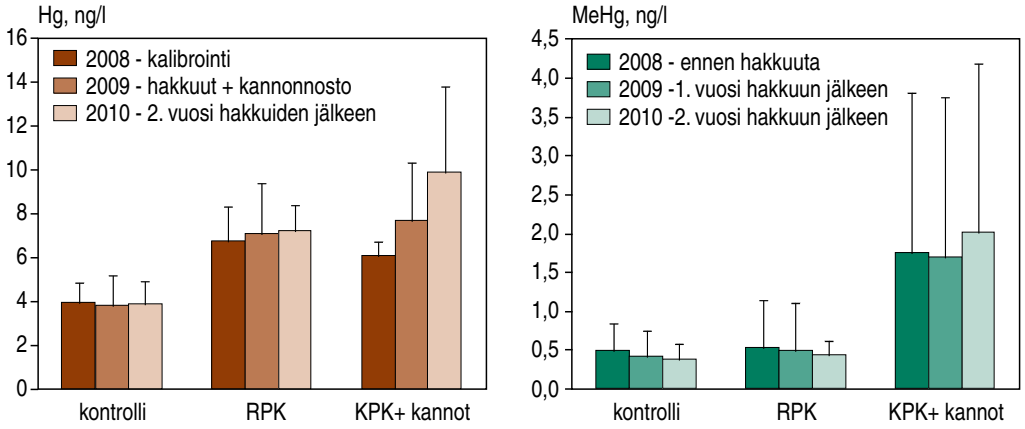


Kuva 2.2.15. Typpi (N), fosfori (P) ja kalium (K) pitoisuudet (mg/l) purkuojissa ennen toimenpiteitä (2008 –kalibrointi) ja toimenpiteiden jälkeen (2009 ja 2010). Kuvassa esitettävät tutkimusalueet sijaitsevat Sotkamossa.. Tutkimuksessa toteutetut käsittelyt olivat RKP = runkopuukorjuu, KPK= kokopuukorjuu, KPK+kannot = kokopuukorjuu + kantojennosto, sekä käsittelemätön kontrollialue. Näytteenotto tehtiin vuoden lumettomana aikana.

Sotkamon aloilla ojissa virtaavan veden raskasmetallien pitoisuudet pääsääntöisesti nousivat päätehakkuiden jälkeen hakkuutavasta riippumatta. Esimerkiksi rautapitoisuus lähes kaksinkertaistui hakkuiden jälkeen jo hakkuuvuotena (Kuva 2.2.16). Tyypillisesti pitoisuudet alkoivat laskea jo toisena vuotena hakkuiden jälkeen. Kokonaiselohopean ja metyylielohopean pitoisuudet olivat luontaisesti erilaiset eri käsittelyissä ja pitoisuudet vaihtelivat paljon mittauskertojen välillä. Erilaisten korjuutapojen vaikutuksia elohopean huuhtoutumiseen ei siten havaittu (Kuva 2.2.17). Suomailta päätehakkuun jälkeen vesistöihin tuleva raskasmetallikuormitus saattaa siten lisätä kalojen elohopeapitoisuuksia (Verta ym. 1986, Porvari 1998) tai vaikuttaa kalalajien runsaussuhteisiin (Rask ym. 1996).



Kuva 2.2.16. Rautapitoisuus (mg/l) purkuojissa Sotkamossa, ennen talvella 2009 tehtyjä toimenpiteitä ja toimenpiteiden jälkeen. Runkopuuhakkuut ja kokopuunkorjuu lisäsivät puroveden rautapitoisuutta. Kokopuukorjuukohteella veden rautapitoisuus oli selvästi muita kohteita korkeampi jo ennen käsittelyjä. Tutkimuksessa toteutetut käsittelyt olivat RKP = runkopuukorjuu, KPK= kokopuukorjuu, KPK+kannot = kokopuukorjuu + kantojennosto, sekä käsittelemätön kontrollialue. Näytteenotto tehtiin vuoden lumettomana aikana.

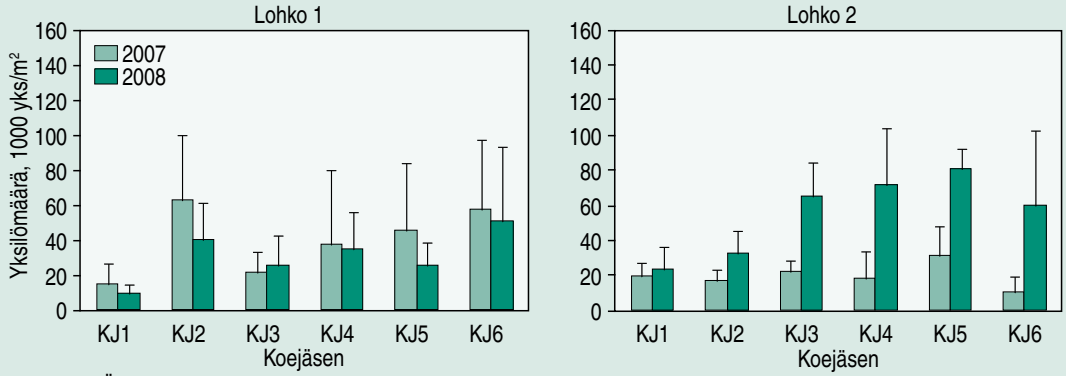


Kuva 2.2.17. Hakkuut ja kannonnosto lisäsivät kokonaiselohopean (Hg) huuhtoutumista Sotkamon valuma-alueilla. Metyylielohopean (MeHg) pitoisuus vaihteli eri mittauskerroilla paljon, eikä käsittelyjen välillä havaittu eroja ennen ja jälkeen toimenpiteiden. Pitoisuudet ovat hyvin pieniä, ne ilmoitetaan yksikössä nanogrammaa (= gramman miljardisosa) litrassa (ng/l). Käsittelyjen lyhenteet kuten kuvassa 2.2.16.

Kokopuun korjuun vaikutukset maaperäeliöihin

Bakteerien ja sienten lisäksi maaperäeläimet ovat hyvin merkittävä eliöryhmä maaperän kuolleen orgaanisen aineksen hajotuksessa ja siten niillä on tärkeä osa metsämaiden ravinnekierron ylläpitäjänä ja metsien hiilitaseen säätelijänä. Avohakkuu ja sitä seuraavat maan muokkaukset rikkovat maapeitteen rakennetta sekä muuttavat voimakkaasti maaperän eliöyhteisöä ja sen toimintaa. Hakkuutähteet lisäävät hetkellisesti maassa olevan hajotettavan biomassan määrää voimakkaasti. Monet maaperäeläimet käyttävät hakkuutähteitä ravintonaan. Käsittelyjen vaikutukset maaperäeliöyhteisöön riippuvat myös käytettävien käsittelyjen intensiteetistä. Avohakkuuseen ja perinteiseen äestykseen tai mätästykseen verrattuna hakkuutähteiden korjuu ja kantojen nosto ovat voimakkaampia ekosysteemin häiriötekijöitä. Hakkuutähteiden korjuu vähentää hakkuutähteiden määrää ja siten myös maaperäeläimien saatavilla olevaa ravinnon määrää. Kantojen nostossa rikkoutuneen maan osuus lisääntyy selvästi ja samalla paljastuu laajoja alueita kivennäismaata, jossa usein maaperäeläinten yksilömäärä on selvästi humuskerrosta alhaisempi.

Bioenergian käytön vaikutuksia selvittävän maaperäeläintutkimuksen tavoitteena on tutkia kantojen noston ja hakkutähteiden keruun vaikutusta maaperäeläinten lajistoon sekä runsauden vaihteluun. Maaperäeläinten tutkimuksessa käytettävien menetelmien työläyden takia kokopuun korjuun vaikutuksista on tällä hetkellä käytettävissä vasta vähän tuloksia. Kuvan 2.2.18 tulosten mukaisesti näyttää siltä, että hakkuiden yhteydessä syntyvät hakkuutähteet lisäävät maaperäeläinten määrää kontrollimetsään verrattuna heti hakkuuta seuraavana kesänä, mutta erilaisten korjuutapojen välillä ei ole selviä eroja.



Kuva 2.2.18. Änkyrimatojen keskimääräinen yksilömäärä Längelmäen koekentän lohkoilla 1 ja 2 ennen käsittelyä vuonna 2007 ja käsittelyjen jälkeen 2008. Längelmäen koekentän lohkot ja kokeessa toteutetut käsittelyt 1-6 (=koejäsen) on kuvattu tietotaulussa 3. Käsittelyjen vaikutuksissa on paljon paikallista vaihtelua. Kuvasta nähdään, että lohkolla 1 hakkuut eivät ole juurikaan vaikuttaneet maaperäeläinten määriin, mutta lohkolla 2 hakkuita seuraavana vuonna maaperäeläinten määrä on selvästi hakkuita edeltänyttä aikaa suurempi.

Kuva 2.2.19. Änkyrimatoja “spagetti-muodostelmassa” heti erottelun jälkeen ja ryhmiteltynä kuvausta ja mittausta varten. Kuvat Metla/Martti Lindgren.

2.2.8 Bioenergian korjuun vaikutus metsämaan hiilitaseeseen ja maahengitykseen

Ihminen on käyttänyt metsiä eri tavoin jo vuosisatojen ajan, ja kaikilla näillä käyttötavoilla on ollut omat vaikutuksensa myös maan hiilivarastoon. Kaskenpolton vaikutukset ovat ilmeiset. Kaskea poltettaessa sekä puuston että maaperän hiilivarastot ovat vähentyneet merkittävästi. Samalla kuitenkin maahan on voinut kertyä merkittävä määrä hiiltynyttä puuta. Musta hiili on käytännössä mikrobiologisesti hajoamatonta ja siten pysyvä osa maan hiilivarastoa. Metsän laidunnus on vaikuttanut voimakkaasti sekä aluskasvillisuuden että puun taimien määrään ja puuston rakenteeseen. Tervanpoltossa poistettiin maasta kantoja ja muutettiin puuston rakennetta koloamalla puita. Myös harsintahakkuissa vaikutettiin voimakkaasti jäljelle jääneen puuston tiheyteen ja kasvukykyyn ja tämän kautta myös metsikön hiilensidontakykyyn ja kariketuotokseen. Kokopuun korjuussa metsistä poistetaan valtaosa korjattavan puuston sisältämästä hiilestä.

Maahan kohdistuvien vaikutustensa osalta kantojen nosto muistuttaa toimenpiteenä maan muokkausta. Eräissä käytettävissä olevissa tutkimuksissa maan muokkauksen on havaittu pienentävän maan hiilivaraston kokoa (Jandl ym. 2007), toisissa tutkimuksissa tällaista taas ei ole havaittu (Freeman ym. 2005). Maan muokkaantumisen hiilitasevaikutusten arviointia hankaloittaa myös se, että maata käsiteltäessä orgaanisen kerroksen hiiltä voi sekoittua mineraalimaan joukkoon pienentäen orgaanisen kerroksen hiilimäärää samalla kasvattaen kivennäismaan hiilimäärää (Yanai ym. 2003; Nordborg ym. 2006).

Sitä, vaikuttaako kasvupaikan muuttunut ravinnetila tai kantojen noston aiheuttama maan pinnan muokkaantuminen myös karikkeen hajotusnopeuteen, ei vielä tunneta. Maan hiilivaraston koko on suuri oletettuun hiilivaraston muutokseen verrattuna ja myös hiilivaraston koon paikallinen vaihtelu on varsin suurta. Tästä syystä muutoksen osoittaminen on vaikeata (Jandl ym. 2007, Walmsley & Godbold 2010). Hakkuiden ja kokopuun korjuun vaikutuksia maan hiilivaraston kokoon selvittäviä kokeellisia mittauksia on tällä hetkellä käytettävissä vain muutamia. Niissä esitetyt tulokset eivät ole yhdenmukaisia. Zabowski ym. (2008) havaitsivat, että maan hiilivarasto oli pienentynyt 20 vuotta kantojen noston jälkeen. Johnson ym. (2002) puolestaan havaitsivat 16 vuoden kuluttua kannonnostosta tehdyissä mittauksissa kannonnoston lisänneen maanpäällisen biomassan määrää, mutta ei aiheuttaneen muutoksia maan hiilivarastossa. Hopen (2007) Kanadassa tehdyssä tutkimuksessa kantojen nosto yhdessä äestyksen kanssa pienensi maan hiilivarastoa.

Koska nykyisen kaltaista kokopuun korjuuta on tehty vasta lyhyen aikaa, tutkittua tietoa maan hiilivaraston muutoksista ei ole vielä olemassa suomalaisia olosuhteita vastaavista metsistä. Erilaisissa ilmasto-olosuhteissa tehtyjen mittausten tuloksia puolestaan ei voi suoraan yleistää meille.

Suorien mittauksien sijaan energiapuun korjuun aiheuttamaa muutosta metsien hiilitaseisiin on pyritty arvioimaan myös erilaisilla mallitarkasteluilla (Bengtsson & Wikström 1993; Peng ym. 2002, Ågren & Hyvönen 2003; Repo ym. 2011; Lindholm ym. 2011). Mallitarkasteluissa maahan tuleva hajoava biomassa jää pienemmäksi hakkuutähteiden ja kantojen korjuussa, minkä vuoksi myös maan hiilivarastossa tapahtuu laskennallinen pieneneminen. Käytännön kohteilla tehdyt mittaukset eivät yksiselitteisesti tue tätä johtopäätöstä. Tällainen ristiriita mallien ja kokeellisten tulosten välillä voi syntyä monista syistä. Esimerkiksi mallien kariketuotosta ja hajotusta kuvaavat yhtälöt voivat olla puutteellisia tai kokeellisessa työssä näytteiden välinen hajonta on niin suurta, että muutoksia ei voida osoittaa merkitseviksi.

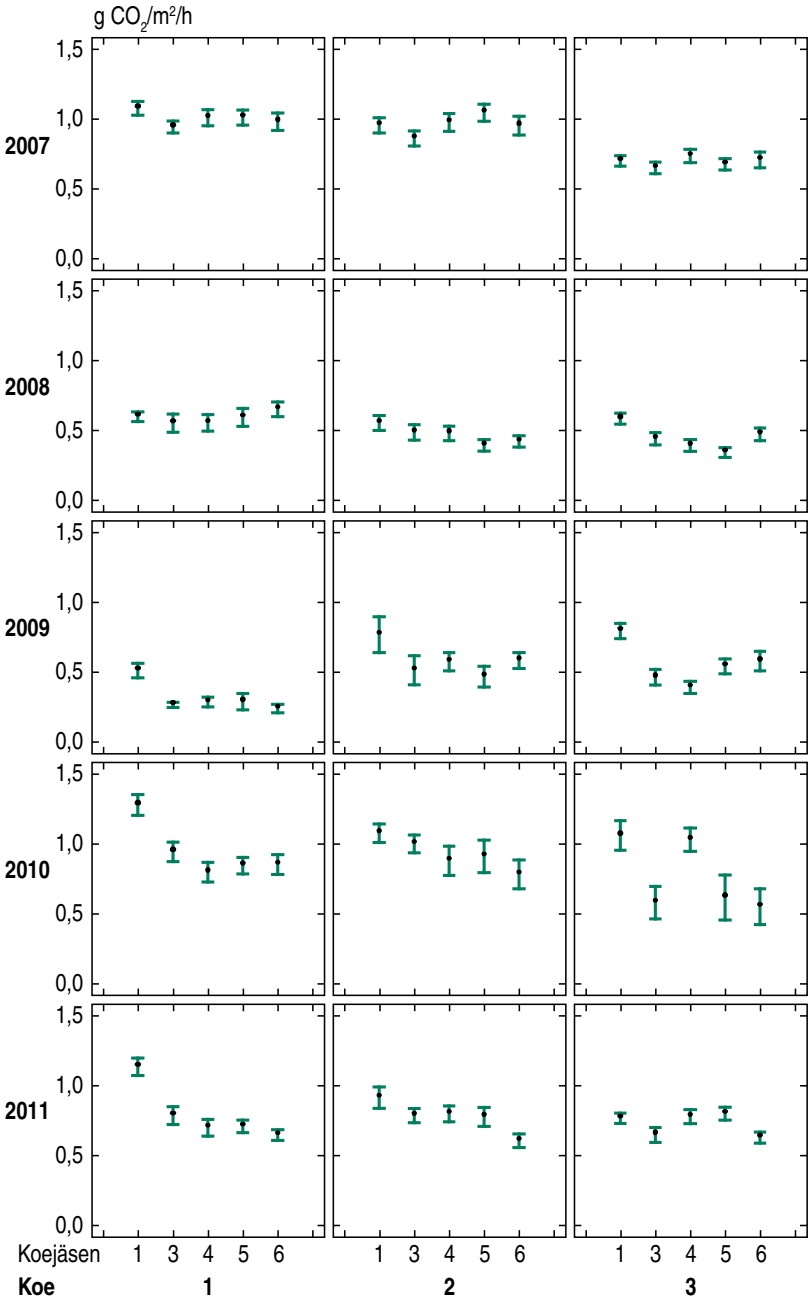
Ilmeisin johtopäätös hakkuiden ja puun korjuun vaikutuksista maan hiilivarastoon on, että ne kohdistuvat lähinnä ylimpään maakerrokseen eli humukseen, eivät juurikaan mineraalimaahan.

Energiapuun korjuun vaikutukset maaperän hiilivuohon

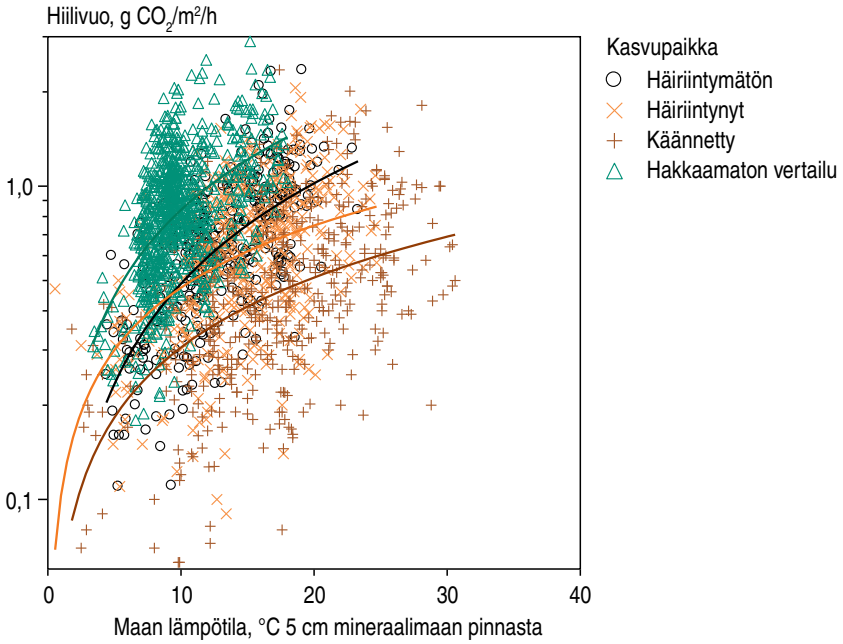
Bioenergiaa metsistä – tutkimusohjelmassa perustetuilla hakkuu- ja maankäsittelykoealoilla on mitattu hiilivuota (maahengitys) hakkaamattomassa metsässä ja eri tavoin käsitellyillä avohakkuualoilla. Vuoden kuluttua käsittelystä avohakattujen ja koealojen hiilivuossa ei vielä havaittu eroa hakkaamattomaan kontrolliin verrattuna. Seuraavina kolmena kasvukautena hakkaamattoman metsän hiilivuot olivat suuremmat kuin hakatuilla aloilla mitatut vuot. Eri korjuuintensiivisyyksien välillä ei voitu havaita tilastollisesti merkitseviä eroja, joskin usein käsittelyssä, josta oli poistettu kaikki hakkuutähteet ja kannot, hiilivuo oli alhaisin (kuva 2.2.20).

Maaperän hiilivuo oli runsainta kontrollikohteilla, joilta puustoa ei oltu poistettu. Tämä johtuu todennäköisesti elävän puuston ja aluskasvillisuuden juuristossa tapahtuvasta hengityksestä, joka on hakkaamattomilla aloilla avohakattuja kohteita korkeampi. Hakkuissa syntyneen hakkuutähteen hajotuksessa vapautuva hiilidioksidi ei siten vastaa suuruudeltaan juuriston hengityksen tuottamaa hiilidioksidivuota.

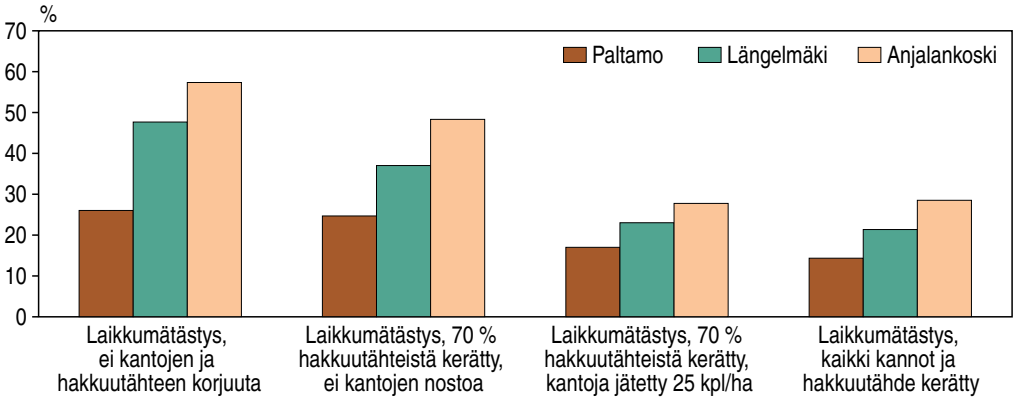
Maaperän hiilivuo riippuu maan lämpötilasta ja on sitä suurempaa, mitä lämpimämpi maa on (Kuva 2.2.21). Avohakkuu ja samalla tapahtuva maan pinnan rikkoutuminen tekevät maahan kohoumia ja tummia pintoja, joiden lämpötila on korkeampi kuin maan lämpötila metsän alla. Tästä huolimatta maahengitys oli suurinta häiriintymättömässä maassa varttuneen puuston alla ja alhaisinta pinnoilla, joissa kivennäismaa on paljastunut. Tästä voidaan päätellä, että maahengityksen määrää säätelee voimakkaimmin elävän puuston juurten ja ritsosfäärin hengitys. Tämän lisäksi tärkeitä maahengityksen nopeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat hajoamiskelpoisen maan orgaanisen aineksen määrä, sekä maan lämpötila ja vesipitoisuus.



Kuva 2.2.20. Eri tavoin käsitellyiltä koealoilta mitatut hiilivuot ennen hakkuita sekä neljänä hakkuuta seuranneena vuotena. Tulokset perustuvat yli tuhanteen maastossa tehtyyn hiilidioksidivuomittaukseen. Käsittelyt 1 = Hakkaamaton metsä, 3 = Avohakkuu + laikkumätästys + kuusen istutus, 4 = Avohakkuu + hakkuutähteestä kerätään 70 % + laikkumätästys + kuusen istutus, 5 = Avohakkuu + hakkuutähteestä kerätään 70 % + kannonnosto, jää 25 kantoa/ha + laikkumätästys + kuusen istutus, 6 = Avohakkuu + hakkuutähteestä kerätään 100 % + kannonnosto, 100 % + laikkumätästys + kuusen istutus.



Kuva 2.2.21. Maanpinnan rikkoutumisen mukaan neljään eri luokkaan jaettujen mittauspisteiden hiilivuon (g CO_2 m^{-2} h^{-1}) väliset tasoerot sekä hiilivuon riippuvuus maan lämpötilasta. Hiilivuon suuruutta kuvaava Y-akseli on logaritmimuunnettu. Kuvassa käytetyt koodit ovat ○ = häiriintymätön maanpinta aukolla, × = häiriintynyt maanpinta aukolla, + = käännetty maanpinta aukolla ja △ = häiriintymätön maanpinta puustoisella kontrollikoealoilla. Maan lämpötila (C°) mitattiin mittaushetkellä 5 cm syvyydellä mineraalimaan pinnasta.



Kuva 2.2.22. Koskemattoman maan määrä eri käsittelyillä koealueittain (Kubin ym. 2012).

2.2.9 Yhteenveto

Kokopuun korjuu on ainespuun korjuuta intensiivisempää metsien käyttöä, jossa pois kuljetetun biomassan ja ravinteiden määrä lisääntyy. Tämä vähentää harvennushakkuissa jäljelle jäävän tai päätehakkuiden jälkeen syntyvän uuden puuston kasvua kivennäismaakohteilla, joilla typpi on kasvua rajoittava tekijä. Turvemaakohteilla todennäköisin kasvua vähentävä ravinne on kalium. Ravinnepoistuman aiheuttamaa kasvun pienenemistä voidaan ehkäistä käyttämällä sellaisia hakkuutähteiden korjuuketjuja, joissa neulaset ehtivät varista kasvupaikalle ennen hakkuutähteiden kuljetusta kasvupaikalta. Myös laskeuma ja rapautuminen sekä oikein kohdennettu lannoitus vähentävät ravinteiden pois kuljetuksesta aiheutuvia kasvuvaikutuksia.

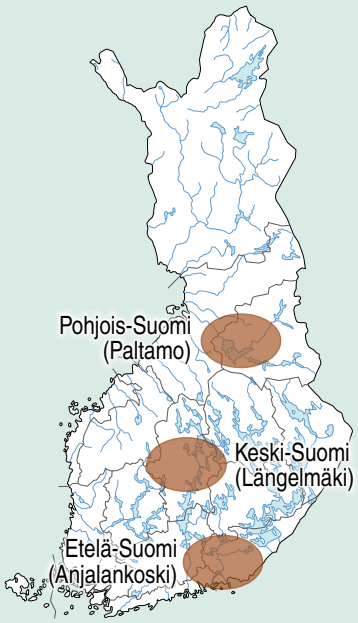
Jotta bioenergian korjuun vaikutukset kasveille käyttökelpoisten ravinteiden määrään ei muodostuisi metsien kasvua rajoittavaksi tekijäksi, energiapuun korjuumenetelmien tulee olla sellaisia, että mahdollisimman suuri osa hakkuutähteiden neulasista varisee hakkuualalle. Saadut tutkimustulokset kokopuun korjuun vaikutuksista kasvuun tukevat käytännön toimijoille jo annettua suositusta, jonka mukaan puun vihreät osat kannattaa jättää metsään ja kolmannes hakkuutähteistä jättää kokonaan korjaamatta.

Kokopuun korjuun vaikutukset metsien hiilitaseeseen on vaikea selvittää. Johtopäätöksiin vaikuttaa erittäin merkittävästi tarkastelujakson pituus ja tarkasteltavan alueen koko. Puun polttaminen vapauttaa yhteytyksessä sitoutuneen hiilidioksidin takaisin ilmakehään, mutta toisaalta puut ovat käyttäneet kasvaessaan vastaavan määrän hiilidioksidia ilmakehästä. Metsiemme puusto ja sen vuotuinen kasvu ovat noin kasinkertaistuneet viimeisten 60 vuoden aikana. Tämä tarkoittaa, että metsiimme on sitoutunut kaksinkertainen määrä hiiltä viime vuosisadan puolivälin metsiin verrattuna. Metsät myös sitovat kasvuunsa joka vuosi kaksinkertaisen määrän hiiltä sotien jälkeen vallinneeseen tilanteeseen verrattuna.

Maaperän hiilivarastossa tapahtuvien muutosten määrittäminen on paljon hankalampaa kuin puuston hiilivarastojen arvioiminen. Lisääntynyt puusto ja puuston kasvu lisäävät kariketuotosta eli kasvattavat maaperän hiilivarastoa. Hakkuut puolestaan poistavat metsistä biomassaa, joka ilman hakkuita jäisi aikanaan metsään lahoamaan. Tulevan tutkimuksen haasteeksi jää arvioida, miten ilmaston muuttuminen ja erilaiset toimenpiteet vaikuttavat maassa jo olevan hiilivaraston kokoon. Ilmeistä kuitenkin on, että suurimmat vaikutukset havaitaan humuskerroksessa.

Vaikka maa on tehokas ravinteiden pidättäjä, hakkuualalle syntyvistä suurista hakkuutähdekasoista voi huuhtoutua lyhytkestoisesti runsaasti ravinteita. Avohakkuualoilta ravinteiden ja kiintoaineen valunta vesistöihin voi kasvaa, kun haihduttavaa puustoa ei ole ja maanpinta on hakkuiden yhteydessä rikkoutunut ja urittunut. Turvemaakohteilla hakkuiden seurauksena tapahtuva pohjaveden pinnan kohoaminen lisää hapettomuutta, mikä edistää raskasmetallien liukoisuutta ja lisää siten niiden huuhtoutumista. Jos hakkuutähteiden korjuun yhteydessä kasvupaikalta korjataan myös ravinnerikkaita neulasia, nämä ravinteet eivät voi lisätä huuhtoutuvien ravinteiden määrää, eli on todennäköistä, että kokopuun korjuu pienentää ravinteiden huuhtoutumista vesistöihin.

Kantojen noston ja hakkuutähteiden korjuun ekologiset ja metsänhoidolliset vaikutukset



Kuva 2.2.23. Koekenttien sijainti.

Kokopuun korjuun ekologisten vaikutusten tutkimusta varten perustettiin kesällä 2007 koekentät kolmelle eri ilmasto-olosuhteita edustavalle alueelle (Kuva 2.2.23). Yksittäinen koekenttä muodostuu kolmesta lohkosta, joilla kullakin on taulukon 1 mukaiset, voimakkuudeltaan toisistaan poikkeavat käsittelyt.

Taulukko 1. Käsittelyt.

1.	*Hakkaamaton metsä (kontrolli)*
2.	*Avohakkuu*
3.	*Avohakkuu + laikkumätästys + kuusen istutus*
4.	*Avohakkuu + laikkumätästys + hakkuutähteistä kerätään 70 % + kuusen istutus*
5.	*Avohakkuu + laikkumätästys + hakkuutähteistä kerätään 70 % + kantojen nosto, jätetään 25 kpl/ha + kuusen istutus*
6.	*Avohakkuu + laikkumätästys + hakkuutähteistä kerätään 100 % + kantojen nosto, 100 % +kuusen istutus*

Tutkimuksen kohteena ovat käsittelyiden vaikutukset aluskasvillisuuden lajiston muuttumiseen ja palautumiseen, istutustaimien kasvuun, maaperäeläimien lajistoon ja yksilömääriin, sienijuurten lajistoon ja biomassaan, maan mikrobiologiseen aktiivisuuteen, kasvupaikan hiilitaseeseen ja sitä kuvaavaan maan hiilidioksidivuohon sekä vaikutukset maaveden ja pohjaveden laatuun. Vesistövaikutuksia seurataan neljä kertaa kasvukauden aikana kerättävien pohjavesinäytteiden avulla. Vesinäytteistä analysoidaan 14 veden laatua kuvaavaa tunnusta (sähkönjohtokyky, väri, NH_4-N, NO_3-N, P-tot, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu ja Al). Veden laadun lisäksi kohteilla seurataan pohjaveden pinnankorkeuden vaihtelua.

Kuva 2.2.24. Keski-Suomen lohko 1 heti hakkuiden jälkeen vuonna 2007 ja vuoden 2010 kesällä. Kuvat Metla/Reijo Seppänen ja Tanja Murto.

Kantojen noston vesistövaikutukset valuma-alueilla

Kuusamon Oijusluoman ja Taivalkosken Katajavaaran (Kuva 2.2.25) valuma-alueilla seurataan kantojennoston vaikutuksia sekä valumaan että ravinteiden ja kiintoaineiden huuhtoutumaan. Tutkimuksessa hyödynnetään 1990 -luvulla ”Hakkuun ja maamuokkauksen vesistövaikutukset”-hankkeessa perustettuja kokeita ja niiltä kerättyä mittausaineistoa.

Keskeytyksissä olleet mittaukset aloitettiin uudestaan vuoden 2007 syksyllä. Molemmilta alueilta on käsitelty kantojennostolla yksi valuma-alue. Loput valuma-alueet on säilytetty luonnontilaisina verrokkialueina. Työt valuma-alueilla aloitettiin ainespuun korjuulla ja kantojen nostolla syksyllä 2010. Alueiden muokkaus ja viljely suoritettiin syksyn 2011 aikana. Käsitellyille Oijusluoman valuma-alueelle 1 (Kuva 2.2.26) ja Katajavaaran valuma-alueelle 10 on syksyn 2010 aikana asennettu sääasemat, jotka mahdollistavat jatkuvan sadannan sekä ilman- ja maaperän lämpötilan seurannan.

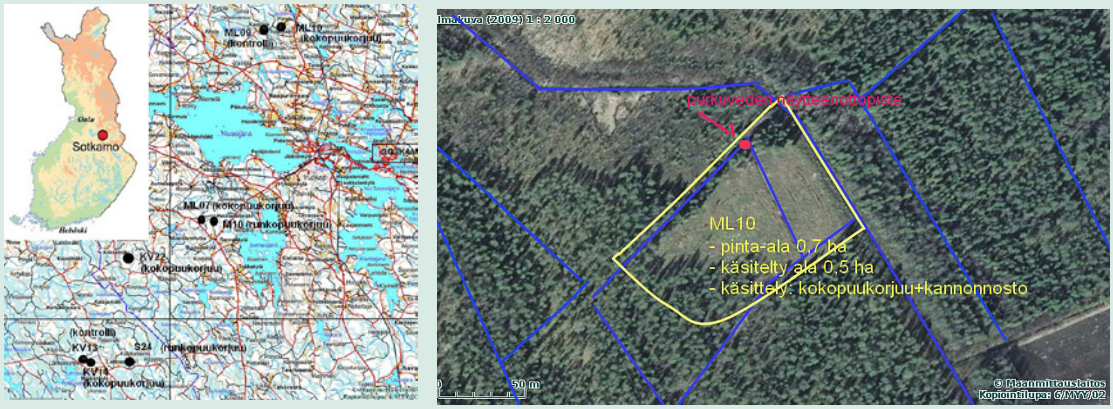
Kuva 2.2.25. Valuma-alueiden sijainti.

Kuva 2.2.26. Oijusluoman valuma-alueet, mittapatojen sijainti ja valuma-alueen yksi mittapato. Kuva Metla/Ari Kokko.

Vedenpinnan korkeuden vaihtelua patoaltaissa seurataan jatkuvatoimisten vedenkorkeusmittareiden avulla. Ravinnepitoisuuksien määrityksiä varten vesinäytteet kerätään sulan veden aikana vähintään kerran kuukaudessa, tulvahuippujen aikana kahdesti kuukaudessa. Vesinäytteiden kerääminen suoritetaan yhteistyössä Oulun yliopiston Oulangan tutkimusaseman kanssa.

Kokopuun korjuun vaikutus valumavesien laatuun turvemailla

Bioenergiaohjelmassa käynnistettiin ojitetuilla turvemailla valuma-aluetutkimuksia Vilppulassa (10 kpl), Lapinjärvellä (6 kpl) ja Sotkamossa (8 kpl). Kokeissa tutkitaan koko- ja runkopuun korjuun vaikutuksia ravinteiden, kiintoaineksen ja raskasmetallien huuhtoutumiin. Valuma-aluetutkimukset aloitettiin vuonna 2007, jolloin Vilppulassa ja Lapinjärvellä alettiin seurata veden laatua ja valuntaa, Sotkamossa seuranta aloitettiin 2008. Hakkuut koealoille tehtiin keväällä 2009, jolloin myös hakkutähteet poistettiin kokopuukorjuukohteilta. Kannot nostettiin kesän ja syksyn aikana.



Kuva 2.2.27. Yleiskartta Sotkamoon perustetun koesarjan koealoista sekä ilmakuva koealasta (ML10), jolle tehtiin kokopuun korjuu ja kantojen nosto.

Kuva 2.2.28. Vilppulan ojituksin rajatut 10 keinotekoista pienvaluma-aluetta. Valuma alueet on värjätty harmaalla ja vesinäytteiden keräyspisteet kokoojaojan vieressä on merkitty karttaan mustalla pisteellä (a). Mittapato ja hakkuunäkymä Lapinjärveltä. Käsittelyalueelta valuva vesi ohjataan kulkemaan kuvassa näkyvän putken kautta. Vesinäytteet kerätään ja virtaavan veden määrän mittaus tehdään putken suulta (b). Kuva Metla/Mika Nieminen.

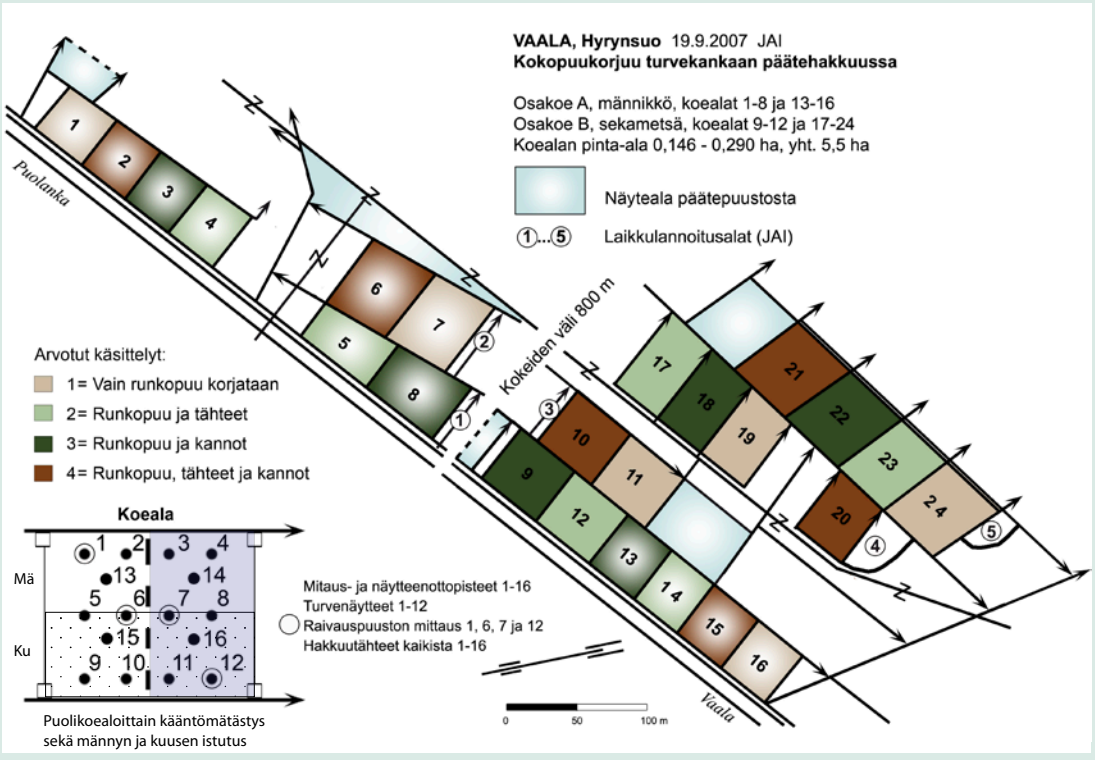
Turvemaakohteille perustetut ravinteiden riittävyyskokeet

Turvemaakohteille perustetut ravinteiden riittävyyskokeet

Vaalaan ja Vesijaolle perustettiin koesarjat, joiden avulla tutkitaan hakkuutähteiden korjuun pitkäaikaisia vaikutuksia ravinteiden riittävyyteen. Kokeessa käytettävät käsittelyt ovat:

1)	*Tavanomainen hakkuu,*
2)	*Hakkuu ja hakkuutähteiden korjuu*
3)	*Hakkuu ja kantojen nosto*
4)	*Hakkuu, hakkuutähteiden korjuu ja kantojen nosto*

Kaikilta koealoilta arvioitiin koealoille jääneen hakkuutähteen määrä heti hakkuun jälkeen. Oksat, neulaset, kuori ja latvusrunkopuu ja muut rungon kappaleet punnittiin ja hakkuutähteistä kerättiin näytteet niiden kuivapainon ja ravinnesisällön määrittämiseksi. Niillä koejäsenillä, joissa tehtiin kannon nosto, kaikki kannot, jotka ylittävät 15 cm:n minimiläpimitan, korjattiin kesällä 2009. Eri läpimittaluokkia edustavista näytekannoista punnittiin tuorepaino ja otettiin näytteet niiden kuivapanon ja ravinnesisällön määrittämiseksi. Maankäsittelyä varten koeala jaettiin kahteen osaan, joista toinen osa kääntömätästettiin ja toinen osa jätettiin käsittelemättä. Taimet (kuusi Vesijaolla, mänty Vaalan männikköosassa, kuusi korpiosalla) istutettiin mättäisiin tai tasamaalle. Taimien elossaoloa ja kasvua seurataan vuosittain toistuvin mittauksin.



Kuva 2.2.29. Vaalan Hyrynsuon turvekankaan päätehakkuualueelle perustetut pitkäaikaiset ravinteiden riittävyyttä selvittävät kokeet ja niille tehdyt erilaiset käsittelyt toistoineen.

Kirjallisuus

Bengtsson, J. & Wikström, F. 1993. Effects of whole-tree harvesting on the amounts of soil carbon: Model results. New Zealand Journal of Forestry Science 23: 380–289.

Egnell, G. & Lejon, B. 1999. Survival and growth of planted seedlings of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* after different levels of biomass removal in clear-felling. Scandinavian Journal of Forest Research 14: 303–311.

Egnell, G. & Valinger, E. 2003. Survival, growth, and growth allocation of planted Scots pine trees after different levels of biomass removal in clear-felling. Forest Ecology and Management 177: 65–74.

Finér, L. 1992. Biomass and nutrient dynamics of Scots pine on a drained ombrotrophic bog. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 420. 43 s. + 4 liitejulkaisua.

Freeman, M., Morén, A.S., Strömgren, M. & Linder, S. 2005. Climate change impacts on forests in Europe: biological impact mechanisms. Julkaisussa: Kellomäki, S., Leinonen, S., (Eds.),Management of European forests under changing climatic conditions. Res. Notes 163. Joensuu, Finland: Forest Faculty, University of Joensuu, pp. 46–115.

Hakkila, P., Nurmi J. & Kalaja H. 1998. Metsänuudistamisalojen hakkuutähde energianlähteenä. 68 s.

Heikkilä J. 2007. Turvemaiden puun kasvatus ja korjuu – nykytila ja kehittämistarpeet. Metsäntutkimuslaitoksen työraportteja 43. 29 p.

Helmisaari, H.-S., Hanssen, K., Jacobson, S., Kukkola, M., Luiro, J., Saarsalmi, A., Tamminen, P. & Tveite, B. 2011. Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Long-term impact on tree growth. Forest Ecology and Management 261: 1919–1927.

Hope, G.D. 2007. Changes in soil properties, tree growth, and nutrition over a period of 10 years after stump removal and scarification on moderately coarse soils in interior British Columbia. Forest Ecololgy and Management 242: 625–635.

Hytönen, J., Moilanen, M. , Kohal, O. & Lokasaari, A. 2010. Hakkuutähteiden määrä ja ravinnesisältö aines- ja energiapuukorjuun jälkeen ojitettujen turvemaiden ensiharvennusmänniköissä. Julkaisussa: Sauvula-Seppälä, T., Ulander, E. & Tasanen, T. (toim.) 2010. Kehittyvä metsäenergia – Tutkimusseminaari Seinäjoen Framissa 18.11.2009. Seinäjoen ammattikorkeakoulun julkaisusarja B46. s 70–79.

Hynynen, J. 2001. Energiapuuvarat. Julkaisussa: Nurmi, J. & Kokko A. (toim.). 2001. Biomassan tehostetun talteenoton seurannaisvaikutukset metsässä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 816. s. 9–16

Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D.W., Minkkinen, K. & Byrne, K.A. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? Geoderma 137: 253–268.

Johansson, M. & Tarvainen, T. 1997. Estimation of weathering rates for critical load calculations in Finland. Environmental Geology 29 (3/4).

Johnson, D.W. Knoepp, J.D., Swank, W.T., Shan, J., Morris, L.A., Van Lear, D. H. & Kapeluck, P.R. 2002. Effects of forest management on soil carbon: result of some long-term resampling studies. Environmental Pollution 116: 201–208.

Laiho, R. 1997. Plant biomass dynamics in drained pine mires in southern Finland. Implications for carbon and nutrient balance (väitöskirja). Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 631. 53 s. + 5 osajulkaisua.

Laitila, J., Asikainen, A. & Anttila, P. 2008. Energiapuuvarat. Julkaisussa: Kuusinen, M. ja Ilvesniemi, H. (toim.) 2008. Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja, s. 6–12 [Verkkodokumentti]. Saatavissa: www.metsavastaa.net/energiapuu/raportti

Lindholm, E-L., Stendahl, J., Berg, S.& Hansson, P-A. 2011. Greenhouse gas balance of harvesting stumps and logging residues for energy in Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research 26: 586–594.

Marklund, L.G. 1988. Biomassafunktioner for tall, gran och björk i Sverige (Biomass functions for pine, spruce and birch in Sweden). Department of Forest Survey. Report 45. Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå. (In Swedish) ISBN 91-576- 3524-2.

Mälkönen, E., Kukkola, M. ja Finer, L. . 2001. Teoksessa Nurmi, J. ja Kokko, A. (toim). Biomassan tehostetun talteenoton seurannaisvaikutukset metsässä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 816: 31–52.

Moilanen, M., Silfverberg, K., Hökkä, H. & Issakainen, J. 2005. Wood ash as a fertilizer on drained mires – growth and foliar nutrients of Scots pine. Canadian Journal of Forest Research 35(11): 2734–2742.

Nordborg, F., Nilsson, U., Gemmel, P. & Örlander, G. 2006. Carbon and nitrogen stocks in soil, trees and field vegetation in conifer plantations 10 years after deep soil cultivation and patch scarification. Scandinavian Journal Forest Research 21: 356–363.

Nurmi, J. Hakkuutähteen korjuu päätehakkuukuusikoista. 1997. Työtehoseuran metsätiedote 569. 4 s.

Peng, C., Liu, J., Dang, Q., Apps, M. J., Jiang, H., 2002 TRIPLEX: a generic hybrid model for predicting forest growth and carbon and nitrogen dynamics. Ecol. Modell. 153: 109–130.

Petersson, H., Ståhl, G., 2006. Functions for below-ground biomass of *Pinus sylvestris, Picea abies, Betula pendula* and *Betula pubescens* in Sweden. Scand. J. For. Res. 21(Suppl 7), 84–93.

Porvari 1998. Development of fish mercury concentrations in Finnish reservoirs from 1979–1994. The Science of Total Environment 213: 279–290.

Rask, M., Jutila, E., Järvenpää, T., Lappalainen, A. & Vuorinen, P. 1996. Metsätalouden vaikutukset kalakantoihin. In. Finér, L. Ilvesniemi, H., Kortelainen, P & Karvinen, I (Eds.), Metsätalouden ympäristökuormitus. Forest Research Insitute, Research Papers 607. 107 p.

Repo, A., Tuomi, M. & Liski, J. 2011. Indirect carbon dioxide emissions from producing bioenergy from forest harvest residues. GCB Bioenergy 3(2): 107–115.

Repola, J., 2008. Biomass equations for birch in Finland. Silva Fennica 42(4): 605–624.

Repola, J. 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. Silva Fennica 43(4): 625–647.

Saarsalmi, A., Smolander, A., Kukkola, M. & Arola, M. 2010a. Effect of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes, and stand growth in two coniferous stands in Finland. Plant and Soil 331: 29–340.

Saarsalmi, A. Tamminen, P., Kukkola, M & Hautajärvi, R. 2010b. Whole-tree harvesting at clear-felling: Impact on soil chemistry, needle nutrient concentrations and growth of Scots pine. Scandinavian Journal of Forest Research 25: 148–156.

Saarsalmi, A., Smolander, A., Kukkola, M., Moilanen, M. & Saramäki, J. 2012. 30-year effects of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes and stand growth in a Scots pine stand. Forest Ecology and Management 278: 63–70.

Saksa, T., Tervo, L. & Kautto, K. 2002. Hakkuutähde ja metsänuudistaminen. Hakkuutähteen korjuun vaikutukset metsänuudistamiseen tutkimushankkeen loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 851. 41 s.

Smolander, A., Levula, T.. & Kitunen, V. (2008) Response of litter decomposition and soil C and N transformations in a Norway spruce thinning stand to removal of logging residues. Forest Ecology and Management 256: 1080–1086.

Smolander, A., Kitunen, V., Tamminen, P. & Kukkola, M. 2010. Removal of logging residue in Norway spruce thinning stands: Long-term changes in organic layer properties. Soil Biology and Biochemistry 42: 1122–1228.

Tamminen, P. & Mälkönen, E. 2003. Metsämaiden viljavuus. Julkaisussa: Mälkönen, E. (toim.). Metsämaa ja sen hoito. Metsäntutkimuslaitos – Kustannusosakeyhtiö Metsälehti. 141–152.

Tamminen, P., Saarsalmi, A., Smolander, A. & Kukkola, M. 2012. Effects of logging residue harvest in thinnings on amounts of soil carbon and nutrients in Scots pine and Norway spruce stands. Forest Ecology and Management 263: 31–38.

Ukonmaanaho, L., Merilä, P., Nöjd, P. & Nieminen, T.M. 2008. Litterfall production and nutrient return to the forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland. Boreal Environment Research 13(supp.B): 67–91.

Verta, M., Rekolainen, S. & Kinnunen, K. 1986. Causes of increased fish mercury levels in Finnish reservoirs. Publications of the Water and Environment Research Institute 65: 44–58.

Walmsley, J.D. & Godbold, D.L. 2010. Stump Harvesting for Bioenergy – A Review of the Environmental Impacts. Forestry 83(1): 17–38.

Yanai, R.D., Currie, W.S. & Goodale, C.L. 2003. Soil carbon dynamics after forest harvest: An ecosystem paradigm reconsidered. Ecosystems 6: 197–212.

Zabowski, D., Chambreau, D., Rotramel, N. & Thies,W.G. 2008. Long-term effects of stump removal to control root rot on forest soil bulk density, soil carbon and nitrogen content. Forest Ecology and Management 255: 720–727.

Ågren, G.I. & Hyvönen, R. 2003. Changes in carbon stores in Swedish forest soils due to increased biomass harvest and increased temperatures analysed with a semiempirical model. Forest Ecology and Management 174: 25–37.

2.3 Metsäbiomassan lisääntyvä käyttö muuttaa metsänhoitoa

Timo Saksa, Jari Hynynen, Jyrki Hytönen ja Pentti Niemistö

Metsäbiomassan energiakäytön voimakas lisääntyminen on merkinnyt muutoksia metsänhoitoon, ennen kaikkea metsänuudistamiseen. Nykyään avohakkuita tehdään Suomessa vuosittain 100 000–150 000 hehtaarilla, joista latvusmassaa korjataan joka kolmannelta ja kantoja nostetaan joka kymmenenneltä avohakatulta hehtaarilta (Kuva 2.3.1). Suunnitelmien mukaan metsäbioenergian käyttö tulee lähes kaksinkertaistumaan kuluvan vuosikymmenen loppuun mennessä. Tällöin latvusmassan korjuuta tehtäisiin yli 80 000 hehtaarilta (arvioitu saanto 60 m^3/ha) ja kannonnostoa lähes 75 000 hehtaarilta (60 m^3/ha) vuodessa. Energiapuun korjuulla on ja tulee näin ollen olemaan selvästi aiempaa merkittävämpi ja näkyvämpi asema metsätaloudessa ja metsämaisemassa. Vuonna 2020 latvusmassaa ja kantoja voidaan arvioida korjattavan 60 % – 80 % metsänviljelyaloista. Tämä avaa uusia mahdollisuuksia maanmuokkaus- ja viljelymenetelmien sekä tekniikoiden kehittämiselle.

Latvusmassaa ja kantoja on tähän asti korjattu ensisijaisesti kuusivaltaisilta kohteilta. Jatkossa korjuumäärien kasvaessa myös mäntyvaltaisten metsiköiden osuus lisääntyy merkittävästi. Koska Etelä-Suomessa mäntyvaltaisia metsiä on 1,8-kertaisesti kuusivaltaisiin metsiin verrattuna, lisääntynee energiapuun korjuu myös mäntymetsien uudistusaloilla. Pohjois-Suomessa mäntyvaltaisten metsien osuus on yli 5-kertainen kuusivaltaisiin metsiin, mikä väistämättä ohjaa energiapuun korjuuta mäntyvaltaisille päätehakkuualoille.

Kuva 2.3.1. Latvusmassan ja kantojen varastomuodostelmat yleistyvät metsämaisemassa. Kuva Metla/Erkki Oksanen.

Pienpuun korjuu energiapuuksi nuoren metsän kunnostuksissa ja ensiharvennuksissa on ollut voimakkaassa kasvussa viime vuosina. Toistaiseksi energiapuun korjuukohteet ovat pääosin olleet ns. nuoren metsän kunnostusta vaativia metsiköitä, joissa taimikonhoito on viivästynyt tai jäänyt tekemättä. Myös varsinaisten ensiharvennuskohteiden määrä energiapuunkorjuussa on ainakin tilapäisesti lisääntynyt. Ensiharvennuspuun käyttö energian tuotannossa tullee todennäköisesti vaihtelemaan voimakkaasti suoraan puukaupan suhdanteiden mukaan sekä päätehakkuualoilta saatavan metsäenergian määrän vaihteluista johtuen.

Jos tarvittava pienpuuhake, joka on kolmannes metsähakkeen kokonaismäärästä, korjataan nuorista metsistä, se edellyttää pidemmällä aikavälillä tavoitteellista energiapuun kasvattamista varttuneissa, nykyistä tiheämmissä taimikoissa. Tällainen metsänhoitovaihtoehto on sisällytetty myös tuoreimpiin metsänhoitosuosituksiin (Hyvän metsänhoidon … 2006, Äijälä ym. 2010). Metsikön kasvua simuloivien mallien mukaan varttuneen mäntytaimikon tavallista tiheämpi (3000–4000 runkoa/ha) kasvatus olisi myös taloudellisesti järkevää. Käytännön kokemuksia ja havaintoja integroidun energia- ja ainespuun kasvatusketjun riskeistä ei kuitenkaan vielä ole.

Energiapuuta saataneen jatkossa myös hieskoivuvaltaisten turvemaiden hakkuista ja pieneltä osin myös varsinaisilta energiapuuviljelmiltä. Energiapuuviljelmät voivat olla esimerkiksi turvetuotannosta vapautuvilla suonpohjilla vaihtoehto ruokohelpin kasvatukselle. Hoitamatta jääneiden hieskoivikoiden energiapuumäärä on alueellisesti merkittävä Pohjanmaalla ja Länsi-Lapissa, ja sen hyödyntäminen on edullista riittävän aikaisin tehtävissä uudistamishakkuissa.

2.3.1 Latvusbiomassan ja kantojen energiakäytön vaikutukset metsänuudistamiseen ja taimikon kehitykseen

Muokkaustyö helpottuu – logistiset haasteet kasvavat

Latvusmassan korjuu helpottaa kaivinkoneella tehtävää muokkausta ja lisää muokkaustyön tuottavuutta keskimäärin 15–20 % (Saksa 2001, Saksa ym. 2002, Saarinen ja Harstela 2004). Muokkaustyö on selkeämpää, koska siirtyminen ja muokattavien kohtien valinta helpottuu, kun hakkuutähteet on viety pois. Hakkuutähteiden alla saattaa olla myös työtä haittaavia kantoja ja kiviä. Usein mättään paikka pystytään valitsemaan vasta hakkuutähteiden siirtämisen jälkeen. Hakkuutähteellisellä uudistusalalla työajasta kuluu n. 10 % hakkuutähteiden siirtelyyn. Samasta syystä koneellisen istutuksen tuottavuus nousee noin 20 % hakkuutähteen korjuun ansiosta (Saarinen 2006). Muutoinkin istutustyön laatu on latvusmassan korjuun jälkeen jonkin verran parempi.

Kantoja nostetaan yleensä uudistusaloilta, joilta latvusmassa on jo korjattu. Kantojen nosto antaa mahdollisuuden yhdistää maanmuokkaus itse kannonnosto-operaatioon, jolloin varsinaiseen muokkaukseen kuluu 60 % tavanomaisen muokkauksen työajasta (Saarinen 2006). Kantojen noston yhteydessä tehtävän maanmuokkauksen jälki poikkeaa laadultaan tavanomaisen maanmuokkauksen jäljestä. Hyvien mättäiden osuus jää kannonnoston yhteydessä tehdyssä muokkauksessa selvästi pienemmäksi kuin normaalisti laikkumätästetyllä alalla. Lisäksi 10–20 % tehdyistä muokkausjäljistä menetetään kantojen poiskuljetuksen yhteydessä (Rantala ym. 2010), mitä pyritään kompensoimaan suuremmalla muokkausjälkien tiheydellä (Äijälä ym. 2010).

Viimeisimpien tutkimustulosten mukaan erillinen maanmuokkaus kannonnoston jälkeen on taloudellisesti järkevin toteutustapa, kun tulosta arvioidaan viljelykelpoisen muokkausjäljen yksikkökustannusten pohjalta (Rantala ym. 2010). Kantojen korjuun jälkeen päästään jatkuvatoimisilla

muokkauslaitteilla hyvään työjälkeen etenkin vähäkivisillä kohteilla. Latvusmassan korjuu ja kantojen nosto avannee uusia mahdollisuuksia myös jatkuvatoimisten istutuskoneiden kehittämiseen. Koska kannonnoston yhteydessä tai sen jälkeen tehtävän maanmuokkauksen laatu vaihtelee tavanomaista enemmän, on muokkausjäljen laadun seuranta tärkeää käytännön toiminnassa.

Päätehakkuun jälkeen latvusmassaa kuivatetaan hakkuualalla muutamia viikkoja ennen sen siirtämistä tienvarsivarastoon. Myös kantojen annetaan kuivua usein ennen niiden nostamista ja muutamia viikkoja noston jälkeen uudistusalalla, ennen kuin ne kuljetetaan tien varteen. Näistä logistisista syistä johtuen uudistusalaa ei yleensä viljellä päätehakkuuta seuraavana kasvukautena. Jos päätehakkuusta metsänviljelyyn kuluu useampia kasvukausia, ennättää pintakasvillisuus voimistua uudistusalalla, mikä heikentää jatkossa viljelytaimien kehitysedellytyksiä.

Etenkin lehtipuun taimettuminen lisääntyy

Latvusmassan korjuu uudistusaloilta on lisännyt istutustaimien elävyyttä muutamia %-yksikköjä (Egnell ja Valinger 2003, Miljöeffekter … 2006). Männyllä vaikutus on ollut selvempi kuin kuusella, mutta kuusellakin metsäbiomassan korjuun positiivinen vaikutus elävyyteen on havaittavissa. Paremman elävyyden on arvioitu johtuvan paremmasta maanmuokkauksesta, mikä nopeuttaa taimien sopeutumista istutuspaikalle ja siten parantaa taimien kestävyyttä mm. hyönteistuhoja vastaan. Hyvä muokkausjälki antaa istutustaimelle myös paremmat edellytykset kilpailla pintakasvillisuutta vastaan.

Latvusmassan korjuu (Saksa ym. 2002) ja erityisesti kannonnosto on lisännyt luontaista taimettumista (Kardell 1992), minkä seurauksena uudistamistulos havupuutaimikoissa parantuu. Valtaosa luontaisesti syntyneistä taimista on kuitenkin lehtipuuta, minkä määrän on arvioitu 1,3–1,8 kertaistuvan kannonnoston seurauksena tavanomaiseen muokkaukseen verrattuna (Kardell 1992, Miljökonsekvenser … 2007, Strandström 2007). Syynä lisääntyvään taimettumiseen on maaperän rikkoutuminen kannonnostoaloilla, mikä edistää lehtipuiden luontaista uudistumista. Vaihtelu taimettumisessa on suurta johtuen maaperän ominaisuuksista ja kasvukauden sääoloista.

Runsaasta luontaisesta taimettumisesta johtuen taimikonhoidon ja etenkin perkauksen kustannukset nousevat kannonnostoaloilla tavanomaista suuremmiksi. Jos lehtipuun määrä nousee 50 %, on taimikonhoitokustannusten arvioitu kasvavan 15–30 % (Harstela 2004). Taimikon perkauksen ajoitus kannonnostoaloilla on kustannusten kannalta erityisen tärkeä. Tavanomaisessa perkauksessa kahden vuoden viivästymä perkauksessa nostaa kustannuksia 10–40 % (Kaila ym. 2006), mutta suuremman lehtipuuntiheyden vuoksi perkauksen myöhästymisestä aiheutuva kustannusten nousu voi kannonnostoaloilla olla selvästi tätäkin suurempi. Toisaalta kannonnostoaloille muodostuva runsas lehtipuusto antaa myös mahdollisuuden integroituun energia- ja ainespuun kasvatukseen (Heikkilä ym. 2007).

2.3.2 Energiapuun kasvatus osana metsänhoitoa

Energia- ja ainespuun yhdistetty kasvatus

Nykyisissä metsän kasvatusmalleissa nuoren metsän kunnostuksessa ja taimikonhoidossa on ensisijaisesti kysymys metsänhoidollisesta toimenpiteestä, jonka tavoitteena on saattaa metsikkö mahdollisimman hyvään tilaan ainespuunkasvatusta varten. Tässä yhteydessä energiaksi korjattu pienpuu on ollut toiminnan sivutuote.

Ensiharvennusta lähestyvissä mäntyvaltaisissa nuoren metsän kunnostuskohteissa, joissa taimikonhoito on tekemättä, energiapuuhakkuu on edullisin vaihtoehto, jos poistuvan ainespuun määrä jää alle 20 m^3/ha (Heikkilä ym. 2007). Kun ainespuun määrä ylittää 20 m^3/ha, tulee ainespuun ja energiapuun erottelu kannattavaksi. Toisena vaihtoehtona on viivästyttää ensiharvennusta muutamalla vuodella ja tehdä se tavanomaisena ainespuuhakkuuna (Heikkilä ym. 2007, 2009). Kun näitä nuoren metsän käsittelyvaihtoehtoja tarkastellaan koko kiertoajan puuntuotoksen ja metsänkasvatuksen kannattavuuden näkökulmasta, niin energiapuuharvennus on hoitamattomissa nuorissa metsissä suositeltavampi vaihtoehto kuin ensiharvennuksen viivästäminen ja toteutus ainespuuhakkuuna.

Uutena vaihtoehtona pienpuun energiakäytön edistämiseksi on viimeisiin metsänhoitosuosituksiin lisätty energiapuun ja ainespuun yhdistetyn kasvatuksen vaihtoehto (Hyvän metsänhoidon suositukset 2006, Äijälä ym. 2010). Tällöin taimikon harvennusvaiheessa jätetään puusto selkeästi nykyistä tiheämmäksi ja energiapuuhakkuu tehdään huomattavasti tavanomaista ensiharvennusta aiemmin. Ainespuun ja energiapuun nykyisillä hintasuhteilla energiapuun ja ainespuun yhdistetty kasvattaminen ei kuusivaltaisissa taimikoissa ole taloudellisesti kannattavaa. Mäntyvaltaisissa kohteissa yhdistetty kasvatusohjelma näyttäisi olevan taloudellisesti mahdollinen pienellä energiapuun kantohinnalla (3–5 euroa /m^3) (Siren ym. 2007). Mäntyvaltaisissa kohteissa riukumetsävaiheen tavanomaista suuremman tiheyden voidaan olettaa parantavan tulevan ainespuun laatua. Toisaalta tiheänä kasvaneen männikön harvennukseen liittyy lisääntynyt lumi- ja tuulituhoriski.

Aines- ja energiapuuharvennusten vaikutukset viljelymänniköiden kasvatukseen

Jari Hynynen, Tiina Sauvula-Seppälä ja Saija Huuskonen

Simulointitutkimus kasvatusvaihtoehdoista

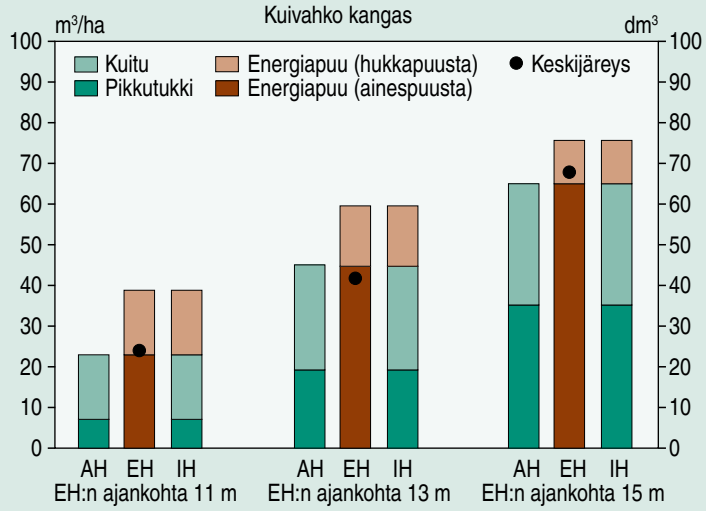
Aines- ja energiapuun yhteiskasvatuksen toteutusvaihtoehtoja ja metsänkasvatuksen kannattavuuteen viljelymänniköissä tutkittiin simulointitutkimuksen avulla. Tavoitteena oli selvittää miten taimikoita olisi kannattavin käsitellä silloin kun ensiharvennuksissa otetaan talteen joko pelkkää ainespuuta, aines- ja energiapuuta tai pelkästään energiapuuta. Lisäksi selvitettiin näiden käsittelytapojen vaikutuksia hakkuukertymiin ja vertailtiin eri kasvatusvaihtoehtojen kannattavuutta.

Laskelmat tehtiin Metsäntutkimuslaitoksen MOTTI-ohjelmistolla (Salminen ym. 2005) esimerkkimetsiköille, jotka edustivat hyvin hoidettuja tuoreen ja kuivahkon kankaan viljelymänniköitä. Laskelmien avulla vertailtiin taimikonhoitovaihtoehtoja jotka olivat 1) taimikonharvennus 3 metrin pituisena ja 2) varhaisperkaus 1–2 metrin pituisena ja taimikonharvennus 6 metrin pituisena. Lisäksi tarkasteltiin taimikonharvennuksen voimakkuutta kasvatettavan puuston vaihteluvälillä 1500–4000 kpl/ha. Ensiharvennusvaihtoehtoina tutkittiin 1) ainespuuharvennusta, jolloin vain ainespuu (pikkutukit, kuitupuu) otettiin talteen, 2) energiapuuharvennusta, jolloin koko kertymä otettiin talteen energiapuuna, ja 3) yhdistettynä aines- ja energiapuuharvennuksena, jolloin ainespuun lisäksi kuitupuun mittoja pienemmät karsitut rangat otettiin talteen energiapuuna. Lisäksi tutkittiin ensiharvennusvoimakkuuden ja ajankohdan vaikutusta. Kaikissa vaihtoehdoissa myöhemmät harvennukset ja päätehakkuu oletettiin tehtäviksi Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion Hyvän metsänhoidon suositusten (2006) mukaan, kannattavuusvertailut tehtiin nettotulojen nykyarvon perusteella käyttäen 3 %:n korkokantaa. Laskelmissa käytettiin keskimääräisiä kantohintoja ja metsänhoitokustannukset laskettiin töihin kuluvan ajanmenekkien ja yksikkökustannusten avulla.

Aines- ja energiapuun kertymät ensiharvennuksissa

Taimikonharvennuksen toteutuksella voidaan vaikuttaa paljonkin ensiharvennuskertymien määrään ja laatuun. Tiheänä kasvatetun nuoren männikön ensiharvennuksessa runkopuun kokonaiskertymä on suurempi kuin harvempana kasvatetussa metsässä, mutta poistettavien puiden keskikoko on pienempi. Toisaalta harvana kasvetussa taimikossa kertymän kokonaismäärä jää alhaisemmaksi, mutta poistettavat puut ovat järeämpiä. Se kumpi kasvatusmalli valitaan, riippuu kasvatuksen tavoitteista. Jos jo ensiharvennuksista halutaan suuri ainespuukertymä, kannattaa taimikko harventaa voimakkaammin. Jos halutaan suuri energiapuukertymä, toisin sanoen paljon biomassaa puuston järeydestä välittämättä, niin tiheämpi kasvatustiheys taimikkovaiheessa on parempi vaihtoehto. Koko kiertoajan runkopuun tuotosmääriin taimikonhoidon ajoituksella ja voimakkuudella ei ole kovin suurta vaikutusta hoidetuissa viljelymänniköissä. Sitä vastoin jo aikaisempien tutkimusten perusteella tiedetään että taimikonhoidon tekemättä jättäminen kokonaan johtaa tuntuviin ainespuun tuotostappioihin.

Myös ensiharvennuksen ajoitus ja harvennusvoimakkuus vaikuttaa hakkuukertymän määrään ja järeyteen. Tehtyjen laskelmien mukaan ensiharvennuksen viivästäminen 11 metristä 15 metriin lisäsi kertymien kokonaistilavuutta yli kaksinkertaiseksi (35–40 kuutiometristä 70–80 kuutiometriin hehtaarilla) ja puuston keskikokoa noin kolminkertaiseksi (25 dm^3:sta 70–80 dm^3:iin) (Kuva 2.3.2). Aikaisessa ensiharvennuksessa puuston järeys onkin usein niin alhainen että vain osa poistumasta täyttää ainespuun kokovaatimukset. Sitä vastoin energiapuuta voidaan jo tuolloin saada tuntuvasti talteen. Laskelmien mukaan 11 metrin pituusvaiheessa tehtävässä yhdistetyssä aines- ja energiapuuharvennuksessa lähes puolet oli energiapuuta. Myöhemmin tehtävässä harvennuksessa 85 % kertymästä täytti ainespuun mitat ja energiapuun osuus oli enää 15 %.



Kuva 2.3.2. Runkopuun puukertymä ja poistettavan puuston keskijäreys 11, 13 tai 15 metrin valtapituudessa eritavoin tehdyissä ensiharvennuksissa (AH= ainespuuharvennus, EH= energiapuuharvennus, IH= integroitu harvennus) (Keski-Suomi,kuivahko kangas). Taimikko varhaisperattiin metrin pituusvaiheessa, harvennettiin 6 m pituusvaiheessa tiheyteen 3000 runkoa hehtaarilla ja ensiharvennettiin tiheyteen 1100 runkoa hehtaarilla.

Aines- ja/tai energiapuun talteenoton kannattavuus

Taimikonhoidon ja ensiharvennusten ajoitus ja toteutustapa vaikuttaa niin taimikonhoidon kuin ensiharvennuksenkin toteutuksen ajanmenekkiin ja kustannuksiin, sekä myös ensiharvennuksesta saataviin tuloihin. Se miten suuria kannattavuusvaikutukset lopulta ovat, riippuu metsänhoitotöiden yksikkökustannuksista, sekä aines- ja energiapuun hinnoista ja niiden keskinäisistä hintasuhteista.

Taimikonhoito on pääsääntöisesti sitä halvempaa mitä aikaisemmin se tehdään. Tässä tarkastelluista vaihtoehdoista kertaalleen tehty taimikonhoito kolmen metrin pituusvaiheessa oli kustannuksiltaan noin kolmannes verrattuna kaksivaiheiseen taimikonhoitoon, jossa tehtiin varhaisperkaus ja taimikonharvennus kuuden metrin pituisena.

Yhdistetty aines- ja energiapuun talteenotto johti nyt tehdyssä laskelmissa suurempiin kantorahatuloihin kuin pelkkä ainespuu- tai energiapuuharvennus. Ero ainespuuharvennukseen oli 10–20 prosentin luokkaa. Koko ensiharvennuskertymän talteenotto ainoastaan energiapuuksi oli taloudellisesti heikoin vaihtoehto. Sen kantorahatulot jäivät keskimäärin noin puoleen yhdistetyn aines- ja energiapuukertymän tuloista.

Riippumatta siitä otetaanko kertymä talteen aines- vai energiapuuna, hoidetuissa viljelymänniköissä ensiharvennuksen viivästäminen vähintään 13–15 metrin pituusvaiheeseen lisää hakkuutuloja ja parantaa ensiharvennuksen kannattavuutta. Suurimmat ensiharvennustulot saatiin yhdistetyn aines- ja energiapuun kasvatusohjelmalla, jossa taimikko harvennettiin tiheyteen 3000 puuta/ha, tosin erot tiheyksiin 2000 ja 4000 kpl/ha oli alle kymmenen prosentin luokkaa.

Tutkimuksessa tarkasteltiin metsikön käsittelyvaihtoehtoja hyvin hoidetuissa viljelymänniköissä, jotka oli huolellisesti uudistettu ja joissa kaikissa myös taimikonhoidosta ja ensiharvennuksista huolehdittiin tavalla tai toisella. Tällaisissa hyväpuustoisissa metsissä taimikonhoidon sen enempää kuin ensiharvennuksen toteutustapa ei kovin paljoa vaikuttanut metsikön koko kiertoajan tuotokseen tai metsänkasvatuksen kannattavuuteen. Tutkittujen vaihtoehtojen väliset erot niin puuntuotoksen määrässä kuin kannattavuudessakin mahtuivat 10 prosentin vaihtelun sisälle. Tuloksen mukaan yhdistetty aines- ja energiapuun talteenotto ensiharvennusten yhteydessä on varteenotettava vaihtoehto. Jos hakkuussa otetaan talteen vain runkopuu karsittuna rankana, niin ravinnemenetykset eivät ole mainittavasti tavallista ainespuuharvennusta suuremmat. Lisäksi yhdistetyssä energia- ja ainespuun kasvatusvaihtoehdoissa taimikko kannattaa jättää tiheämmäksi, minkä tiedetään vaikuttavan puiden oksikkuuteen ja parantavan aikanaan päätehakkuussa korjattavan tukkipuun laatua.

Energiapuun kasvatus erikoiskohteissa

Energiapuun käytön lisääntyessä kiinnostus mahdollisuuksiin tuottaa puubiomassaa intensiivisesti lyhytkiertoviljelmillä on herännyt uudestaan. Maanviljelystä vapautuneille pelloille tai suopohjille perustetut lyhytkiertoviljelmät muodostavat myös Kioton sopimuksen mukaisen hiilinielun. Energiapajuviljelmien kasvatusta tutkittiin Suomessa erityisesti 1980-luvulla, joten kasvatusmenetelmät tunnetaan jo melko hyvin (Heino ja Hytönen 2005, Kuva 2.3.3). Pajun pistokkaita istutetaan koneellisesti noin 15 000 kpl hehtaarille. Biomassatuotoksen lisäämiseksi käytetään lannoitusta. Alkuperältään ulkomaisten pajujen kiertoaika on 3–5 vuotta, kotimaisten 5–10 vuotta. Suomessa on pienillä viljelmillä mitattu suuriakin, yli 10 kuiva-ainetonnia hehtaaria kohti vuodessa olevia biomassatuotoksia, mutta käytännön mittakaavan viljelyn tuotostasoa ja riskejä ei vielä tiedetä. Esimerkiksi alkuperältään ulkomaisten pajujen talvenkestävyys on ongelmallista Keski-Suomessa ja sitä pohjoisempana.

Etelä-Ruotsissa energiapajuviljelmät ovat vakiinnuttaneet asemansa uusiutuvien energiaraaka-aineiden valikoimassa. Siellä energiapajuviljelmiä on yli 10 000 ha, kun Suomessa on ainoastaan koeluontoisia viljelmiä vain muutamia kymmeniä hehtaareja. Hyvin hoidettujen käytännön viljelmien tuotostaso Ruotsissa on ollut keskimäärin 6 t/ha kuiva-ainetta vuodessa (Mola-Yudego 2010). Pajun lyhytkiertoviljelyn energiatase on positiivinen, sillä kasvatukseen ja korjuuseen tarvitaan vain 4–5 % tuotetusta energiasta (Börjeson 1996). Energian tuottaminen pajuviljelmillä ei kuitenkaan 1980-luvulla osoittautunut Suomessa ilman tukia taloudellisesti kannattavaksi energiaraaka-aineen tuotantomuodoksi. Ruotsissa viljelyn kustannuksia ovat laskeneet jalostetut tuottavammat lajikkeet, parantuneet viljelymenetelmät ja erityisesti kehittyneemmät istutus- ja korjuukoneet.

Viime vuosikymmeninä on tutkittu myös tiheiden koivu-, hybridihaapa-, paju- ja leppämetsiköiden kasvattamista lyhytkiertoviljelminä (kiertoaika 5–15 vuotta) sekä näiden uudistamista vesasyntyisesti. Suonpohjille saadaan syntymään tiheä hieskoivikko joko kylvämällä tai reunametsien luontaisella siemennyksellä. Typpirikkailla suonpohjilla tarvitaan tuhkalannoitus ravinnetilanteen tasapainottamiseksi. Parhaimmillaan entisille turvetuotantoalueille viljellen perustetuilla lannoitetuilla koeviljelmillä on päästy 5–8 tonnin vuotuiseen lehdettömään kuivamassatuotokseen hehtaarilla (Hytönen ja Saarsalmi 2009), mutta toistaiseksi varsinaisten lyhytkiertoviljelmien hyödyntäminen energiapuuntuotannossa on ollut vähäistä.

Kuva 2.3.3. Energiapajuviljelmä suonpohjalla. Kuva Metla/Esa Heino.

Kotimaisten lehtipuulajien, kuten hieskoivun, lepän tai haavan kasvatusta energiaviljelmillä hieman pidemmillä 10–25 vuoden kiertoajoilla on tutkittu vielä vähän (Kuva 2.3.4). Tiheä hieskoivuviljelmä voidaan perustaa hyvin edullisesti luontaisen siemennyksen avulla tai kylvämällä. Leppä ja haapa ovat hyvin nopeakasvuisia ja uudistuvat kaadon jälkeen myös juurivesoista. Vaikka kotimaisten puulajien tuotostaso on pajuja alhaisempi, ovat myös viljelmän perustamisen ja hoidon kustannukset sekä kasvatuksen riskit pienemmät. Siksi energiaviljelyssä kiinnostus kotimaisten puulajien tutkimukseen on lisääntynyt.

Viime aikoina on tutkittu mahdollisuutta kasvattaa normaaleilla metsämailla, etenkin turvemailla, hieskoivikoita lyhyehköllä 30–50 vuoden kiertoajalla joko kokonaan energiapuuksi tai yhdistää niissä aines- ja energiapuun kasvatus toisiinsa. Myös hieskoivikon jatkokasvatusta vesasyntyisenä on tutkittu. Alustavien tulosten mukaan energiapuun korjuu parhaimmillaan 1,5-kertaistaa hieskoivikon puuntuotoksen verrattuna pelkän ainespuun korjuuseen. Hieskoivikon korkein tuotos ja kannattavuus saavutetaan 40–50 vuoden kiertoajalla ilman harvennuksia. Keskimääräinen vuotuinen tuotos oli Pohjois-Pohjanmaalla ja Lapissa sijainneissa kokeissa 3–4 m^3/ha ainespuuta ja sen lisäksi 1–2 m^3/ha energiapuuta. Vaihtoehtona on taimikon harvennus tiheyteen 2500–3000 kpl/ha, jolloin ainespuun kasvatus on kannattavaa, mutta energiapuun tuotos jää hyödyntämättä. Energiapuuharvennus turvemaan hieskoivikossa kannattaa huonosti, koska lievänä se tulee kalliiksi ja voimakkaana se vähentää liikaa puuston kasvua.

Kuva 2.3.4. Tiheä (12100 runkoa/ha) luontaisesti syntynyt 24-vuotias hieskoivikko suonpohjalla. Koivikon lehdetön maanpäällinen biomassa on 76 t/ha. Kuva Metla/Seppo Vihanta.

2.3.3 Ilmastonmuutoksen huomioon ottaminen metsänhoidossa

Hiilivarastoja vai ilmastonmuutoksen hillintää

Ilmastonmuutoksen hillitsemisessä metsien suurin merkitys liittyy niiden hiilitalouteen. Toisaalta metsät sitovat ja varastoivat hiiltä ja toisaalta ne ovat merkittävä uusiutuvan raaka-aineen ja energian lähde. Metsien käsittelyllä ja metsänhoidolla voidaan vaikuttaa siihen, miten paljon hiiltä metsät sitovat ja miten kestävästi uusiutuvaa raaka-ainetta ja/tai energiaa tuotetaan. Metsien kasvua ja hiilen sidontaa on myös mahdollista vauhdittaa sopivissa intensiivikohteissa lannoituksella. Ruotsalaisten tutkimusten mukaan metsien tuotos ja puustoon sitoutuneen hiilen määrä on voinut intensiiviviljelmissä jopa yli kaksinkertaistua (Bergh ym. 1999).

Metsän kokonaistuotos, mitataanpa sitä sitten biomassana tai hiilenä, on yleensä suurimmillaan harventamattomissa metsissä, joissa puusto saa kehittyä täystiheänä. Tällaisessa metsässä osa puustosta (kilpailussa häviölle jääneet puut) kuitenkin kuolee luonnonpoistumana ja jää lahoamaan metsään. Kuolleen puuston hiili vapautuu vähitellen takaisin ilmakehään. Suomen oloissa luonnonpoistuman osuus harventamattomassa metsässä voi olla 25–35 % biomassan kokonaistuotoksesta metsän kiertoaikana. Hoidetussa metsässä vastaava luonnonpoistuman osuus jää muutamaan prosenttiin. Tämä tulee ottaa huomioon arvioitaessa metsikön nettotuotosta eli kokonaistuotoksen ja luonnonpoistuman erotusta. Suomalaisissa hoidetuissa mänty- ja kuusivaltaisissa metsissä nettotuotos on 15–30 % suurempi kuin hoitamattomissa (esim. Forestcluster 2011).

Jos metsissä halutaan varastoida mahdollisimman paljon hiiltä, niin silloin paras kasvatusstrategia on pitäytyä hakkuista. Hoidetuissa metsissä hiilivarasto on pienempi, muuta hyvän kasvun ja vähäisen kuolleisuuden vuoksi nettokasvu ja hiilen nettosidonta puustoon voi olla suurempi kuin hoitamattomassa metsässä. Merkittävä osa sidotusta hiilestä otetaan hakkuissa talteen. Ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta oleellista onkin se, miten talteen otettava puusto ja sen sitoma hiili käytetään. Jos talteen otettava puu käytetään ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta suotuisalla tavalla, esimerkiksi puurakentamisessa, voidaan sillä kompensoida hoidettujen metsien vähäisempää hiilivarastoa.

Metsien hiilivaraston kartuttaminen lisäämällä luonnonmetsien määrää voi erilaisten häiriötekijöiden vuoksi johtaa tämän hiilivaraston äkilliseen tyhjentymiseen. Tällaiset riskit (hyönteis- ja sienituhot, metsäpalot) ovat käsittelemättömässä luonnontilaisessa metsässä hoidettua metsää suuremmat. Tällöin, suuresta hiilivarastosta johtuen, vapautuu runsaasti hiiltä ilmakehään (Lippke ym. 2011). Hoidetussa metsässä tällaisessa katastrofitilanteessa ilmakehään vapautuvan hiileen määrä jää pienemmäksi ja yleensä hoidetun metsän puustoa pyritään näissäkin tilanteissa hyödyntämään taloudellisesti.

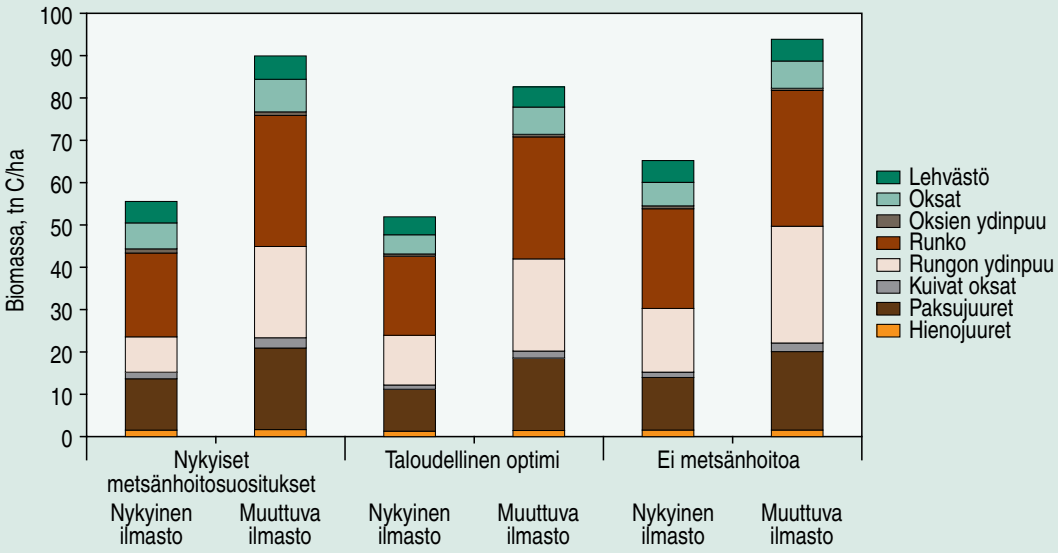
Ilmastonmuutos ja metsien hoito vaikuttavat talousmetsien kykyyn sitoa hiiltä

Raisa Mäkipää ja Tapio Linkosalo

Metsät ovat huomattavan suuri hiilivarasto ja ne toimivat hiilinieluna sitoessaan ilmakehästä hiilidioksidia biomassan ja maaperän pitkäaikaiseen varastoon. Hiilen sitoutuminen metsiin hidastaa ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvua ja hillitsee ilmastonmuutoksen etenemistä. Kansainväliset sopimukset velvoittavat seuraamaan metsien hiilivarastonmuutoksia sekä kannustavat toimiin, joilla hiilinieluja vahvistetaan. Talousmetsien käsittelyllä voidaan vaikuttaa metsien hiilitaseeseen ja puuston kehitystä kuvaavien simulointimallien avulla voidaan tarkastella eri vaihtoehtojen edullisuutta hiilitaseiden ja metsien tuottamien muiden hyödykkeiden ja palvelujen kannalta.

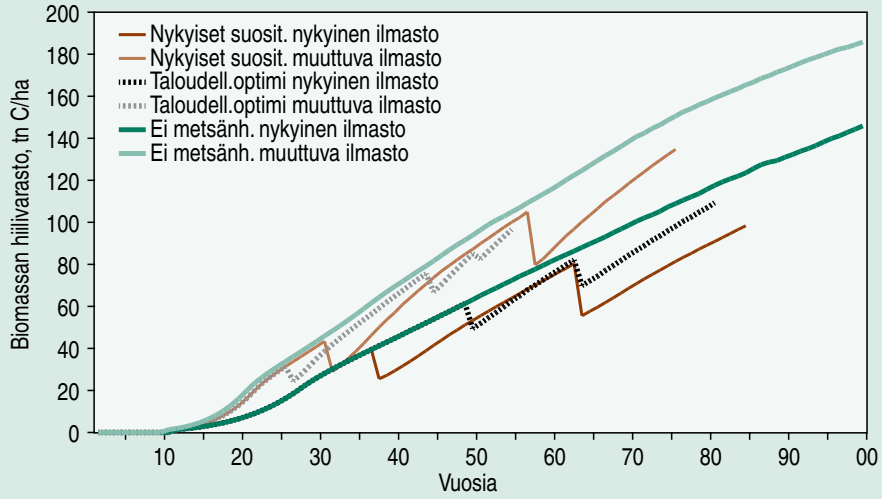
Simulointimallit mahdollistavat puuston kasvun ja hiilensidontakyvyn ennustamisen erilaisissa ympäristöolosuhteissa ja eri tavoin käsitellyissä metsissä. Yhdistettynä maan hiilimalliin ne kertovat myös maaperän hiilivaraston kehityksestä. Jos malli kuvaa puun kasvua sääteleviä prosesseja myös nykyisistä ilmasto-oloista poikkeavissa oloissa, voidaan sen avulla tutkia myös ilmastonmuutoksen vaikutuksia kasvuun ja hiilensidontaan. Tutkimuksessamme käytettiin prosessipohjaista kasvumallia (PipeQual) yhdessä dynaamisen – typen ja hiilen kiertoa kuvaavan – maamallin (ROMUL) kanssa. Tutkimme mallien avulla, kuinka puuston ja maaperän hiilivarasto kehittyy muuttuvissa ilmasto-oloissa, kun harvennushakkuiden ajoitusta ja voimakkuutta sekä päätehakkuuajankohtaa muutetaan.

Tutkimuksemme mukaan (Mäkipää ym. 2011) ilmastonmuutos lisäsi kuusen kasvua hakkuiden ajoituksesta riippumatta (Kuvat 2.3.5 ja 2.3.6). Sekä kasvillisuuden että maaperän hiilivarasto oli muuttuvassa ilmastossa suurempi kuin nykyilmastossa (Kuvat 2.3.6 ja 2.3.7). Vaikka ilmastonmuutoksen seurauksena kohoava lämpötila ja sadanta kiihdyttävät maaperässä orgaanisen aineksen hajoamista, kasvaa biomassatuotanto ja karikesyöte tätä voimakkaammin ja maaperään sitoutuu muuttuvassa ilmastossa nykyistä enemmän hiiltä.

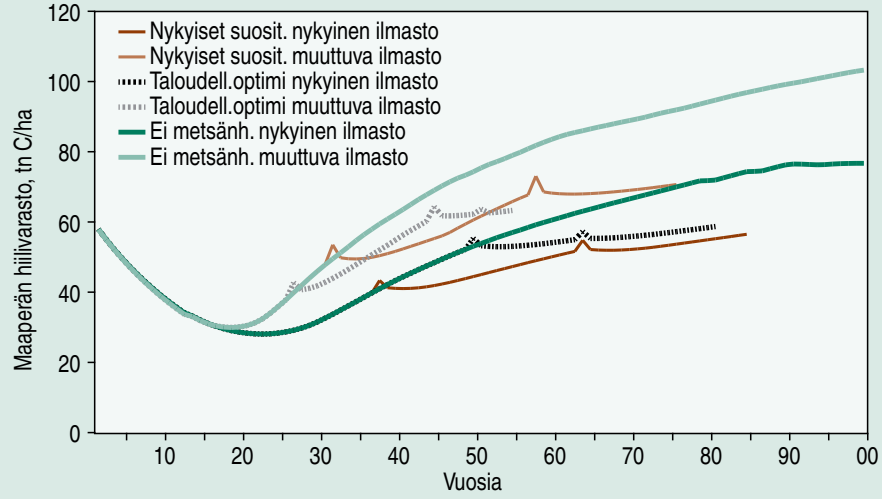


Kuva 2.3.5. Puuston biomassa eri tavoin käsitellyissä talousmetsissä sekä käsittelemättömässä 50 vuoden ikäisessä metsässä nykyisessä ja muuttuvassa ilmastossa (IPCC A2 skenaarion ennustama keskilämpötilan kasvu +3 °C ja sadannan lisääntyminen 10 %). Nykyisen suosituksen mukaisessa vaihtoehdossa toteutettiin nykyilmastossa simuloitaessa harvennukset puuston ollessa 36 ja 62 vuoden iässä ja metsänomistajan kantorahatuloja optimoitaessa 48 ja 62 vuoden iässä. Muuttuvassa ilmastossa harvennukset aikaistuivat ja taloudellinen optimointi tuotti kolme harvennusta.

Metsien käsittely vaikuttaa metsien hiilitaseeseen voimakkaammin kuin ilmastonmuutos (Kuvat 2.3.5–2.3.7). Luonnontilaisen metsän hiilivarasto on suurempi kuin käsitellyn talousmetsän. Käsittelyketju, jossa tavoiteltiin mahdollisimman suurta taloudellista kannattavuutta voimakkaiden ja tavanomaista aikaisemmin tehtyjen hakkuiden avulla, johti puuston hiilivaraston pienentymiseen (Kuva 2.3.6). Sen seurauksena väheni myös karikesyöte maaperään ja maaperä ei enää ollut hiilinielu, kuten tavanomaisesti käsitellyissä tai luonnontilaisissa metsissä. Päätehakkuun jälkeen metsämaa on kaikissa tapauksissa lähes 20 vuoden ajan hiililähde (Kuva 2.3.7), ja vasta sen jälkeen metsämaahan alkaa kertyä hiiltä kun puuston tuottaman karikesyöte on suurempi kuin orgaanisen aineksen hajotuksessa vapautuva hiilimäärä. (Mäkipää ym. 2011).



Kuva 2.3.6. Biomassan hiilivarasto eri tavoin käsitellyissä ja käsittelemättömissä metsissä nykyisessä ja muuttuvassa ilmastossa. Ilmasto- ja käsittelyvaihtoehdot kuten kuvassa 2.3.5.



Kuva 2.3.7. Maaperän hiilivarasto eri tavoin käsitellyissä ja käsittelemättömissä metsissä nykyisessä ja muuttuvassa ilmastossa. Ilmasto- ja käsittelyvaihtoehdot kuten kuvassa 2.3.5.

Metsänhoidon keinoja ilmastonmuutokseen sopeutumisessa

Metsänhoidon pääkeino ilmaston muutoksen huomioon ottamisessa on pyrkiä sopeutumaan ilmastonmuutoksen aiheuttamiin ongelmiin ja sitä kautta pienentää ilmaston muutoksesta aiheutuvien haittojen todennäköisyyttä. Lähtökohtana on vastata ilmastonmuutoksen tuomiin riskeihin hyvällä ja oikein ajoitetulla metsänhoidolla, jolla ylläpidetään ja parannetaan kasvatettavan puuston elinvoimaisuutta ja vastustuskykyä erilaisia kasvuympäristön stressitekijöitä vastaan (Parviainen ym. 2010).

Ilmastonmuutoksen tuomiin riskeihin varauduttaessa metsien uudistamisessa lähtökohtana on kasvupaikalle sopeutuneen ja riittävän geneettisen vaihtelun omaavan uudistamismateriaalin käyttö viljelyssä sekä luontaisen uudistamisen suosiminen sille sopivilla kasvupaikoilla. Etelä-Suomessa ilmastonmuutoksen myötä vähäsateiset jaksot yleistyvät, mikä voi heikentää kuusen kasvuedellytyksiä (Kellomäki ym. 2007). Puulajien muutos olisi suurin tuoreilla kankailla, joilla mänty- ja koivuvaltaiset metsät tulisivat pidemmällä aikavälillä vallitseviksi. Kuusivaltaisia metsiä olisi pääasiassa lehtomaisilla kankailla. Kasvukauden aikaisten kuivuusriskien minimoimiseksi tulisi kuusen viljelyssä välttää kuivuudelle alttiita, karuja kasvupaikkoja ja uudistaa ne männylle.

Kun puuston harvennukset niin taimikoissa kuin varttuneemmissakin metsissä tehdään oikea-aikaisesti, vältetään voimakkaat ja äkilliset puuston tiheyden muutokset. Näin minimoidaan lumi- ja tuulituhojen riskejä ja ylläpidetään metsikön vastustuskykyä sieni- ja hyönteistuhoja vastaan. Yhdistetyssä aines- ja energiapuun kasvatuksessa nykyistä suuremmat nuorten metsiköiden tiheydet voivat lisätä lumi- ja tuulituhojen riskiä etenkin, jos ensiharvennuksen ajoitus poikkeaa oleellisesti optimista. Taimikoissa ja kasvatusmetsissä suositaan sekametsiköitä sekä edistetään metsikön monimuotoisuutta niin metsien rakenteessa kuin käsittelytavoissa. Yhtenä käsittelyvaihtoehtona on esitetty erirakenteisen metsän kasvatusta poimintahakkuin, jolloin metsikköä kasvatetaan ja uudistetaan samanaikaisesti ja säilytetään metsikössä osittainen latvuspeite kaikenaikaa.

Leimikoiden suunnittelulla ja käsittelykuvioiden rajauksella voidaan pienentää tuulituhoriskiä. Käsittelykuvioiden rajaaminen maastonmukaisesti välttäen jyrkkiä kuviorajoja vähentää metsikkökuvioiden reuna-alueiden alttiutta tuulituhoille. Samoin tuulituhoriskiä voidaan pienentää välttämällä harvennushakkuita varttuneissa, lähellä päätehakkuuta olevissa metsissä, erityisesti kuusikoissa. Ilmastonmuutoksen myötä kiihtyvä puuston kasvu mahdollistaa myös nykyistä käytäntöä lyhyempien kiertoaikojen käytön metsän kasvatuksessa.

Puunkorjuussa priorisoidaan talvikorjuu heikoiten kantaviin kohteisiin sekä kehitetään korjuukalustoa sulan maan aikana huonosti kantaville maapohjille. Samoin huolehditaan nykyistä huolellisemmin sairaan ja kuolevan puuston poistosta metsiköstä ja kantokäsittelyistä sieni- ja hyönteistuhojen ehkäisemiseksi sekä varastoidun puutavaran poiskuljetuksesta tai suojauksesta tuhoriskien minimoimiseksi kaikissa hakkuissa. Myös nuorten metsien energiapuuhakkuissa tulee huolehtia kuusen tyvilahon leviämisen ehkäisemisestä. Kantojen korjuulla kuusen tyvilahokohteilta sekä männyn tyvitervasalueilta voidaan oikein suoritettuna parantaa metsien terveydentilaa ja sopeutumiskykyä ilmastonmuutosta vastaan.

2.3.4 Johtopäätökset

Laajenevalla metsäbiomassan energiakäytöllä tulee olemaan hyvin näkyvä vaikutus metsänhoitoon ja erityisesti metsänuudistamisvaiheen toimenpiteisiin. Tämä avaa omalta osaltaan uusia mahdollisuuksia metsänhoidon (viljely, taimikonhoito, nuoren metsän hoito) koneellistamiseen. Energiapuun korjuu tuo puuntuotantoon uudenlaisia kasvatusketjuja, joiden kustannustehokkuudesta ja puuntuotosvaikutuksista on vielä vähän tietoa. Pelkän energiapuun kasvatus tai sen yhdistäminen ainespuun kasvatukseen nousevat entistä merkittävämmiksi metsien hyödyntämismuodoiksi.

Tehokas puuntuotanto ja fossiilisten energialähteiden korvaaminen biomassalla hillitsevät hiilidioksidipäästöjä ja siten myös ilmastonmuutosta. Ilmastonmuutokseen sopeutuminen edellyttää, että ilmastonmuutoksesta aiheutuvat riskit tunnetaan ja metsänhoidossa vältetään riskialttiita valintoja ja menetelmiä.

Kirjallisuus

Bergh, J., Linder, S., Lundmark, T., & Elfving, B. 1999. The effect of water and nutrient availability on the productivity of Norway spruce in northern and southern Sweden. Forest Ecology and Management 119: 51–62.

Börjeson, P.I.I. 1996. Energy analysis of biomass production and transportation. Biomass and Bioenergy 184: 305–313.

Egnell, G. & Valinger, E. 2003. Survival, growth, and growth allocation of planted Scots pine trees after different levels of biomass removal in clear-fellings. Forest Ecology and Management 177: 65–74.

Forestcluster. Ltd. 2011. “Intelligent and Resource-Efficient Production Technologies” (EffTech) Programme. Programme Report 2008–2010. s. 26–39.

Harstela, P. 2004. Metsänuudistaminen ja taimikonhoito. Julkaisussa: Harstela, P. (toim.). Metsähake ja metsätalous. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 913: 16–25.

Heikkilä, J., Sirén, M. & Äijälä, O. 2007. Management alternatives of energy wood thinning stands. Biomass & Bioenergy 31(5): 255–266.

Heikkilä, J., Sirén, M., Ahtikoski, A., Hynynen, J., Sauvula, T. & Lehtonen, M. 2009. Energy wood thinning as a part of the stand management of Scots pine and Norway spruce. Silva Fennica 43(1): 129–146.

Heino, E. & Hytönen, J. 2005. Suomalainen pajukirjallisuus. Finnish bibliography on willow. Working papers of the Finnish Forest Research Institute. 38 s. http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2005/mwp017.htm

Hytönen, J. & Saarsalmi, A. 2009. Long-term biomass production and nutrient uptake of birch, alder and willow plantations on cut-away peatland. Biomass & Bioenergy 33(9): 1197–1211.

Hyvän metsänhoidon suositukset 2006. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 100 s.

Kaila, S., Kiljunen, N., Miettinen, A. & Valkonen, S. 2006. Effect of timing of precommercial thinning on the consumption of working time in Picea abies stands in Finland. Scandinavian Journal of Forest Research 21: 496–504.

Kardell, L. 1992. Vegetationsförändring plantetablering samt bärproduktion efter stubb- och ristäkt. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig landskapsvård. Rapport 50. 63 s.

Kellomäki S., Peltola H., Nuutinen T., Korhonen K. T. & Strandman H. 2007. Sensitivity of managed boreal forests in Finland to climate change, with implications for adaptive management. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 363: 2341–2351.

Lippke, B., Oneil, E., Harrison, R., Skog, K., Gustavsson, L. & Sathre, R. 2011. Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: knowns and unknowns. Carbon Management 2011 2(3) : 303–333

Miljöeffekter av skogsbränsleuttag och askåterföring i Sverige. En syntes av Energimyndighetens forskningsprogram 1997 till 2004. Energimyndigheten Rapport ER 2006 (44). 211 s.

Miljökonsekvenser av stubbskörd – en sammanställning av kunskap och kunskapsbehov. Environmental aspects on stump-harvest – compilation of knowledge and knowledge gaps. Energimyndigheten Rapport ER 2007 (40). 154 s.

Mola-Yudego, B. 2010. Trends and productivity improvements from commercial willow plantations in Sweden during the period 1986–2000. Biomass and Bioenergy 35: 446–453.

Mäkipää, R., Linkosalo, T., Niinimäki, S., Komarov, A., Bykhovets, S., Tahvonen, O., Mäkelä, A. 2011. How forest management and climate change affect the carbon sequestration of a Norway spruce stand. Journal of Forest Planning, 16:107–120.

Parviainen, J., Vapaavuori, E. & Mäkelä, A. (toim.). 2010. Finland's forests in changing climate. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 159. 50 s.

Rantala, J., Saarinen, V.-M. & Hallongren, H. 2010. Quality, productivity and costs of spot mounding after slash and stump removal. Scandinavian Journal of Forest Research 25(6): 507–514.

Saarinen, V.-M. 2006. The effects of slash and stump removal on productivity and quality of forest regeneration operations—preliminary results. Biomass and Bioenergy 30 (4): 349–356.

Saarinen, V.-M. & Harstela, P. 2004. Hakkuutähteiden ja kantojen korjuun vaikutus maanmuokkaukseen ja metsänviljelyyn. Effect of slash and stump removal on soil preparation and planting. Julkaisussa: Alakangas, E. & Holviala, N, (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003. Puuenergian teknologiaohjelman vuosiseminaari, Jyväskylä, 17.-18.3.2004. VTT Symposium 231: 275–288.

Saksa, T. 2001. Hakkuutähteen vaikutus metsän uudistamiseen. Teoksessa: Nurmi, J. & Kokko, A. (toim.). Biomassan tehostetun talteenoton seurannaisvaikutukset metsässä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 816: 53–58.

Saksa, T., Tervo, L. & Kautto, K. 2002. Hakkuutähde ja metsänuudistaminen. Hakkuutähteen korjuun vaikutukset metsänuudistamiseen tutkimushankkeen loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 851. 41 s.

Salminen, H., Lehtonen, M. & Hynynen, J. 2005. Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator. Computers and Electronics in Agriculture 49: 103–113.

Sirén, M., Heikkilä, J., Hynynen, J. & Sauvula, T. 2007. Energy wood thinning alternatives in management of Scots pine and Norway spruce stands. Julkaisussa: Savolainen, M. (toim.). Bioenergy 2007. 3rd International Bioenergy Conference and Exhibition from 3rd to 6th of September 2007, Jyväskylä, Finland. Proceedings. s. 215–221.

Strandström, M.2007. Kannonnoston vaikutus uudistusalan vesakoitumiseen. Metsänuudistaminen ja bioenergian korjuu. Pohjoismaisen metsätalouden siemen- ja taimineuvoston (NSFP) teemapäivä. Moniste 6 s.

Äijälä, O., Kuusinen, M. & Koistinen, A. (toim.). 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset. Energiapuun korjuu ja kasvatus. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio julkaisusarja 30/2010. 56 s.

2.4 Metsäpuiden ja -kasvien sopeutuminen nyt ja tulevaisuudessa

Elina Vapaavuori, Pertti Pulkkinen, Matti Haapanen, Heljä-Sisko Helmisaari, Hannu Ilvesniemi, Leila Korpela, Eero Kubin, Jaana Leppälammi-Kujansuu, Kari Mikkola, Jorma Pasanen, Jarmo Poikolainen, Pasi Rautio, Tapani Repo, Marja Roitto, Matti Rousi, Maija Salemaa, Markku Tamminen, Pekka Tamminen, Tiina Tonteri ja Saila Varis

Metsäpuiden lisääntyminen ja kasvu muuttuvissa olosuhteissa edellyttävät hyvää sopeutumiskykyä, jotta metsien kasvu voi tapahtua ilman pahoja häiriöitä. Ilmastovaihteluihin hyvin sopeutuneet metsät ovat tärkeitä ekosysteemipalvelujen tuottajia toimimalla mm. tehokkaina hiilinieluina, tulva- ja valumavesien säätelijöinä ja puhtaan veden ylläpitäjinä. Metsät luovat myös edellytykset monipuoliselle taloudelliselle toiminnalle, hyvinvoinnille ja virkistyskäytölle.

Ilmastomalliennusteiden mukaan maapallon keskilämpötila nousee seuraavien vuosikymmenten aikana noin 0,2 ºC vuosikymmenessä ja sään ääri-ilmiöt, kuten kuivuus, helteet ja rankkasateet, tulevat yleistymään (IPCC 2007). Lämpenemiskehitys ei ole suoraviivaista, vaan alueellisesti sääoloissa tulee jatkossakin olemaan suurta vuosien välistä vaihtelua. Tämän vuoksi metsissä on oltava riittävästi muuntelua sekä luonnonvalinnan raaka-aineeksi että fenotyyppistä joustavuutta vastata kasvuympäristössä tapahtuviin säätilan muutoksiin.

Ilmaston muuttuessa boreaalisten metsien kasvun ennustetaan lisääntyvän lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden nousun sekä lisääntyvän sadannan seurauksena (Kellomäki ym. 2005). Kasvun kannalta on kriittistä, millainen puiden ja muun metsäkasvillisuuden sopeutumiskyky on muuttuvissa talveentumis-, lepotila- ja suveentumisoloissa. Myös metsätalous on muuttanut metsäluontoa Suomessa ja metsäbioenergian käytön lisääntyminen tulevaisuudessa tullee näkymään voimakkaampina muutoksina metsien ja metsäekosysteemien rakenteessa.

Metsien hyvä stressinsietokyky ja kyky palautua stressistä ovat ympäristöön sopeutumisen edellytyksiä. Mitkä tekijät vaikuttavat sopeutumiseen, millaisia muutoksia metsissämme voidaan havaita ja miten metsien sopeutumista muuttuvaan ilmastoon ja kasvuympäristöön voidaan edistää? Näitä teemoja käsitellään tässä luvussa.

2.4.1 Miten metsäpuut sopeutuvat muuttuvaan ilmastoon?

Geenivirta edistää sopeutumista

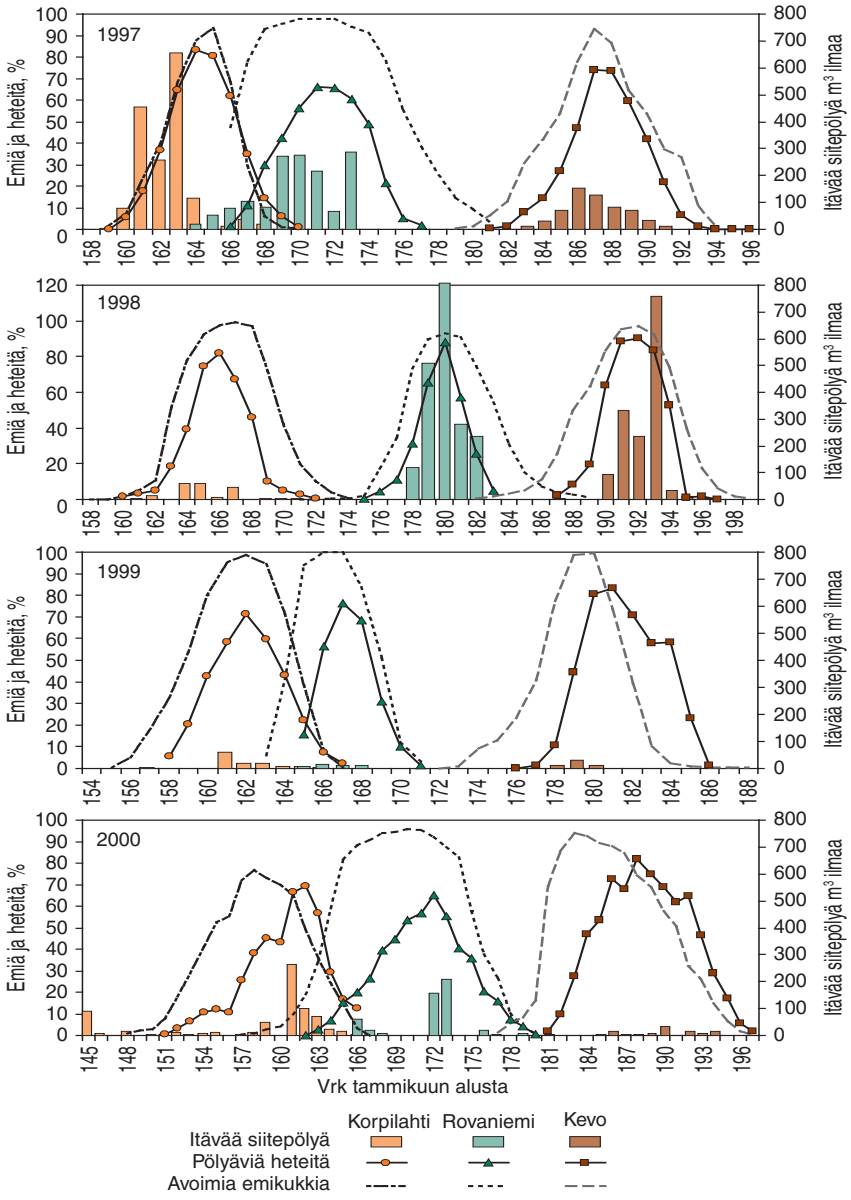
Lyhyehkön aikavälin sopeutumista metsissä ylläpitää siitepölyn ja siementen välityksellä tapahtuva geenivirta. Siitepöly voi kulkeutua tuulten mukana tuhansiakin kilometrejä, kun puolestaan siementen leviäminen on aina rajoitettua. Siementen leviäminen rajoittuu yleensä vain populaatioiden lähipiiriin sekä vesistöjen sekä siemeniä syövien eläinten mahdollisesti tarjoamaan kuljetusapuun. Tietoa siementen välityksellä tapahtuneesta leviämisestä on saatu Lapin puurajametsistä. Juntusen ja Neuvosen (2006) mukaan puuraja on edennyt 1900-luvulla Länsi-Lapissa yli 30 kilometrin päähän nykyisestä metsärajasta. Pitkän aikavälin etenemisnopeus vuosien 1788–1973 aikana oli tutkimuksen mukaan 140 metriä vuodessa. Eteneminen voi tapahtua hyppäyksittäin johtuen mm. kesäajan suotuisista sääoloista, jotka edistävät siementuotantoa, sekä talviajan äärevistä lämpötiloista, jotka säätelevät taimikuolleisuutta.

Metsiköiden katsotaan yleisesti sisältävän riittävästi geneettistä vaihtelua, jotta puulajit voivat sopeutua suuntaavaan valintaan (Hamrick 2004). On myös oletettu, että geenivirta lämpimämmiltä tai kylmemmiltä alueilta nopeuttaa sopeutumista tuottamalla jatkuvasti uutta vaihtelua luonnonvalinnan materiaaliksi. Valtapuulajimme mänty, koivu ja kuusi ovat tuulipölytteisiä ja hyvinä kukkimisvuosina niiden valtava siitepölytuotanto mahdollistaa siitepölyn kulkeutumisen oman metsikön ulkopuolelle jopa tuhansienkin kilometrien päähän. Suomessa eteläiset ilmavirtaukset ovat olleet vallitsevia puiden kukinta-aikaan ja ovat siten mahdollistaneet esimerkiksi koivun siitepölyn kulkeutumisen etelämpää, kuten Etelä-Venäjältä Etelä-Suomeen (Siljamo ym. 2008), ja männyn siitepölyn kulkeutumisen eteläisestä Suomesta Pohjois-Suomeen (Kuva 2.4.1) (Varis ym. 2009). Kun hedelmöittävä siitepöly on syntynyt eri olosuhteissa kuin vastaanottavissa metsiköissä, muodostuva siemen eroaa sopeutuneisuudeltaan siemenestä, joka on syntynyt metsikön sisäisen pölytyksen seurauksena (Kuva 2.4.2) (Pulkkinen ym. 1995). Aikaisin kukkivat pohjoiset männyt voivat siten pölyttyä eteläisellä siitepölyllä, jolloin syntyvä siemen on paremmin sopeutunutta lämpimämpiin kasvuolosuhteisiin (Kuva 2.4.1).

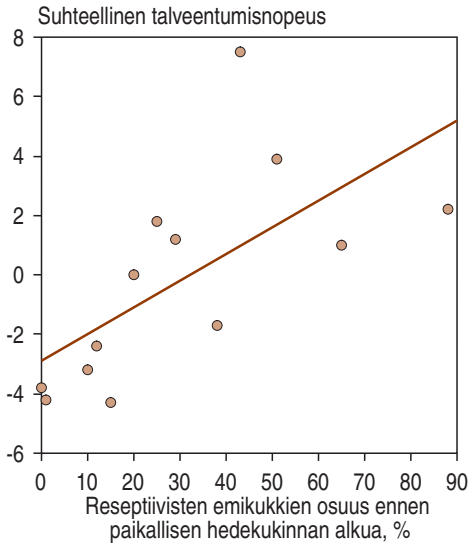
Tuulipölytyksen mahdollistama geenivirta ylläpitää osaltaan metsäpuiden valmiutta sopeutua nopeisiin ympäristönmuutoksiin. Niillä puulajeilla, jotka ovat hyönteispölytteisiä (esim. lehmus ja pihlaja) tai joiden metsiköt ovat pieniä ja eristyneitä, geenivirta on rajoitetumpaa, ja valmius sopeutua on vastaavasti heikompi. Lisäksi pienissä populaatioissa tapahtuu sukusiitoksen lisääntymistä ja perinnöllisen muuntelun vähenemistä sukupolvesta toiseen ns. satunnaisajautumisen vaikutuksesta. Muuntelupohjan supistuminen merkittävässä määrin vie kuitenkin käytännössä niin monta sukupolvea, ettei sillä ole merkitystä sopeutumisen kannalta käynnissä olevan ilmastonmuutoksen aikajänteellä.

Ilmastonmuutos aikaistaa kevään tuloa mahdollistaen nykyistä aikaisemman kukkimisen. Lämpenevät kesät yhdessä hiilidioksidipitoisuuden nousun kanssa saattavat edistää kukkasilmujen erilaistumista luoden edellytykset runsaille siemensadoille, ja myös puiden siirtyminen kasvullisesta vaiheesta lisääntymisvaiheeseen voi aikaistua. Tehokkaan geenivirran edellytyksenä ei ole ainoastaan runsas kukkiminen ja siitepölyn nopea kulkeutuminen ilmavirtojen mukana, vaan myös vastaanottavien puiden emien oikea-aikainen kukkiminen. Kaukokulkeutuneen siitepölyn vaikutus riippuukin siitä, ovatko paikalliset emikukinnot vastaanottavia, ennen kuin paikallinen siitepölyntuotanto vähentää kaukokulkeuman pölytysmahdollisuuksia. Tutkimustietoa emi- ja hedekukinnan ajallisesta ja paikallisista eroista on vielä vähän, mikä johtuu mm. havainnoinnin hankaluudesta puiden latvustoissa. Männyllä tehdyn tutkimuksen mukaan geenivirran tehokkuutta lisää emien aukeaminen ennen paikallisen hedekukinnan alkua (Varis ym. 2009). Männyn kukinta on sopeu-

tunut nykyolosuhteisiin niin, että emikukinta alkaa suhteessa hedekukintaan sitä aikaisemmin mitä pohjoisemmista mäntymetsistä on kyse (Kuva 2.4.1). Etelässä saman mänty-yksilön emikukat tulevat vastaanottaviksi noin puoli päivää ennen kuin saman puun hedekukat alkavat kukkia, mutta Pohjois-Suomessa ero voi olla useita päiviä. Männyn osalta näyttäisi siltä, että emikukinta reagoi hedekukintaa voimakkaammin nouseviin lämpötiloihin, mikä lisää eteläistä geenivirtaa. Puulajien välillä on kuitenkin eroja. Tuoreet tulokset Punkaharjulla tehdystä pitkäaikaisesta tutkimuksesta osoittavat, että mahdollisuudet geenivirtaan rauduskoivumetsikköjen välillä ovat vähäisiä. Rauduksen emikukat avautuvat samanaikaisesti hedekukkien kanssa, joten fenologista ikkunaa eteläiselle kaukopölylle ei näytä avautuvan. Joinain vuosina rauduskoivun emikukat kuitenkin säilyvät auki useita päiviä paikallisen pölytyksen loppumisen jälkeen, joten pohjoisella siitepölyllä on mahdollisuus lisätä puiden sopeutumista myös viilenevään ilmastoon (Rousi ym. 2011).



Kuva 2.4.1. Neljän vuoden aikasarja männyn hede- ja emikukinnan sekä ilmassa levinneen elävän siitepölyn ajoittumisesta Korpilahdella, Rovaniemellä ja Kevolla. Emikukinta alkoi 2–5 päivää ennen paikallista hedekukintaa, ja yhteensä 7,5 % tutkituista emikukista aukesi ennen kuin paikallisista hedekukista irtosi siitepölyä. Elävää siitepölyä oli kuitenkin ilmassa jokaisena vuonna jo ennen paikallisen hedekukinnan alkua, ja erityisesti vuonna 1997 siitepölyä oli ilmassa runsaasti mahdollistaen jo avoinna olevien emikukkien pölytyksen kaukokulkeutuneella siitepölyllä (Varis ym. 2009).



Kuva 2.4.2. Männyn emikukinnan ajankohdan vaikutus taimien talveentumisnopeuteen. Ennen paikallisen hedekukinnan alkua avautuvat emikukat pölyttyvät eteläisemmistä metsiköistä kaukokulkeutuneella siitepölyllä, mikä ilmenee taimien suhteellisissa talveentumisnopeuksissa. Mitä suurempi suhteellisen talveutumisnopeuden arvo on, sen hitaampaa on talveentuminen. Mitä suurempi osuus pohjoisten mäntymetsiköiden emikukista avautuu vastaanottamaan siitepölyä ennen paikallisen siitepölyn irtoamista hedekukista, sen hitaammin näiden metsiköiden siemenistä kasvatetut taimet talveentuvat.

Sään vuodenaikaisvaihtelu boreaalisilla alueilla asettaa sopeutumisen raamit

Ilmaston muuttuessa syksyn olosuhteiden – lämpötila, kosteus – ennustetaan muuttuvan boreaalisilla alueilla merkittävästi, kun taas vuotuinen vaihtelu valojakson pituudessa pysyy ennallaan. Sopeutumisen edellytys on, että puiden vuosisykli on synkronoitu vuodenaikaisten säävaihteluiden kanssa. Muuttuvassa ympäristössä liian varhain keväällä käynnistyvä tai liian myöhään syksyllä jatkuva puiden kasvu voi johtaa halla/pakkasvaurioihin. Liian myöhään keväällä käynnistyvä tai liian aikaisin syksyllä päättyvä kasvu puolestaan voi puolestaan aiheuttaa kasvutappioita.

Syksyllä signaali kasvun päättymiseen tulee valoperiodin muutoksista ja/tai lämpösummakertymästä, jotka vaihtelevat laji- ja alkuperäkohtaisesti (Koski ja Sievänen 1985, Oleksyn ym. 1992). Verson pituuskasvun päättymisen kannalta kriittinen yönpituus muuttuu pohjois-eteläsuunnassa: esimerkiksi rauduskoivulla se on Kittilässä kolme tuntia ja Tuusulassa kuusi tuntia (Viherä-Aarnio ym. 2006). Pituuskasvun päätyttyä alkaa karaistuminen. Karaistumisessa, jota nopeuttaa vähitellen laskeva yölämpötila, on huomattavia laji-, alkuperä- ja genotyyppi kohtaisia eroja (Repo ym. 2001). On kuitenkin ilmeistä, että esimerkiksi suomalaiset rauduskoivut ovat sopeutuneet hyvinkin monentyyppisiin valo- ja lämpöolosuhteisiin (Rousi ym. 2012).

Ilmaston lämpeneminen pidentää potentiaalista kasvukautta, minkä vuoksi voisi olettaa, että fenologiset ilmiöt, kuten puiden kasvu syksyllä, jatkuvat pidempään ja karaistuminen viivästyy. Perusteita tällaiselle yleispätevälle olettamukselle ei kuitenkaan ole. Boreaalisen vyöhykkeen puulajeilla on kullakin oma useasta kehitysvaiheesta koostuva vuosisyklinsä, jossa vaiheesta toiseen siirtyminen edellyttää, että edellinen kehitysvaihe on päättynyt (Hänninen ja Tanino 2011). Esimerkiksi männyllä, jonka pituuskasvu on ennalta määräytynyt, pituuskasvun päättymisajankohta aikaistuu lämpötilan noustessa, kun kasvuun tarvittava lämpösummakertymä täyttyy aiemmin (Slaney ym. 2007, Hänninen ja Tanino 2011). Viimeaikaisten tutkimusten mukaan ennenkaikkea yölämpötilalla on tärkeä merkitys pituuskasvun päättymisessä (Tanino ym. 2010). Niinpä pohjoisilla leveysasteilla lyhenevä päivänpituus syyskesällä yhdessä korkean yölämpötilan kanssa voi nopeuttaa monien puiden pituuskasvun päättymistä (Hänninen ja Tanino 2011). Muita fenologisia

ilmiöitä, kuten puiden paksuuskasvun ja juurten kasvun päättyminen sekä lehtien kellastuminen ja variseminen, lämpenemisestä johtuva kasvukauden piteneminen voi puolestaan viivästyttää. Esimerkiksi männyn paksuuskasvu jatkuu viikon pidempään olosuhteissa, joissa kesälämpötilaa oli nostettu kahdella asteella (Peltola ym. 2002). Rauduskoivulla ja haavalla hiilidioksidipitoisuuden (Riikonen ym. 2004, 2008) ja lämpötilan (Mäenpää ym. 2011) nousu viivästyttävät lehtien kellastumista ja tippumista syksyllä (Riikonen ym. 2004, Mäenpää ym. 2011).

On arveltu, että ilmastonmuutoksen aiheuttama kasvukauden piteneminen hidastaisi boreaalisen vyöhykkeen puiden karaistumista ja pakkaskestävyyden kehittymistä, minkä vuoksi puut olisivat alttiimpia pakkasvaurioille syksyllä ja talvella. Olettamuksen tueksi on niukasti kokeellista, osittain ristiriitaista tietoa. Kenttäoloissa tehdyissä tutkimuksissa männyllä (Repo ym. 1996, Repo ym. 2006) ja kuusen taimilla (Riikonen ym. 2012) altistus kohotetulle lämpötilalle ei heikentänyt neulasten pakkaskestävyyttä syksyllä. Sen sijaan kasvihuoneolosuhteissa männyn ja kuusen taimilla tehdyssä tutkimuksessa lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden nosto hidastivat pakkaskestävyyden kehittymistä syksyllä ja vauriot ilmenivät seuraavan kasvukauden alussa elävyyden alenemisena (Pulkkinen ym. julkaisematon tieto). Lepotilaan siirtyneillä boreaalisen vyöhykkeen puilla pakkaskestävyys on hyvä, joskin puulajien ja alkuperien välillä on selviä eroja siinä, kuinka ne sietävät talven äärilämpötiloja (George ym. 1974, Gusta ym. 1983). Tutkimustulosten mukaan ennustetun kaltainen ilmaston lämpeneminen ei näytä vaikuttavan puiden talvilepoon eikä heikentävän niiden talviaikaista pakkaskestävyyttä (Repo ym. 2006, Hänninen ym. 2007). Sen sijaan leutoihin talviolosuhteisiin sopeutuneilla puulajeilla, kuten monet jalot lehtipuut, ja alkuperillä on nykyisin vaikeuksia kestää mannerilmaston kylmiä talvia. Mikäli talvien äärilämpötilat tulevaisuudessa häviävät, tällaisten genotyyppien menestymismahdollisuudet paranevat edellyttäen, että ne kykenevät sopeutumaan pohjoisten leveysasteiden huomattavaan vuotuiseen päivänpituuden vaihteluun.

Puiden talvenkestävyyteen ja seuraavan vuoden kasvuun vaikuttavat myös edellisen kasvukauden olosuhteet. Epäsuotuisat olot kasvukauden aikana, kuten kuivuus, helle ja sateisuudesta johtuva maaperän märkyys, heikentävät solurakenteiden ja energiavarastojen kehittymistä, mikä voi lisätä talviaikaisia solukkovaurioita ja näkyä seuraavan vuoden kasvussa (Sakai ja Larcher 1987). Ilmaston lämmetessä äärevien sääolojen on ennustettu yleistyvän (IPCC 2007), mistä johtuen puiden kunto ja kyky puolustautua erilaisia tuhonaiheuttajia vastaan voi heikentyä ja johtaa puustovaurioihin. Tällaiset puustovauriot syntyvät usein monen ympäristötekijän yhteisvaikutuksen tuloksena, minkä vuoksi niiden syy-seuraussuhteita on vaikea kokeellisesti tutkia (Müller ym. 2012).

Talvilevon purkautumista ja kasvun käynnistymistä keväällä säätelee pääasiassa lämpötila, mutta myös puun alkuperällä, iällä, lumipeitteellä, valolla, kosteudella ja ravinteilla on vaikutusta (Johnsen ja Apeland 1988, Hänninen ja Tanino 2011). Kasvu käynnistyy, kun tietty laji- tai alkuperäspesifinen talvilepovaatimus kylmässä on täyttynyt ja riittävä lämpösumma on kertynyt (Hänninen ja Tanino 2011). Koska lämpötilalla on suveentumiskehityksessä keskeinen rooli, on selvää, että ilmaston lämmetessä puiden kasvun käynnistyminen boreaalisessa vyöhykkeessä tulee aikaistumaan (Repo ym. 2006, Slaney ym. 2007, Hänninen ym. 2007) ja keskitalven lauhat jaksot voivat vielä nopeuttaa suveentumiskehitystä (Granhus ym. 2009). Niillä lajeilla, joilla lepotilavaade kylmässä on lyhyt, kasvu voi käynnistyä selvästi aikaisemmin kuin pitkän lepovaiheen vaativilla lajeilla. Maltillistenkin ilmastoskenaarioiden mukainen lämpenemiskehitys (A1B) on aikaistanut mm. kuusten kasvuunlähtöä Pohjois-Ruotsissa jopa kahdella viikolla (Slaney ym. 2007). Aikaistunut kasvuunlähtö merkitsee siten kasvukauden pidentymistä, minkä seurauksena puiden kasvu voi lisääntyä. Mutta varhainen kevääntulo luo myös omat riskinsä, sillä kasvun käynnistyttyä uudet, kehittyvät kasvinosat ovat alttiita keväthalloille ja niiden aiheuttamille pakkasvaurioille (Hänninen ym. 2007).

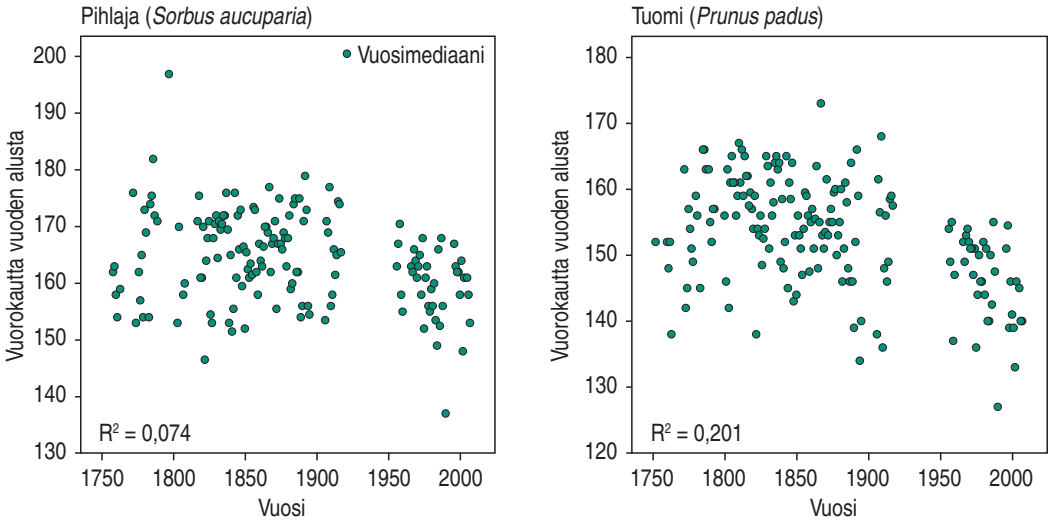
2.4.2 Miten sopeutuminen näkyy nykymetsissä?

Suomen metsien vuotuinen kasvu on viime vuosikymmenten aikana lähes kaksinkertaistunut ja puuston tilavuus on nyt 30 % suurempi kuin 40 vuotta sitten. Kasvun lisääntymiseen on useita syitä, kuten turvemaiden laajamittainen ojittaminen, metsänkäsittelymenetelmien tehostuminen, metsien ikärakenteen muutokset ja lisääntynyt typpilaskeuma. Ilmastonmuutoksen roolia kasvunlisäyksessä on vaikea eritellä. Oletettavaa kuitenkin on, että ilmakehän hiilidioksidipitoisuudessa tuona ajanjaksona tapahtunut 20 % lisääntyminen on omalta osaltaan edistänyt metsien kasvua.

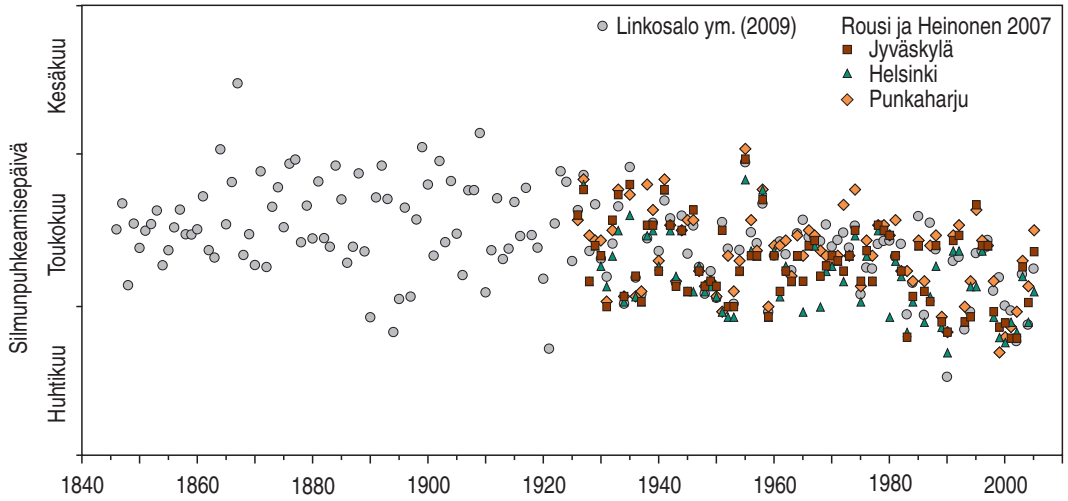
Fenologiahavainnot kertovat lämpenemisestä

Metsäpuista on kerätty harrastajavoimin 1750-luvulta saakka fenologiahavaintosarjoja (Terhivuo ym. 2009, Kuva 2.4.3), joiden avulla vuosirytmiin liittyvät ilmiöt, kuten kukinnan ja silmun puhkeamisen ajoittuminen, voidaan kytkeä ilmastossa tapahtuneisiin muutoksiin. Boreaalisen vyöhykkeen lehtipuilla fenologiset ilmiöt ovat tiukasti lämpötilaan kytkettyjä (Körner ja Basler 2010), ja esimerkiksi koivun silmujen puhkeaminen voidaan ennustaa lämpösummakertymän perusteella päivän tarkkuudella (Rousi ja Heinonen 2007). Fenologiset mittaussarjat ovat hyödyllisiä, mutta myös haasteellisia. Koska vuosien välinen vaihtelu lämpötiloissa ja siten myös fenologisten ilmiöiden ajoittumisessa on huomattavaa, tarvitaan pitkiä havaintosarjoja, jotta saadaan luotettavaa tietoa muutoksista ja että muutokset voidaan kytkeä lämpenemiskehitykseen. Rauduskoivulla tehdyn tutkimuksen mukaan vasta yli 30 vuoden aikasarjan perusteella voidaan luotettavasti arvioida silmun puhkeamisajankohdassa tapahtuneita muutoksia (Rousi ja Heinonen 2007, Kuva 2.4.4).

Kahdeksasta puulajista kerättyjen fenologiahavaintojen perusteella on arvioitu, että puiden silmun puhkeaminen ja kukinnan alkaminen ovat aikaistuneet 3,3–11 päivällä viimeisen sadan vuoden aikana Etelä- ja Keski-Suomessa. Aikaistuminen vastaa 1,8 °C keskilämpötilan nousua kevätkuukausien (maalis-toukokuu) aikana (Linkosalo ym. 2009; Terhivuo ym. 2009), mikä on samaa suuruusluokkaa kuin säätilastojen perusteella havaittu keskilämpötilan nousu viimeisen sadan vuoden aikana (Tietäväinen ym. 2010).



Kuva 2.4.3. Pihlajan (Sorbus aucuparia) ja tuomen (Prunus padus) kukkimisen ajoittuminen vuosina 1752–2007. vihreä symboli = vuosimediaani. Kuvaan on piirretty regressiosuorat, joiden kulmakertoimet (k) ovat pihlajalle -0,031 ja tuomelle -0,052 sekä 95 %:n luotettavuusvälit. Pihlajan kukkiminen on aikaistunut kolme ja tuomen viisi vuorokautta 100 vuotta kohti. Kuva perustuu vapaaehtoisvoimin kerättyyn aineistoon, jossa pihlajan kukkimishavaintojen lukumäärä on 4 778 ja tuomen 5 330. (Terhivuo ym. 2009).



Kuva 2.4.4. Fenologia-aikasarja rauduskoivun silmujen puhkeamisajankohdan muutoksesta Etelä-Suomessa. Kuvaan on yhdistetty tulokset kahdesta tutkimusaineistosta. Linkosalo ym. (2009) tulokset perustuvat Suomen Tiedesäätiön luonnosta keräämään havaintosarjaan 1840-luvulta lähtien (harmaat ympyrät). Värilliset symbolit esittävät lämpösummamallin pohjalta tehtyä ennustetta 30 vuoden ajalle koivun silmun puhkeamisajankohdasta Helsingissä, Punkaharjulla ja Jyväskylässä (Rousi ja Heinonen 2007). Kuva osoittaa, että lämpösummamallilla saatavat ennusteet vastaavat hyvin koivun silmun puhkeamisaikaa luonnossa.

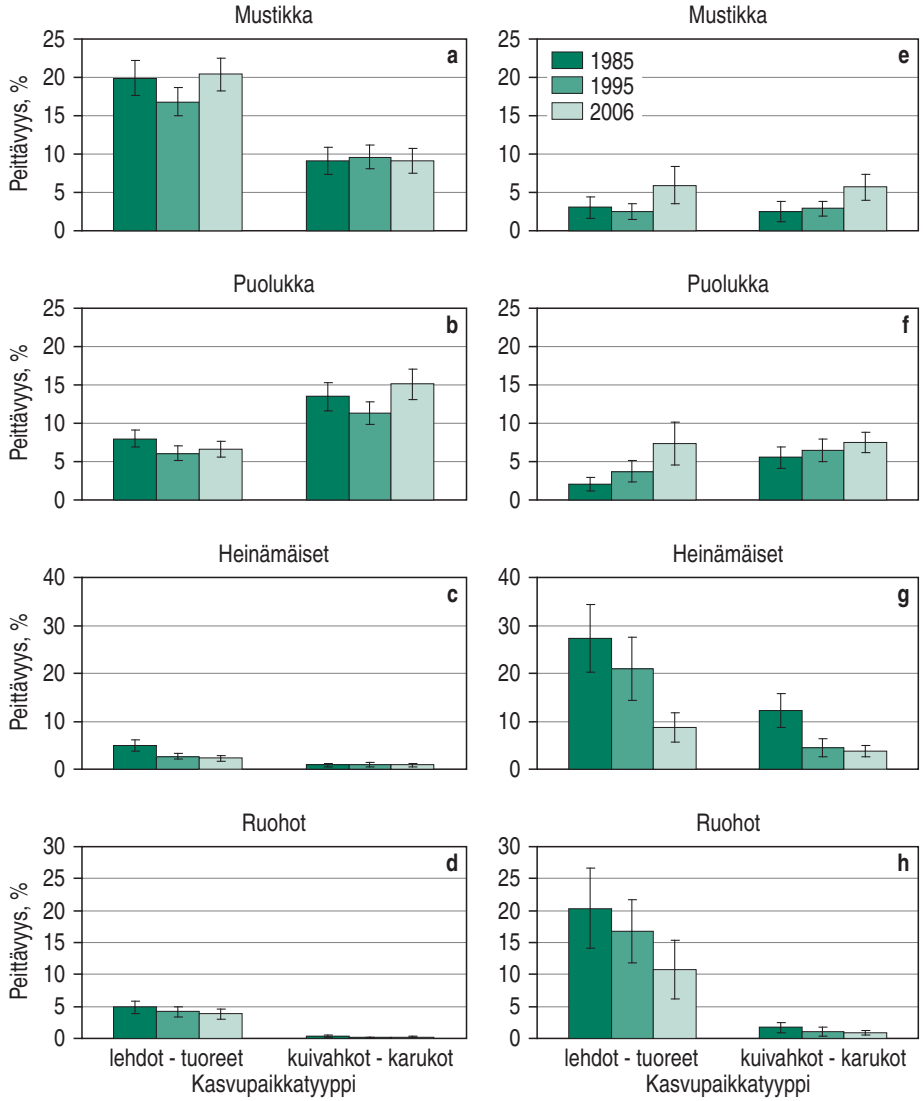
Metsäntutkimuslaitoksen koealoilla (Kubin ym. 2008) 1990-luvun puolivälistä lähtien tehdyt systemaattiset fenologiahavainnot ovat samansuuntaisia pitkien havaintosarjojen kanssa: ilmaston lämpeneminen vaikuttaa puiden ja metsäkasvillisuuden vuosirytmiikkaan (Pudas ym. 2007, Pudas ym. 2008) aikaistaen erityisesti kevätfenologiaa. Fenologiatulokset viittaavat siihen, että vuosirytmin muutokset voivat heikentää siemen- ja marjasatojen määrää ja laatua, metsäkasvien suvullista lisääntymistä sekä kasvilajien välisiä määrällisiä suhteita. Nämä muutokset voivat puolestaan siirtyä ravintoketjussa eteenpäin vaikuttamalla mm. sienten ja eläinten elinmahdollisuuksiin. Esimerkiksi muutokset metsämarjojen satomäärissä voivat näkyä myyräkantojen vuosittaisessa vaihtelussa ja edelleen metsäkanalintujen määrissä.

Miten metsän aluskasvillisuus sopeutuu muutoksiin?

Metsätalous on huomattavin metsien rakennetta 1950-luvun jälkeen muuttanut tekijä. Intensiivisellä metsänkasvatuksella ja uudistusalojen maanmuokkauksella on ollut suuri merkitys myös aluskasvillisuuden runsaussuhteille (Reinikainen ym. 2000). Nykyisin harjoitettavalla energiapuun korjuulla, johon usein liittyy kantojen nosto ja hakkuutähteiden poisto, on oletettavasti vielä suuremmat vaikutukset aluskasvillisuuteen kuin perinteisillä uudistushakkuilla (Siitonen 2012). Toisaalta ilmastonmuutoksella, oli kyse sitten lämpötilan, sademäärän tai ilmakehän CO_2-pitoisuuden muutoksista, on vaikutuksia kasvilajien menestymiseen ja kasvuun, koska jokaisella kasvilajilla on ympäristötekijöiden suhteen omat vaatimus- ja sietoalueensa. Ilmaston muuttuminen voikin siirtää paitsi yksittäisten lajien myös kokonaisten kasvillisuusvyöhykkeiden levinneisyysalueita.

Ilmaston muuttumisella on suorien vaikutusten lisäksi monia epäsuoria vaikutuksia. Boreaaliselle vyöhykkeelle ennustettu muutaman asteen lämpötilan nousu kuluvan vuosisadan aikana lisää typen mineralisaatiota metsämaassa. Koska typpi rajoittaa kasvien kasvua boreaalisissa metsissä, voidaan ennustaa, että ne lajit, jotka pystyvät nopeimmin hyödyntämään lisätypen kasvussaan, lisääntyvät ja saavat kilpailuetua. Tällaisia lajeja ovat heinät ja ruohot. Myös varvut hyötyvät lisätypestä, mutta ne kasvavat hitaammin ja varastoivat typpeä rakenteisiinsa. Kiihtynyt puiden kasvu saattaa vaikuttaa aluskasvillisuuteen luontaista sukkessiota nopeuttamalla, kun esim. valaistus sekä neulaskarikkeen määrä ja laatu muuttuvat aikaisemmin varttunutta metsää muistuttavaksi.

Kasvillisuusaineistoissa näkyy selviä muutoksia metsäkasvillisuudessa viimeisten noin 25 vuoden aikana. Aineistoja on kerätty valtakunnan metsien inventointien ja BioSoil-hankkeen yhteydessä ravinteisuudeltaan erilaisilta, hakkaamattomilta ja uudistushakatuilta koealoilta eri puolilta Suomea. Hakkaamattomissa metsissä putkilokasviryhmien peittävyys ja lajimäärät säilyivät suhteellisen vakaina koko seurantajakson ajan (Kuva 2.4.5, a-d). Mustikan peittävyys on pysynyt jokseenkin ennallaan, puolukan vähentynyt tuoreilla ja lisääntynyt kuivilla kasvupaikoilla (Kuva 2.4.5, a-b). Puolukan muutokset voidaan selittää puuston kasvulla, muilla luontaisen sukkession aiheuttamilla muutoksilla tai vuosien 1995 ja 2006 kuivuudella. Suurin muutos hakkaamattomissa metsissä on tapahtunut pohjakerroksessa jäkälien peittävyyden vähentymisenä sammalten peittävyyden samanaikaisesti runsastuessa (Kuva 2.4.6, a-d). Kuivilla kasvupaikoilla varsinkin seinäsammal ja kynsisammalet ovat vallanneet tilaa jäkäliltä. Tuoreilla kasvupaikoilla kerrossammal on kasvattanut osuuttaan, mutta kynsisammalet ovat vähentyneet.



Kuva 2.4.5. Mustikan, puolukan, heinämäisten kasvien ja ruohojen keskimääräiset peittävyydet yli 55-vuotiailla hakkaamattomilla (ei hakkuita jaksolla 1975–2006, Kuvat a-d) ja v. 1975–1985 uudistushakatuilla koealoilla vuosina 1985–1986, 1995 ja 2006 (Kuvat e–h). Luokka "lehdot – tuoreet" sisältää lehdot, lehtomaiset kankaat ja tuoreet kankaat (n = 67 hakkaamattomilla ja n=14 uudistushakatuilla koealoilla). Luokka "kuivahkot – karukot" sisältää kuivahkot, kuivat ja karukkokankaat (n=33 hakkaamattomilla ja n=13 uudistushakatuilla koealoilla).

Jäkälien väheneminen hakkaamattomissa metsissä johtunee Pohjois-Suomessa paljolti porojen laiduntamisesta. Etelä-Suomessa syitä voivat olla puuston latvuspeittävyyden lisääntyminen, muun kasvillisuuden kilpailu, kulojen harvinaistuminen ja mahdollisesti pitkällä aikavälillä kertynyt typpilaskeuma. Jäkälissä ja sammalissa havaittujen muutosten lisäksi kasviyhteisöissä ei kuitenkaan voida havaita mitään voimakasta muutossuuntaa, joka indikoisi kasvupaikkojen muuttumista ravinteikkaammiksi. Sen sijaan puuston tilavuuden kasvu ja latvuspeittävyyden lievä lisääntyminen ovat saattaneet muuttaa metsän pohjan valo- ja kosteussuhteita sammalten kasvua suosivaksi. On mahdollista, että tulevaisuudessa ilmastonmuutoksen vaikutukset aluskasvillisuuteen ilmenevätkin epäsuorasti puustosta aiheutuvien vaikutuksien kautta.

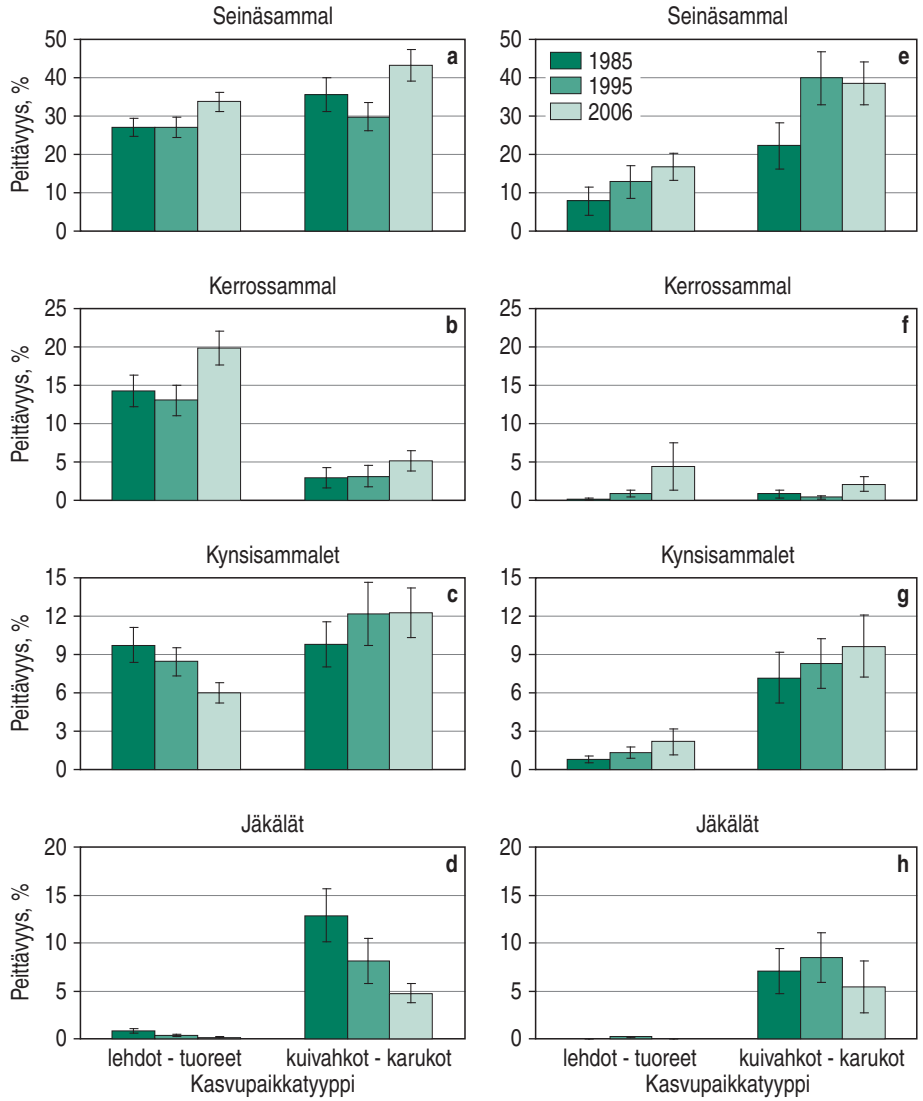
Uudistushakkuu ja sen yhteydessä tehtävä maanpinnan käsittely aiheuttavat suuria muutoksia ympäristötekijöissä. Valon määrä lisääntyy ja maaperän lämpö- ja kosteusolot muuttuvat. Ravinteita vapautuu sekä humuskerroksesta että hakkuutähteestä. Koska puusto ei ole kilpailemassa ravinteista, aluskasvillisuuden käytössä on lyhyen aikaa runsaammat ravinnevarat kuin sulkeutuneessa metsässä. Kasvillisuustutkimuksen mukaan uudistushakatuissa metsissä tapahtuneet kasvillisuusmuutokset muistuttavat luontaisen sukkession kehityskulkua heinien ja ruohojen lajimäärien ja peittävyyksien lisääntyessä ja varvikoiden peittävyyden romahtaessa (Kuva 2.4.5, e-h; Taulukko 2.4.1). Kahdenkymmenen vuoden kuluessa hakkuusta heinien ja ruohojen peittävyydet alkoivat uudelleen vähetä kasvavan puuston aiheuttaman varjostuksen ja muiden lajiryhmien aiheuttaman kilpailupaineen lisääntyessä, mutta lajimäärät olivat tässä vaiheessa edelleen suuremmat kuin varttuneissa metsissä (Kuva 2.4.5, e-h; Taulukko 2.4.1).

Taulukko 2.4.1. Puiden ja pensaiden alle 50 cm korkeiden taimien, varpujen, heinien ja ruohojen keskimääräiset lajilukumäärät ja sammalten ja jäkälien lajiryhmien lukumäärät hakkaamattomilla ja uudistushakatuilla koealoilla 4 x 2 m^2 pinta-alalla vuosina 1985–86, 1995 ja 2006. Luokka lehdot – tuoreet sisältää lehdot, lehtomaiset ja tuoreet kankaat, luokkaan kuivahkot – karukot kuuluvat kuivahkot, kuivat ja karukkokankaat.

		n	Taimet	Varvut	Heinät	Ruohot	Sammalet	Jäkälät
Hakkaamattomat yli 55 v. koealat								
Lehdot – tuoreet	1985–1986	67	1.58	3.66	2.15	3.97	8.7	1.04
	1995	67	1.37	3.46	2.21	3.9	9.46	0.96
	2006	67	1.52	3.51	2.1	3.63	8.93	0.75
Kuivahkot – karukot	1985–1986	33	0.79	4.36	1.03	0.67	6.91	3.27
	1995	33	0.88	4.33	0.76	0.42	7.06	3.06
	2006	33	1.12	4.42	0.91	0.55	7.21	2.82
Vuosina 1975–1985 uudistushakatut koealat								
Lehdot – tuoreet	1985–1986	14	3.29	2.64	4.57	8.07	7.50	0.07
	1995	14	2.79	2.86	4.64	8.57	9.00	0.57
	2006	14	2.50	2.79	4.29	7.71	8.07	0.29
Kuivahkot – karukot	1985–1986	13	2.54	3.69	2.00	1.46	7.54	2.62
	1995	13	1.62	3.92	2.00	1.00	7.08	3.23
	2006	13	1.69	4.08	2.00	1.38	7.77	2.69

Ohutlehtisenä varjoisten metsien kasvina mustikka kärsii kuivuudesta ja auringonpaahteesta enemmän kuin nahkealehtinen puolukka. Mustikan peittävyys oli tuoreissa metsissä 20 vuotta uudistushakkuun jälkeen vain neljäsosan varttuneiden metsien tasosta (Kuva 2.4.5, e-h). Puolukan peittävyys sen sijaan palautui lähelle hakkuuta edeltävää tasoa jo 20 vuoden kuluessa. Molemmilla varpulajeilla maavarret vaurioituvat uudistusalojen maanmuokkauksissa. Kestää kymmeniä vuosia ennen kuin niiden maanalainen biomassa saavuttaa vanhan metsän mittasuhteet.

Myös sammalet ja jäkälät vähentyivät voimakkaasti uudistushakkuun jälkeen. Tuoreiden kasvupaikkojen sammallajit ovat kärsineet hakkuista enemmän kuin kuivien (Kuva 2.4.6, e-h). Sammalten lajimäärät saattavat jopa hieman lisääntyä pioneerilajien löytäessä kasvupaikkoja hakkuuaukeiden paljastuneelta kivennäismaalta (Taulukko 2.4.1). Erityisesti jäkälille uudistushakkuut ovat kohtalokkaita, ja ne toipuvat hitaasti maanpinnan rikkoutumisesta ja mekaanisista vaurioista.



Kuva 2.4.6. Seinäsammalen, kerrossammalen, kynsisammalten ja jäkälien keskimääräiset peittävyydet yli 55-vuotiailla hakkaamattomilla (ei hakkuita jaksolla 1975–2006, Kuvat a-d) ja v. 1975–1985 uudistushakatuilla koealoilla vuosina 1985–1986, 1995 ja 2006 (Kuvat e-h). Luokka ”lehdot – tuoreet” sisältää lehdot, lehtomaiset kankaat ja tuoreet kankaat (n = 67 hakkaamattomilla ja n=14 uudistushakatuilla koealoilla). Luokka ”kuivahkot – karukot” sisältää kuivahkot, kuivat ja karukkokankaat (n=33 hakkaamattomilla ja n=13 uudistushakatuilla koealoilla).

Kaikki havumetsien kenttäkerroksen valtalajit ovat pitkäikäisiä ja pääasiassa kasvullisesti leviäviä kloonikasveja. Näillä lajeilla on laajat ekologiset sietoalueet, minkä vuoksi ne eivät ole kovin herkkiä ympäristömuutoksille. Pohjakerroksen sammalet ja jäkälät reagoivat herkemmin ympäristötekijöiden muutoksiin, ja esimerkiksi sade ja sen mukana latvustosta huuhtoutuvat ravinteet säätelevät niiden runsautta. Sulkeutuneessa metsässä on vähän vapaita ekolokeroita, joihin tulokaslajit voisivat levitä. Erilaiset metsän sukkessiokehitykseen liittyvät häiriöt saattavat kuitenkin muuttaa tilannetta. Myrskyt, puiden kuolleisuutta lisäävät taudit ja hyönteistuhot sekä metsänhoidossa luodut isot aukot mahdollistavat uusien lajien leviämisen. Voidaankin ennustaa, että runsaasti siemeniä tai itiöitä tuottavat eteläiset pioneerilajit ovat ensimmäisiä ilmaston muuttuessa pohjoiseen levittäytyviä lajeja. Jos uudet lajit onnistuvat valtaamaan itselleen kasvutilaa, seurauksena saattaa olla kokonaan uudenlaisten kasviyhteisöjen kehittyminen.

Kasvilajien leviäminen ja kasvillisuusvyöhykkeiden siirtyminen pohjoiseen riippuu kuitenkin myös mm. pH:n ja ravinnemäärien kehittymisestä metsämaan luontaisessa sukkessiossa. Metsämaan orgaaninen kerros kehittyy metsäkasvillisuuden ja puuston tuottamasta karikkeesta hitaasti ja maannostuminen vie vielä enemmän aikaa, joten metsämaa asettaa rajat aluskasvillisuuden ja puuston muutoksen nopeudelle.

Hakkuista johtuvat aluskasvillisuuden muutokset ovat niin suuria, että myös muuttuvassa ilmastossa metsien käsittely tulee mitä todennäköisimmin olemaan vaikutuksiltaan huomattavin kasvillisuutta muokkaava tekijä. Energiapuun korjuu, erityisesti kantojen poisto, rikkoo humuskerrosta ja tuhoaa tehokkaasti hakkuualalla vanhastaan olevaa kasvillisuutta. Tällöin siemenpankin ja muualta tulleiden leviäimien osuus uuden kasvillisuuden synnyssä kasvaa. Kivennäismaan paljastuminen korjuun ja muokkauksen seurauksena suosii pioneerilajeja. Toisaalta myös varttuneiden metsien lajeille sopivat mikroympäristöt, kuten hakkuutähdekasojen vierukset ja kantojen tyvet, vähenevät. Hakkuutähteen korjuu myös köyhdyttää maata, mikä vähentää varsinkin typensuosijalajien kasvua ja muuttaa lajien keskinäisiä suhteita. Esimerkiksi vadelma- ja maitohorsmakasvustot saattavat olla tuoreilla ja viljavilla kasvupaikoilla hakkutähteiden poiston seurauksena selvästi vähemmän peittäviä, kuin jos hakkuutähteet olisi jätetty kasvupaikalle. Sama vaikutus nähtäneen myös heinien peittävyyksissä. Näin muille lajeille jää enemmän kasvutilaa. Usein hyötyjinä ovat karumpia kasvupaikkoja suosivat lajit. Vaikutus lienee sitä voimakkaampaa mitä useammissa peräkkäisissä kierroissa energiapuun korjuuta tehdään.

Lisää tuloksia aluskasvillisuuden muutoksista eri tavoin käsitellyissä metsissä on artikkelissa ”Changes of understorey vegetation in Finland in 1985-2006” (Tonteri ym. 2013).

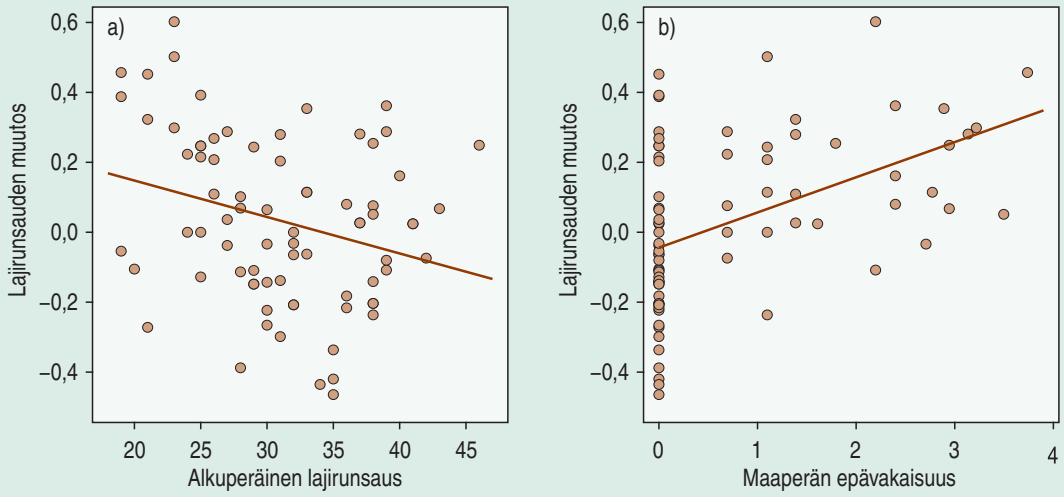
Arktisten alueiden kasvillisuus – karua ja muutosherkkää? Tutkimustietoa Enontekiöltä

Ilmaston muuttumisella on moninaisia vaikutuksia kasvilajien keskinäisiin suhteisiin, kasvillisuuden dynamiikkaan ja yhteisörakenteeseen. Joidenkin teorioiden mukaan ilmaston lämpeneminen näkyisi herkimmin kaikkein äärevimmissä tundraekosysteemeissä (Tilman 1988), joissa lämpenemisen ja sadannan ennustetaan kasvavan eniten (IPCC 2007, Jylhä ym. 2009). Aihetta tarkasteltiin Luoteis-Enontekiöllä vuosina 1982 ja 2008 tehdyissä kasvillisuustutkimuksissa (Mikkola ja Sepponen 1986; Virtanen ym. 2010). Säätilastojen mukaan Luoteis-Lapin lämpötila ja sadanta kasvoivat tutkimusjakson aikana, lämpösumma noin 100 d.d. yksikköä ja vuotuinen sadanta noin sata millimetriä.

Luoteis-Enontekiö sijaitsee mantereisen ja mereisen ilmastovyöhykkeen vaihettumisvyöhykkeessä ja rajautuu lännessä kallioperältään kalkkipitoisista kivilajeista koostuvaan Kölin vuoristoon, idempänä mantereisempaan metsien ja soiden mosaiikkiin. Alueen vallitseva puulaji on tunturikoivu (Betula pubescens ssp. czerepanovii). Metsänraja yltää 600–650 metriin ja on siten muuhun Lappiin verrattuna selvästi ylempänä.

Kasvillisuusanalyysien mukaan kasviyhteisöjen muutoksiin vaikutti kasvupaikan rehevyys ja lajirunsaus sekä kasviyhteisön toiminnallinen rakenne. Lajimäärä lisääntyi häiriöherkillä vyörysora-alueilla, mutta runsaslajisilla alueilla pysyi ennallaan tai taantui hieman. Kaikkein rehevimmillä kohteilla vahvat kilpailijat ja stressinsietoiset vahvat kilpailijat menestyivät, kuivahkoilla paikoilla tietyt heinät, kuten metsälauha runsastuivat. Yleensä rehevillä kasvupaikoilla ruohojen määrä lisääntyi. Tulosten tulkintaan toi oman lisänsä tunturimittarin *(Epirrita autumnata)* aiheuttama tuho vuosina 2004–2005. Tällöin tunturimittarin toukat söivät alueen koivikot paljaaksi niin, että koivuihin ei juuri jäänyt vihreää biomassaa. Toukkien ulosteet toimivat typpilannoitteena, ja seurauksena oli heinämäisten kasvien ja ruohojen huomattava lisäys paljaaksi syöntiä seuranneina kasvukausina. Tällä maaperän ravinnetasapainon heilahduksella on voinut olla vaikutuksia lajien runsaussuhteisiin vuoden 2008 kasvillisuustutkimuksessa heinien ja ruohojen osalta.

Tutkimustulokset Enontekiöltä tukevat hypoteesia, että erilaisten häiriöiden (tässä tutkimuksessa säätekijät, bioottinen tuho) seurauksena kasvilajiston monimuotoisuus karuilla kasvupaikoilla kasvaa. Tämä johtunee siitä, että kasviyhteisöjen kyky puolustautua uusia lajeja vastaan on karuilla kasvupaikoilla heikompi kuin rehevillä, joilla muutosherkkyys on vähäinen. Tuloksien mukaan kasvillisuusmuutokset näissä pohjoisissa olosuhteissa jäivät kuitenkin kohtuullisiksi. Oletettavaa myös on, että ilmastonmuutoksesta aiheutuvat kasvillisuusmuutokset ovat suurempia ja nopeampia kasvun kannalta suotuisemmilla alueilla, joissa monet tekijät vaikuttavat kasviyhteisöjen vakauteen.



Kuva 2.4.7. Lajiston monimuotoisuudessa Enontekiöllä 26 vuoden aikana tapahtuneet muutokset suhteessa alkuperäiseen (1982–83) monimuotoisuuteen (a) ja geomorfologisen häiriön määrään eli maaperän epävakaisuuteen (b). Lajimäärän (SR) muutos = [ln(SR 2008/SR 1982)]; geomorfologinen häiriö = [ln (geomorfologinen häiriöindeksi)]. (Virtanen ym. 2010)

2.4.3 Näkökulmia metsäpuiden ja –kasvillisuuden sopeutumiseen tulevaisuudessa

Kuivuus ja tulva – riskejä metsien kasvulle

Sadanta jakautuu subarktisessa vyöhykkeessä ja Itämeren ympäristön maa-alueilla varsin tasaisesti eri vuodenaikojen välillä (Castro ym. 2007). Kuitenkin myös näissä ympäristöissä koetaan ajoittain sään ääri-ilmiöitä, kuten rankkasateita ja pitkiä kuivuusjaksoja ja lumipeitteen nopeasta sulamisesta johtuvia tulvia, jotka voivat vaikuttaa metsien kasvuun. Säätilastojen valossa voimakkaan rankkasateen (>240 mm/vrk) todennäköisyys Suomessa on kerran kymmenessä vuodessa. Lounais-Suomessa pitkäkestoinen, yli 75 vrk kestävä ja kasvukauteen ajoittuva kuivuus, jolloin sadanta on alle 50 mm, sattuu kerran 10 vuodessa (Venäläinen ym. 2009).

Kuivuuden siedossa on suuria puulajien sisäisiä ja välisiä eroja. Sopeutumisen edellytyksenä on, että juuristo kykenee ottamaan maasta vettä ja että puut pystyvät säätelemään tehokkaasti lehtien kautta tapahtuvaa haihduntaa, jolloin veden kuljetus johtosolukoissa ei pääse katkeamaan (Bréda ym. 2006). Sopeutumisen kannalta onkin tärkeää pystyä tunnistamaan ominaisuuksia, jotka edistävät kuivuuden sietoa. Näitä ominaisuuksia pitäisi kyetä hyödyntämään metsäpuiden jalostuksessa (Street ym. 2006).

Suomessa kuivuus ja siitä aiheutuva metsien kasvun heikkeneminen on erityisesti Etelä-Suomen ongelma. Pohjois-Suomessa kuivuus ei rajoita metsien kasvua, vaan siellä kasvu määräytyy pääasiassa heinäkuun lämpötilan mukaan. Etelä-Suomessa puolestaan kesä-heinäkuun sadanta yhdessä lämpötilan kanssa selittävät kuusen vuotuista kasvuvaihtelua (Henttonen 1990, Mäkinen ym. 2001). Muuttuvassa ilmastossa malliennusteiden perusteella kaikkien pääpuulajiemme kasvun arvioidaankin lisääntyvän Pohjois-Suomessa kuluvan vuosisadan loppua kohti puulajista riippuen 11–22 %. Etelä-Suomessa kasvuvaikutukset puolestaan ovat puulajikohtaiset, kuusen kasvun taantuessa ja koivun ja männyn kasvun lisääntyessä (Ge ym. 2011a, 2011b).

Puulajeistamme kuusi on erityisen altis kuivuudelle, koska sen juurista noin 70 % kasvaa maan pintakerroksessa 10 cm:n sisällä maanpinnasta (Jyske ym. 2010). Kuivuuden vaikutus kumuloituu kuivuusajan pidetessä ja näkyy kasvun asteittaisena heikentymisenä, viiveellä havaittavana kuolemisena ja sekundaaristen tuhonaiheuttajien (tuhohyönteiset/patogeenisienet) aiheuttamina tuhoina. Kuivuudesta aiheutuvat kasvutappiot voivat olla suuret. Isoilla puilla tehdyssä altistuskokeessa ankara kuivuus on hidastanut kuusen pituuskasvua 20–30 % ja läpimitan kasvua 10–20 % (Jyske ym. 2010).

Sadantavaihtelut vaikuttavat myös männyn kasvuun Etelä-Suomessa. Vaikutukset ovat kasvupaikkakohtaisia ja riippuvat maaperän vedenpidätysominaisuuksista. Hyvillä kasvupaikoilla veden saatavuus ei ole yleensä männyn osalta ongelma, ja kasvu selittyy pääasiallisesti ilman lämpötilan perusteella. Kuivahkoilla kankailla männyn kasvu heikentyy alkukesän pitkäaikaisten lämpö- ja kuivuusjaksojen pidetessä. Kuivilla, kallioisilla kasvupaikoilla männyn kasvu määräytyy alkuvuoden sademäärän perusteella ja niillä kuivuus heikentää kasvua. Kuivuusvaikutus voimistuu hellepäivien (>25 ^{o}C) lukumäärän lisääntyessä (Vapaavuori ym. 2010). Tällaiset ankarat kasvuolosuhteet mm. kesien 2006 ja 2010 aikana näkyivät kuivilla paikoilla Etelä-Suomen metsissä ennenaikaisena neulasten ja lehtien tippumisena sekä puiden kuolemisena.

Puulajeistamme koivu on metsien pioneerilaji, jonka on ennustettu hyötyvän ilmastonmuutoksesta. Tätä näkemystä tukevat myös tuoreet kasvumalleilla saadut ennusteet, joiden mukaan koivu

näyttäisi sopeutuvan hyvin muuttuviin olosuhtesiin (Ge ym. 2011a). Erilaisilta kasvupaikoilta kerätyllä ja kloonatulla rauduskoivumateriaalilla on havaittu genotyyppien välisiä rakenteellisia ja toiminnallisia eroja, joiden oletetaan edistävän lajin sopeutumista erilaisiin ja muuttuviin ilmastoolohin (Aspelmeier ja Leuschner 2004, 2006). Kenttätutkimusten mukaan hiilidioksidipitoisuuden lisäys (Riikonen ym. 2005) ja lämpötilan nosto viivästyttävät rauduskoivun ja haavan (Mäenpää ym. 2011) lehtien kellastumista ja tippumista syksyllä. Nämä tutkimustulokset viittaisivat siihen, että koivupopulaatioissa on sopeutumiskykyä ja että koivu pystyisi hyötymään muuttuvasta ilmastosta, ainakin tietyissä rajoissa.

Ilmastoennusteiden mukaan pohjoisilla leveysasteilla erityisesti talviaikainen sadanta tulee lisääntymään, mikä voi lisätä **talvitulvien** riskiä (Jylhä ym. 2009). Tulvia voi syntyä talvella myös toistuvien lumen ja maan sulamisjaksojen ja keväällä lumen nopean sulamisen seurauksena. Tulva tai korkealle noussut pohjavesi alentavat maaperän happipitoisuutta, jolloin puiden juuriin syntyy happivaje eli hypoksia. Hypoksia haittaa pitkittyessään puiden elintoimintoja, vähentää kasvua ja pahimmillaan tappaa kasvin. Siementen itävyys voi heikentyä hapettomissa oloissa. Juurten vahingoittumisen myötä kasvien veden ja ravinteiden kuljetus huononee. Myös mykorritsasymbioosi voi kärsiä, mutta sienilajistolla näyttäisi olevan eroja tulvankestävyyden suhteen (Stenström 1991). Hapettomissa oloissa maan mikrobitoiminta ja ravinnekierto häiriintyvät ja maan rakenteelliset ominaisuudet voivat muuttua (Armbruster ym. 2006).

Mänty, kuusi, rauduskoivu ja euroopanlehtikuusi eivät ole kovin hyvin tulvaa kestäviä lajeja, mutta monet pajulajit ja lepät ovat tulvankestäviä (Glenz 2006) ja myös hieskoivu sietää kasvualustan märkyyttä ja hapettomuutta (Paavilainen 1966). Tulva voi altistaa kasvit muille vauriotekijöille, kuten sienitaudeille (Armbruster ym. 2006). Saksalaisessa tutkimuksessa todettiin edellisen vuoden tulvan lisäävän rauduskoivun taimien hallavaurioita alkukesällä (Frye ja Grozze 1992).

Keväällä ennen kasvuun lähtöä puiden juurten joutuminen lyhyeksi aikaa veden alle ei yleensä ole haitallinen. Täysikasvuiset puut kestävät tulvaa yleensä paremmin kuin taimet, jotka voivat peittyä kokonaan veden alle. Puiden selviytymiskeinoina tulvaoloissa voivat olla rakenteelliset, hapen saatavuutta ja kulkeutumista solukoissa edistävät muutokset, kuten korkkihuokosten, jälkijuurten tai tuuletussolukon muodostuminen (Glenz ym. 2006). Kasvien fysiologinen sopeutuma on energian tuottaminen hapettomissa oloissa käymisen avulla, mutta tällöin kasviin voi kertyä haitallisia yhdisteitä.

Tulvan, maan pintaan syntyvän jääkerroksen ja pohjaveden pinnan nousun seurauksena maan ilmanvaihto heikkenee. Yleisesti arvellaan, että puut ovat alttiimpia tulvan haittavaikutuksille kasvukaudella kuin lepotilassa talvella, jolloin kasvien hapenkulutuskin on alhaisempi (Crawford 2003). Pohjoisten puulajien hypoksiakestävyyden vuodenaikaisvaihtelua on tutkittu suhteellisen vähän. 1970-luvulla tutkittiin patoamiskokeissa korkean pohjaveden vaikutuksia männyn menestymiseen (Pelkonen 1975) sekä tehtiin upotuskokeita männyn ja kuusen taimilla (Pelkonen 1979). Muutaman viikon kestänyt upotus oli haitallisin juurten voimakkaimman kasvun aikana ja loppukesällä. Kuusen sietokyky oli mäntyä huonompi kasvukauden aikaiselle tulvitukselle (Pelkonen 1979). Talvella, virtaavaan veteen upotettuina männyn ja kuusen taimet kestivät juuriston veden alla olemista melko hyvin. Juuripaakkujen jäätyminen talviseen tulvaan yhdistettynä oli männylle kuitenkin haitallista. Keväällä ja alkukesällä korkealla oleva pohjavesi voi olla hyödyksi silloin, kun alkukesä on kuiva ja lämmin (Pelkonen 1975). Kun arvioidaan ilmastomuutoksen seurauksena mahdollisesti lisääntyvien tulvien vaikutuksia puiden kasvuun, avainkysymys lienee tulvien esiintymisajankohta suhteessa puiden vuosisykliin sekä juurten ja maanpäällisten kasvinosien elintoimintojen vilkkauteen. Juurten happivajeesta aiheutuva vaurioriski oletettavasti lisääntyy suhteellisen nopeasti juurten elintoimintojen vilkastuessa.

Maaperän routaantuminen muuttuu – vaikutuksia puiden juuristoon?

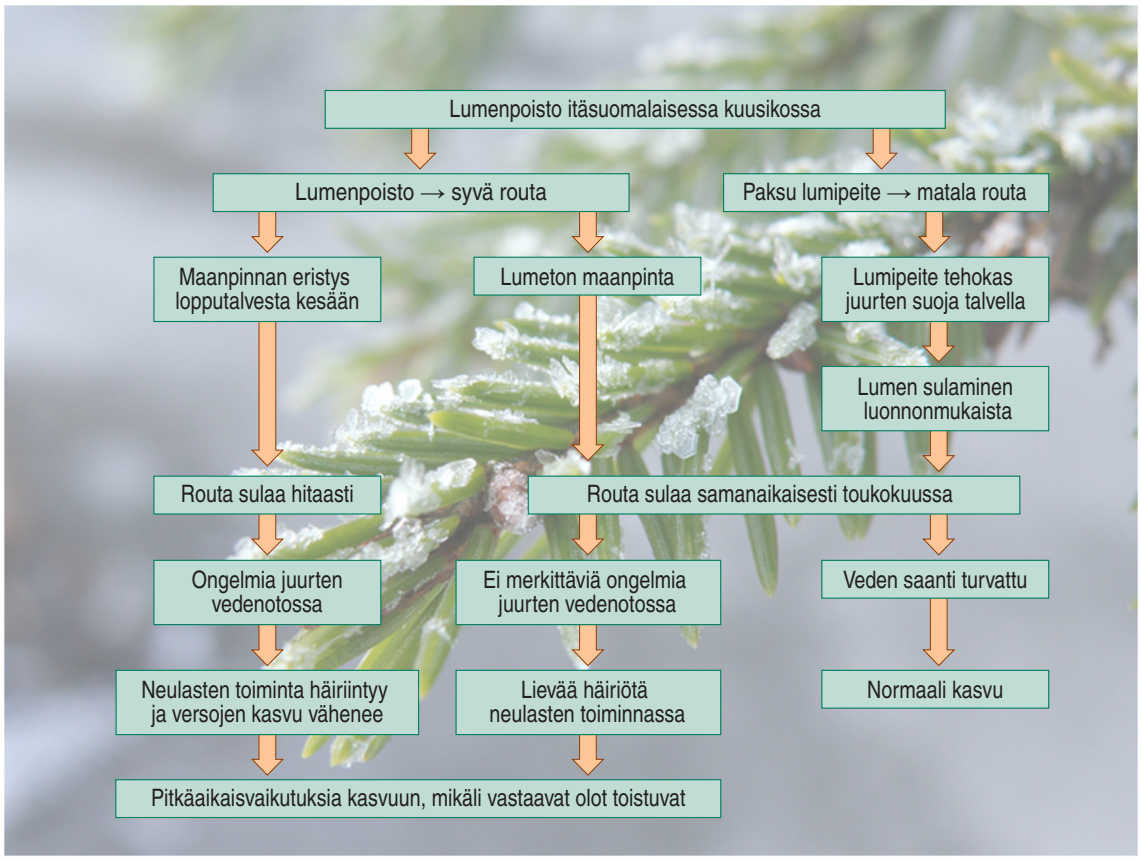
Tietämys puiden maanalaisten osien sopeutumisesta vuodenaikojen vaihteluun on huomattavasti maanpäällisiä kasvinosia vähäisempää. Maan lämpötila ja routaantuminen ovat kiinteästi sidoksissa lumipeitteen esiintymiseen. Ilmastomalliennusteiden mukaan lämpeneminen on suurin talvella, jolloin myös sadannan ennustetaan lisääntyvän ja tulevan enenevässä määrin vetenä (Jylhä ym. 2009). Tämä merkitsisi lumikerroksen ohenemista, roudan syvyyden ja maan sulamis- ja jäätymissyklien määrään muutoksia. Mallisimulointien mukaan roudan ennustetaan ohenevan Etelä-Suomessa vuosisadan loppua kohden (Kellomäki ym. 2010). Pohjois-Suomessa routaisuus puolestaan lisääntyisi vuosisadan puolivälin tienoilla, mikä johtuisi nimenomaan lumipeitteen ohenemisesta.

Routa on ilman lämpösummakertymän jälkeen merkittävin pohjoisten metsien vuotuista kasvua selittävä ilmastotekijä (Solantie 2003). Routa syntyy, kun maavesi jäätyy. Jäätymisen seurauksena maa kuivuu, ja siitä aiheutuva stressi kohdistuu maaperäorganismeihin. Vedellä on suuri lämpökapasiteetti, ja siksi lumettomana aikana kestää useita viikkoja, ennen kuin maan lämpötila laskee alle nollan, vaikka ilman lämpötila olisikin pakkasen puolella. Tämä on merkittävä juurten suojamekanismi loppusyksyllä ja talvella. Alhaisesta lämpötilasta aiheutuva stressi syntyy, kun maassa oleva vesi on pääosin jäätynyt ja maan lämpötila laskee nollan alapuolelle. Koska juuret ovat boreaalisessa vyöhykkeessä pakkaskeston suhteen puiden herkimmät osat, lämpötilan nopea aleneminen voi aiheuttaa hienojuurten vaurioitumisen (Cleavitt ym. 2008). Tämä koskee erityisesti kuusta, jonka juuristosta valtaosa on maan pintakerroksessa.

Tulevaisuudessa juuristovaurioiden riski lisääntyy alueilla, joilla lumipeite ohenee ja routaa esiintyy nykyilmastoa enemmän. Vaurioriski on suurin puulajeilla, joilla on pinnallinen juuristo. Muutamissa tutkimuksissa on havaittu, että puu pystyy korjaamaan talviaikana syntyneitä juuristovaurioita jo kasvukauden alkupuolella tuottamalla uusia juuria vaurioituneiden tilalle (Tierney ym. 2001, Gaul ym. 2008). Korjausprosessit kuluttavat energiavarastoja, jotka puu normaalisti käyttäisi muuhun kasvuun. Tutkimustulokset myös osoittavat, että mykorritsat eli sienirihmaston kanssa symbioosissa kasvavat juuret eivät paranna juuriston (Korhonen ym., julkaisematon tieto) eivätkä neulasten pakkaskestävyyttä. Sienirihmastot sinänsä voivat laboratoriokokeiden perusteella kestää jopa -30 ^{o}C lämpötiloja, joskin niiden kasvu heikkenee alhaisissa lämpötiloissa (Lehto ym. 2008).

Juurten ja maanpäällisten kasvinosien elintoiminnot ovat kiinteässä yhteydessä toisiinsa. Toisin kuin maanpäällisillä osilla, joilla kasvuvaihe ja lepovaihe vuorottelevat, juurilla ei nykytietämyksen mukaan ole varsinaista lepotilaa. Juurten kasvukyky siis säilyy ympäri vuoden, joskin kasvun määrä riippuu käytettävissä olevista resursseista. Maan lämpötila ja routaisuus vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti kasvuprosessit keväällä käynnistyvät. Jos maa ei jäädy talvella tai se sulaa ja lämpenee aikaisin keväällä, juurten veden ja ravinteiden otto helpottuvat, kun haihdunta keväällä lisääntyy valaistuksen ja lämpötilan kohoamisen myötä. Tällainen tilanne olisi puiden kasvun käynnistymisen kannalta suotuisa. Jos maa jäätyy talven aikana, sulaminen keväällä vie aikansa, minkä vuoksi juuret eivät kykene veden ottoon kylmästä, osittain sulaneesta maasta. Kuusilla tehdyssä maastokokeessa, jossa lumi poistettiin talvella ja maanpinta eristettiin keväällä roudan sulamisen hidastamiseksi, havaittiin useita muutoksia puiden elintoiminnoissa ja kasvussa. Ääritilanteissa silmun puhkeaminen ja rungon paksuuskasvun käynnistyminen viivästyivät, silmuissa havaittiin epämuodostumia ja neulasten tärkkelysaineenvaihdunnassa tapahtui muutoksia (Repo ym. 2009, 2011, Jyske ym. 2012). Talviolosuhteista riippuen vuosien välillä oli eroja, ja puiden vasteet olivat selvemmät kylmemmän kuin lauhemman talven jälkeen.

Talviaikaiset paukkupakkaset tuskin häviävät pohjoisilta leveysasteilta eli routaa tulee esiintymään myös tulevaisuudessa. On kuitenkin oletettavaa, että routaoloissa tapahtuu muutoksia. Roudan väheneminen vaikeuttaa puiden korjuuta ja lisää korjuusta aiheutuvia juuristovaurioita. Niiden seurauksena juurten kautta leviävät sienitaudit lisääntyvät. Juurivaurioiden korjaamiseen kuluu energiaresursseja. Roudan väheneminen altistaa puut myös myrskytuhoriskeille. Puiden kasvun kannalta roudan vähenemisellä on nähtävissä lähinnä positiivisia vaikutuksia. Roudan lisääntyminen ja sen myötä maan hidas lämpeneminen keväällä voi hidastaa jonkin verran kasvukauden käynnistymistä ja johtaa muutoksiin kasvuresurssien jakautumisessa juurten ja verson välillä. On myös oletettavaa, että roudan vaikutukset ovat voimakkaampia, mikäli maa routaantuu voimakkaasti useina peräkkäisinä vuosina. Toisaalta roudalla näyttää olevan puiden kasvun kannalta myös positiivisia vaikutuksia. Kasvukammiokokeissa maan jäätyminen lepokauden aikana aikaisti keväällä männyn ja rauduskoivun silmujen puhkeamista sulana pidettyihin taimiin verrattuna, mikäli maa oli sulanut riittävän ajoissa (Roitto ym., julkaisematon tieto). (Kuva 2.4.8)



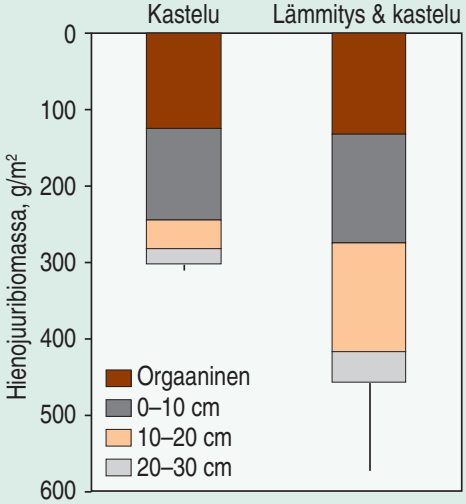
Kuva 2.4.8. Ilmastonmuutos voi ohentaa lumipeitteen paksuutta ja siten lisätä maan routaantumista, mikäli talvipakkasia edelleen esiintyy. Kuvassa esitetään, miten maastokokeessa toteutetut käsittelyt (lumenpoisto ja maanpinnan eristäminen) vaikuttivat maan routaantumiseen ja roudan sulamisajankohtaan, ja miten nämä tekijät vaikuttivat kuusen neulasiin ja versoihin.

Maaperän lämpeneminen muuttaa puiden hienojuuridynamiikkaa

Ilmakehän lämpeneminen lämmittää myös maaperää. Maaperän lämpenemisen vaikutuksia metsämaiden ravinteiden ja hiilen kiertoihin on tutkittu sekä laboratorio- että maastokokeissa (Rustad ym. 2001, Niinistö ym. 2004). Tutkimukset ovat olleet pääasiallisesti lyhytkestoisia ja niissä on kohotettu maaperän lämpötilaa muutamia asteita eri pituisina ajanjaksoina. Tutkimustulosten mukaan lämpeneminen muuttaa maaperäprosesseja merkittävästi, mm. maahengitys vilkastuu, mineralisaatio lisääntyy ja esimerkiksi metsämaissa kasvua rajoittavan typen saatavuus paranee. Vaikutukset ovat näkyneet myös maanpäällisen biomassan ja runkopuun tuotoksen kasvuna (Jarvis ja Linder 2000). Pitkäkestoisia lämmityskokeita puolestaan on tehty vähän, mutta ne ovat arvokkaita, sillä maaperän lämpenemisen pitkäaikaisvaikutukset saattavat poiketa merkittävästi lyhytaikaisvaikutuksista.

Pohjois-Ruotsissa Flakalidenin tutkimusalueella sijaitseva Ruotsin maatalousyliopiston (SLU) maaperän lämmityskoe on ainutlaatuinen boreaalisella vyöhykkeellä ja toiseksi vanhin koko maailmassa. Kuusimetsässä toteutettu maaperän lämmityskoe aloitettiin vuonna 1995 (Bergh ja Linder 1999). Humuskerroksen alle upotetut lämmityskaapelit kohottavat maaperän lämpötilaa viisi astetta normaaliin verrattuna. Lämmitys kytketään päälle huhtikuussa noin kuukautta ennen lumen sulamista ja lopetetaan syksyllä marras-joulukuun vaihteessa. Koeasetelman tavoitteena on pidentää vuosittaista kasvukautta noin kahdella kuukaudella. Kaikkia koealoja myös kastellaan lämmityksestä aiheutuvan kuivumisen ehkäisemiseksi.

Tutkimuksessamme selvitimme, miten maaperän pitkäaikainen lämmitys Flakalidenin kokeessa vaikuttaa kuusen hienojuurten biomassan määrään sekä elinikään. Läpimitaltaan alle 2 mm hienojuuret mykorritsoineen ovat kasvun kannalta tärkeitä, koska ne vastaavat puun veden ja ravinteiden otosta. Hienojuurten kasvua ja elinikää tutkittiin miniritsotronimenetelmällä, jossa maahan upotetuista läpinäkyvistä sylintereistä käsin seurataan videokuvauksin juuriston kasvudynamiikkaa. Tulosten mukaan lämmitys lisää hienojuurten kokonaisbiomassaa, etenkin syvemmissä kivennäismaakerroksissa (Kuva 2.4.9), mikä parantaa puun ravinteiden- ja vedenottomahdollisuuksia (Leppälammi-Kujansuu ym. 2012, käsikirjoitus). Toisaalta elinikäanalyysin mukaan lämmitetyillä aloilla hienojuuret kuolevat nopeammin. Näin ollen yhteytyksessä sidottua hiiltä ohjautuu juurten kautta maahan enemmän lämmitetyillä kuin lämmittämättömillä aloilla. Hiilen varastoituminen maaperään riippuu kuitenkin useista tekijöistä, kuten ravinteiden saatavuudesta ja siitä, paljonko hajotus kiihtyy maaperän lämmetessä. Aihetta tutkitaan parhaillaan eri puolilla maailmaa, sillä hienojuuridynamiikassa tapahtuvien muutosten vaikutukset maaperän hiilitaseisiin riippuvat ympäristötekijöiden lisäksi myös puulajista ja kasvupaikasta.



Kuva 2.4.9. Hienojuuribiomassa (g/m^2) eri metsämaakerroksissa (orgaaninen ja kivennäismaa) Flakalidenin kokeella 15 vuoden lämmityskäsittelyn jälkeen, jossa maan lämpötilaa kohotettiin keskimäärin 5 °C kevään, kesän ja syksyn aikana. Tulokset ovat kahden toiston keskiarvoja (+ keskiarvon keskivirhe).

Metsänjalostuksen mahdollisuudet ilmastonmuutokseen varautumisessa

Ilmastonmuutos on metsäpuille haasteellinen sen ennustetun nopeuden takia. Puiden pitkäikäisyydestä, varttuneiden puuyksilöiden hyvästä mukautumiskyvystä ja alhaisesta kuolleisuudesta johtuen luonnonmetsät voivat toimia sopeutumisen jarruna, koska kasvupaikkoja vapautuu uusiin olosuhteisiin kelpoisemmille genotyypeille hitaammin kuin olisi sopeutumisen kannalta optimaalista (Savolainen ym. 2004, Kuparinen ym. 2010). Tästä johtuen luonnonpopulaatioiden sopeutuminen muutoksiin voi viivästyä. Sopeutumiskeinoksi on ehdotettu vanhojen puustojen uusiutumisen edistämistä (Kuparinen ym. 2010).

Ilmastonmuutokseen varautuminen onkin asetettu metsänjalostusstrategioissa yhdeksi keskeisimmistä tavoitteista (Haapanen ja Mikola 2008, Rosvall 2011). Metsänjalostus perustuu luonnonmetsien perimäaineksen toistuvaan seulomiseen ja sekoittamiseen valinnan, testauksen ja risteytysten avulla, josta parhaimmaksi havaittua materiaalia hyödynnetään metsänviljelyaineiston tuottamisessa. Jalostettu aineisto tuotetaan nykyisin miltei yksinomaan suvullisesti siemenviljelyksissä (Haapanen ja Mikola 2008). Siemenviljelyspuiden ristipölytyksen ja ulkoisen taustapölytyksen tuloksena syntyvä siemenviljelyssiemen sisältää valtaosan jalostuksella saavutetuista parannuksista sekä myös luonnonpopulaatioita vastaavan perinnöllisen muuntelun (Szmidt ja Muona 1985, Muona ja Harju 1989). Lisäksi siemenviljelyssiemen on vapaata useisiin ominaisuuksiin heikentävästi vaikuttavasta sukusiitosrasituksesta, jonka on esitetty olevan luonnonmetsiköissä tähän asti luultua yleisempää (Garcia-Gil ym. 2009). Metsänviljelyssä muuntelupohja voi kaventua vain kasvullisesti lisättyä aineistoa käytettäessä, mutta sellaista ei pääpuulajeillamme ole ollut juurikaan saatavilla. Muuntelupohjaltaan suppeamman klooniaineiston viljely ei sinänsä johda riskien merkittävään lisääntymiseen. Olennaisempaa on viljelyaineiston kyky mukautua ympäristötekijöihin ja niiden vaihteluun, mikä voi myös kloonatulla aineistolla olla täysin riittävä. Kloonauksen yleistyminen metsäpuilla voisi osaltaan vähentää ilmastonmuutoksiin liittyviä riskejä metsikkötasolla, koska se loisi edellytyksiä nopeatuottoisten lajikkeiden tehoviljelylle ja metsänkasvatuksen kiertoaikojen merkittävälle lyhentämiselle.

Metsäpuiden pitkästä kiertoajasta ja tulevaisuuteen liittyvistä riskeistä johtuen metsänjalostuksen ensisijaisena tavoitteena on hyvä viljelyvarmuus ja korkea tuotos erilaisissa ympäristöissä. Tehokkaan valinnan edellytyksenä on, että jalostusaineisto on testattu monivuotisissa kenttäkokeissa erilaisissa lämpö- ja valoilmastoissa useilla paikkakunnilla. Jalostusaineistojen altistaminen ilmastotekijöiden ajallisille ja paikalliselle vaihtelulle luo edellytykset seuloa esiin ne genotyypit, joiden voidaan odottaa menestyvän parhaiten muuttuvissa olosuhteissa (Haapanen ja Mikola 2008, Rosvall 2011). Viljelyvarmuutta painottavassa valinnassa on kiinnitettävä erityistä huomiota sopeutumiseen liittyviin ominaisuuksiin, joita esimerkiksi kuusella ovat kasvuunlähdön ajankohta sekä jälkikasvun, hallavaurioiden ja sienituhojen esiintyminen (Napola 2010). Muita jalostuksessa huomioitavia ominaisuuksia tulevaisuudessa ovat nopeakasvuisuus, hieno-oksaisuus, kapealatvaisuus ja kuivuuden sietokyky, jotka lyhentävät kiertoaikoja ja vähentävät myrsky-, lumituho- ja kuivuusriskejä ja siten edistävät sopeutumista.

Taimiaineistojen varhaistestauksella voidaan saada arvokasta lisätietoa esimerkiksi karaistumis- ja lepotilan purkautumisherkkyyden geneettisestä muuntelusta. Säätekijöiden äärevöityessä nämä ominaisuudet voivat muodostua tärkeäksi osaksi jalostettavaa viljelyvarmuutta. Tuoreet tutkimustulokset mm. osoittavat, että kuusi ei ehkä hyödykään lämpenevästä ilmastosta (Way ja Sage 2008, Kostiainen ym. 2009, Bronson ja Gower 2010, Riikonen ym. julkaisematon) ja myös rauduskoivu- ja haapagenotyyppien välillä on eroja lämpötila- ja hiilidioksidivasteissa (Riikonen ym. 2004, Mäenpää ym. 2011). Jotta metsänjalostuksen avulla voidaan vauhdittaa sopeutumista ja ohjata sitä

haluttuun suuntaan, tarvitaan lisää monipuolista tietoa sopeutumisen kannalta keskeisten ominaisuuksien periytyvyydestä, geneettisistä vuorovaikutussuhteista ja ympäristövasteista. Monesta erilaisesta tietolähteestä kertyvän informaation avulla on mahdollista valita jalostusmateriaaliksi muuttuvaan ilmastoon sopivia genotyyppejä, edistää perinteisin menetelmin tehtävää jalostustyötä sekä luoda edellytyksiä uusille ja tehokkaammille jalostusmenetelmille.

2.4.4 Johtopäätökset

Metsäpuiden ja metsäkasvillisuuden lisääntyminen ja kasvu muuttuvissa ilmasto-oloissa edellyttävät hyvää sopeutumiskykyä. Sopeutumista nopeuttaa geenivirta lämpimämmiltä tai kylmemmiltä alueilta tuottamalla uutta vaihtelua luonnonvalinnan materiaaliksi. Siitepölyvälitteinen geenivirta ylläpitää tuulipölytteisillä pääpuulajeillamme valmiutta sopeutua nopeisiin ympäristönmuutoksiin. Siementen kautta tapahtuva leviäminen puolestaan on hidasta ja rajoittuu yleensä vain populaatioiden lähipiiriin.

Pohjoisilla alueilla vuodenaikaisvaihtelut tulevat jatkumaan myös lämpenevässä ilmastossa. Metsäpuilla on kullakin omat vuosisyklinsä, joiden tulee olla synkronissa vuodenaikaisten säävaihteluiden kanssa, jotta sopeutuminen muutokseen on mahdollinen. Ilmaston muuttuessa synkronoituminen voi heikentyä, ja vuodenaikaisvaihteluista ja sään ääri-ilmiöistä aiheutuvat riskit voivat lisääntyä. Riskit liittyvät puiden karaistumiseen, pakkaskestävyyteen, suveentumiseen ja kuivuuden-/tulvankestävyyteen. Riskit tulee ottaa huomioon metsänhoidossa suosimalla kasvuympäristöön, etenkin valoilmastoon ja kuivuuden sietoon, parhaiten sopeutuneita puulajeja ja alkuperiä. Näin metsätaloudessa voidaan hyötyä ilmaston lämpenemisen ja kasvukauden pitenemisen positiivisista vaikutuksista lisääntyvän kasvun muodossa.

Metsäpuista kerättyjen fenologiahavaintosarjojen avulla vuosirytmiin liittyvät ilmiöt, kuten kukinnan ja silmun puhkeamisen ajoittuminen, voidaan kytkeä ilmastossa tapahtuneisiin muutoksiin. Fenologiahavaintojen perusteella on arvioitu, että puiden silmun puhkeaminen ja kukinnan alkaminen ovat aikaistuneet 3,3–11 päivällä viimeisen sadan vuoden aikana Etelä- ja Keski-Suomessa. Tämä vastaa 1,8 ^{o}C keskilämpötilan nousua kevätkuukausien aikana, mikä on samaa suuruusluokkaa kuin säätilastojen perusteella havaittu keskilämpötilan nousu viimeisen sadan vuoden aikana. Fenologiatulokset viittaavat myös siihen, että vuosirytmin muutokset voivat heikentää siemen- ja marjasatojen määrää ja laatua, metsäkasvien suvullista lisääntymistä sekä kasvilajien välisiä määrällisiä suhteita. Nämä muutokset voivat puolestaan siirtyä ravintoketjussa eteenpäin vaikuttamalla mm. sienten ja eläinten elinmahdollisuuksiin.

Ilmastonmuutoksella on vaikutuksia metsäkasvillisuuden menestymiseen ja kasvuun, jolloin yksittäisten lajien ja myös kokonaisten kasvillisuusvyöhykkeiden levinneisyysalueet voivat siirtyä. Lämpötilan nousun johdosta typen mineralisaatio metsämaassa lisääntyy ja lajit, jotka pystyvät nopeimmin hyödyntämään lisätypen kasvussaan, lisääntyvät ja saavat kilpailuetua. Tällaisia lajeja ovat heinät ja ruohot.

Metsätalous on kuitenkin huomattavin metsien rakennetta 1950-luvun jälkeen muuttanut tekijä. Intensiivisellä metsänkasvatuksella ja uudistusalojen maanmuokkauksella on ollut suuri merkitys metsien aluskasvillisuuden runsaussuhteille. Uudistushakkuu ja sen yhteydessä tehtävä maanpinnan käsittely aiheuttavat suuria muutoksia ympäristötekijöissä. Uudistushakkuun jälkeen metsissä tapahtuneet kasvillisuusmuutokset muistuttavat luontaisen sukkession kehityskulkua heinien ja ruohojen lajimäärien ja peittävyyksien lisääntyessä ja mustikka- ja puolukkavarvikoiden peittävyyden romahtaessa. Nykyisin harjoitettavalla energiapuun korjuulla on oletettavasti vielä suuremmat

vaikutukset aluskasvillisuuteen kuin perinteisillä uudistushakkuilla. Hakkuista johtuvat aluskasvillisuuden muutokset ovat niin suuria, että myös muuttuvassa ilmastossa metsien käsittely tulee olemaan mitä todennäköisimmin vaikutuksiltaan huomattavin kasvillisuutta muokkaava tekijä.

Ilmastonmuutokseen varautuminen on yksi metsänjalostuksen keskeisimmistä tavoitteista. Metsäpuiden pitkästä kiertoajasta ja tulevaisuuteen liittyvistä riskeistä johtuen metsänjalostuksen ensisijaisena tavoitteena on hyvä viljelyvarmuus ja korkea tuotos erilaisissa ympäristöissä. Jotta metsänjalostuksen avulla voidaan vauhdittaa sopeutumista ja ohjata sitä haluttuun suuntaan, tarvitaan lisää monipuolista tietoa sopeutumisen kannalta keskeisten ominaisuuksien periytyvyydestä, geneettisistä vuorovaikutussuhteista ja ympäristövasteista. Monesta erilaisesta tietolähteestä kertyvän informaation avulla on mahdollista valita jalostusmateriaaliksi muuttuvaan ilmastoon sopivia genotyyppejä, edistää perinteisin menetelmin tehtävää jalostustyötä sekä luoda edellytyksiä uusille ja tehokkaammille jalostusmenetelmille.

Kirjallisuus

Armbruster, J, Muley-Fritze, A., Pfarr, U., Rhodius, R., Siepmann-Schinker, D., Sittler, B., Trémolières, M., Rennenberg, H. & Kreuzwieser, J. (Toim.). 2006. FOWARA. Forested Water Retention Areas. Guidline for Decision Makers, Forest Managers and Land Owners, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Germany.

Aspelmeier, S. & Leuschner, C. 2004. Genotypic variation in drought response of silver birch (*Betula pendula*): leaf water status and carbon gain. Tree Physiology 24: 517–528.

– & Leuschner, C. 2006. Genotypic variation in drought response of silver birch (*Betula pendula* Roth): leaf and root morphology and carbon partitioning. Trees 20: 42–52.

Bergh, J. & Linder, S. 1999. Effects of soil warming during spring on photosynthetic recovery in boreal Norway spruce stands. Global Change Biology 5: 245–253.

Bréda, N., Huc, R., Granier, A. & Dreyer, E. 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. Annals of Forest Science 63: 625–644.

Bronson, D.R. & Gower, S.T. 2010. Ecosystem warming does not affect photosynthesis or aboveground autotrophic respiration for boreal black spruce. Tree Physiology 30: 441–449.

Castro, M., Gallardo, C., Jylhä, K. & Tuomenvirta, H. 2007. The use of a climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of nine regional climate models. Climatic Change 81: 329–341.

Cleavitt, N.C., Fahey, T.J., Groffman, P.M., Hardy, J.P., Henry, K.S. & Driscoll, C.T. 2008. Effects of soil freezing on fine roots in a northern hardwood forest. Canadian Journal of Forest Research 38: 82–91.

Crawford, R.M.M. 2003. Seasonal differences in plant responses to flooding and anoxia. Canadian Journal of Botany 81: 1224–1246.

Frye, J. & Grozze, W. 1992. Growth responses to flooding and recovery of deciduous trees. Zeitschrift für Naturforschung 47c: 683–689.

Garcia-Gil, M., Olivier, S., Kamruzzahan, S. & Waldmann, P. 2009. Joint analysis of spatial genetic structure and inbreeding in a managed population of Scots pine. Heredity 103: 90–96.

Gaul, D., Hertel, D. & Leuschner, C. 2008. Effects of experimental soil frost on the fine-root system of mature Norway spruce. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171: 690–698.

Ge, Z-M., Kellomäki, S., Peltola, H., Zhou, Z., Wang, K-Y. & Väisänen, H. 2011a. Impacts of changing climate on the productivity of Norway spruce dominant stands with a mixture of Scots pine and birch in relation to water availability in southern and northern Finland. Tree Physiology 31(3): 323–338.

– , Zhou, X., Kellomäki, S., Peltola, H. & Wang, K-Y. 2011b. Climate, canopy conductance and leaf area development controls on evapotranspiration in a boreal coniferous forest over a 10 year period: a united model assessment. Ecological Modelling 222(9): 1626–1638.

George, M.F., Burke, M.J., Pellet, H.M. & Johnson, A.G. 1974. Low temperature exotherms and woody plant distribution. Horticultural Science 9: 519–522.

Glenz, R. Schlaepfer, I. Iorgulescu & Kienast, F. 2006. Flooding tolerance of Central European tree and shrub species, Forest Ecology and Management 235: 1–13.

Granhus, A., Sundheim Fløistad, I. & Søgaard, I. 2009. Bud burst timing in Picea abies seedlings as affected by temperature during dormancy induction and mild spells during chilling. Tree Physiology 29: 497–503.

Gusta, L.V., Tyler, N.J. & Chen, T.H-H. 1983. Deep undercooling in woody taxa growing north of the -40C isotherm. Plant Physiology 72: 122–128.

Haapanen, M. & Mikola, J. 2008. Metsänjalostus 2050 – Pitkän aikavälin metsänjalostusohjelma. Metlan työraportteja/Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 71. 50 s.

Hamrick, J. 2004. Response of forest trees to global environmental changes. Forest Ecology and Management 197: 323–335.

Henttonen, H. 1990. Variation in the diameter growth of Norway spruce in southern Finland. University of Helsinki. Department of Forest Mensuration and Management. Research Notes No. 25. 88 s.

Hänninen, H., Slaney, M. & Linder, S. 2007. Dormancy release of Norway spruce under climatic warming: testing ecophysiological models of bud burst with a whole-tree chamber experiment. Tree Physiology 27: 291–300.

– & Tanino, K. 2011. Tree seasonality in a warming climate. Trends in Plant Science 16: 412–416.

IPCC 2007. Climate change 2007: The physical basis – contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averty, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), IPCC Assessment Reports. Cambridge University Press Cambridge (UK), New York (USA), 996 s.

Jarvis, P. & Linder, S. 2000. Botany: Constraints to growth of boreal forests. Nature 405: 904–905.

Johnsen, Ø. & Apeland, I. 1988. Screening early autumn frost hardiness among progenies from Norway spruce seed orchards. Silva Fennica 22: 203–212

Juntunen, V. & Neuvonen, S. 2006. Natural regeneration of Scots pine and Norway spruce close to the timberline in Northern Finland. Silva Fennica 40: 443–458.

Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. & Seitola, T. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. (The changing climate in Finland: estimates for adaptation studies. ACCLIM project report 2009.) Ilmatieteen laitos, Raportteja 2009:4, 102 s. (In Finnish, abstract, extended abstract and captions for figures and tables also in English)

Jyske, T., Hölttä, T., Mäkinen, H., Nöjd, P., Lumme, I. & Spiecker, H. 2010. The effect of artificially induced drought on radial increment and wood properties of Norway spruce. Tree Physiology 30: 103–115.

- , Manner, M., Mäkinen, H., Nöjd, P., Peltola, H. & Repo, T. 2012. The effects of artificial soil frost on cambial activity and xylem formation in Norway spruce. Trees – Structure and Function 26(2): 405–419.

Kellomäki, S., Strandman, H., Nuutinen, T., Peltola, H., Korhonen, K.T. & Väisänen, H. 2005. Adaptation of forest ecosystems, forests and forestry to climate change. FINADAPT Working Paper 4, Finnish Environment Institute. Mimeographs 334, Helsinki, 44 s.

– , Maajärvi, M., Strandman, H., Kilpeläinen, A., Peltola, H. 2010. Model computations on the climate change effects on snow cover, soil moisture and soil frost in the boreal conditions over Finland. Silva Fennica 44: 213–233.

Koski, V. & Sievänen, R. 1985. Timing of growth cessation in relation to the variations in the growing season. Julkaisussa: Tigerstedt P.M.A., Puttonen, P. & Koski, V. (toim.). Crop Physiology of Forest Trees. Helsinki University Press, Helsinki, s. 167–193.

Kostiainen, K., Kaakinen, S., Saranpää, P., Sigurdsson, B.D., Lundqvist, S.-O., Linder, S. & Vapaavuori, E. 2009. Stem wood properties of mature Norway spruce after 3 years of continuous exposure to elevated CO_2 and temperature. Global Change Biology 15: 368–379.

Kubin, E., Pudas, E., Venäläinen, A. & Terhivuo, J. 2008. Phenological recording in Finland. Julkaisussa: Nekovar, J., Koch, E., Kubin, E., Nejedlik, P., Sparks, T. & Wielgolaski, F.-E. (toim.). COST Action 725. The history and current status of plant phenology in Europe. s. 68–75.

Kuparinen, A., Savolainen, O. & Schurr, F. 2010. Increased mortality can promote evolutionary climate change. Forest Ecology and Management 259: 1003–1008.

Körner, C. & Basler, D. 2010. Phenology under global warming. Science 327: 1461–1462.

Lehto, T., Brosinsky, A., Heinonen-Tanski, H. & Repo, T. 2008. Freezing tolerance of ectomycorrhizal fungi in pure culture. Mycorrhiza 18: 385–392.

Leppälammi-Kujansuu, J., Ostonen, I., Nilsson, L.O., Strömgren, M., Berggren, D.K., Sah, S.P. & Helmisaari, H-S. 2012. Effects of long-term temperature and nutrient manipulation on Norway spruce fine roots, mycorrhizal root tips and mycelia production. Plant and Soil, käsikirjoitus lähetetty.

Linkosalo, T., Häkkinen, R., Terhivuo, J., Tuomenvirta, H. & Hari, P. 2009, The time series of flowering and leaf bud burst of boreal trees (1846–2005) support the direct temperature observations of climatic warming. Agricultural and Forest Meteorology 149: 453–461.

Mikkola, K. & Sepponen, P. 1986. Kasvupaikkatekijöiden ja kasvillisuuden suhteet Luoteis-Enontekiön tunturikoivikoissa. Summary: Relationship between site factors and vegetation inmountain birch stands in northwestern Enontekiö. Folia Forestalia 674: 1–30.

Muona, O. & Harju, A. 1989. Effective population sizes, genetic variability, and mating system in natural stands and seed orchards of Pinus sylvestris. Silvae Genetica 38: 221–228.

Müller, M., Hantula, J., Henttonen, H., Huitu, O., Kaitera, J., Matala, J., Neuvonen, S., Piri, T., Sievänen, R., Viiri H. & Vuorinen, M. 2012. Metsien terveys. Julkaisussa: Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E. & Muhonen, T. (toim.) Suomen metsät energia- ja hiilitaloudessa. METLAn BIO- ja MIL-ohjelmien synteesiraportti. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 240. 211 s. ISBN 978-951-40-2378-1 (PDF). Saatavissa: http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240.htm.

Mäenpää, M., Riikonen, J., Kontunen-Soppela, S., Rousi, M. & Oksanen, E. 2011. Vertical profiles reveal impact of ozone and temperature on carbon assimilation of *Betula pendula* and *Populus tremula*. Tree Physiology 31: 808–818. doi:10.1093/treephys/tpr075

Mäkinen, H., Nöjd, P. & Mielikäinen, K. 2001. Climatic signal in annual growth variation in damaged and healthy stands of Norway spruce [Picea abies (L.) Karst.] in southern Finland. Trees 15: 177–185.

Napola, M. 2010. Kevätfenologia osoittautunut entistä tärkeämmäksi kuusen jalostuksessa. Taimiuutiset 1: 9–12.

Niinistö, S.M., Silvola, J. & Kellomäki, S. 2004. Soil CO_2 efflux in a boreal pine forest under atmospheric CO_2 enrichment and air warming. Global Change Biology 10: 1363–1376.

Oleksyn, J., Tjoelker, M.G. & Reich, P.B. 1992. Growth and biomass partitioning of populations of European *Pinus sylvestris* L. under simulated 50° and 60° N daylengths: evidence for photoperiodic ecotypes. New Phytologist 120: 561–574.

Paavilainen, E. 1966. On the relationships between the root systems of white birch and norway spruce and the ground water table. Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja 62.

Pelkonen, E. 1975. Vuoden eri aikoina korkealla olevan pohjaveden vaikutus männyn kasvuun. Suo 26: 25–32.

– 1979. Männyn ja kuusen kyvystä sietää tulvaa vuoden eri aikoina. Suo 30: 35–42.

Peltola, H., Kilpeläinen, A. & Kellomäki, S. 2002. Diameter growth of Scots pines (*Pinus sylvestris* L.) grown at elevated temperature and CO_2 under boreal conditions. Tree Physiology 22: 963–972.

Pudas, E., Leppälä, M., Tolvanen, A., Poikolainen, J., Venäläinen, A. & Kubin, E. 2007. Trends in phenology of Betula pubescens across the boreal zone in Finland. International Journal of Biometeorology 52(4): 251–259.

– , Tolvanen, A., Poikolainen, J., Sukuvaara, T. & Kubin, E. 2008. Timing of plant phenophases in Finnish Lapland in 1997–2006. Boreal Environment Research 13(1): 31–43.

Pulkkinen, P., Haapanen, M. and Mikola, J. 1995. Effect of southern pollination to the survival and growth of seed orchard progenies of northern Scots pine (Pinus sylvestris) clones. Forest Ecology and Management 73: 75–84.

Reinikainen, A., Mäkipää, R., Vanha-Majamaa, I. & Hotanen, J.-P. (toim.) 2000. Kasvit muuttuvassa metsäluonnossa. Summary: Changes in the frequency and abundance of forest and mire plants in Finland since 1950. Kustannusosakeyhtiö Tammi, Helsinki. 384 s.

Repo, T., Hänninen, H. & Kellomäki, S. 1996. The effects of long-term elevation of air temperature and CO on the frost hardiness of Scots pine. Plant, Cell & Environment 19: 209–216. DOI: 10.1111/j.1365–3040.1996.tb00242.x

– , Nilsson, J.-E., Rikala, R., Ryyppö, A. & Sutinen, M.-L. 2001. Cold Hardiness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Julkaisussa: Bigras, F.J. & Colombo, S.J. (toim.). Conifer Cold Hardiness. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. s. 463–493.

– , Leinonen, I., Wang, K.-Y. & Hänninen, H. 2006. Relation between photosynthetic capacity and cold hardiness in Scots pine Physiologia Plantarum 126: 224–231.

– , Manner, M., Jyske, T., Nöjd, P. & Mäkinen, H. 2009. Roudan vaikutus kuusen fenologiaan. Kutsumuksena metsätiede: Risto Sarvaksen 100-vuotisjuhlakirja. Seppo Ruotsalainen, Juhani Häggman (toim.). Paino Gummerus kirjapaino Oy, Jyväskylä, s. 101–107.

– , Roitto, M., Sutinen, S. 2011. Does the removal of snowpack and the consequent changes in soil conditions affect the physiology of Norway spruce needles? Environmental and Experimental Botany 72: 387–396.

Riikonen, J., Lindsberg, M.-M., Holopainen, T., Oksanen, E., Lappi, J., Peltonen, P. & Vapaavuori, E. 2004. Silver birch and climate change: variable growth and carbon allocation responses to elevated concentrations of carbon dioxide and ozone. Tree Physiology 24: 1227–1237.

– , Holopainen, T., Oksanen, E. & Vapaavuori, E. 2005. Leaf photosynthetic characteristics of silver birch during three years of exposure to elevated CO_2 and O_3 in the field. Tree Physiology 25: 621–632.

– , Kets, K., Darbah, J., Oksanen, E., Sôber, A., Vapaavuori, E., Nelson, N., Kubiske, M. & Karnosky, D. 2008. Carbon gain and bud physiology in Populus tremuloides and Betula papyrifera grown under long-term exposure to elevated concentrations of CO_2 and O_3. Tree Physiology 28(2): 243–254.

– , Kontunen-Soppela, S. Ossipov, V., Tervahauta, A., Tuomainen, M., Oksanen, E., Vapaavuori, E., Heinonen, J. & Kivimäenpää, M. 2012. Needle metabolome, freezing tolerance and gas exchange in Norway spruce seedlings exposed to elevated temperature and O_3 concentration. Tree Physiology, hyväksytty.

Rousi, M. & Heinonen, J. 2007. Temperature sum accumulation effects on within-population variation and long-term trends in date of bud burst of European white birch (*Betula pendula*). Tree Physiology 27: 1019–1025.

– , Heinonen, J. & Neuvonen, S. 2011. Intrapopulation variation in flowering phenology and fecundity of silver birch, implications for adaptability to changing climate. Forest Ecology and Management 262: 2378–2385. http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.038

– , Possen, B.J.H.M., Hagqvist, R. & Thomas, B. 2012. From the Arctic Circle to the Canadian prairies – a case study of silver birch acclimation capacity. Silva Fennica 46: 355–364.

Rosvall, O. 2011. Review of the Swedish Tree Breeding Programme. Skogforsk. 85 s.

Rustad, L.E., Campbell, J.L., Marion, G.M., Norby, RlJ., Mitchell, M.J., Hartley, A.E., Cornelissen, J.H.C. & Gurevitch, J. 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. Oecologia 126: 543–562.

Sakai, A. & Larcher, W. 1987. Frost survival of plants. Responses and adaptation to freezing stress. Ecological Studies 62, Springer-Verlag, Berlin, 321 s.

Savolainen, O., Bokma, F., Garcia-Gil, R., Komulainen, P. & Repo, T. 2004. Genetic variation in cessation of growth and frost hardiness and consequences for adaptation of Pinus sylvestris to climatic changes. Forest Ecology and Management 197: 79–89.

Siitonen, J. 2012. Monimuotoisuus. Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E. & Muhonen, T. (toim.) Suomen metsät energia- ja hiilitaloudessa'. METLAn BIO- ja MIL-ohjelmien synteesiraportti. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 240. 211 s. ISBN 978-951-40-2378-1 (PDF). Saatavissa: http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwpxxx.htm.

Siljamo, P., Sofiev, M., Severova, E., Ranta, H., Kukkonen, K., Polevova, S. Kubin, E. and Minin, A. 2008. Sources, impact and exchange of early-spring birch pollen in the Moscow region and Finland. Aerobiologia 24(4): 211–23.

Slaney, M., Wallin, G., Medhurst, J. & Linder, S. 2007. Impact of elevated carbon dioxide concentration and temperature on bud burst and shoot growth of boreal Norway spruce. Tree Physiology 27: 301–312.

Solantie, R. 2003. On definition of ecoclimatic zones in Finland. Finnish Meteorological Institute, Reports 2003(2): 1–44.

Stenström, E. 1991. The effects of flooding on the formation of ectomycorrhizae in Pinus sylvestris seedlings. Plant and Soil 131: 247–250.

Street, N.R., Skogström, O., Sjödin, A., Tucker, J., Rodriguez-Acosta, M., Nilsson, P., Jansson, S. & Taylor, G. 2006. The genetics and genomics of the drought response in *Populus*. The Plant Journal 48: 321–341.

Szmidt, E. & Muona, O. 1985. Genetic effects of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) domestication, Lecture Notes in Biomathematics 60: 241–252.

Tanino, K.K., Kalcsits, L., Silim, S., Kendall, E. & Gray, G.R. 2010. Temperature-driven plasticity in growth cessation and dormancy development in deciduous woody plants: a working hypothesis suggesting how molecular and cellular function is affected by temperature during dormancy induction. Plant Molecular Biology 73: 49–65.

Terhivuo, J., Kubin, E. & Karhu, J. 2009. Phenological observation since the days of Linné in Finland. In: Special issue COST action 725-WGI. Proceedings of workshop "Benefit of old Phenodata Series-Evaluation and Declaring Ability", Rome 2–7 November 2008. Italian Journal of Agrometeorology 14(1): 45–49.

Tierney, G.L., Fahey, T.J., Groffman, P.M., Hardy, J.P., Fitzhugh, R.D. & Driscoll, C.T. 2001. Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. Biogeochemistry 56: 175–190.

Tietäväinen, H., Tuomenvirta, H. & Venäläinen, A. 2010. Annual and seasonal mean temperatures in Finland during the last 160 years based on gridded temperature data. International Journal of Climatology 30: 2247–2256, DOI: 10.1002/joc.2046

Tilman, D. 1988. Plant strategies and the dynamics and structure of plant communities. Princeton University Press, Princeton.

Tonteri, T., Salemaa, M. and Rautio, P. (2013). Changes of understorey vegetation in Finland in 1985–2006. In: Merilä, P. & Jortikka, S. (eds.). Forest Condition Monitoring in Finland – National report. The Finnish Forest Research Institute. [Online report].
Available at http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201305087583.

Vapaavuori, E., Henttonen, H.M., Peltola, H., Mielikäinen, K., Neuvonen, S., Hantula, J. & Müller, M. 2010. Climate change impacts and most susceptible regions of severe impact in Finland. Julkaisussa: Parviainen, J., Vapaavuori, E. & Mäkelä, A. (toim.). Finland's Forests in Changing Climate. Metlan työraportteja/Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 159: 17–25.

Varis, S., Pakkanen, A., Galofre, A. & Pulkkinen, P. 2009. The extent of south-north pollen transfer in Finnish Scots pine. Silva Fennica 43: 717–726.

Venäläinen, A., Jylhä, K, Kilpeläinen, T., Saku, S., Tuomenvirta, H., Vajda, A. & Ruosteenoja, K. 2009. Recurrence of heavy precipitation, dry spells and deep snow cover in Finland based on observations. Boreal Environmental Research 14: 168–172.

Viherä-Aarnio, A., Häkkinen, R. & Junttila, O. 2006. Critical night length for bud set and its variation in two photoperiodic ecotypes of *Betula pendula*. Tree Physiology 26: 1013–1018.

Virtanen, R., Luoto, M., Rämä T., Mikkola, K., Hjort, J., Grytnes, J-A., & Birks, H. 2010. Recent vegetation changes at the high-latitude tree line ecotone are controlled by geomorphological disturbance, productivity and diversity. Global Ecology and Biogeography 19: 810–821.

Way, D.A. & Sage, R.F. 2008. Elevated growth temperatures reduce the carbon gain of black spruce [Picea mariana (Mill.) B.S.P.]. Global Change Biology 14: 624–636.

2.5 Metsien terveys

Michael Müller, Jarkko Hantula, Heikki Henttonen, Otso Huitu, Juha Kaitera, Juho Matala, Seppo Neuvonen, Tuula Piri, Risto Sievänen, Heli Viiri ja Martti Vuorinen

Ilmastonmuutos vaikuttaa metsien kuntoon monella tavalla. Niistä suuri osa on epäsuoria. Vaikutusmekanismit voivat olla hyvin monimutkaisia vuorovaikutusverkkoja, jolloin lopputulosta on vaikea ennakoida tarkkaan. Monien tautien ja hyönteistuholaisten oletetaan aiheuttavan aiempaa enemmän tuhoja ilmastonmuutoksen myötä (Harvell ym. 2002, Engesser ym. 2008, Bolte ym. 2009, Woods ym. 2010, Sturrock ym. 2011). Tuhot lisääntyvät varsinkin, jos puiden kunto heikkenee nykyisestä. Puiden kunnolla on keskeinen merkitys tauti- ja hyönteisepidemioiden puhkeamiselle. Hyväkuntoinen puu pystyy vastustamaan menestyksellisesti tauteja ja tuholaisia, joiden kanssa puulajilla on yhteinen kehityshistoria. Sen sijaan uudet lajit voivat tappaa hyväkuntoisenkin puun.

Ympäristöolosuhteiden muuttuessa voi puiden ja niiden taudin- ja tuhonaiheuttajien dynaaminen yhteiselo järkkyä. Esimerkiksi kuivuuden tauteja edistävä vaikutus on yleensä pystytty selittämään isäntäkasvin alentuneella vastustuskyvyllä. Ympäristötekijöiden muuttuessa mikrobit ja hyönteiset kykenevät nopean sukupolvenkiertonsa vuoksi mukautumaan geneettisesti puita paljon nopeammin. Ne myös pystyvät siirtymään ilmasto-olosuhteiden muuttuessa puustoa nopeammin alueelta toiselle. Mikrobien ja hyönteisten kykyä sopeutua uusiin olosuhteisiin pidetäänkin huomattavasti puita parempana.

Metsätuhoihin liittyvässä ilmastokeskustelussa rajoitutaan usein mahdollisesti yleistyvien äärevien sääilmiöiden seurausvaikutuksiin, vaikka vähintään yhtä tärkeitä ovat talvi- ja kesäkeskilämpötilojen ja sadannan keskimääräiset muutokset. Lämpötilojen nousu vaikuttaa eliöyhteisöjen monimuotoisuuteen, suoraan tuhohyönteisten sukupolvien määrään ja siten tuholaisten runsauteen ja niiden kannanvaihteluiden dynamiikkaan. Ennustettavuutta vaikeuttaa se, että patogeenien ja tuholaisten reaktiot ympäristötekijöiden muutoksiin eivät ole suoraviivaisia ja vaikutukset voivat riippua kynnysarvoista (Scherm 2004, Woods ym. 2010).

Oman epävarmuustekijänsä metsien terveyden ennustamiselle ilmaston muuttuessa muodostaa ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvun vaikutus kasvien kemialliseen koostumukseen (Kaakinen ja Vapaavuori 2005), mikä voi muuttaa niiden alttiutta tuholaisille ja taudeille (Vapaavuori ym. 2005).

2.5.1 Ilmastonmuutoksen vaikutukset abioottisiin tuhoihin

Tuulituhot lisääntyvät ja lumituhot vähentyvät

Tuulituhojen ennustaminen ilmastonmuutosten yhteydessä on monimutkainen ongelma, jossa oleellinen merkitys on voimakkaiden tuulten esiintymisellä roudattomana aikana (Peltola ym. 2010). Peltola ym. (1999) ovat arvioineet roudan keston voivan lyhentyä Etelä-Suomessa 4–5 kuukaudesta 2–3 kuukauteen ilmastonmuutoksen myötä, minkä seurauksena 80 % kovista tuulista (>11 ms^{-1}) ajoittuisi roudattomaan aikaan, kun nyt niiden osuus on 55 %. Pohjois-Suomessa kovien tuulien osuus roudattomana aikana kasvaisi 40 %:sta 50 %:iin. Tämä muutos epäilemättä lisää metsien tuulituhoja, vaikka kovien tuulien määrä ei lisääntyisikään.

Myös juurikäävällä on suora yhteys tuulituhoihin, sillä lahojen juurten ja runkojen kyky kestää kovia tuulia on huomattavasti terveitä puita vähäisempi. Niinpä juurikäävän vaivaamien metsien tuulituhoista on merkittävä osa voitu selittää juurikääpäinfektioilla (Oliva ym. 2008). Kun juurikäävän lahottamalta paikalta kaatuu runsaasti puita, syntyy aukko, jonka reunalta terveetkin puut kaatuvat aiempaa helpommin seuraavan kovan tuulen yhteydessä. Näin metsään syntyy uusia tartuntareittejä juurikäävälle.

Lumituhojen arvioidaan laskevan kuluvan vuosisadan ensimmäisen, toisen ja kolmannen 30-vuotisjakson aikana 11 %, 23 % ja 56 % verrattuna keskimäärin ajanjakson 1961−1990 aikana havaittuihin tuhoihin (Kilpeläinen ym. 2010a).

Metsäpalojen määrä riippuu hellejaksoista

Kesäaikaisten lämpötilojen noustessa haihdunta metsistä lisääntyy ja kuivuus voi vaivata metsiä, vaikka sadanta pysyisi entisellä tasolla. Jos hellejaksot yleistyvät ja pitenevät, metsäpalot tulevat yleistymään. Pohjois-Amerikassa laaja-alaiset metsäpalot ovat lisääntyneet viime vuosikymmenien aikana, ja tämän oletetaan johtuvan ilmastonmuutoksesta (Pautasso ym. 2010). Metsäpaloja kirjattiin Suomessa kuivana kesänä 2006 ennätykselliset 2992 kpl (Metsätilastollinen vuosikirja 2010). Yhteenlaskettu paloala jäi meillä kuitenkin verrattain pieneksi, 1595 hehtaariin. Etelä- ja Keski-Suomessa ennakoidaan korkean metsäpaloriskin päivien lukumäärän lisääntyvän noin 1,5-kertaiseksi nykyisestä vuosisadan loppuun mennessä (Kilpeläinen ym. 2010b). Riski laaja-alaisiin metsäpaloihin lienee maassamme kuitenkin vähäinen ilmaston lämmetessäkin mm. hyvän valvonnan, sammutusvalmiuden, tiheän metsäautotieverkoston ja vesistöjen aiheuttaman maaston rikkonaisuuden vuoksi.

Hellejaksojen aikana on ilmavirtauksen suunta Suomessa usein kaakkoinen, mikä lisää riskiä Venäjän puolella syttyneen metsäpalon leviämiselle maahamme. Karjalan tasavallassa metsäpaloriski on suurempi kuin Suomessa. Esimerkiksi ajanjakson 1996−2003 pahimpana vuonna 1999 paloi Karjalassa metsiä yli 9000 ha (Vanha-Majamaa 2006), kun samana vuonna Suomessa paloi vain 610 ha (Metsätilastollinen vuosikirja 2010). Keskimääräinen paloala Venäjän Karjalan tasavallassa oli ko. jakson aikana 4 ha (Vanha-Majamaa 2006), joten yksittäiset paloalat olivat siellä kymmenkertaisia verrattuna Suomessa vastaavana aikana tilastoituihin paloihin.

Yllätykselliset ravinnehäiriöt mahdollisia

Poikkeuksellisen lämpimät kasvukaudet voivat mobilisoida aiempaa enemmän typpeä rehevillä turvekankailla ja vastaavasti kylmät kasvukaudet voivat aiheuttaa typen immobilisoitumista (Ferm ym. 1990; Pietiläinen ym. 2007). Männyn ravinnehäiriötä on havaittu vuodesta 2009 lähtien rehevillä turvekankailla, joissa liiallinen typpi maaperässä lämpimien kasvukausien seurauksena on

mahdollisesti aiheuttanut mäntyjen kunnon heikkenemisen. Runsas typpi on edelleen aiheuttanut männyn silmuihin ja neulasiin kaliumin- ja boorinpuutoksen, joiden on epäilty altistaneen ne pakkasvaurioille. Tuhon syntyyn ovat mahdollisesti vaikuttaneet myös kuivat ja lämpimät kesät puiden stressiä lisäävinä tekijöinä. Ilmaston lämpenemisellä, kasvukaudenaikaisen ja vuosittaisen vaihtelun äärevöitymisellä ja pakkastalvilla sekä edellisten tekijöiden yhteisvaikutuksella yhdistettynä muihin häiriötekijöihin, kuten ravinne-epätasapainoon, on luultavasti metsätuhoja lisäävä vaikutus.

2.5.2 Ilmastonmuutos suosii monia puiden tauteja

Suomessa kaikki merkittävät metsätaudit ovat sienien aiheuttamia (Taulukko 2.5.1). Bakteeri- ja virusperäisten tautien merkitys on vähäinen, mutta mainittakoon kirsikankierrelehtivirus, joka aiheuttaa paikka paikoin lehtivaurioita koivulla (Jalkanen ym. 2007).

Monien tautiepidemioiden puhkeaminen metsissä on viime vuosikymmenien aikana pystytty selittämään poikkeavilla sääoloilla. Tämä johtuu siitä, että sienten itiölevintä ja itse infektiotapahtuma, eli itiön itäminen kasvin pinnalla ja tunkeutuminen kasvin solukkoon, ovat säästä riippuvaisia. Lisäksi säät vaikuttavat puiden kuntoon ja niiden vastustuskykyyn. Kun säätila on samaan aikaan otollinen sienille, mutta epäedullinen puille, voi syntyä tautiepidemia.

Puut ovat mikrobiseuralaisineen (parasiitit, monet symbiontit kuten mykorritsat, sekä taudinaiheuttajat) sopeutuneet esiintymisalueensa ilmastoon vuosituhansien yhteisen kehityshistorian aikana. Siksi muutos ilmastossa voi aiheuttaa häiriön, jonka nettotulos voi olla jommallekummalle osapuolelle eduksi suhteessa toiseen. Tämän seurauksena metsien kehityskulku voi muuttua monella tavalla. Ilmastonmuutos voi edesauttaa myös uusien tulokaslajien elinmahdollisuuksia, jolloin meille voi ilmaantua uusia aiemmin tuntemattomia tauteja. Myös nykyiset patogeenipopulaatiot voivat ominaisuuksiltaan muuttua valintapaineiden muuttuessa sekä muualta tapahtuvan geenivirran seurauksena. Ilmastonmuutos voi myös johtaa abioottisten tuhojen esiintymiseen. Kaikki nämä ilmiöt ovat metsässä vuorovaikutuksessa keskenään ja lopputulosta on vaikea ennakoida. Joitakin muutoksia metsien terveydessä voidaan kuitenkin ennustaa kirjallisuustietojen ja MIL-tutkimusohjelmassa saatujen uusien tutkimustulosten perusteella (Müller ym. käsikirjoitus).

Yleisesti ottaen voidaan ilmastonmuutoksen ennustaa lisäävän metsätauteja (Harvell ym. 2002, Engesser 2008, Bolte ym. 2009, Woods ym. 2010). Sienipopulaatiot voivat lyhyen, usein yksi- tai kaksivuotisen, sukupolvenkiertonsa ansiosta mukautua nopeasti muuttuviin olosuhteisiin, kun taas muutokset puiden geneettisessä rakenteessa tapahtuvat hitaasti (Woods ym. 2010). On myös joitakin taudinaiheuttajia kuten juurikääpä ja mesisieni, jotka voivat jatkaa eloaan lahottajina isäntäkasvin kuoltua, ja elää siten näitä kauemmin, mutta niilläkin sukupolvenkierto on nopeimmillaan vain muutamia vuosia.

Yleisesti ottaen voidaan ilmastonmuutoksen ennustaa lisäävän metsätauteja.

Taulukko 2.5.1. Taloudellisesti merkittävimmät metsätaudit ovat.

Mänty	Kuusi	Koivu
männynjuurikääpä	kuusenjuurikääpä	koivunruoste
versosurma	kuusentuomiruoste	Koivun verso- ja tyvilaikku
tervasroso	kuusentalvikkiruoste	Koivun levälaikku
männynversoruoste	mesisieni	Monet eri lahottajasienet
männynkariste	verinahakka	

Jos ilmastonmuutos heikentää puiden vastustuskykyä (kuivuus kesällä, korkea lämpötila ja ilmankosteus puiden ollessa lepotilassa, ym.) myös maahamme päässeiden vieraspatogeenien elinmahdollisuudet paranevat. Vieraspatogeeneja saamme vilkkaan kansainvälisen kasvikaupan ja puuaineksen kuljetuksen sekä matkailun myötä. Vieraspatogeenit voivat aiheuttaa täällä uudenlaisia tauteja, joita vastaan puillemme ei ole kehittynyt vastuskykyä.

Sateet, ilmankosteus ja kaste ovat sienitautien kannalta merkityksellisiä

Ilmastonmuutoksen ennustetaan lisäävän Suomessa sateita kaikkina vuodenaikoina, mutta etenkin talvisin. Tämä edesauttaa monien tautisienten leviämistä ja tarttumiskykyä. Sienten itiöt itävät vain tartuntapinnan ollessa kosteana. Ruostesienten helmi- ja kesäitiöt lentävät vain kuivalla säällä, mutta itäminen alkaa vasta tartuntapinnan kastuessa.

Talven pituus ja lämpötila – nollan tuntumassa muutamankin asteen ero vaikuttaa

Monien sienten itiöt kestävät hyvin alhaisia (-70 ºC) lämpötiloja. Rihmastojen pakkaskestävyys elävässä isäntäkasvissaan on paljon huonompi. Alhaiset tai korkeat lämpötilat tuskin rajoittavat useimpien sienitautien levinneisyyttä merkittävästi. Siksi taudinaiheuttajat ovat levinneet pääasiallisen isäntäkasvinsa koko luontaiselle levinneisyysalueelle, eli ne kestävät samaa ilmastoa kuin isäntäkasvinsa. Näin ei aina ole, vaan eräiden moni-isäntäisten taudinaiheuttajien kuten esimerkiksi joidenkin munasienten (*Phytophthora* ja *Phytium)* infektiokyky edellyttää lämmintä ja kosteaa pienilmastoa (Benson 1982, Brasier 1996, Marcais ym. 1996), mikä mahdollisesti selittää sen, etteivät nämä taudinaiheuttajat ole toistaiseksi aiheuttaneet pahoja tuhoja boreaalisissa metsissä. Myös männyillä versotautia aiheuttavan *Sphaeropsis sapinea'n* patogeenisuus näyttää edellyttävän korkeampia lämpötiloja kuin isäntäkasvi. Se ei vaivaa mäntyjä Pohjoismaissa, joskin saattaa esiintyä täällä saprofyyttinä (Kujala 1950), mutta jo Liettuassa sen tiedetään tappaneen metsämännyn taimia. Viimeisen 15 vuoden aikana *S. sapinea* on aiheuttanut yhä enemmän tuhoja mm. metsämännyllä Pohjois-Ranskassa talvilämpötilojen nousun ja kesäsateiden lisääntymisen myötä (Desprez-Loustau ym. 2007, Fabre ym. 2011). Aiemmin tauti on aiheuttanut tuhoja etelämpänä mm. Italiassa ja Espanjassa.

Nollan tuntumassa muutamankin asteen muutos lämpötilassa voi olla merkittävää taudin kehittymisen kannalta. Niinpä männyntaimien alttius surmakalle riippuu huomattavasti jo muutaman asteen lämpötilan muutoksesta välillä –7 ºC ja 0 ºC (Petäistö ja Laine 1999). Douglas-kuusella esiintyvän *Phaeocryptopus* –neulaskaristeen (Swiss needle cast) on Oregonissa arvioitu lisääntyvän kaksivuotisissa neulasissa 6 %:lla keskimääräisen päivittäisen talvilämpötilan noustessa 1 ºC:lla (Manter ym. 2005). Keskitalvella toistuva suoja- ja pakkassäiden vuorottelu aiheuttaa puille stressiä ja altistaa niitä sairauksille (Horsley ym. 2002).

Talvihomesienet ovat aktiivisia talven aikana lumipeitteen suojassa. Voidaan pitää hyvin todennäköisenä, että lumipeitteisen ajan lyhentyessä näiden sienten aiheuttamat tuhot taimikoissa vähenevät. Esimerkiksi Virossa talvihomeet eivät aiheuta tuhoja. Myös surmakan B-tyypin aiheuttamien tuhojen voidaan olettaa vähenevän lumipeitteen ohenemisen ja lumipeitteisen ajan lyhenemisen myötä.

Eräät ruostesienet kuten tervasrosot ja käpyruosteet saattavat hyötyä kevään aikaistumisesta niiden itiölevinnän aikaistumisen ja tehostumisen kautta kasvukauden alkuvaiheessa. On mahdollista, että joidenkin sienten osalta keväiden aikaistuminen voi myös vähentää niiden taudinaiheuttamiskykyä, jos itiöinti ajoittuu liian aikaisin suhteessa puiden kehitykseen. Näiden ns. fenologisten tekijöiden merkitys taudinkehittymiselle on osoitettu esimerkiksi tammen äkkikuoleman kohdalla

(Dodd ym. 2008). Sienten voidaan kuitenkin ennustaa mukautuvan nopeasti isäntäkasvin ja itiöiden levinnässä mahdollisesti tarvittavan vektorihyönteisen fenologian muutokseen.

Talvien lauhtuminen ja lumipeitteen väheneminen tulevat lisäämään korjuuvaurioita sekä mahdollisesti pienten hirvieläinten aiheuttamia vaurioita ennestään. Nämä tekijät edistävät myös lahottajasienten leviämistä seurauksenaan kasvutappioita ja puun laadun heikkenemistä. Erityisesti verinahakka (*Stereum sanguinolentum)* hyötyy hirvieläinten aiheuttamista vaurioista (Kurkela 1994).

Kasvukauden lämpösumma ja hellejaksot

Kasvukauden lämpösumman nousun ennustetaan lisäävän puiden kasvua Suomessa, varsinkin pohjoisessa (Kellomäki ym. 2008). Etelä- ja Keski-Suomessa lämpötilan nousu voi lisätä haihduntaa siinä määrin, että kuivilla kankailla puut kärsivät aiempaa useammin kuivuudesta, vaikka sadanta hieman lisääntyisikin. Kasvun lisäyksen ennustetaankin näillä alueilla jäävän alhaisemmaksi kuin pohjoisessa. Kuivuus vaikuttaa patogeeneihin yleensä itiöintiä vähentävästi, mutta monet sienet pystyvät kuitenkin kasvamaan kuivemmissa olosuhteissa kuin niiden isäntäkasvi (Desprez-Loustau ym. 2006). Elävän kasvin solukkoihin tunkeuduttuaan ne ovat turvassa kuivumiselta, ja voivat kasvaa hellejaksojen aikanakin. Kuivuuden puille aiheuttama stressi lisää ainakin juuristotauteja, kuten juurikääpää ja varsinkin mesisientä (Brandt ym. 2003, Dukes ym. 2009, Horsley ym. 2002, Popoola ja Fox 2003). Kuivuus voi estää ruostesienten leviämisen joko kokonaan tai vähentää tiettyjen itiöasteiden muodostumista, jolloin sienen leviämisstrategia muuttuu. Esimerkiksi tervasroson tuhot männyllä vähenevät helteisinä kesinä vaikka väli-isäntätartunnat jatkuisivatkin (Ragazzi 1983).

Muutamankin asteen nousu ruohikon lämpötilassa lisäsi sieni- ja hyönteistuhoja.

Vaikka lämpötilan nousu voi lisätä puiden kasvua, vaikuttaa se myös kaikkiin muihin biologisiin ilmiöihin ja lopputuloksena voi olla tautien lisääntyminen. Esimerkiksi ruohoekosysteemiä tutkittaessa on todettu keinotekoisen 12 vuotta kestäneen lämmittämisen muutamalla asteella lisänneen sieni- ja hyönteistuhoja sekä myös taudinaiheuttajien ja tuholaisten lajikirjoa (Roy ym. 2004).

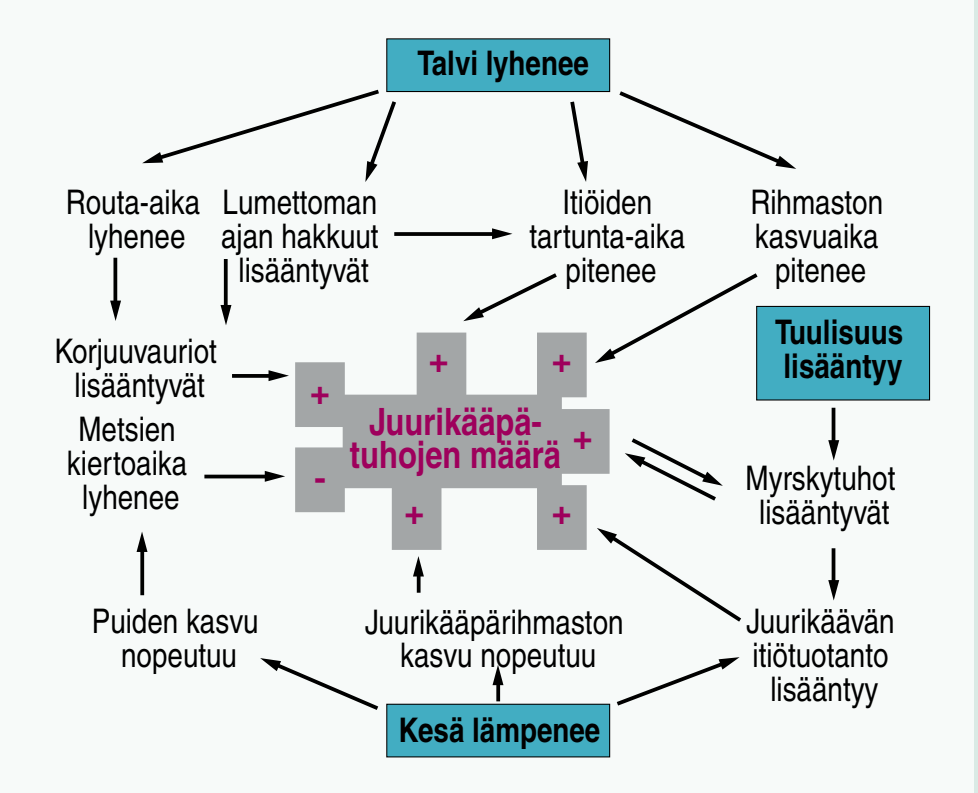
Lisääntyvä kuivuusstressi puilla voi aiheuttaa aiemmin tuntemattomien tautien ilmestymistä metsiimme. *Phytophthora*-munasienten sekä mesisienten tiedetään hyötyvän kuivuuden isäntäkasvilajille aiheuttamasta stressistä (Engesser ym. 2008). Surmakan vähäisyys Etelä-Euroopan männiköissä viittaa siihen, että se saattaisi vähentyä ilmaston lämmetessä.

Juurikääpä – pahin nykyisistä taudeistamme leviää nykyisestä

Juurikäävät ovat boreaalisten havumetsien taloudellisesti vahingollisimpia taudinaiheuttajia. Suomessa niitä esiintyy kaksi lajia, joista merkittävämpi on kuusenjuurikääpä. Sen aiheuttamat tyvilahotuhot kuusella ovat kustannuksiltaan vähintään 40 miljoonaa euroa vuodessa. Männynjuurikääpä puolestaan on moni-isäntäinen sieni, joka männyllä aiheuttaa isojenkin puiden kuolemista ryhmittäin. Lisäksi se aiheuttaa kuusella samanlaista tyvilahoa kuin kuusenjuurikääpä. Männynjuurikäävän aiheuttamat taloudelliset tappiot arvioidaan yli viideksi miljoonaksi euroksi vuodessa.

Juurikäävät elävät Suomessa levinneisyysalueensa pohjoisrajalla. Syytä, miksi ne eivät ole levinneet puurajalle asti, ei tiedetä. Se voi johtua sienen biologisista lämpötilavaateista, kivennäismaiden vähäisyydestä sienen levinneisyysalueen pohjoispuolella tai pohjoisen Suomen intensiivimetsätalouden lyhyestä historiasta. Joka tapauksessa juurikääpä on esimerkiksi Baltian maissa ja Etelä-Ruotsissa selvästi suurempi ongelma kuin meillä.

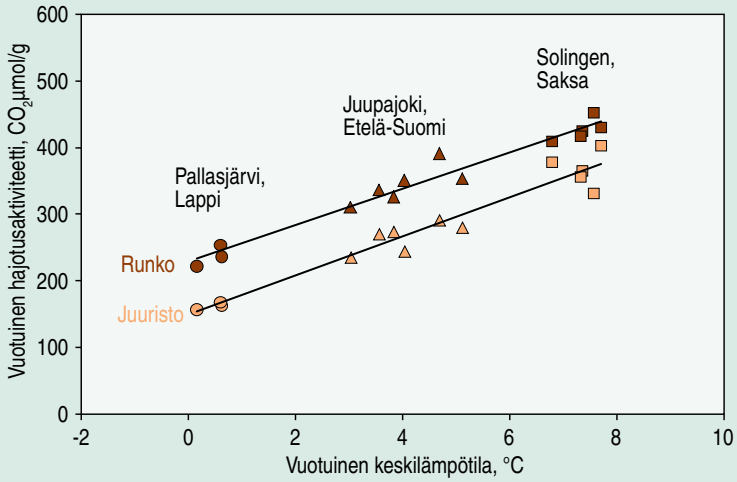
Ilmastonmuutos lisää juurikääpätuhoja



Kuva 2.5.1. Juurikääpätuhojen ja ympäristötekijöiden välinen vuorovaikutus. Nuolella + merkkiä osoittava tekijä lisää juurikääpätuhoja ja - merkkiä osoittava päinvastoin vähentää tuhoja. Esimerkiksi myrskytuhot lisäävät juurikääpää (+) koska juurikääpä voi infektoida juurien tai rungon paljaita katkoskohtia, mutta juurikääpä toisaalta myös lisää myrskytuhoja heikentämällä puiden tuulenkestävyyttä.

Kuvaan 2.5.1. on koottu tiedossa olevat juurikääpätuhoihin vaikuttavat tekijät ja merkitty niiden vaikutukset sekä tekijöiden keskinäiset vuorovaikutukset nuolimerkein. Juurikääpään kohdistuvat vaikutukset on merkitty joko juurikääpää edistävinä (+) tai heikentävinä (-). Talven lyheneminen ilmastonmuutoksen seurauksena vaikuttaa monella tavalla juurikääpätuhoja edistävästi. Korjuuvolyymien säilyessä nykyisellään on odotettavissa, että roudattoman ajan hakkuut lisääntyvät, mikä johtaa korjuuvaurioiden lisääntymiseen. Näin syntyy uusia leviämisreittejä juurikäävälle, jonka itiöintiaika myös pidentyy talvikauden lyhetessä. Lisäksi sienen rihmaston kasvuaika pitenee. Juurikäävän rihmasto on aktiivinen vielä -4 °C:ssa (Müller, käsikirjoitus), vaikka itiöinti loppuukin noin +5 °C:ssa. Ennusteiden mukainen ilmaston lämpeneminen tulee todennäköisesti lisäämään juurikääpätuhoja, koska kuusi seitsemästä juurikääpään vaikuttavasta ilmastonmuutoksen seurausvaikutuksesta edistää juurikäävän leviämistä (Kuva 2.5.1). Metsien kasvun lisääntyessä lämpötilan ja ilman hiilidioksidipitoisuuden nousun myötä voidaan puiden kiertoaikaa lyhentää, mikä kompensoi jossain määrin juurikäävän samanaikaisesti parantuvia tartuntamahdollisuuksia.

MIL-tutkimusohjelmassa saatujen tutkimustulosten perusteella juurikäävän rihmaston hajotusaktiviteetti nousee merkittävästi, jos vuoden keskilämpötila nousee muutamankin asteen (Kuva 2.5.2).



Kuva 2.5.2. Juurikäävän hajotusaktiivisuuden riippuvuus maan (maa 20 cm:n syvyydessä: juuristo) ja ilman (2 m:n korkeudella: runko) vuotuisesta keskilämpötilasta. Kukin havaintopiste edustaa päivittäisten keskilämpötilojen perusteella laskettua vuotuista hengitysaktiivisuutta hajotettavaa puugrammaa kohti. Laskentaan on käytetty lämpötilamittausaineistoja vuosilta 1998–2008 sekä puhdasviljelmistä mitattua sienen hengitysaktiivisuuden lämpötilavastetta.

Tulosten mukaan yhden asteen lämpötilan nousu lisää juurikäävän hajotusaktiivisuutta 27 µmol CO_2/g puuta / °C ilmassa ja 29 µmol/g puuta / °C maassa. Maaperän vuorokauden keskilämpötilan 20 cm:n syvyydessä oletetaan tässä vastaavan keskimääräistä juurien lämpötilaa ja 2 m:n korkeudessa ilmassa mitatun lämpötilan oletetaan vastaavan keskimääräistä puun rungon lämpötilaa. Kuvan tulokset laskettiin käyttäen juurikäävän hengitysaktiviteetin lämpötilavastetta, joka määritettiin kasvattamalla juurikääpäsienen puhdasviljelmiä eri lämpötiloissa kuusen sahanpurussa ja mittaamalla niiden CO_2-tuotto. Tuloksista ilmenee, että vuotuisen keskilämpötilan nousu muutamalla asteella lisää merkittävästi juurikäävän hajotusaktiviteettia (Taulukko 2.5.2). Muutos on pohjoisessa suurempi kuin etelässä, mutta suhteessa ennustettuun metsien kasvun lisäykseen tilanne pohjoisessa ja etelässä on erilainen. Etelässä ilmastonmuutos todennäköisesti edistää juurikäävän aktiviteettia enemmän kuin metsien kasvua ja pohjoisessa päinvastoin. Sateisuus ja maaperän kosteus eivät todennäköisesti vaikuta juurikäävän aktiviteettiin sen jälkeen, kun sieni on päässyt tunkeutumaan puun solukkoon, koska kosteus elävässä puussa on aina riittävä tälle lahottajalle. Lisäksi lämpimässä ilmastossa juurikäävän itiötuotannon oletetaan kasvavan, jolloin myös kantoihin kohdistuva itiölaskeuma kasvaa.

Metlan tutkimuksissa on myös selvinnyt, että ilmastoltaan samalta alueelta, esimerkiksi Etelä-Suomesta, peräisin olevien juurikääpäkantojen lämpötilavaste vaihtelee laajasti. Euroopassa imastoltaan erilaisten alueiden juurikääpäkantojen välinen vaihtelu sen sijaan on merkityksetöntä. Suomalainen juurikääpäkanta voi kasvaa korkeissa tai matalissa lämpötiloissa aivan yhtä hyvin kuin italialainen kanta. Lisäksi eurooppalaisten osapopulaatioiden välinen geenivirta on merkittävää. Näiden havaintojen mukaan juurikääpäpopulaatiomme pystyy hyvin sopeutumaan ilmaston muutoksiin ainakin lämpötilan osalta. (Müller ym. käsikirjoitus).

Taulukko 2.5.2. Juurikäävän aktiviteetin kasvu puun rungossa ja juuristossa vuoden keskilämpötilan noustessa 6 °C verrattuna puiden kasvun lisääntymiseen ilmaston muuttuessa A2-skenaarion mukaisesti tämän vuosisadan aikana. Laskentaan on käytetty kuvan 2.5.2 tuloksia. Juupajoen tuloksien katsotaan edustavan Etelä-Suomea ja Pallasjärven Pohjois-Suomea.

Alue	Juurikäävän hajotusaktiviteetin kasvu		Metsien kasvu (Kellomäki ym. 2008)
	Runko	Juuristo	
Etelä-Suomi	48 %	67 %	12 %
Pohjois-Suomi	68 %	109 %	109 %

Mesisienivahingot runsastuvat, jos hellejaksot yleistyvät

Metsiemme tyvilahoisuus voi lisääntyä ilmastonmuutoksen myötä myös mesisienen vuoksi. Maassamme on nykyään neljä mesisienilajia, joiden isäntäkasveja ovat sekä havu- että lehtipuut. Mesisieni on juurikäävän jälkeen yleisin kuusen tyvilahon aiheuttaja (Kuva 2.5.3). Paikoin mesisieni tappaa myös männyn taimia kuivilla harjualueilla. Lauhkeissa ja subtrooppisissa metsissä mesisienet ovat monin paikoin selvästi pahempia patogeenejä kuin Suomessa. Jos meillä ilmasto lämpenee ja kuivuusjaksot yleistyvät, on vaarana, että mesisienituhot lisääntyvät. Etenkin kuivuudesta kärsivät puut ovat alttiita mesisienitartunnalle. Kuivuudelle alttiille kasvupaikoille tulisi istuttaa mäntyä kuusen sijaan, koska mänty kestää kuivuutta paremmin ja on siten vähemmän altis mesisienelle.

Sateet ja ilman kosteus vaikuttavat surmakan, karisteiden sekä ruosteiden esiintymiseen

Sateiden ja ns. nollakelien yleistyminen lisää todennäköisesti lukuisten kariste-, laikku- ja versotautien tuhoja metsissämme, sillä korkea ilmankosteus edesauttaa niiden itiötuotantoa ja itiöiden infektiokykyä. Nämä sienet hyötyvät puuston tiheydestä, koska varjoisassa tiheikössä on niille edullinen kostea pienilmasto ja valon vähäisyys altistaa puita taudinaiheuttajille. Ruostetautien lisääntymistä edistävät ennen kaikkea kesäsateet. Kosteissa oloissa niiden leviäminen pintakasvillisuuden väli-isäntäkasveista puihin ja toisiin väli-isäntiin tehostuu. Tästä ovat esimerkkeinä tervasroso ja käpyruosteet.

Kuva 2.5.3. Mesisienen aiheuttama tuho Espoon saaristossa kuivien kesien 2003 ja 2006 jälkeen. Kuva on otettu syyskuussa 2008. Kuva Metla/Michael Müller.

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia tervasrosotuhoihin vaikea ennustaa

Tervasroso on tällä hetkellä pahin männyn sienitauti Pohjois-Fennoskandiassa (Kuva 2.5.4). Sitä on kahta eri muotoa, joista toinen leviää väli-isäntäkasvien välityksellä ja toinen suoraan männystä mäntyyn. Vakavasti sairaita männiköitä havaittiin Pohjois-Ruotsissa viime vuosikymmenen lopussa yli 50 000 ha. Tuho keskittyy pääasiassa nuoriin männiköihin ja on väli-isäntäkasvia vaihtavan tervasroson aiheuttamaa (Samils ym. 2010). Molempia tervasroson muotoja esiintyy meillä koko maassa. Väli-isäntäkasvia vaihtava tervasroso aiheuttaa vakavaa tuhoaa yksittäisissä metsiköissä Pohjois-Suomessa, kun taas muissa osissa maata tuho on pääosin männystä mäntyyn leviävän tervasroson aiheuttamaa (Hantula ym. 1998). Syitä laajamittaisiin ja lisääntyneisiin tautiepidemioihin ei tunneta tarkasti. Ne voivat johtua sienen infektiobiologiassa tapahtuneista muutoksista, väli-isäntäkasvilajiston muutoksista tai ilmastossa tapahtuvista muutoksista.

Kuva 2.5.4. Tervasroson tappama männyn latvus. Kuva Metla/Michael Müller.

Väli-isäntää vaihtavan tervasroson levinneisyys ja epidemiologia on sidoksissa väli-isäntäkasvien levinneisyyteen ja taudinalttiuteen. Tervasroso on selvästi väli-isäntäkasvin suhteen rajoittuneempi Etelä-Suomessa kuin Pohjois-Suomessa, ja siten leviäminen on etelässä tehottomampaa. MIL-tutkimusohjelman tutkimustulosten perusteella tervasroso voi levitä aiemmin tunnettujen kasvilajien lisäksi myös muiden luonnossa yleisenä esiintyvien kasvilajien välityksellä (Kaitera ja Hiltunen 2011, Kaitera, julkaisematon tieto). Tutkimustemme mukaan metsiemme yleinen aluskasvi metsämaitikka esiintyy tervasroson väli-isäntänä Länsi-Lapista Oulun läänin kaakkoisosiin. Myös kangas- ja lehtomaitikka, eri kuusiolajit ja pionit levittävät tautia luonnossa. Rehevät metsämaitikan kasvupaikat ovat altteimmat tautiepidemioiden leviämisen kannalta (Kaitera ym. 2005, Kaitera ym., 2011). Etelä-Suomen rannikkoalueella ja saaristossa sieni leviää myös käärmeenpistonyrtin välityksellä.

Männyn kasvun lisääntyminen ilmaston lämmetessä edistää myös sienten kasvua ja voi tehostaa sienten itiöintiä. Kevään aikaistumisen seurauksena varhentunut männyn kasvuun lähtö aikaistaa myös sienen itiöintiä männyllä (Kaitera, julkaisematon tieto). Kasvukauden aikaistuminen ja pidentyminen lisäävät luultavasti väli-isäntien kausimuuntelua (esim. maitikat) tehostaen sienen leviämistä mäntyyn loppukesällä. Varsinkin Pohjois-Suomessa sienen itiöinnin aikaistuminen väli-isännillä tehostaa sen leviämistä mäntyyn. Tämä voi lisätä tautiepidemioita. Toisaalta hellejaksot ja kasvukauden keskilämpötilan nousu luultavasti vähentävät sienen talvi-itiöpesäkkeiden muodostumista, mikä voi hidastaa sen leviämistä mäntyyn.

Heikosti tunnetut endofyyttisienet

Puissa elää runsaasti isäntäspesifisiä endofyyttisieniä (Müller ja Hallaksela 2000), joiden merkitys isäntäkasvilleen vaihtelee suuresti lajista riippuen. Endofyytit elävät isäntäkasvinsa solukoissa aiheuttamatta ulkoisia oireita olemassaolostaan. Männyn ja kuusen neulasissa niitä elää runsaasti. Jotkut puiden endofyyteistä suojaavat isäntäkasvia tuhohyönteisiä ja patogeenimikrobeja vastaan. Ilmastonmuutos vaikuttaa todennäköisesti myös endofyyttisienten esiintymiseen ja käyttäytymiseen johtaen vaikeasti ennustettaviin seurauksiin. On mahdollista, että joistakin endofyyteistä tulee patogeeneja, jos ilmasto muuttuu siinä määrin, että isäntäkasvin vastustuskyky heikkenee merkittävästi. Meilläkin yleisen, kuusen neulasissa elävän endofyytin, *Tiarosporella parca'n* tiedetään aiheuttavan joissakin olosuhteissa neulasten ennenaikaista varisemista (Heiniger ja Schmid 1989).

Tulokas- ja vieraslajien aiheuttama riski kasvaa

Ilmaston lämpeneminen voi johtaa eteläisten meille uusien tulokaslajien leviämiseen maahamme. Uusia taudinaiheuttajia oletettavasti ilmaantuu etelästä ilmavirtojen mukana itiölevinnän kautta. Viime vuosina on muissa Pohjoismaissa ja Baltian alueella havaittu lukuisia uusia metsätauteja, joiden leviämistavasta ja alkuperästä ei ole varmuutta. Parinkymmenen vuoden aikana olemme saaneet koivunlevälaikun, männyn punavyökaristeen ja saarnensurman (Lilja ym. 2009a). Virossa on lisäksi havaittu *Sphaeropsis sapinea* –niminen männyn patogeeni ja männyn ruskovyökariste (Lilja ym. 2009b). On todennäköistä, että useimmat niistä ovat levinneet etelästä ilmateitse itiölevintänä.

Punavyökariste – potentiaalinen tuhonaiheuttaja tulevaisuudessa myös Suomessa?

Hiljattain löydettiin Suomessa uusi männyllä neulaskaristetta aiheuttava patogeeni, punavyökariste (Müller ym. 2009, Kuva 2.5.5). Populaation geneettisestä monimuotoisuudesta päätellen sieni on todennäköisesti saapunut tänne paljon aikaisemmin. Metsämännyn on todettu olevan melko kestävä punavyökaristetta vastaan, mutta sopivan kosteissa oloissa se kuitenkin infektoituu. Sienen yleistyessä 2000-luvun alussa sääolojen vallitsevana piirteenä useana vuonna olivat pitkät kosteat jaksot kesällä ja poikkeuksellisen pitkät lämpimät syksyt. Englannissa punavyökaristeen on oletettu hyötyneen siellä viime vuosikymmenien aikana lisääntyneestä sateisuudesta (Brown ja Webber 2008). Myös Kanadassa punavyökariste on herättänyt huomiota aiheutettuaan viime aikoina aiempaa runsaampaa neulasten ruskettumista, ja siellä tämän ilmiön katsotaan liittyvän ilmastonmuutokseen (Woods ym. 2005).

Kuva 2.5.5. Punavyökariste männyn neulasissa. Kuva Metla/Michael Müller.

Vieraslajit ovat ihmisen toiminnan tuloksena uusille alueille levinneitä lajeja. Ihmisten aiheuttamista vieraslajien kulkeutumisista on maailmanlaajuisesti runsaasti esimerkkejä: hollanninjalavatauti Euroopassa ja Amerikassa, eurooppalainen surmakka Amerikassa, haavanroso pohjoismaissa sekä kastanjansurma ja valkomännyntervasroso Amerikassa. Suurin osa merkittävää tuhoa aiheuttaneista vieraslajeista on todennäköisesti levinnyt ihmistoiminnan seurauksena taimiaineksen tai puuaineksen kuljetuksien myötä. Suomeen olemme aikojen saatossa saaneet useita uusia taudinaiheuttajia, jotka alun perin ovat tulleet Eurooppaan todennäköisesti Pohjois-Amerikasta tai Aasiasta. Tällaisia ovat valkomännyntervasroso 1800-luvulla, koivun levälaikku vuonna 1990, haavan kuoripolte, haavanroso ja vuonna 2005 alppiruusulta löydetty mustaturma (Lilja ym. 2009a, Lilja ym. 2009b).

Vieras–patogeeni–voi–tappaa–yhden–puulajin–laajoilla–aloilla–viimeiseen–yksilöön.

Joskus uudet vieraslajit leviävät nopeasti alueille, joissa luontaista vastustuskykyä ei ole kehittynyt. Pohjois-Amerikassa on arvioitu muutaman hyvin patogeenisen vieraslajin (kastanjansurma, hollanninjalavatauti, pyökinkuoripolte ja valkomännyntervasroso) levinneen mantereella 7–31 km vuodessa (Evans ja Finkral 2010). Vieraslajit voivat olla niin turmiollisia, että ne tappavat yhden puulajin laajoilla aloilla viimeiseen yksilöön. Näin on käynyt Pohjois-Amerikassa amerikankastanjalle, strobusmännylle ja jalavalle. Viime vuosina tammen äkkikuolema on tappanut tammia laajoilla alueilla USA:n länsirannikolla (Condeso ja Meentemeyer 2007, Dodd ym. 2008). Valkomännyn tervasroson tehokkaaseen leviämiseen Pohjois-Amerikassa on saattanut osaltaan vaikuttaa sienen sopeutuminen leviämään uusien väli-isäntäkasvien avulla (McDonald ym. 2006), joiden esiintymiseen myös ilmastonmuutos voi vaikuttaa. Myös meillä on valkomännyntervasrosolle löydetty uusia luonnonvaraisia väli-isäntäkasveja, joiden avulla sieni voi levitä entistä laajemmin tunnetuilla esiintymisalueilla sekä entistä pohjoisemmille alueille (Kaitera ja Hiltunen 2011, Kaitera, julkaisematon tieto).

2.5.3 Ilmastonmuutoksen vaikutukset hyönteistuhoihin

Osa lajeista hyötyy ilmastonmuutoksesta, eivät kaikki

Pohjois-Euroopan metsäpuilla elää useita satoja hyönteislajeja, mutta vain pieni osa lajeista on merkittäviä tuholaisia Suomessa. Jotkin meillä esiintyvät lajit ovat tärkeitä tuholaisia etelämpänä Euroopassa, mutta niiden aiheuttamia tuhoja ei ole mainittavammin esiintynyt maassamme. Tietyn lajin esiintymiseen tuholaisena vaikuttavat sekä lajin ominaisuudet että paikalliset ympäristötekijät. Esimerkiksi tunturimittarin populaatiodynamiikassa sekä ravinnon laadun vaihtelu ja luontaisista vihollisista erityisesti toukkien loiset että säätekijät (talvipakkaset) ovat kaikki tärkeitä (Haukioja ym. 1988), mutta eri tekijöiden suhteellinen merkitys vaihtelee sekä paikallisesti että alueellisesti (Karhu ja Neuvonen 1998, Virtanen ja Neuvonen 1999, Neuvonen ym. 1999, Neuvonen ym. 2005). Ruskomäntypistiäisen populaatiodynamiikassa puolestaan luontaisilla vihollisilla (mm. koteloja saalistavat pikkunisäkkäät, toukkia vaivaavat loiset, pedot ja virustauti) on suuri merkitys, kun taas ravintokasvin laadun suora merkitys on vähäisempi (Hanski 1987, Saikkonen ja Neuvonen 1993). Joidenkin hyönteislajien aiheuttama tuhoriski voi kasvaa ilmaston lämmetessä, mutta ilmastonmuutos ei välttämättä lisää tuhoriskejä kaikkien hyönteislajien osalta.

Hyönteisten aiheuttamien metsätuhojen riski voi kasvaa muuttuvassa ympäristössä eri syistä (Day ja Leather 1997, Niemelä ym. 2001). Joidenkin lajien aiheuttamien tuhojen riski voi liittyä suoraan ilmaston muutokseen, koska kylmät talvet rajoittavat munina talvehtivien hyönteisten elossa säilymistä (Virtanen ym. 1996, Virtanen ym. 1998, Neuvonen ym. 1999). Myös muuttuvat metsänhoidon käytännöt ja luonnon monimuotoisuuden lisäämiseen tähtäävät toimenpiteet (lahopuun

määrän lisääminen, puuston ikäjakauman muutokset) voivat kasvattaa tuhoriskejä. Luontaiselle lajistollemme vieraitten tuholaislajien uhka on myös kasvamassa maailmanlaajuisen liikkumisen sekä kaupan vapautumisen ja lisääntymisen myötä (Liebhold ym. 1995, Brockerhoff ym. 2006).

Nopeasti muuttuvassa ympäristössä on jatkuva riski jollekin alueelle (esim. Suomi) uusien tuholaisongelmien syntymisestä seuraavin tavoin:

- (A1) Aiemmin muualla (esim. Keski-Euroopassa) tuholaisena esiintyneen lajin leviäminen Suomeen ilmastonmuutoksen seurauksena;

- (A2) Aiemmin muualla (esim. Kauko-Idässä, Pohjois-Amerikassa) tuholaisena esiintyneen lajin leviäminen Suomeen lisääntyneen kansainvälisen kaupan ja tavarankuljetuksen seurauksena;

- (B1) Aiemmin alueella harmittomana esiintyneen lajin muuttuminen tuholaiseksi esim. ilmastonmuutoksen tai metsänviljelyn tai puunkorjuun logistiikassa tapahtuneiden muutosten seurauksena;

- (B2) Olemassa olevan tuholaislajin aiheuttaman riskin kasvu ilmastonmuutoksen tai metsänviljelyn tai puunkorjuun logistiikassa tapahtuvien muutosten seurauksena.

Ilmaston muutosten vaikutuksia metsien hyönteistuhoriskiin voidaan arvioida, mikäli ymmärrämme puiden, tuhohyönteisten ja näiden luontaisten vihollisten väliset vuorovaikutukset sekä ympäristötekijöiden vaikutukset näihin vuorovaikutustekijöihin. Luotettavien riskiarvioiden ja ennusteiden tekeminen edellyttää myös tuholaiskantojen jatkuvaa seurantaa ja populaatiodynaamisia malleja, jotka luotettavasti kuvaavat lajien välisiä vuorovaikutussuhteita ja ympäristötekijöiden vaikutuksia näihin. Valitettavasti tällaisten mallien kehittäminen on metsiemme tuhohyönteisten osalta vasta alkuvaiheessaan (Larsson ym. 2000, Soubeyrand ym. 2009).

Hyötyvätkö mäntypistiäiset?

Ruskomäntypistiäisen kannanvaihtelut kytkeytyvät säätekijöistä mm. kosteusolosuhteisiin ja talvien minimilämpötiloihin. Pistiäisten koteloihin kesällä kohdistuva saalistus on vähäisempää kuivina jaksoina ja karuilla alueilla. Ruskomäntypistiäisen munat eivät selviä hengissä kylmistä talvista (kynnyslämpötila -36 °C). Talvien minimilämpötilojen merkitys lajille on suuri etenkin Itä- ja Pohjois-Suomessa ja talvien lämpeneminen voi lisätä tuhoriskiä näillä alueilla (Virtanen ym. 1996). Myös UV-säteilyn lisääntyminen voi vaikuttaa kannanvaihteluihin, koska biologisessa torjunnassa käytettävä ruskomäntypistiäisen tumamonisärmiövirus tuhoutuu helposti UV-säteilyn vaikutuksesta. Pilkkumäntypistiäisen kannanvaihteluihin talvilämpötiloilla ei liene suoraa vaikutusta, koska laji talvehtii kotelona maassa lumipeitteen suojassa. Tosin lämpökausien aiheuttama lumen jäätyminen suojaa koteloita pikkkunisäkkäiden saalistukselta.

Mäntypistiäistuhoja ovat usein edeltäneet normaalia kuivemmat kesät (Larsson ja Tenow 1984), joten kuivuusjaksojen yleistyminen voi lisätä sekä rusko- että pilkkumäntypistiäisen joukkoesiintymien todennäköisyyttä Suomessa. Mäntypistiäisten kannanvaihtelujen säätelyssä koteloja saalistavilla pikkunisäkkäillä, päästäisillä ja myyrillä, on tärkeä rooli, joten myös näiden luontaisten vihollisten kannanvaihtelut muuttuvassa ympäristössä vaikuttavat mäntypistiäistuhojen esiintymiseen.

Eri tuholaislajien aiheuttamien tuhojen riskiin voi vaikuttaa kasvupaikkatekijöiden ja sääolojen lisäksi myös metsikön ikä. Esimerkiksi ruskomäntypistiäistuhot esiintyvät useimmiten nuorehkoissa,

20−40-vuotiaissa metsissä (Larsson ja Tenow 1984), kun taas pilkkumäntypistiäinen vaivaa useimmiten vanhempia metsiä. Voimakkaammat hakkuut voivat noin kolmenkymmenen vuoden aikajänteellä lisätä ruskomäntypistiäiselle alttiiden männiköiden osuutta metsäalasta, mutta toisaalta pilkkumäntypistiäiselle alttiiden männiköiden osuus pienenisi.

Kirjanpainajatuhot lisääntyvät

Normaalioloissa kirjanpainaja tuottaa meillä yhden sukupolven ja iskeytymishuipun kesän aikana. Kesällä 2010 Suomessa havaittiin ensimmäisen kerran kaksi sukupolvea kirjanpainajalta usealla Kaakkois-Suomen paikkakunnalla (Pouttu ja Annila 2010). Toisen sukupolven kehitys jäi pääosin toukka- ja koteloasteelle. Vaikka populaatiokoko ei kasvanutkaan uusilla talvehtimiskykyisillä aikuisilla, puustolle aiheutui tuhoa siitä, että uusiin puihin oli kyetty munimaan.

Kuva 2.5.6. Pihkavuotoa kirjanpainajan tappaman kuusen rungolla. Kuva/Metla/Michael Müller.

Kirjanpainaja hyötyy lämpötilan noususta nopeutuneena elinkiertona ja mahdollisen toisen sukupolven kehittymisestä kasvukauden aikana (Wermelinger ja Seifert 1998, Lange ym. 2006, Jönsson ym. 2009). Lisäksi muna- ja toukkavaiheiden lyhentyessä pedoille ja loisille altis kehitysvaihe lyhenee, mikä parantaa lisääntymismenestystä (Rouault ym. 2006). Alueilla, joissa kirjanpainaja voi tuottaa kaksi sukupolvea vuodessa, on myös kaksi iskeytymisvaihetta, jolloin puut ovat kasvukauden aikana pitemmän ajanjakson alttiina iskeytymisille. Kuusen edellytykset puolustautua iskeytymisiä vastaan ovat heikommat loppukesällä kuin alkukesällä, ja jo nykyisessä ilmastossa kuusi on alttiimpi kirjanpainajan aiheuttamalle iskeytymiselle loppukesästä (Horntvedt 1988). (Kuvat 2.5.6–2.5.8)

Kuvat 2.5.7 ja 2.5.8. Kirjanpainajan aiheuttamaa tuhoa Sipoossa, Uudellamaalla keväällä 2011. Tuuli on kaatanut iäkkään kuusikon reunalta aiemmin joukon puita. Oikeassa kuvassa irronnutta kuorta, jossa kirjanpainajan syömäkuvioita. Kirjanpainajatuhojen odotetaan lisääntyvän merkittävästi, mikäli kesien lämpeneminen ja piteneminen mahdollistaa jatkossa kahden sukupolven kehittymisen saman vuoden aikana. Kuva Metla/Michael Müller.

Tukkimiehentäi ja lisääntynyt bioenergian korjuu

Tukkimiehentäi on meillä merkittävin metsänuudistamista haittaava tuhohyönteinen. Sen toukat käyttävät ravinnokseen mm. kantojen kuorta ja nilaa, mikä tarjoaa niille runsaasti ravintoa uudistusaloilla. Kannonnostosta on odotettu helpotusta tukkimiehentäin aiheuttamiin taimituhoihin. Tukkikärsäkkäiden esiintymistä, niiden aiheuttamia taimituhoja ja ravinnonkäyttöä on tutkittu BIO-ohjelmassa kannonnostoaloilla ja vertailualueina käytetyillä tuoreilla hakkuualoilla, joilta ei ole nostettu kantoja. Koealoja oli yhteensä kymmenen ja ne sijaitsevat Pohjois-Karjalassa sekä Keski-Suomessa.

Tulosten perusteella kannonnosto lisää tukkimiehentäin esiintymistä uudistusaloilla sekä ensimmäisenä että kolmantena kesänä hakkuun jälkeen. Kannonnostoalueilta saatiin pyydettyä molempina kesinä tilastollisesti merkitsevästi enemmän tukkimiehentäitä kuin kontrollialoilta, joilta ei oltu nostettu kantoja. Pyydyksissä havaitut tukkikärsäkkäiden suuremmat määrät kannonnostoaloilla saattavat selittyä sillä, että kantojen ja hakkuutähteiden vähäisempi määrä sai ne liikkumaan enemmän ja täten hyönteiset joutuivat pyydyksiin useammin.

Jäljelle jääneiden juurten määrässä ei ollut merkittävää eroa saman alueen kannonnosto- ja vertailualueiden välillä. Uudistamisen jälkeen jäljelle jäänyttä havupuiden juurten kuoripinta-alaa oli keskimäärin 3 700 m² hehtaarilla, josta keskimäärin 20 % oli tukkikärsäkkäiden vioittamaa. Lisäksi juurinilurit olivat syöneet juurinäytteiden pinta-alasta keskimäärin 18 %.

Männyn kantonäytteistä löytyi keskimäärin 133 ja kuusen 59 havaintoa tukkimiehentäin eri kehitysvaiheista. Tukkikärsäkkäiden aiheuttama juurten syöntivioitus, kannoista löydetyt eri kehitysasteiden lukumäärät ja hyönteisten pyyntitulokset viittaavat siihen, ettei kannonnosto vähennä tukkikärsäkkäiden lukumäärää uudistusalalla. Erikokoisia juuria ja erityisesti pieniä juuria on kannonnoston jälkeen edelleen runsaasti jäljellä maaperässä ja tukkikärsäkkäiden toukat voivat käyttää näitä ravintonaan. Lisäksi aikuinen tukkimiehentäi on kaikkiruokainen puuvartisten kasvien suhteen, joten kannonosto ja hakkuutähteiden keruu eivät todennäköisesti rajoita niiden lisääntymistä.

Uudistusaloilla tukkimiehentäin syöntivioituksia taimissa voidaan vähentää kiinnittämällä erityistä huomiota maanmuokkauksen laatuun. Kannonnostosta riippumatta kivennäismaapintainen mätäs taimen ympärillä vähentää tukkimiehentäin aiheuttamia vioituksia ja takaa taimelle parhaat mahdollisuudet selvitä elossa istutuksen jälkeen.

Lisää uusia tuholaisia tulossa

Monien perhoslajien on todettu levittäytyneen pohjoiseen viimeaikaisen ilmaston lämpenemisen seurauksena (Parmesan ym. 1999), ja näiden joukossa voi olla myös tuholaislajeja. Havununna on aiemmin ollut Suomessa harvinaisuus, mutta havainnot lajista ovat runsastuneet 2000-luvulla. Esimerkiksi Nauvon Seilissä tavattiin kesällä 2005 kohtalaisen runsaasti aikuisia havununnia (Pouttu ym. 2006). Viime vuosina perhosesta on tehty yhä enemmän havaintoja myös sisämaasta, mutta toistaiseksi tietoon ei ole tullut havaintoja lajin aiheuttamista tuhoista Suomessa. Havununnan laajoja epidemioita on ollut Itä- ja Keski-Euroopassa, ja suppeampia tuhoja on ollut myös Tanskassa ja Ruotsissa (Bejer 1988). Populaatioiden kasvua ovat edeltäneet lämpimät kesät ja pitkään jatkunut kuivuus. Tuhoalueille on tyypillistä, että heinäkuun keskilämpötila on vähintään 16 °C ja syyskuun keskilämpötila vähintään 10,5 °C sekä sadanta 400–700 mm vuodessa (Bejer 1988). Kerran alettuaan tuhot voivat jatkua alueella pitkään.

Havununna voi yleistyä meillä ilmaston lämmetessä. Lajin esiintymisalue ulottuu tällä hetkellä Pohjois-Afrikasta, Länsi-Euroopan ja Venäjän kautta Japaniin (Bejer 1988). Keski-Ruotsi ja Suomen eteläarannikko ovat havununnan pohjoisinta esiintymisaluetta. Vanhasen ym. (2007) tekemän CLIMEX-mallin mukaan ilmaston lämmetessä 1,4 °C astetta havununnan levinneisyysalue siirtyisi Oulun korkeudelle saakka. Tällöin on mahdollista, että havununna voi aiheuttaa tuhoja myös meillä.

Mänty on ollut luontainen puulaji havununnan levinneisyysalueella, mutta kuusen viljely on ollut pääasiallinen metsänuudistamismenetelmä tällä alueella 1900-luvun alusta asti (Bejer 1988). Suurten havununnaepidemioiden syynä pidetäänkin yleisesti kuusen viljelyä sille sopimattomilla liian kuivilla kasvupaikoilla. Kuuselle on tyypillistä, että se ei toivu havununnan syönnin ylittäessä 70 % neulasmassasta. Usein kuusi kuolee jo, kun puolet neulasmassasta on syöty (Bejer 1988). Keski-Euroopassa tuhoja on erityisesti ylitiheissä metsiköissä, joten ajallaan tehdyt harvennukset vähentävät tuhoriskiä.

Tähtikudospistiäinen (*Acantholyda posticalis*) on esimerkki meillä koko maassa harmittomana esiintyneestä hyönteisestä, jonka aiheuttamat tuhot voivat yleistyä Pohjois-Euroopassa. Aiemmin laji on aiheuttanut tuhoja mm. Keski- ja Itä-Euroopan männiköissä. Kuivana kesänä 2006 tällä lajilla oli joukkoesiintymä Porissa noin 200 ha:n alueella, jossa vakavaa tuhoa oli 30 ha:lla. Tuho on jatkunut ja laajentunut ja kesällä 2009 vakavaa tuhoa oli jo 200 ha:lla.

Metsäteollisuus on globalisoitunut ja puutavaran sekä muun puumateriaalin tuonti ulkomailta on lisääntynyt, mikä on poistanut leviämisen esteitä tuholaisilta. Esimerkiksi aasianrunkojäärän (*Anoplophora glabripennis*) aikuisia yksilöitä on löydetty jo kaksi kertaa, vuosina 2007 ja 2010, Suomeen tuoduista lähetyksistä (Evira 2011). Aasianrunkojäärä on monia lehtipuita vioittava kovakuoriainen, jonka toukat elävät puun sisässä ja voivat tappaa puun (Evira 2011). Kuoriainen leviää kansainvälisessä kaupassa puisen pakkausmateriaalin mukana. Myös *Agrilus anxius* –jalosoukko, koivujen paha tuholainen Pohjois-Amerikassa, saattaa tulla Eurooppaan, koska Pohjois-Amerikasta tuodaan lisääntyvässä määrin haketta bioenergiantuotantoon. Näistä syistä johtuen on tärkeää kehittää mekanismeja, joilla uudet tuholaislajit voidaan havaita nopeasti. Tällöin uusien tuholaisten torjunta ja ehkä hävittäminenkin ovat vielä mahdollisia.

2.5.4 Myyräkantojen vaihtelu saattaa heiketä

Myyrät ovat olennainen osa pohjoista selkärankaiseliöyhteisöä. Ne ovat elintärkeää saalista monelle petolajille, niillä on merkittävä rooli kasvillisuuden muokkaajana ja lisäksi ne voivat levittää tauteja ihmisiin (Brown ja Heske 1990, Ostfeld ja Canham 1993, Terborgh ym. 2001, Sundell ym. 2004, Olsson ym. 2010). Myyrät ovat lisäksi yksi merkittävimmistä tuholaisista metsäpuiden taimikoissa. Runsaimmillaan myyrät voivat tuhota miljoonia taimia tuhansien hehtaarien aloilta (Huitu ym. 2009).

Peltomyyrien määrät ovat Suomessa kasvaneet ja metsämyyrien pienentyneet.

Myyräkannat vaihtelevat 3−4 vuoden sykleissä, joita saavat aikaan petojen saalistus ja talviravinnon puute (Hansson ja Henttonen 1988, Stenseth 1999, Huitu ym. 2003). Myyrien kannanvaihteluiden on havaittu heikentyneen viimeksi kuluneiden parin vuosikymmenen aikana monin paikoin eri puolilla maailmaa (Henttonen ja Wallgren 2001, Hörnfeldt ym. 2005, Bierman ym. 2006, Ims ym. 2008, Brommer ym. 2009).

Heikkenemiselle on esitetty useita hypoteeseja, joista toistuvin on ollut ilmastonmuutos (Ims ym. 2008, Gilg ym. 2009, Post ym. 2009). Varsinkin talvien leudontuminen ja lumisen kauden lyhentyminen voivat heikentää myyräsyklejä. Joillain alueilla kyseisiä ilmiöitä on jo havaittu ja ne on voitu kohtalaisen luotettavasti kytkeä muuttuneisiin talviolosuhteisiin (Bierman ym. 2006, Kausrud ym. 2008). Talvet ovat leudontuneet myös Etelä-Suomessa, mutta samalla alueella myyräkantojen vaihtelu on ollut kuluneen vuosikymmenen aikana voimakkaampaa kuin koskaan. Samoin pohjoisessa Fennoskandiassa pitkään vallinnut ”syklitön” vaihe näyttää olevan loppumassa. On siis mahdollista, että muutokset myyräsyklien säännöllisyydessä johtuvat ilmaston lisäksi myös muista, toistaiseksi tuntemattomista, tekijöistä.

Ilmastonmuutos voi vaikuttaa myyrien kannanvaihteluihin joko suoraan tai epäsuorasti ravintoverkon kautta. Myyriin epäsuorasti ilmaston kautta vaikuttavia tekijöitä tunnetaan toistaiseksi huonosti. Muuttuvat ilmasto-olot voivat vaikuttaa esimerkiksi joko nisäkäsyhteisöjen kiltarakenteeseen (erilaisten saalis- ja petotyyppien monimuotoisuus), myyriä saalistavien petojen lisääntymis- tai saalistusmenestykseen (Hansson ja Henttonen 1985, Hanski ym. 1991) tai myyrien käyttämien ravintokasvien levinneisyyteen, runsauteen tai ravinnolliseen laatuun ja tätä kautta myyriin (Negus ja Berger 1977, Laine ja Henttonen 1987, Ayres 1993, Veteli ym. 2002, Bronson 2009).

MIL-ohjelman puitteissa on osoitettu, että ilmastonmuutos on jo vaikuttanut myyriä ravinnokseen käyttävien petolintujen populaatioekologiaan. Hiirihaukan lisääntymisaika on varhaistunut suotuisten ilmasto-olojen ansiosta, mutta samaan aikaan poikastuotto on pienentynyt poikasvaiheen epäedullisten ilmasto-olojen vuoksi. Tämä on osaltaan vaikuttanut hiirihaukan populaatiokoon voimakkaaseen pienenemiseen 1970-luvulta lähtien (Lehikoinen ym. 2009). Maassamme pesivien pöllölajien lisääntymisen ajoitukseen ja menestykseen on säätekijöillä lähes yhtä paljon vaikutusta kuin myyrärunsaudella (Lehikoinen ym. 2011). On selvää, että myyriä syövien petojen runsausmuutokset kokonaisuutena tulevat heijastumaan myös myyräkantojen dynamiikkaan ja tätä kautta myös myyrien aikaansaamien tuhojen määrään.

MIL-tutkimusohjelmassa on myös selvitetty ilmastotekijöiden suoraa vaikutusta myyrien kannanvaihteluihin. Tutkimuksissa on havaittu, että talven lumiolosuhteilla on aiemmin luultua pienempi merkitys myyrien kannankasvun määrääjänä. Sitä vastoin syksyn sateet vaikuttavat myyriin negatiivisesti ja kevään sekä kesän sateet positiivisesti. Muutosten myötä peltomyyrän sukuisten myyrien määrät Suomessa ovat runsastuneet ja metsämyyrän sukuisten myyrien määrät pienentyneet kuluneiden kolmen vuosikymmenen aikana (Korpela ym. 2011, käsikirjoitus). Havaitun kaltainen runsaussuhteiden muutos on todennäköisesti yhteydessä taimituhojen runsastumiseen. Esimerkiksi syksyn 2008 jättimäinen peltomyyrähuippu ja sitä seuranneet kaikkien aikojen pahimmat tuhot saattoivat johtua kesän kosteudesta, minkä ansiosta peltomyyrillä oli jatkuvasti tarjolla tuoretta itävää heinäravintoa. Kyseinen ravinto sisältää runsaasti estrogeenihormonien esiasteita, jotka tehostavat peltomyyrien lisääntymistä (Berger ym 1981). Myyrähuippu siis ilmeni oman rytmiikkansa mukaisesti kesällä 2008, mutta sille kesälle sattuneet edulliset ilmasto-olosuhteet voimistivat huippua.

Myyrätuhoja esiintyy syklisen kannanvaihtelun huippuvaiheessa, kun myyriä on runsaasti (Huitu ym. 2009). Ilmastonmuutoksen oletetaan heikentävän syklien voimakkuutta ja kasvattavan syklin pituutta (Ims ym. 2008). Ohjelmassa tehdyn tutkimuksen mukaan peltomyyrien syklisyys on heikentynyt Pohjois-Suomessa ja voimistunut Etelä-Suomessa (Korpela ym. 2011, käsikirjoitus). Muutosten yhteyttä ilmastonmuutokseen tutkitaan edelleen.

Tämänhetkisen tietämyksen mukaan muuttuva ilmasto on saanut aikaan peltomyyrän sukuisten myyrien runsastumisen Suomessa, johon ovat myötävaikuttaneet myös metsätalousmenetelmät (paljaaksi-

Ajantasainen tieto metsien terveydestä on edellytys tehokkaille metsänhoidollisille korjaustoimenpiteille.

hakkuut ja sen jälkeinen heinittyminen) sekä luultavasti myös maatalouden muutokset, kuten pakettipellot ja karjatalouden loppuminen. Samaan aikaan näiden myyrien kannanvaihtelut Etelä-Suomessa ovat voimistuneet. Molemmat tekijät uhkaavat johtaa myyrien aiheuttamien taimituhojen voimakkaaseen runsastumiseen tulevaisuudessa. On kuitenkin mahdollista, että myyrien populaatiodynamiikka muuttuu ilmastonmuutoksen edetessä äkillisesti, johtaen nykyisin vallitsevan voimakkaan syklisyyden katoamiseen. Kesien ennustettu lämpeneminen ja kuivuus tulisivat vähentämään peltomyyrien lisääntymistä. Lisäksi lajistodiversiteetin monipuolistuminen, vaikkapa ilmaston lämpenemisen vuoksi, yleensä vakauttaa eliökantoja. Tässä tapauksessa myyrien suurimmat tiheydet jäisivät nykyistä huomattavasti alemmiksi, mikä puolestaan vähentäisi myyrien aiheuttamia syklisiä, ajoittaisia taimituhoja huomattavasti, mutta tuhoja voisi esiintyä jatkuvasti jonkin verran.

2.5.5 Hirvieläinten levinneisyys muuttuu

Hirvieläinten ravinnonkäyttö voi merkittävästi muokata metsäekosysteemin rakennetta ja toimintaa (Risenhoover ja Maass 1987, Pastor ja Naiman 1992). Suomessa hirvi on tällä hetkellä talousmetsiemme merkittävin vahinkojen aiheuttaja männyn ja koivun taimikoissa (Korhonen ym. 2010). Lisäksi erityisesti haapaan ja pihlajaan kohdistuvan ravinnonkäytön on arvioitu vaikuttavan metsien monimuotoisuuteen myös luonnonsuojelualueilla (Heikkilä ja Tuominen 2009). Hirvi on hyötynyt nykymuotoisesta metsikkötalouteen perustuvasta metsien hoidosta erityisesti talviravintoa tarjoavien männyn taimikoiden kautta. Yhdessä säännellyn ja tavoitteellisen metsästyksen ja vähäisten petokantojen kanssa metsätalous on osaltaan vaikuttanut hirvien runsastumiseen viime vuosikymmeninä.

Metsä- ja valkohäntäkauriin sekä metsäpeuran merkitys vahinkoeläiminä ja metsäekosysteemin muokkaajina on hirveä pienempi ravinnonkäytön erilaisuuden vuoksi ja myös siksi, että kauriskannat ovat tällä hetkellä vasta kasvu- ja levittäytymisvaiheessa ja metsäpeurakanta taas on pieni ja uhanalainen. Kuitenkin myös metsä- ja valkohäntäkauriit voivat hyödyntää erityisesti pieniä taimikoita ravinnokseen ja aiheuttaa merkittäviäkin vahinkoja (Heikkilä ym. 2003). Niiden kantojen nousu ei hirven tavoin liity metsien rakenteessa tapahtuneeseen muutokseen, vaan niiden kohdalla kyse on pääsystä siirrettyinä niille luonnonolosuhteiden puolesta hyvin soveltuville alueille: valkohäntäkauris tuotiin Pohjois-Amerikasta 1930-luvulla (Salmi 1949) ja metsäkauriin maansisäisiä siirtoja tehtiin Perämeren rannikolta ja Ahvenanmaalta Etelä-Suomeen 1980- ja 1990-luvuilla. Leudot talvet 1990-luvulla ja 2000-luvun alussa ja varsinkin valkohäntäkauriin osalta paikoin voimakas talviruokinta lienevät myös edistäneet lajien levittäytymistä ja kantojen runsastumista.

Ilmaston puolesta hirvi on sopeutunut hyvin Suomen nykyisiin olosuhteisiin, mutta metsä- ja valkohäntäkauriit elävät täällä levinneisyysalueensa rajalla. Esimerkiksi lumipeitteen paksuus vaikuttaa selvästi sekä valkohäntä- että metsäkauriin ravinnon ja elinympäristön valintaan, selviämiseen talvesta ja leviämiseen (Telfer 1970, Mystlerud ym. 1997). Valkohäntäkauris onkin menestynyt parhaiten Etelä- ja Länsi-Suomessa alueilla, jotka vastaavat lumipeitteen paksuuden ja kylmimmän kuukauden keskilämpötilan perusteella alkuperäaluetta Pohjois-Amerikassa (Salmi 1949). MIL-ohjelmassa toteutetussa metsä- ja valkohäntäkauriiden seurantatutkimuksessa on havaittu lumen paksuudella olevan selkeä yhteys elinpiirien kokoon (Saari ym., käsikirjoitus). Erityisen selvästi lumipeitteen paksuneminen pienensi elinpiiriä pohjoisimmilla yksilöillä. Lumipeitteen paksuus muodostuu kriittiseksi tekijäksi talvesta selviytymisen kannalta. Pohjoisessa ravintoresurssit ovat huonommat ja niiden tehokas hyödyntäminen edellyttäisi liikkumista laajemmalla alueella kuin lumiolojen puolesta on mahdollista.

Ilmastonmuutoksella voi olla vaikutuksia hirvieläinten aiheuttamiin metsätuhoihin. Tämä voi johtua sekä eläinkannoissa tapahtuvista muutoksista että muutoksista ympäristössä ja ravintokasvilajistossa, joilla voi olla vaikutuksia eläinten ravinnonkäyttöön. Vaikutukset ovat vaikeasti ennakoitavia ja toistaiseksi on mahdollista esittää epävarmoja arvioita lähinnä liittyen elinoloissa tapahtuviin muutoksiin esimerkiksi lämpötiloissa ja lumipeitteessä.

Nykyistä lämpimämmät kesät ja korkeammat talvilämpötilat voivat aiheuttaa hirvelle energiaa kuluttavaa ja selviytymistä heikentävää lämpöstressiä, jonka seurauksena hirvikantojen painopiste siirtynee Suomessa vähitellen pohjoisemmaksi. On kuitenkin huomattava, että lämpöstressin vaikutuksista hirviin on toistaiseksi ristiriitaisia tuloksia (Dussault ym. 2004, Lowe ym. 2010). Käytännön kokemusten mukaan hirvituhot ovat pahimmat talvina, jolloin lumipeite tulee aikaisin ja on runsas. Tällöin hirvet laumautuvat pienille talvielinpiireille, jolloin pienikin hirvikanta aiheuttaa suuria paikallisia vahinkoja. Mikäli talvet muuttuvat vähälumisemmiksi, voi olla mahdollista, että paikallisten vahinkokeskittymien syntyminen vähenee, kun hirvet pääsevät helpommin liikkumaan laajemmalla alueella. Tällöin syöntien vaikutukset jäävät lievemmiksi, mikäli hirvikannan taso on talviravintovaroihin nähden kohtuullinen.

Todennäköisin ilmastonmuutoksen vaikutus hirvieläimiin aiheutuu talvien lauhtumisesta, lumipeitteen ohentumisesta ja lumipeitteisen ajan lyhenemisestä, jolloin valkohäntä- ja metsäkauriille ilmastollisesti suotuisa alue laajenee. Tällöin on odotettavissa näiden lajien levittäytyminen edelleen pohjoisemmaksi sellaisille alueille, joilta löytyy niiden suosimaa peltojen ja metsien vaihtelun luonnehtimaa maisemarakennetta. Toisaalta metsäjäniskannan pitkäaikainen väheneminen vaikuttaa ilveksen ravinnonvalintaan, jolloin lisääntynyt saalistuspaine kohdistuu pieniin hirvieläimiin. Monin paikoin pienten hirvieläinten määrät ovat kääntyneet laskuun aivan viime vuosina, ainakin osin lisääntyneen ilveskannan vuoksi. Trofiatasojen välisten vuorovaikutusten ennustaminen ei ole helppoa.

2.5.6 Havaittavissa olevat ilmastonmuutoksen seuraukset

Sään vuosittainen vaihtelu on edelleen suurta verrattuna vähittäiseen ilmastonmuutokseen. Siten yksittäisiä tautiepidemioita ei yleensä pystytä todentamaan ilmastonmuutoksen aiheuttamiksi. Tautiepidemioiden pitkäaikaisseurantaa on tehty vähän, eikä epidemioiden vaihteluja ole näin ollen voitu mallintaa eri tekijöiden selvittämiseksi. Muutamien tautiepidemioiden arvellaan johtuvan ilmastonmuutoksesta. Tällaisia ovat koko Euroopassa yleistyneet punavyökariste-epidemiat sekä tervasroson (kaksi lajia: *Cronartium flaccidum* ja *Peridermium pini*) männylle aiheuttamien tuhojen yleistyminen 2000-luvulla Fennoskandian pohjoisosissa ja varsinkin Norrbottenissa Pohjois-Ruotsissa (Krekula ym. 2005, Barklund 2006). Muina syinä ilmiöihin voivat olla myös aiheuttajasienen aiempaa virulentimman muodon yleistyminen sekä männyn kasvatus sille liian rehevillä kasvupaikoilla tai taudille alttiin siemenalkuperän käyttäminen metsänuudistuksessa.

Eräillä alueilla Kanadan Brittiläisen Kolumbian länsirannikolla kesäsateet ovat lisääntyneet, minkä katsotaan johtuvan ihmisen aiheuttamasta ilmaston muutoksesta. Lisääntyneiden kesäsateiden myötä sikäläinen punavyökariste on muuttunut heikosta patogeenista aggressiiviseksi tuholaiseksi kontortamännyllä (Woods ym. 2005). Brittiläisen Kolumbian sisäosissa kesäsateet ovat sen sijaan vähentyneet, kesän lämpötilat nousseet, eikä talvisin ole koettu viime vuosina kovia pakkasia. Tämä on myötävaikuttanut vuoristonilurin aiheuttamiin laaja-alaisiin (> 16 000 000 ha) kontortamäntytuhoihin. Ilmiön uskotaan johtuvan ilmastonmuutoksesta (Kurz ym. 2008). Tuhojen laajuuteen on myötävaikuttanut oleellisesti myös kontortamäntyä suosinut metsänhoito, jonka vuoksi alueelle on muodostunut laajoja ikääntyneitä puhtaita kontortametsiä.

Suomessa keskitalvella esiintynyt lämpöaalto ja parin päivän vesisade sitä seuraavine maanpinnan jäätymisineen on tuhonnut nousevan sopulikannan ainakin talvella 1997−1998 ja 2001−2002. Lapissa myös tunturi- ja hallamittarituhoja on esiintynyt uusilla alueilla sisämaassa (Jepsen ym. 2008).

2.5.7 Tauti- ja tuhoriskien minimointi

Puulajiston monipuolistaminen

Suomessa tulisi pyrkiä monipuolistamaan metsien puulajistoa ja välttää laajoja tasaikäisiä yhden puulajin metsiköitä.

Kun ilmastonmuutoksen ennusteeseen sisältyy huomattavia epävarmuuksia, on vaikea määritellä tarkasti riskit ja metsänhoitotoimet niiden minimoimiseksi. Yleisesti ottaen voidaan kuitenkin todeta, että suurien tappioiden välttämiseksi tulisi metsiä hoitaa mahdollisimman monimuotoisiksi, varsinkin puulajiston suhteen (Lüpke 2004, Brang ym. 2008, Woods ym. 2010, Sturrock ym. 2011). Tällöin ympäristöolosuhteiden muuttuessa riski laaja-alaiselle totaaliselle tuholle vähenee joidenkin lajien mahdollisesti hyötyessä muutoksesta ja toisten kärsiessä siitä. Puulajistoltaan monimuotoisessa metsässä yksittäinen tuhonaiheuttaja ei voi yleistyä laaja-alaisesti. Lähes kaikki tiedossa olevat suurta tuhoa aiheuttaneet taudit ja tuholaiset ovat toistaiseksi kohdistuneet vain yhteen puulajiin tai -sukuun. Erityisen vältettäviä ovat samanikäiset tiheät yhden puulajin laaja-alaiset metsiköt, kuten viimeaikaiset vuoristonilurin aiheuttamat tuhot Kanadan Brittiläisen Kolumbian kontortamänniköissä ovat karulla tavalla osoittaneet (Kurz ym. 2008) (Kuva 2.5.9). Suomessa olisi syytä pyrkiä monipuolistamaan metsien puulajistoa ja välttää laajoja tasaikäisiä yhden puulajin metsiköitä.

Tästä näkökulmasta tarkasteltuna on nykyinen tilanne Suomen metsien osalta arveluttava, kun 80 % puustostamme on kahta puulajia, mäntyä ja kuusta (Metsätilastollinen vuosikirja 2010). Yhä suurempi osa uudistusaloista istutetaan nykyään kuuselle. Viivästyneiden kasvatushakkuiden vuoksi metsämme myös tihentyvät. Nykyinen metsänhakkuumäärä 55 milj. m^3vuodessa alittaa reilusti kestäväksi hakkuukertymäksi arvioidun 70 milj. m^3vuodessa (Metsätilastollinen vuosikirja 2010), ja näin ollen vanhojen tiheiden metsien määrä lisääntyy. Kanadan länsiosissa koetun

Kuva 2.5.9. Esimerkki metsätuhosta pahimmillaan. Vuoristonilurin tappamia ja sen vuoksi kaadettuja metsäalueita lokakuussa 2010 lähellä Prince Georgea Brittiläisessä Kolumbiassa Kanadassa. Vuoristoniluri on tappanut etupäässä kontortamänniköitä mutta myös muita mäntylajeja yli 16 000 000 ha yksistään Länsi-Kanadassa. Pinta-ala vastaa lähes Suomen koko metsäpinta-alaa. Tuhot alkoivat Brittiläisessä Kolumbiassa ja ovat levinneet nyt Kalliovuorten yli kohti Kanadan keskiosia sekä USA:n puolelle. Kuva Metla/Heikki Nuorteva.

vuoristonilurituhon kaltaisien katastrofien riskin vähentämiseksi olisi syytä Suomessa pyrkiä monipuolistamaan puulajistoa. Tämä suositus pätee riippumatta siitä, muuttuuko ilmastomme vai ei, mutta ilmastonmuutos toki lisää vakavan tuhon riskiä.

Ilmastonmuutoksen toteutuessa ennustetulla tavalla voi yksittäisten alueiden kasvupaikkaluokitus muuttua. Esimerkiksi alue, jolla nyt menestyy kuusi, saattaa tulevaisuudessa olla sille liian kuiva, mutta voi soveltua rauduskoivulle tai haavalle (Kellomäki ym. 2008). Kun muutoksia ei voida tarkkaan ennakoida, totaalisen epäonnistumisen riski vähenee useita puulajeja kasvatettaessa. Sekametsien pienempi riski tautien suhteen on osoitettu mm. juurikäävän (Thor ym. 2005) ja tammenlakasteen kohdalla (Menges ja Loucks 1994). Tämä johtuu siitä, että useimmat vakavat taudinaiheuttajat ovat patogeenisiä vain yhdelle puulajille ja lisäksi korkeintaan tämän puulajin lähisukuiselle lajille. Vaikka taudit leviäisivätkin itiöiden välityksellä ilmateitse, vähenee yksittäisen puun osalta todennäköisyys saada tartunta etäisyyden kasvaessa itiöitä levittävään puuhun. Toisin sanoen itiöiden määrä ilmassa vähenee taudinkantajien tiheyden laskiessa. Monilajisessa metsässä myös ravintoverkot ovat monipuolisemmat, mikä usein edistää vakautta, kun yhden lajin saalis-petosuhteet ja niiden dynamiikkaan liittyvät aikaviiveet puuttuvat. Puuston monilajisuus vähentää myös hyönteistuhoja, varsinkin jos puusto koostuu monista toisilleen etäisistä puulajeista (Jactel ja Brockerhoff 2007).

Taudin ollessa hyvin aggressiivisen ja tappaessa lähes kaikki saman lajin puut, on kohtalokasta, jos metsät ovat laaja-alaisesti yhden puulajin peitossa. Tällaisia tuhonaiheuttajia tunnetaan monia, ja ne ovat lähes kaikki tulokas- tai vieraslajeja, eli lajeja, joilla ei ole yhteistä kehityshistoriaa isäntäpuulajin kanssa. Poikkeuksena mainittakoon vuoristoniluri, joka on Kanadassa alueen alkuperäislajistoa.

Jos emme ennakoivasti monipuolista metsiämme, saattaa tämä toteutua luonnon pakottamana. Usein toistuvat erilaiset voimakkaat häiriöt ovat eräillä lauhkean ilmastovyöhykkeen alueilla johtaneet monimuotoisiin lehtipuu – havupuusekametsiin, kun niiden on annettu uudistua luontaisesti. Näin on käynyt USA:n koillisosissa, joissa aiemmin oli runsaasti metsäpaloja, laaja-alaisia hakkuita, erittäin aggressiivisia vieraslajeja ja joissa esiintyy lisäksi 70–100 vuoden välein voimakkaita hurrikaaneja. Näitä metsiä pidetään nykyään puuston monilajisuuden vuoksi kestävinä ympäristömuutosten suhteen (Lüpke 2004).

Lehtimetsien lisäämiseksi tulisi hirvieläinten kantoja vähentää.

Monille karuille kasvupaikoille, varsinkin Pohjois-Suomessa, ei ole puulajiksi muita vaihtoehtoja kuin mänty, mutta tuoreilla kankailla ja sitä rehevämmillä paikoilla menestyisivät kuusen lisäksi monet muutkin puulajit kuten koivu ja haapa. Tapion ohjeiden (Hyvän metsänhoidon suositukset 2006) mukaan tulisi havupuuvaltaisiin metsiköihin jättää ”lievää lehtipuusekoitusta”, eikä tätä periaatetta ole käytännön syistä yleensä mahdollisuus muuttaa, mutta puhtaiden lehtipuumetsiköiden määrää tulisi lisätä. Monet metsänomistajat tekisivätkin todennäköisesti näin, jos hirvieläinkannat tämän mahdollistaisivat. Siksi hirvieläinkantoja tulisi monin paikoin vähentää nykyisestä huomattavasti. Lehtipuiden käytöllä voitaisiin myös torjua juurikääpää jo infektoituneista kuusikoista. Siperianlehtikuusen istutusta voisi harkita paikoilla, jotka eivät ole juurikäävän saastuttamia.

Viime vuosina on yhä useammin puhuttu ilmastonmuutoksen hyödyntämisestä käyttämällä aiempaa eteläisempiä siemenalkuperiä. Metsän terveyden kannalta huomattavan eteläisten alkuperien käyttö on arveluttavaa, sillä niiden on todettu olevan paikallisia alkuperiä alttiimpia erilaisille metsätuhoille (Uotila 1985; Viherä-Aarnio 2009). Esimerkiksi Salpausselän etelänpuoleisella rannikkoalueella ei ainakaan Viroa eteläisempiä kuusi- tai koivualkuperiä tulisi käyttää. Mänty sietää siirtoja kuusta ja koivua huonommin.

Abioottisten tuhojen torjunta

Koska kuusi on herkin puulaji tuulituhoille, voidaan tuhoriskiä pienentää vähentämällä metsänhoidollisesti kuusen osuutta metsissä. Myös oikea-aikaisilla harvennuksilla ja hakkuualojen rajauksien suunnittelulla voidaan vähentää tuulituhoriskiä (Hyvän metsänhoidon suositukset 2006). Juurikäävän torjunta vähentää merkittävästi tuulituhoriskiä. Juurikäävän saastuttamalla alueella Ruotsissa 59 % tuulien kaadoista selittyi juuri- ja tyvilaholla (Oliva ym. 2008). Ilmastonmuutoksen vaikutuksia metsäpaloriskiin tutkitaan Ilmatieteen laitoksella, jossa on käynnissä tutkimushankkeita (FUME) osana EU:n 7. puiteohjelmaa.

Lumituhot vähentyvät ilmastonmuutoksen myötä. Muiden abioottisten tekijöiden kuten lisääntyvän UV-säteilyn ja alailmakehän otsonipitoisuuden sekä typpi- ja rikkilaskeumien vaikutusmekanismit ovat vuorovaikutteisia ja moninaisia. Niiden haitallisten vaikutuksien lieventämiseksi ei tunneta muita torjuntakeinoja kuin puuston mahdollisimman hyvän yleiskunnon ylläpito metsänhoidollisin keinoin.

Juurikäävän torjunta yhä tärkeämpää

Juurikääpää voidaan torjua usealla tavalla. Itiölevintää tuoreiden kantopintojen kautta voidaan torjua levittämällä kasvinsuojeluainetta (ureaa tai kilpailevaa sientä) puunkaadon yhteydessä kannolle. Lisäksi tulee välttää vahingoittamasta kasvavia puita ja niiden juuria hakkuiden ja muiden metsänhoitotoimien yhteydessä. Näillä toimenpiteillä voidaan estää juurikäävän leviämistä alueille, joilla sitä ei entuudestaan esiinny. Sen sijaan alueilla, joilla juurikääpäinfektio jo on, eivät nämä keinot tehoa, koska juurikääpä voi levitä kasvullisesti juuriyhteyksiä pitkin. Lahossa kuusikossa juurikäävän leviämistä voidaan vähentää jonkin verran kannonnoston avulla (Vasaitis ym. 2008). Juurikäävän saastuttamia tyveyksiä ei tule jättää hakkuualueelle, koska niihin voi muodostua juurikäävän itiöemiä lisäämään tartuntariskiä (Müller ym. 2007).

Ilmastonmuutoksen ja bioenergiatuotannon kokonaisuutta tarkasteltaessa on selvää, että juurikäävän aiheuttamat tuhot ja niiden seurauksena myös tuulituhot tulevat lisääntymään. Siksi tuhojen nykyistä tehokkaampaan ehkäisyyn tulisi valmistautua jo nyt. Kantokäsittelyn tai kannonnoston avulla torjuntaa tulisi tehostaa etenkin Pohjanmaalta Kainuuseen ulottuvalla vyöhykkeellä, jolla juurikääpää ei nyt esiinny tai se on harvinainen.

Ainoa tunnettu tapa hävittää juurikääpä saastuneelta alueelta on uudistaa alue lehtipuilla.

Ainoa tunnettu keino juurikäävän hävittämiseksi saastuneelta alueelta on uudistaa alue lehtipuilla. Koivu ja haapa ovat kuusen juurikääpää vastaan hyvin ja männynjuurikääpää vastaan verrattain vastustuskykyisiä. Tätä keinoa voidaan käyttää valitettavasti harvassa paikassa suurten hirvieläinkantojen vuoksi. Hirvieläinkantoja pitäisikin harventaa huomattavasti nykyisestä, jotta kuusen- ja männynjuurikäävän aiheuttamia huomattavia tappioita (40+5 milj. € vuodessa) voitaisiin vähentää käyttämällä puulajikiertoa pahimmin saastuneilla alueilla. Lisäksi torjuntatoimenpiteiden toteutumista ja tehokkuutta tulisi seurata jatkuvasti.

Juurikäävän torjunnan tutkimukseen tulisi panostaa huomattavasti nykyistä enemmän: erityisesti pitäisi kehittää keinoja, jotka mahdollistavat terveen metsän kasvatuksen juurikäävän infektoimalla kasvupaikalla.

Energiapuunkorjuu edellyttää huolellisuutta jotta juurikääpätuhot eivät lisääntyisi

Metsäenergian tuotanto on lisännyt korjuutapoihin mm. kantojen noston hakkuualoilta sekä ainespuuta pienempien puiden korjuun. Energiatuotannon ohella kantojen nostoa perustellaan myös juurikäävän torjunnalla. Torjunnan onnistuminen edellyttää kuitenkin erityistä huolellisuutta kantojen korjuun kaikissa työvaiheissa. Myös energiapuuharvennuksissa tulisi tiedostaa juurikäävän leviämisen riski. Energiapuuharvennuksissa kantokäsittely on ollut puutteellista, mikä todennäköisesti tulee lisäämään juurikäävän määrää näillä metsäkuvioilla.

Kantojen korjuulle on asetettu suuria odotuksia juurikäävän torjumiseksi silloin, kun kuusen viljelyä jatketaan tyvilahon saastuttamalla kasvupaikalla. Bio-ohjelman tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että juurikääpä pysyy yllättävän sitkeästi kasvupaikalla kantojen korjuun jälkeenkin. Syynä taudin säilymiseen ovat kantojen noston yhteydessä katkeilevat ja uudistusalalle jäävät lahot juuret. Juurikääpä voi säilyä yli kuusi vuotta tartuntakykyisenä hyvinkin pienissä, vain 15 mm paksuissa juurenpätkissä. Niistä sieni leviää lähellä kasvavan kuusen taimen juuristoon ja tartuttaa taimen. Tutkimuksen ensimmäiset taimet saivat juurikääpätartunnan noin 4,5 vuotta istutuksen jälkeen (Piri, käsikirjoitus). On selvää, että päätehakkuukantojen infektiopotentiaali on suurempi ja pitempiaikainen kuin irrallisten maahan jääneiden juurenpätkien, ja pahoilla tyvilahokohteilla huolellisella kantojen korjuulla voidaan vähentää, joskaan ei kokonaan estää, taudin leviämistä seuraavaan puusukupolveen. Sen sijaan korjuukohteilla, joilla edellisen puusukupolven juurikääpäpesäkkeet ovat rajoittuneet pienelle osalle uudistusaluetta, voi juurikäävän lahottama juurimateriaali levitä kantojen noston ja kuljetuksen seurauksena laajemmalle alueelle, jolloin yksittäisiä tartuntapesäkkeitä syntyy enemmän kuin jos kannot olisi jätetty nostamatta.

Kuva 2.5.10. Juurikäävän itiöemiä kolme vuotta varastokasassa olleessa kuusen kannossa. Kuva Metla/Tuula Piri.

Tutkimukset osoittavat myös, että lahojen kuusenkantojen varastointi lisää juurikäävän leviämisriskiä, jos kantojen poiskuljetuksesta ei huolehdita ajoissa (Kuva 2.5.10). Varastokasojen alaosassa kannot eivät kuivu maaperästä nousevan kosteuden takia pitkänkään varastoinnin aikana ja olosuhteet ovat suotuisat juurikäävän itiöemien (kääpien) kehittymiselle. Ensimmäiset itiöemät muodostuvat lahoihin kantoihin noin kahden vuoden kuluessa. Seuraavina vuosina syntyy uusia itiöemiä, mutta myös vanhojen itiöemien itiöitä tuottavan pillistön pinta-ala kasvaa (Piri, julkaisematon aineisto). Koska valtaosa, 99 %, itiöistä laskeutuu 100 metrin säteelle itiöemästä (Kallio 1970, Stenlid 1994), kasvaa juurikäävän itiötartuntariski etenkin varastoaumoja ympäröivissä lähimetsissä. Koska itöitä muodostuu itiöemistä valtavasti, riittää niitä runsaasti huomattavasti kauemmaksikin, ja satunnaiset nousevat ilmavirtaukset voivat kuljettaa itiöitä kymmeniäkin kilometrejä

Energiapuuharvennuksia ei tulisi tehdä kesäaikaan ilman kantojen käsittelyä juurikäävän torjunta-aineella. Alueella, missä juurikääpää esiintyy runsaasti ja itiölaskeuma on suuri, voi pientenkin kantojen tartunta olla runsasta. Metsikön tuleva lahomäärää riippuu siitä, johtaako kannon itiötartunta sienen leviämiseen kasvatettavaan puustoon. Vaikka juurikäävän kasvullinen leviäminen kannosta pystypuihin lisääntyy jyrkästi vasta, kun kannon läpimitta on n. 15 cm (Oliva ym. 2011), on leviäminen tiheissä metsiköissä mahdollista jopa 2–5 cm läpimittaisista kannoista (Gunulf ym. 2009).

Myös energiapuuhakkuissa syntyvät pienet kannot tulisi käsitellä torjunta-aineella.

Pienten kantojen infektoitumista on selvitetty energiapuuleimikossa Etelä- ja Keski-Suomessa. Korkeimmat tartuntamäärät männiköiden energiapuuharvennuksissa olivat Etelä-Karjalassa (keskimäärin 15,9 % tutkituista kannoista, vaihteluväli 0–33,3%) ja Uudellamaalla (11,4 %, 0–50 %). Kuusikoissa tartuntaa oli eniten Pirkanmaalla (23,6 %; 8,3–40,9) ja Etelä-Karjalassa (20,6 %; 9,1–21,7 %). Kantojen keskiläpimitta vaihteli männiköissä 8:sta 11,3 cm:iin ja kuusikoissa 8,8:sta 10 cm:iin (Piri, julkaisematon aineisto). Sekä itiöemien määrä leimikon läheisyydessä että sääolot hakkuuajankohtana ja sitä ennen ovat tärkeimmät tartuntamäärään vaikuttavat tekijät (Solheim 1994). Koska näytteet otettiin yli vuoden kuluttua hakkuusta, oli juurikääpä ehtinyt levitä kannon tyvelle, ja on todennäköistä, että muut sienet eivät pysty enää syrjäyttämään juurikääpää. Etenkin luontaisesti syntyneissä männiköissä poistettavien puiden lukumäärä on suuri, minkä johdosta tartunnan saaneiden kantojen (tautipesäkkeiden) lukumäärä hehtaaria kohden voi nousta korkeaksi. Erityisesti tulisi juurikäävän torjunnasta huolehtia terveiden metsien harvennuksissa.

Ainespuuhakkuisiin verrattuna energiapuuharvennuksissa syntyy helposti enemmän korjuuvaurioita, jotka voivat toimia juurikäävän tartuntareitteinä. Korjuuolosuhteet ovat energiapuuharvennuksissa usein erittäin vaativat, sillä kohteet ovat tiheitä ja kaadon yhteydessä jäävä puusto vaurioituu herkästi. Juurivaurioita syntyy etenkin kokopuukorjuussa, kun ajouran reunapuita ei voida suojata risutuksella. Kuusi on selvästi mäntyä alttiimpi sekä vaurioille että vaurioista lähtevälle juurikääpätartunnalle.

Miten juurikääpäriskiä voidaan pienentää energiapuun korjuussa?

Kantojen korjuu

* Laho puuaines poistetaan uudistusalalta mahdollisimman tarkasti. Mitä huolellisemmin lahot kannot ja niiden osat kerätään pois korjuukohteelta, sitä vähemmän juurikääpätartuntoja esiintyy seuraavassa puusukupolvessa.
* Jos päätehakkuu tehdään kesällä, kaikki nostamatta jäävät havupuiden kannot käsitellään torjunta-aineella uusien juurikääpätartuntojen estämiseksi.
* Kannot varastoidaan aurinkoiselle, tuuliselle ja kuivalle paikalle ja terveet kannot kasataan varastoauman alimmaisiksi.
* Huolehditaan, että kannot kuljetetaan pois tienvarsivarastosta viimeistään kahden vuoden kuluessa.
* Huolehditaan, että kasan alimmaiset, epäpuhtaat, maata vasten olleet kannot, joihin kehittyy runsaimmin juurikäävän itiöemiä, kerätään pois varastopaikalta.

Energiapuuharvennus

* Kesällä harvennuskohteiksi valitaan ensisijaisesti lehtipuuvaltaisia leimikoita.
* Kesäharvennuksia ei tehdä havupuuvaltaisissa leimikoissa ilman kantokäsittelyä. Kantokäsittely on erityisen tärkeää, kun kyseessä on terve metsikkö!
* Vältetään korjuuta keväällä ajankohtana, jolloin puiden paksuuskasvu käynnistyy ja puut ovat herkkiä vaurioille.
* Leimikossa tehdään tarvittaessa ennakkoraivaus.
* Ajourat tehdään riittävän leveiksi ja hakkutähde hyödynnetään ajourilla.

Muiden sienitautien torjunta

Lehti- ja versotautien riski pienenee, kun metsät harvennetaan ajallaan. Harvennus edistää jäljelle jäävien puiden elinvoimaisuutta ja vastustuskykyä sekä vähentää sienitautien riskiä pienilmaston kosteuden laskiessa. Harvennushakkuissa on varottava korjuuvaurioita. Tärkeätä on myös käyttää kullekin kasvupaikalle sopivaa puulajia ja alkuperää.

Tervasrosoa voidaan torjua poistamalla sairaat puut, jolloin sienen elinkierto saadaan katkaistua ja taudille altista puumateriaalia vähennettyä. Mäntyjen tervasrosoalttius on voimakkaasti periytyvää, joten sairaiden siemenpuiden poisto vähentää taudinalttiin siemenen leviämistä ja uuden alttiin puusukupolven syntymistä. Maitikoiden yleisyydestä johtuen väli-isäntäkasveja on mahdotonta poistaa kokonaan, mutta oikealla metsäsuunnittelulla mm. välttämällä männyn kasvatusta liian rehevillä kasvupaikoilla voidaan tuhoriskit minimoida. Koivusekapuuston kasvatuksella varsinkin nuorissa männiköissä on luultavasti mahdollista vähentää männyn sienitartuntaa. Lannoitus ja karsinta voivat sen sijaan lisätä tervasrosoa.

Vieraslajien torjunta – haaste kansainvälisen taimi- ja puutavarakaupan valvonnalle

Monet kohtalokkaat tautiepidemiat ovat saaneet alkunsa patogeenien ja tuholaisten kulkeutumisesta uusille alueille taimiaineksen mukana. Esimerkkeinä mainittakoon surmakan, kastanjansurman sekä valkomännyntervasroson kulkeutuminen Amerikkaan (Hamelin ym. 1998, Beattie ja Diller 1954, Mielke 1943) ja haavan kuoripoltteen kulkeutuminen Amerikasta Eurooppaan (Roll-Hansen ja Roll-Hansen 1969). Myös puutavaran mukana katsotaan useiden patogeenien siirtyneen maasta tai mantereelta toiselle, kuten esimerkiksi hollanninjalavatauti (Lilja 2009a). Kaukokulkeutuvista taudinaiheuttajista esimerkiksi kastanjansurma on osoittautunut tuhoisaksi tappamalla nopeasti amerikankastanjan lähes sukupuuttoon koko Amerikan mantereelta.

Suomessa Evira vastaa vaarallisten tuhonaiheuttajien torjunnasta. Tuhonaiheuttajien leviämistä taimi- tai puuaineksen mukana on kuitenkin hyvin vaikeaa estää, koska patogeenit voivat olla taimissa piilevässä muodossa (esim. surmakka, Ranta ym. 1994, Ranta 1995) samoin kuin puutavarassakin, eli aiheuttamatta ulkoisia oireita. Lisäksi terveissäkin taimissa on satoja luontaisia ja satunnaisia muita mikrobilajeja, joiden käyttäytymisestä uusissa olosuhteissa ja uusilla isäntäkasvilajeilla ei ole tietoa. Kansainvälisen kasvi- ja puutavarakaupan kasvaessa ja ilmaston muuttuessa riski vaarallisten tuhonaiheuttajien leviämisestä käy yhä suuremmaksi. On epätodennäköistä, että valvonnan keinoin voidaan riittävästi estää patogeenisten tai myöhemmin patogeenisiksi osoittautuvien mikrobien leviäminen kauppataimien tai puutavaran mukana. Suomeenkin on levinnyt viime vuosina useita *Phytophthora*-lajeja taimikaupan mukana (Lilja ym. 2009a). Vääjäämättä syntyvien vahinkojen hidastamiseksi on rajavalvonnan resursseista ja kansainvälisestä yhteistyöstä kaupan valvonnassa pidettävä huoli myös jatkossa. Taimiaines aiheuttanee puutavaraa huomattavasti isomman riskin. Pelkästään metsänterveyden kannalta katsottuna koko kansainvälinen taimikauppa kannattaisi lopettaa.

Vähäisen taloudellisen kokonaishyödyn mutta suuren riskin metsänterveydelle aiheuttava kansainvälinen taimikauppa tulisi lopettaa.

Metsäpatologit ovat ilmaisseet kantansa kansainvälisestä kasviaineskaupasta ns. Montesclaros'in julkilausumassa (Montesclaros declaration), joka on julkaistu kansainvälisen metsäntutkimusorganisaatioiden liiton (IUFRO) verkkosivuilla joulukuussa 2011. Siinä esitetään vähittäin lopetettavaksi sellainen kasvikauppa, joka aiheuttaa huomattavan riskin metsätuholaisten ja –taudinaiheuttajien leviämiseksi, mutta tuottaa vain vähäisen kokonaistaloudellisen hyödyn. Tällaista on esimerkiksi puiden siementen

kuljetus Suomesta johonkin halvemman työvoiman maahan taimituotantoa varten ja taimien kuljetus Suomeen istutettaviksi. Erityisen vaarallista on elävien kasvien kaukokuljetus esimerkiksi Itä-Aasiasta eurooppalaisiin puistoihin tai puutarhoihin, koska kokonaan eri kasvillisuusvyöhykkeeltä Euroopaan kulkeutuvilla mikrobeilla ei ole lainkaan yhteistä kehityshistoriaa täkäläisten kasvien kanssa.

Hyönteistuhojen torjunta

Ikä- ja puulajirakenteeltaan vaihteleva metsä ei altis laajoille hyönteistuhoille.

Metsänuudistamisessa voidaan vähentää hyönteisten aiheuttamia tuhoja uudistamalla metsät parhaiten kasvupaikalle soveltuvalla puulajilla. Kasvatusvaiheessa metsien hyönteistuhoja ehkäistään ennakolta tehokkaimmin harventamalla metsät ajoissa. Ilmastonmuutoksen aiheuttamat muutokset tuhohyönteisten yleisyydessä tapahtuvat todennäköisesti pitkän ajanjakson kuluessa. Poikkeuksellisten sääilmiöiden aiheuttamiin tuhohyönteisten tilapäisiin kannannousuihinkin varaudutaan parhaiten kasvattamalla metsissä monipuolista puulajivalikoimaa ja välttämällä suuria yhtenäisiä yhden puulajin viljelyalueita. Lisääntyvän kirjanpainajatuhoriskin vuoksi havupuutavaran korjuuta koskevien säädösten noudattaminen on entistäkin tärkeämpää. Kotimaisten puulajien muodostama ikä- ja puulajirakenteeltaan vaihteleva metsä on myös kestävin vaihtoehto mahdollisia uusia hyönteistuholaisia vastaan.

Myyrätuhojen torjunta

Ilmastonmuutos ei aiheuta muutoksia nykyisiin suosituksiin myyrätuhojen torjunnasta. Suurin tuhoriski taimikoissa on silloin, kun myyrät ovat kannanvaihtelunsa huippuvaiheessa. Jos metsänomistaja voi huomioida myyräsyklin vaiheen istutuksen ajankohdan valinnassa, suositellaan istuttamista vasta välittömästi huippuvaiheen jälkeen. Maanmuokkauksesta ja heinäntorjunnasta on huolehdittava, sillä näin vähennetään myyrien ravintoa ja suojaa. Istutusajankohdaksi suositellaan mieluummin kevättä kuin syksyä. Arvotaimia (visakoivua, tammea, hybridihaapaa jne.) istutettaessa suositellaan käytettäväksi taimisuojia. Jos myyrätalvi uhkaa, voi kokeilla karkotteita tai myyränmyrkkysyöttejä. Hiirenloukuillakin saa vähennettyä myyräkantaa tehokkaasti.

Hirvieläintuhojen torjunnassa kantojen säätely keskeistä

Ilmaston muuttuessa hirvieläintuhojen torjunnassa keskeistä on hirvieläinkantojen pitäminen tasolla, jolla tuhovaikutukset metsätaloudelle jäisivät siedettäviksi. Kannansäätelyn tehostaminen metsävahinkojen näkökulmasta tulee entistä tärkeämmäksi myös valkohäntä- ja metsäkauriin osalta, mikäli ne levittäytyvät nykyistä karummille ja metsävaltaisemmille alueille, jolloin niiden metsäekosysteemiä kuluttava vaikutus voimistuu. Koska suurpetokantojen kehitys vaikuttaa olennaisesti pienten hirvieläinten määriin, tulisi riistapolitiikassa ja metsätuhotorjunnassa pyrkiä kokonaisvaltaiseen lähestymistapaan, mihin uusi Riistakonserni-ajattelu voi antaa mahdollisuuksia. Myös ilmastonmuutokseen sopeutumisen näkökulmasta hirvieläinkantojen tulee olla sellaisella tasolla, ettei metsien monipuolisen puulajirakenteen kehittyminen vaarannu.

2.5.8 Johtopäätökset

Hallitusten välisen ilmastopaneelin (IPCC) ennusteen mukainen ilmastonmuutos voi merkittävästi heikentää metsiemme terveydentilaa. Useimmat taudinaiheuttajasienemme pystyvät mukautumaan muuttuviin ilmasto-olosuhteisiin todennäköisesti paremmin kuin puut. Merkittäviä taloudellisia tappioita metsätaloudelle aiheuttavien juurikääpätuhojen ennustetaan edelleen lisääntyvän havumetsissämme ja leviävän Pohjois-Suomeen. Juurikäävän yleistyminen lisää tuulituhovaaraa, sillä juuristaan ja tyvestään lahot puut kestävät huonosti voimakkaita tuulia.

Metsien terveyttä uhkaavia uusia taudin- ja tuhonaiheuttajia voi saapua ilmavirtausten mukana sekä ulkomaisten taimien, puisten pakkausten ja puutavaran tuonnin myötä. Näiden tulokas- ja vieraslajien käyttäytymistä on hyvin vaikea ennakoida. Koska uusien taudinaiheuttajien ja tuholaisten havaitseminen on tuontitaimista erittäin vaikeaa, tulisi vakavasti harkita taimi- ja koristekasvien tuonnin merkittävää rajoittamista ja vastaavasti kotimaisen tuotannon lisäämistä.

Hirvieläinten määrät ja levinneisyydet tulevat muuttumaan. Pitkällä tähtäimellä hirvi väistyy pohjoisemmaksi, ja metsä- sekä valkohäntäkauris runsastuvat maan etelä- ja keskiosissa. Myyräkantojen vaihtelussa tulee tapahtumaan muutoksia. Nykyisen voimakkaat syklit, jotka liittyvät pitkiin lumisiin talviin ja saalislajiköyhiin ekosysteemeihin, muuttuvat todennäköisesti lievemmiksi.

Lisääntyvää tuhoriskiä tulee ennalta ehkäistä monipuolistamalla puulajistoa kotimaisilla lajeilla. Puulajistoltaan monipuolinen metsämaisema ei ole niin altis yksittäisille tuhonaiheuttajille kuin laajat yhden puulajin metsiköt. Tämän saavuttamiseksi tulee hirvieläinkantojen säätelyssä ottaa aiempaa paremmin huomioon riistalajikohtaiset ja alueelliset erikoispiirteet, jotta hirvieläinkannat ovat eri osissa maata lajikohtaisesti metsänuudistamisen kannalta siedettävät.

Hyvää metsänhoitokäytäntöä tulee noudattaa entistä tarkemmin, jotta metsät olisivat mahdollisimman hyväkuntoisia ja siten vastustuskykyisiä. Metsänuudistamisessa tulee kiinnittää huomiota sopivaan taimialkuperään, sekä harventaa taimikot ja metsät ajallaan. Kuusen istutusta kuiville kasvupaikoille ja männyn liian reheville kasvupaikoille tulee välttää. Kantokäsittely juurikäävän torjumiseksi tulisi tehdä havumetsien kesäaikaisissa hakkuissa koko maassa, lukuun ottamatta pohjoisinta Lappia.

Metsäenergian tuotanto on lisännyt korjuutapoihin kantojen noston hakkuualoilta sekä ainespuuta pienempien mäntyjen korjuun. Kantojennosto juurikäävän saastuttamilta alueilta voi vähentää juurikääpää, mutta se edellyttää kantojen huolellista käsittelyä maastossa noston jälkeen. Energiapuuta korjattaessa tulisi havupuiden kannot käsitellä juurikäävän torjunta-aineella.

Yksityiskohtaisten ennusteiden teko ilmastonmuutoksen vaikutuksista metsäekosysteemin terveydelle on mahdotonta. Vaikuttavia tekijöitä on paljon ja niiden vuorovaikutukset monimutkaisia. Patogeenien ja tuholaisten reaktiot ympäristötekijöiden muutoksiin eivät ole suoraviivaisia ja vaikutukset voivat riippua kynnysarvoista. Lisäksi eliöt tulevat sopeutumaan muuttuviin ympäristöoloihin geneettisesti. Sopeutumisen nopeus vaihtelee suuresti eri eliöryhmien ja lajien välillä.

Metsäekosysteemin terveydentilan monipuolinen tutkimus ja seuranta on ensiarvoisen tärkeää, jotta muutokset todettaisiin varhaisessa vaiheessa. Ajantasainen tieto metsien terveydestä ja siihen vaikuttavien syy-seuraussuhteiden ymmärtäminen ovat edellytys sille, että riskeihin voidaan tarvittaessa mukautua nopeasti metsänhoidollisin keinoin.

Ajantasainen tieto metsien terveydestä on edellytys tehokkaille metsänhoidollisille korjaustoimille.

Kirjallisuus

Ayres, M.P. 1993. Global change, plant defence and herbivory. Julkaisussa: Kareiva, P. M., Kingsolver, J. G. & Huey, R. B. (toim.). Biotic interactions and global change. Sinauer Associates, Sunderland, MA. s. 75–94.

Barklund, P. 2006. Recent disease problems in Swedish forests. Julkaisussa: Solheim, H. & Hietala, A.M. (toim.). Forest Pathology research in the Nordic and Baltic countries 2005. Proceedings from the SNS meeting in Forest Pathology at Skogbrukets Kursinstitutt, Biri, Norway, 28–31 August 2005. Aktuelt fra Skogforsk, 1, 84.

Beattie, R. K. & Diller, J. D. 1954. Fifty years of chestnut blight in America. Journal of Forestry 52: 323–329.

Bejer, B. 1988. The Nun Moth in European Spruce Forests. Julkaisussa: Berryman, A.A. Dynamics of Forest Insect population, Patterns, Causes, Implications. (toim.). Plenum Press. New York. s. 211−231.

Benson, D. M. 1982. Cold inactivation of *Phytophthora cinnamomi*. Phytopathology 72: 560–563.

Berger, P. J., Negus, N. C., Sanders, E. H. & Gardner, P. D. 1981. Chemical triggering of reproduction in *Microtus montanus*. Science 214: 69–70.

Bierman, S.M,. Fairbairn, J.P., Petty, S.J. Elston, D.A., Tidhar, D. & Lambin, X. 2006. Changes over time in the spatiotemporal dynamics of cyclic populations of field voles (*Microtus agrestis* L.) The American Naturalist. 167: 583–590.

Bolte, A., Ammer, C., Lof, M., Madsen, P., Nabuurs, G. J., Schall, P., Spathelf, P., & Rock, J. 2009. Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. Scandinavian Journal of Forest Research 24: 473–482.

Brandt, J. P., Cerezke, H. F., Mallett, K. I., Volney, W. J. A. & Weber, J. D. 2003. Factors affecting trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) health in the boreal forest of Alberta, Saskatchewan, and Manitoba, Canada. Forest Ecology and Management. 178: 287–300.

Brang, P., Bugmann, H., Bürgi, A., Mühlethaler, U., Rigling, A. & Schwitter, R. 2008. Klimawandel als waldbauliche Herausforderung. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 159(10): 362–373.

Brasier, C.M. 1996. *Phytophthora cinnamomi* and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change. Annales des Sciences Forestieres 53: 347–358.

Brockerhoff, E.G., Bain, J., Kimberley, M., Knížek, M. 2006. Interception frequency of exotic bark and ambrosia beetles (Coleoptera: Scolytinae) and relationship with establishment in New Zealand and worldwide. Canadian Journal of Forest Research 36: 289–298.

Brommer, J.E., Pietäinen, H., Ahola, K., Karell, P., Karstinen, T. & Kolunen, H. 2009. The return of the vole cycle in southern Finland refutes the generality of the loss of cycles through 'climatic forcing' Global Change Biology 16: 577–586.

Bronson, F.H. 2009. Climate change and seasonal reproduction in animals. Philosophical Transactions of the Royal Society. B. Biological Sciences 364: 3331–3340.

Brown, J.H. & Heske, E.J. 1990. Control of a desert-grassland transition by a keystone rodent guild. Science 4988: 1705–07.

Brown, A. V., & Webber, J. 2008. Red band needle blight of conifers in Britain: 1–8: Forestry Commission Research Note 002. UK. 8 s.

Condeso, T.E. & Meentemeyer, R.K. 2007. Effects of landscape heterogeneity on the emerging forest disease sudden oak death. Journal of Ecology 95: 364–375.

Day, K.R. & Leather, S.R. 1997. Threats to forestry by insect pests in Europe. Julkaisussa: Watt AD, Stork NE, Hunter MD. (toim.) Forests and insects. London: Chapman & Hall. s. 177–205

Desprez-Loustau, M. L., Marcais, B., Nageleisen, L. M., Piou, D., & Vannini, A. 2006. Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. Annals of Forest Science 63: 597–612

Desprez-Loustau, M.L., Robin, C., Reynaud, G., Deque, M., Badeau, V., Piou, D., Husson, C. & Marcais, B. 2007. Simulating the effects of a climate-change scenario on the geographical range and activity of forest-pathogenic fungi. Canadian Journal of Plant Pathology 29: 101–120.

Dodd, R.S., Hüberli, D., Mayer, W., Harnik, T.Y., Afzal-Rafii, Z. & Garbelotto, M. 2008. Evidence for the role of synchronicity between host phenology and pathogen activity in the distribution of sudden oak death canker disease. New Phytologist 179: 505–514.

Dukes, J.S., Pontius, J., Orwig, D., Garnas, J.R., Rodgers, V.L., Brazee, N., Cooke, B., Theoharides, K.A., Stange, E.E., Harrington, R., Ehrenfeld, J., Gurevitch, J., Lerdau, M., Stinson, K., Wick, R. & Ayres, M. 2009. Responces of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: What can we predict? Canadian Journal of Forest Research, 39: 231–248.

Dussault, C., Ouellet, J.-P., Courtois, R., Huot, J., Breton L. & Larochelle, J. 2004. Behavioural responses of moose to thermal conditions in the boreal forest. Ecoscience 11: 321–328.

Engesser, R., Forster, B., Meier, F. & Wermelinger, B. 2008. Forstliche Schadorganismen im Zeichen des Klimawandels. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 159: 344–351.

Evans, A.M. & Finkral, A.J. 2010. A new look at spread rates of exotic diseases in North American forests. Forest Science 56: 453–459.

Evira, 2011. Evira tiedottaa: Suomessa uusina kasvintuhoojina löydettiin aasianrunkojäärä ja kurkkukasvien virus. Kasvinsuojelulehti 2/2011: 59–60.

Fabre, B., Piou, D., Desprez-Loustau, M.-L. & Marcais, B. 2011. Can the emergence of pine Diplodia shoot blight in France be explained by changes in pathogen pressure linked to climate change? Global Change Biology 17: 3218–3227.

Ferm, A., Hytönen, J., Lähdesmäki, P., Pietiläinen, P. & Pätilä, A. 1990. Effects of high nitrogen deposition on forests: case studies close to fur animal farms. Julkaisussa: Kauppi, P., Kenttämies, K. & Anttila, P. (toim.). Acidification in Finland. s. 635–668.

Gilg, O., Sittler, B. & Hanski, I. 2009. Climate change and cyclic predator-prey population dynamics in the high Arctic. Global Change Biology 15: 2634–2652.

Gunulf, A., Wang, L., Rönnberg, J. & Welander, T. 2009. Limitation in stump diameter for the spread of *Heterobasidion parviporum*. SNS PATHCAR Nordic/Baltic Forest Pathology Meeting, 28th of September – 2nd of October 2009, Palanga, Lithuania. Abstracts. s. 14.

Hamelin, R. C., Lecours, N., & Laflamme, G. 1998. Molecular evidence of distinct introductions of the European race of *Gremmeniella abietina* into North America. Phytopathology 88: 582–588.

Hanski, I. 1987. Pine sawfly population dynamics: patterns, processes, problems. Oikos 50: 327–335.

Hanski, I., Hansson, L. & Henttonen, H. 1991. Specialist predators, generalist predators and the microtine rodent cycle. Journal of Animal Ecology 60: 353–367.

Hansson, L. & Henttonen, H. 1985. Regional differences in cyclicity and reproduction in *Clethrionomys* voles: Are they related? Annales Zoologici Fennici 22: 277–288.

Hansson, L. & Henttonen, H. 1988. Rodent dynamics as community processes. Trends in Ecology and Evolution 3: 195–200.

Hantula, J., Niemi, M., Kaitera, J., Jalkanen, R. & Kurkela, T. 1998. Genetic variation of pine stem rust in Finland as determined by random amplified microsatellites (RAMS). European Journal of Forest Pathology 28: 361–372.

Harvell, C. D., Mitchell, C. E., Ward, J. R., Altizer, S., Dobson, A. P., Ostfeld, R. S. & Samuel, M. D. 2002. Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. Science 296: 2158–2162.

Haukioja, E., Neuvonen, S., Hanhimäki, S. & Niemelä, P. 1988. The autumnal moth in Fennoscandia. Julkaisussa: Berryman, A.A. (toim.). Dynamics of Forest Insect Populations: Atterns, Causes, and Management Strategies. Plenum Press. New York. s. 163–178.

Heikkilä, R., Annala, M.-L. & Härkönen, S. 2003. Metsäkauris taimikoiden vahinkoeläimenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 906. 20s.

Heikkilä, R. & Tuominen, M. 2009. The influence of moose on tree species composition in Liesjärvi National Park in Southern Finland. Alces 45: 49–58.

Heiniger, U., & Schmid, M. 1989. Association of *Tiarosporella parca* with needle reddening and needle cast in Norway spruce. European Journal of Forest Pathology 19: 144–150.

Henttonen, H. & Wallgren, H. 2001. Small rodent dynamics and communities in the birch forest zone of northern Fennoscandia. Julkaisussa: Wielgolaski, F.E. (toim.). Nordic mountain birch ecosystems. UNESCO, Paris and Parthenon Publishing Group, New York and London. UNESCO Man and Biosphere Series 27. s. 263–280.

Horntvedt, R. 1988. Resistance of *Picea abies* to *Ips typographus*: Tree response to monthly inoculations with Ophiostoma polonicum, a beetle transmitted blue-stain fungus. Scandinavian Journal of Forest Research 3: 107−114.

Horsley, S.B., Long, R.P., Bailey, S.W., Hallett, R.A. & Wargo, P. M. 2002. Health of eastern North American sugar maple forests and factors affecting decline. Northern Journal of Applied Forestry 19: 34–44.

Huitu, O., Koivula, M., Korpimäki, E., Klemola, T. & Norrdahl, K. 2003. Winter food supply limits growth of northern vole populations in the absence of predation. Ecology 84: 2108–2118.

Huitu, O., Kiljunen, N., Korpimäki, E., Koskela, E., Mappes, T., Pietiäinen, H., Pöysä, H. & Henttonen, H. 2009. Density-dependent vole damage in silviculture and associated economic losses at a nationwide scale. Forest Ecology and Management 258: 1219–1224.

Hyvän metsänhoidon suositukset. 2006. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Metsäkustannus Oy, Helsinki, 100 s.

Hörnfeldt, B., Hipkiss, T. & Eklund, U. 2005. Fading out of vole and predator cycles? Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 272: 2045–2049.

Ims, R.A., Henden, J.-A. & Killengreen, S. T. 2008. Collapsing population cycles. Trends in Ecology & Evolution 23: 79–86.

Jactel, H. & Brockerhoff, E. G. 2007. Tree diversity reduces herbivory by forest insects. Ecology Letters 10: 835–848.

Jalkanen, R., Büttner, C. & von Bargen, S. 2007. Kirsikankierrelehtivirus hieskoivulla Suomessa. Metsätieteen aikakauskirja 2007: 401–402.

Jepsen, J.U., Hagen, S.B., Ims, R.A. & Yoccoz, N.G. 2008. Climate change and outbreaks of the geometrids *Operophtera brumata* and *Epirrita autumnata* in subarctic birch forest: evidence of a recent outbreak range expansion. Journal of Animal Ecology 77: 257–264.

Jönsson A.M., Appelberg, G., Harding, S. & Bärring, L. 2009. Spatio-temporal impact of climate change on the activity and voltinism of the spruce bark beetle, *Ips typographus*. Global Change Biology 15: 486−499.

Kaakinen, S. & Vapaavuori, E. 2005. Miten ilmastonmuutos vaikuttaa metsäpuiden puun kemiaan ja rakenteeseen – tuloksia eri puilla tehdyistä tutkimuksista. Julkaisussa: Riikonen, J. & Vapaavuori, E. (toim.). Ilmasto muuttuu – mukautuvatko metsät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944: 82–91.

Kaitera, J., Nuorteva, H. & Hantula, J. 2005. Distribution and frequency of *Cronartium flaccidum* on *Melampyrum* spp. in Finland. Canadian Journal of Forest Research 35: 229–234.

Kaitera, J., Hantula, J. & Nevalainen, S. 2011. Distribution and frequency of *Cronartium flaccidum* on *Melampyrum* spp. in permanent sample plots in Finland. Scandinavian Journal of Forest Research 26(5): 413–420.

Kaitera, J. & Hiltunen, R. 2011. Susceptibility of *Pedicularis* spp. to *Cronartium ribicola* and *C. flaccidum* in Finland. Forest Pathology 41: 1–10.

Kallio, T. 1970. Aerial distribution of the root-rot fungus *Fomes annosus* (Fr.) Cooke in Finland. Acta Forestalia Fennica 107. 55 pp.

Karhu, K.J. & Neuvonen, S. 1998. Wood ants and a geometrid defoliator of birch: predation outweighs beneficial effects through the host plant. Oecologia 113: 509–516.

Kausrud, K., Mysterud, A., Steen, H., Vik, J. O., Østbye, E., Cazelles, B., Framstad, E., Eikeset, A. M., Mysterud, I., Solhøy, T. & Stenseth, N. C. 2008. Linking climate change to lemming cycles. Nature 456: 93–97.

Kellomäki, S., Peltola, H., Nuutinen, T., Korhonen, K.T. & Strandman, H. 2008. Sensitivity of managed boreal forests in Finland to climate change, with implications for adaptive management. Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences 363: 2341–2351.

Kilpeläinen, A., Gregow, H., strandman, H., Kellomäki, S., Venäläinen, A., & Peltola, H. 2010a. Impacts of climate change on the risk of snow-induced forest damage in Finland. Climatic Change 99: 193–209.

Kilpeläinen, A., Kellomäki, S., Strandman, H. & Venäläinen, A. 2010b. Climate change impacts on forest fire potential in boreal conditions in Finland. Climatic Change 103: 383–398.

Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Miina, J., Saksa, T. & Viiri, H. 2010. Metsänuudistamisen tila Suomessa VMI10:n aineistojen perusteella. Metsätieteen aikakauskirja 4/2010: 425–478.

Krekula, H., Samuelsson, H. & Northfell, I. 2005. Svampangrepp förstör ungskogar I Norrland. Pressmeddelanden och annat aktuellt från Skogsstyrelsen. 1 s.

Kujala, V. 1950. Über die Kleinpilze der Koniferen in Finnland, Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 38(4).

Kurkela, T. 1994. Metsän taudit, Metsäpatologian perusteet. Tekijä ja Otatieto Oy, Tampere. ISBN 951-672-189-3. 320 s.

Kurz, W.A., Dymond, C.C., Stinson, G., Rampley, G.J., Neilson, E.T., Carroll, A.L., Ebata, T. & Safranyik, L. 2008. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. Nature 452: 987–990.

Laine, K.M. & Henttonen, H. 1987. Phenolics/nitrogen ratios in the bilberry *Vaccinium myrtillus* in relation to temperature and microtine density in Finnish Lapland. Oikos 50: 389–395.

Lange, H., Økland, B. & Krokene, P. 2006. Thresholds in the life cycle of the spruce bark beetle under climate change. Interjournal for Complex Systems 1648: 1−10.

Larsson, S. & Tenow, O. 1984. Areal distribution of a *Neodiprion sertifer* (Hym., Diprionidae) outbreak on Scots pine as related to stand condition. Holarctic Ecology 7: 81–90.

Larsson, S., Ekbom, B. & Björkman, C. 2000. Influence of plant quality on pine sawfly population dynamics. Oikos 89: 440–450.

Lehikoinen, A., Byholm, P., Ranta, E., Saurola, P., Valkama, J. Korpimäki, E., Pietiäinen, H. & Henttonen, H. 2009. Reproduction of the common buzzard at its northern range margin under climatic change. Oikos 118: 829–836.

Lehikoinen, A, Ranta, E., Pietiäinen, H., Byholm, P., Saurola, P., Valkama, J., Huitu, O., Henttonen, H. & Korpimäki, E. 2011. The impact of climate and cyclic food abundance on the timing of breeding and brood size in four boreal owl species. Oecologia 165: 349–355.

Liebhold A.M., MacDonald, W.L., Bergdahl, D. & Maestro, V. C. 1995. Invasion by exotic forest pests – a threat to forest ecosystems. Forest Science 41: 1–49.

Lilja, A., Hantula, J., Rytkönen, A., Müller, M.M. & Parikka, P. 2009a. Vieraslajit uhka metsäkasveillemme. Taimiuutiset 1/2009: 16–18.

Lilja, A., Hantula, J., Rytkönen, A., Müller, M.M. & Pouttu, A. 2009b. Vieraslajit, jotka voivat olla uhka tulevaisuudessa. Taimiuutiset 2/2009: 19–21.

Lowe, S.J., Patterson, B.R. & Schaefer, J.A. 2010. Lack of behavioral responses of moose (*Alces alces*) to high ambient temperatures near the southern Periphery of their range. Canadian Journal of Zoology 88: 1032–1041.

Lüpke, B. v. 2004. Risikominderung durch Mischwälder und naturnaher Waldbau – Ein Spannungsfeld. Forstarchiv 75: 43–50.

Manter, D. K., Reeser, P. W. & Stone, J. K. 2005. A climate-based model for predicting geographic variation in Swiss Needle Cast severity in the Oregon Coast Range. Phytopathology 95: 1256–1265.

Marcais, B., Dupuis, F., & Desprez-Loustau, M. L. 1996. Modelling the influence of winter frosts on the development of the stem canker of red oak, caused by *Phytophthora cinnamomi*. Annals of Forest Science 53: 369–382.

McDonald, G. L., Richardson, B. A., Zambino, P. J., Klopfenstein, N. B., & Kim, M. S. 2006. *Pedicularis* and *Castilleja* are natural hosts of *Cronartium ribicola* in North America: a first report. Forest Pathology 36: 73–82.

Menges, E.S. & Loucks, O.L. 1994. Modeling a disease-caused patch disturbance: Oak wilt in central hardwoods. Ecology 65: 487–498.

Metsätilastollinen vuosikirja. Suomen virallinen tilasto. Maa-, metsä- ja kalatalous 2010. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa. ISBN 978-951-40-2265-4 (nid.). Vammalan Kirjapaino Oy, Vammalan Kirjapaino Oy, Sastamala 2010. 472 s.

Mielke, J. L. 1943. White pine blister rust in western North America. Bull. No. 52. New Haven, CT: Yale Univ. School of Forestry. s. 155.

Mystlerud, A., Bjørnsen, B.H. & Østbye, E. 1997. Effects of snow depth on food and habitat selection by roe deer *Capreolus capreolus* along an altitudinal gradient in south-central Norway. Wildlife Biology 3(1): 27–33.

Müller, M. M., & Hallaksela, A.-M. 2000. Fungal diversity in Norway spruce – a case study. Mycological Research, 104: 1139–1145.

Müller, M.M., Heinonen, J. & Korhonen, K. 2007. Occurrence of *Heterobasidion* basidiocarps on cull pieces of Norway spruce left on cutting areas and in mature spruce stands. Forest Pathology 37: 374–386.

Müller, M.M., Hantula, J. & Vuorinen, M. 2009. First observations of *Mycosphaerella pini* on Scots pine in Finland. Plant Disease 93: 322.

Negus, N.C. & Berger, P.J. 1977. Experimental triggering of reproduction in a natural population of *Microtus montanus*. Science 196:1230–1231.

Neuvonen, S., Niemelä, P. & Virtanen, T. 1999. Climatic change and insect outbreaks in boreal forests: the role of winter temperatures. Ecological Bulletins 47: 63–67.

Neuvonen, S., Bylund, H. & Tømmervik, H. 2005. Forest defoliation risks in birch forest by insects under different climate and land use scenarios in northern Europe. Chapter 9 Julkaisussa: Wielgolaski, F.-E. (toim.). Plant Ecology, Herbivory and Human Impact in Northern Mountain Birch Forests. Springer Verlag, Ecological Studies Vol. 180: 126–138.

Niemelä, P., Chapin, F.S. III, Danell, K. & Bryant, J.P. 2001. Animal-mediated responses of boreal forest to climatic change. Climatic Change 48: 427–440.

Oliva, J., Samils, N., Johansson, U., Bendz-Hellgren, M. & Stenlid, J. 2008. Urea treatment reduced *Heterobasidion annosum* s.l. root rot. Forest Ecology and Management 255: 2876–2882.

Oliva, J., Bendz-Hellgren, M. & Stenlid, J. 2011. Spread of *Heterobasidion annosum* s.s. and *Heterobasidion parviporum* in *Picea abies* 15 years after stump inoculation. FEMS Microbiology Ecology 75: 414–429.

Olsson, G.E., Leirs, H. & Henttonen, H. 2010. Hantaviruses and their hosts in Europe: reservoirs here and there, but not everywhere? Vector-Borne Zoonotic Diseases 10(6): 549–561.

Ostfeld, R.S. & Canham, C.D. 1993. Effects of Meadow Vole Population Density on Tree Seedling Survival in Old Fields. Ecology 74: 1792–1801.

Parmesan, C., Ryrholm, N., Stefanescu, C., Hill, J.K., Thomas, C.D., Descimon, H., Huntley, B., Kaila, L., Kullberg, J., Tammaru, T., Tennent, W.J., Thomas, J.A. & Warren, M. 1999. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. Nature 399: 579–583.

Pastor, J. & Naiman, R.J. 1992. Selective foraging and ecosystem processes in boreal forests. The American Naturalist 139(4): 690–705.

Pautasso, M., Dehnen-Schmutz, K., Holdenrieder, O., Pietravalle, S., Salama, N., Jeger, M. J., Lange, E. & Hehl-Lange, S. 2010. Plant health and global change – some implications for landscape management. Biological Reviews 85: 729–755.

Peltola, H., Kellomäki, S. & Väisänen, H. 1999. Model computations on the impact of climatic change on the windthrow risk of trees. Climatic Change 41: 17–36.

Peltola, H., Ikonen, V.-P., Gregow, H., Strandman, H., Kilpeläinen, A., Venäläinen, A. & Kellomäki, S. 2010. Impacts of climate change on timber production and regional risks of wind-induced damage to forests in Finland. Forest Ecology and Management 260: 833–845.

Petäistö, R.-L. & Laine, A. 1999. Effects of Winter storage temperature and age of *Pinus sylvestris* seedlings on the occurrence of disease induced by *Gremmeniella abietina*. Scandinavian Journal of Forest Research 14: 227–233.

Pietiläinen, P., Hartman, M. & Moilanen, M. 2007. Nitrogen and Scots pine on drained peatlands. Julkaisussa: Taulavuori, E. & Taulavuori, K. (toim.) Physiology of Northern plants under changing environment. Research Signpost, Kerala. ISBN 81-308-0113-2. s. 255–269.

Popoola, T. O. S. & Fox, R. T. V. 2003. Effect of water stress on infection by species of honey fungus (*Armillaria mellea* and *A. gallica*). Arboricultural Journal 27: 139–154.

Post, E., Forchhammer, M. C., Bret-Harte, M. S., Callaghan, T. V. Christensen, T. R., Elberling, B., Fox, A. D., Gilg, O., Hik, D. S., Hoye, T. T., Ims, R. A., Jeppesen, E., Klein, D. R., Madsen, J., McGuire, A. D., Rysgaard, S., Schindler, D. E., Stirling, I., Tamstorf, M. P., Tyler, N. J. C., van der Wal, R., Welker, J., Wookey, P. A., Schmidt, N. M. & Aastrup, P. 2009. Ecological Dynamics Across the Arctic Associated with Recent Climate Change. Science 325: 1355–1358.

Pouttu, A. & Annila, E. 2010. Kirjanpainajalla kaksi sukupolvea kesällä 2010. Metsätieteen aikakauskirja 4/2010: 521−523.

Pouttu, A., Lindgren, M., Lipponen, K., Lilja, A., Poteri, M., Neuvonen, S., Henttonen, H., Hantula, J. & Nevalainen, S. Metsätuhot vuonna 2006. Metsäntutkimuslaitos, Metsätuhotietopalvelu.

Ragazzi, A. 1983. Development of *Cronartium flaccidum* (Alb. & Schw.) Wint. on *Vincetoxicum officinale* Moench in connection with some environmental factors. Phytopatologische Zeitschrift 108: 160–171.

Ranta, H., Neuvonen, S., Kääriäinen, S. & Vesanto, S. 1994. Copper and nickel pollution: frequency of endophytic fungi in Scots pine shoots and endophyte growth in vitro. Canadian Journal of Botany 72: 93–99.

Ranta, H. 1995. Implications of anthropogenic pollution for the host-pathogen system of Scots pine and *Gremmeniella abietina*. PhD. thesis. Reports from the Department of Biology, University of Turku No. 47. 18 s.

Risenhoover, K.L. & Maass, S.A. 1987. The influence of moose on the composition and structure of Isle Royale forests. Canadian Journal of Forest Research 17: 357–364.

Rouault, G., Candau, J., Lieutier, F., Nageleisen, L., Martin, J. & Warzee, N. 2006. Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. Annals of Forest Science 63: 613−624.

Roll-Hansen, F. & Roll-Hansen, H. 1969. *Neofabrea populi* on *Populus tremula* x *P. tremuloides* in Norway. Meddeleser fra Norsk Institutt for Skogforskning 22: 215–226.

Roy, B. A., Gusewell, S., & Harte, J. 2004. Response of plant pathogens and herbivores to a warming experiment. Ecology 85: 2570–2581.

Saikkonen, K. & Neuvonen, S. 1993. European pine sawfly and microbial interactions mediated by the host plant. Julkaisussa: Wagner, M.R. & Raffa, K.F. (toim.). Sawfly Lifehistory Adaptations to Woody Plants. Academic Press, San Diego. s. 431–450.

Salmi, A.-M. 1949. Valkohäntäpeura Suomessa. Suomen Riista 4: 91–124.

Samils, B., Ihrmark, K., Kaitera, J., Hansson, P. & Barklund, P. 2010. Genetic structure of Scots pine blister rust (*Cronartium flaccidum* and *Peridermium pini*). Phytopathologia Mediterranea 49: 428.

Scherm, H. 2004. Climate change: can we predict the impact on plant pathology and pest management? Canadian Journal of Plant Pathology 26: 267–273.

Solheim, H. 1994. Seasonal infection of *Heterobasidion annosum* on stumps of Norway spruce and surface coating with urea. Rapport fra skogforsk 3/94: 1–10.

Soubeyrand, S., Neuvonen, S. & Penttinen, A. 2009. Mechanical-statistical modeling in ecology: from outbreak detections to pest dynamics. Bulletin of Mathematical Biology 71: 318–338.

Stenlid, J. 1994. Regional differentation in *Heterobasidion annosum*. Julkaisussa: Johansson, M. & Stenlid, J. (toim.). Proceedings of the 8th Int. Conf. on Root and Butt Rots, Sweden and Finland, Aug. 9-16, 1993. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden. s. 243–248.

Stenseth, N.C. 1999. Population Cycles in Voles and Lemmings: Density Dependence and Phase Dependence in a Stochastic World. Oikos 87:427–461.

Sturrock, R. N., Franke., S. J., Brown, A. V., Hennon, P. E., Kliejunas, J. T., Lewis, K. J., Worrall, J. J. & Woods, A. J. 2011. Climate change and forest diseases. Plant Pathology 60: 133–149.

Sundell, J, Huitu, O., Henttonen, H., Kaikusalo, A., Korpimäki, E., Pietiäinen, H., Saurola, P. & Hanski I. 2004. Large-scale spatial dynamics of vole populations in Finland revealed by the breeding success of vole-eating avian predators. Journal of Animal Ecology 73: 167–178.

Telfer, E.S. 1970. Winter Habitat Selection by Moose and White-Tailed Deer. The Journal of Wildlife Management 34(3): 553–559.

Terborgh, J., Lopez, L., Nunez, P., Rao, M., Shahabuddin, G., Orihuela, G., Riveros, M., Ascanio, R., Adler, G. H. & Lambert, T. D. 2001. Ecological meltdown in predator-free forest fragments. Science 294: 1923–1926.

Thor, M., Stahl, G. & Stenlid, J. 2005. Modelling root rot incidence in Sweden using tree, site and stand variables. Scandinavian Journal of Forest Research 20: 165–176.

Uotila, A. 1985. On the effect of seed transfer on the susceptibility of Scots pine to *Ascocalyx abietina* in southern and central Finland. (in Finnish). Folia Forestalia 639: 1–12.

Vanha-Majamaa, I. 2006. Global forest resources assessment 2005 – Report on fires in the Baltic region and adjacent countries. FAO Forestry department, Working paper FM/7/E, Rooma, Italia, s. 24.

Vanhanen, H., Veteli, T.O., Päivinen, S., Kellomäki, S. & Niemelä, P. 2007. Climate Change and range shifts in two insect defoliators: gypsy moth and nun moth – a model study. Silva Fennica 41: 621−638.

Vapaavuori, E., Riikonen, J., Peltonen, P., Kasurinen, A., Holopainen, J., Oksanen, E. & Holopainen, T. 2005. Lehtipuut – menestyjiä tulevaisuuden ilmastossa? Tuloksia Suonenjoen kenttäkokeesta rauduskoivulla. Julkaisussa: Riikonen, J. & Vapaavuori, E. (toim.). Ilmasto muuttuu – mukautuvatko metsät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944: 68–81.

Vasaitis, R., Stenlid, J., Thomsen, I. M., Barklund, P. & Dahlberg, A. 2008. Stump removal to control root rot in forest stands. A literature study. Silva Fennica. 42: 457–483.

Veteli, T., Kuokkanen, K., Julkunen-Tiitto, R., Roininen, H. & Tahvanainen, J. 2002. Effects of elevated CO_2 and temperature on plant growth and herbivore defensive chemistry. Global Change Biology 8: 1240–1252.

Viherä-Aarnio, A. 2009. Effects of seed origin latitude on the timing of height growth cessation and field performance of silver birch. Dissertationes Forestales 87, University of Helsinki, ISBN 978-951-651-264-1. 47 s.

Virtanen, T., Neuvonen, S., Nikula, A., Varama M. & Niemelä, P. 1996. Climate change and the risks of *Neodiprion sertifer* outbreaks on Scots pine. Silva Fennica 30: 169–177.

Virtanen, T., Neuvonen, S. & Nikula, A. 1998. Modelling topoclimatic patterns of egg mortality of *Epirrita autumnata* (Lep., Geometridae) with Geographical Information System: predictions in current climate and in scenarios with warmer climate. Journal of Applied Ecology 35: 311–322.

Virtanen, T. & Neuvonen, S. 1999. Performance of moth larvae on birch in relation to altitude, climate, host quality and parasitoids. Oecologia 120: 92–101.

Wermelinger; B. & Seifert, M. 1998. Analysis of the temperature dependent development of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). Journal of Applied Entomology 122: 185−191.

Woods, A., Coates, K. D., & Hamann, A. 2005. Is an unprecedented Dothistroma needle blight epidemic related to climate change. BioScience 55: 761–769.

Woods, A. J., Heppner, D., Kope, H. H., & Maclauchlan, L. 2010. Forest health and climate change: A British Columbia perspective. Forestry Chronicle 86: 412–422.

2.6 Monimuotoisuus

Juha Siitonen

Suomesta tunnetaan nykyisin noin 45000 eliölajia (Rassi ym. 2010), mutta todellisen lajilukumäärän arvioidaan olevan yli 50000. Erityisesti loispistiäisissä (Hymenoptera) sekä kaksisiipisissä (Diptera) tiedetään olevan runsaasti lajeja, joita ei tutkimuksen puutteen takia ole toistaiseksi maastamme löydetty. Myös monet sieniryhmät tunnetaan puutteellisesti, ja niiden lajimäärä saattaa olla paljon tunnettua suurempi. Karkeasti arvioiden noin puolet lajistostamme elää erilaisissa metsissä, joten metsälajeja on noin 20 000–25 000 (Siitonen ja Hanski 2004).

Kaikki metsissä tehtävät metsätaloudelliset toimenpiteet kuten päätehakkuu, harvennushakkuut, maanmuokkaus jne. vaikuttavat tavalla tai toisella lajistoon – niin myös energiapuun korjuu. Päätehakkuun seurauksena osa vanhan sulkeutuneen metsän lajistosta häviää ja tilalle tulee sukkession alkuvaiheen avoimeen ympäristöön sopeutunutta lajistoa. Osa lajistosta pystyy säilymään avohakkuun yli, mutta lajiston runsaussuhteissa tapahtuu suuria muutoksia. Myös luontaiset häiriöt, kuten metsäpalot ja myrskytuhot, muuttavat äkillisesti ja voimakkaasti lajistoa. Harvennushakkuut muuttavat samoin metsikön olosuhteita ja lajistoa, mutta myös kokonaan ilman käsittelyjä kehittyvässä metsikössä puuston rakenne ja lajisto muuttuvat vähitellen sukkession seurauksena.

Kun arvioidaan energiapuun korjuun merkitystä metsäluonnon monimuotoisuuden tai yleisemmin metsätalouden ekologisen kestävyyden kannalta, on tarpeen tarkastella laajan mittakaavan ja pitkän aikavälin mahdollisia vaikutuksia. Mikä on energiapuun korjuun lisävaikutus verrattuna muihin metsätalouden toimenpiteisiin? Entä jos korjuumäärät nousevat tavoitteena olevaan 13 miljoonaan kuutiometriin vuodessa tai vielä suuremmiksi? Voidaanko energiapuuta korjata kestävästi sekä harvennushakkuissa että päätehakkuussa useamman kiertoajan yli?

Tässä katsauksessa keskitytään tarkastelemaan energiapuun korjuun vaikutuksia metsälajiston monimuotoisuuteen pääasiassa pohjoismaisten tutkimustulosten valossa. Lajisto on jaettu kolmeen laajaan ryhmään: kasvillisuus, lahopuusta riippuvainen eliöstö sekä maaperäeliöstö, johon on luettu myös mykorritsasienet ja kariketta lahottavat sienet.

2.6.1 Kasvillisuus

Hakkuutähteiden poiston vaikutuksia kasvilajistoon on selvitetty useissa tutkimuksissa (Olsson ja Staaf 1995, Bråkenhielm ja Liu 1998, Berquist ym. 1999, Rosenberg ja Jacobson 2004, Åström ym. 2005, Kataja-aho ym. 2011b). Koejärjestelyissä on yleensä ollut verrokkina tavanomainen avohakkuu ja käsittelyinä joko kokopuukorjuu, hakkuutähteiden korjuu tai sekä hakkuutähteiden että kantojen korjuu. Vaikutuksia on pisimmillään seurattu 20 vuotta.

Tutkimusten tulosten mukaan avohakkuulla sinänsä on suuri vaikutus kasvilajistoon, johon verrattuna hakkuutähteiden poiston lisävaikutus on vähäinen. Käsittelyjen väliset erot putkilokasvilajistossa ovat yleensä pieniä ja muistuttivat luontaisen kasvupaikkavaihtelun aikaansaamia eroja kasvipeitteessä. Uusia lajeja ilmestyy sitä enemmän, mitä enemmän käsittelyssä aiheutetaan maaperähäiriöitä – eniten siis kannonnoston ja vähiten pelkän avohakkuun jälkeen. Uudet lajit olivat valtaosin joko tehokkaasti leviäviä, kilpailuvapaata kasvutilaa nopeasti hyödyntäviä lajeja tai maanpinnan rikkomisesta aktivoituvia siemenpankkilajeja. Hakkuutähteiden pääasiallinen vaikutus putkilokasvilajistoon liittyy neulasten mukana tulevaan ravinnelisäykseen. Hakkuutähteen korjuun vaikutukset sammallajistoon ovat suurempia. Vallitsevien metsäsammalten peitto väheni noin 50 %, ja kolmannes maksasammallajeista hävisi hakkuutähteiden poiston seurauksena (Åström ym. 2005). Hakkuutähteet vaikuttavat sammallajistoon pääasiassa tarjoamalla suojaa paahdetta ja kuivumista vastaan (Dynesius ym. 2008).

Hakkuutähteiden poisto yleensä vähentää tiettyjen kasvilajien runsauksia, mutta toisaalta lisää toisten lajien runsauksia (Olsson ja Staaf 1995, Bråkenhielm ja Liu 1998, Berqvist ym. 1999). Väheneviä lajeja ovat typpeä suosivat lajit, kuten maitohorsma ja vadelma, runsastuvia lajeja puolestaan yleensä karuja kasvupaikkoja suosivat lajit kuten poronjäkälät, karhunsammalet, puolukka ja kanerva. Eri tutkimusten tulokset eivät kuitenkaan kaikkien lajien osalta ole yhdenmukaisia, mikä voi johtua mm. siitä, että vaikutukset vaihtelevat ravinteisuudeltaan erilaisten kasvupaikkojen välillä.

Edellä tiivistetyt tutkimustulokset koskevat lähinnä yleisiä ja runsaita metsäkasvilajeja. Tarkasteltiinpa sitten paikallista monimuotoisuutta (yksittäisen hakkuualan lajistoa) tai alueellista monimuotoisuutta, yleisten lajien vähäisillä runsauseroilla pelkän avohakkuun tai avohakkuun ja hakkuutähteiden talteenoton jälkeen ei liene merkitystä. Energiapuun korjuun vaikutuksista harvinaisten kasvilajien säilymiseen ei ole tutkimustietoa. Suurin osa harvinaisista metsäkasvilajeista esiintyy kuitenkin ympäristöstään poikkeavilla kasvupaikoilla kuten lehdoissa, lähteiköissä, puronvarsissa jne. Metsälakikohteet, muut arvokkaat elinympäristöt ja pelkästään metsänhoitosuosituksiin perustuvat muut huomionarvoiset luontokohteet rajataan pääosin hakkuiden ulkopuolelle, eikä niillä siten tehdä myöskään energiapuun korjuuta.

Myös yleisten ja runsaiden kasvilajien runsauden muutoksilla voi kuitenkin olla merkittäviä seurannaisvaikutuksia. Kannonnostosta kärsivät useimmat kasvullisesti lisääntyvät kloonikasvit kuten mustikka. Mustikka on metsissä kenttäkerroksen runsain kasvilaji. Valtakunnan metsien inventoinnin pysyviltä koealoilta tehtyjen kasvillisuuskartoitusten perusteella mustikanvarvikot vähenivät 1950-luvulta noin 18 % :n keskipeittävyydestä 8 % :n peittävyyteen vuoteen 1995 mennessä, minkä jälkeen peittävyys on pysynyt noin 10 % :n tasolla (Reinikainen ym. 2000, Salemaa ym. 2011). Väheneminen on pääasiassa avohakkuiden ja maanmuokkauksen seurausta. Mustikka on varttuneissa metsissä tärkein kasvinsyöjähyönteisten ravintokasvi, jolla elää toukkana noin 80 perhoslajia ja viisi sahapistiäislajia (Siitonen ja Hanski 2004). Kasvinsyöjähyönteisten toukat ovat puolestaan tärkeä ravintokohde monille hyönteissyöjälinnuille niiden pesimäaikaan – esimerkiksi metson poikasten tärkein ravintokohde muutaman ensimmäisen elinviikon aikana.

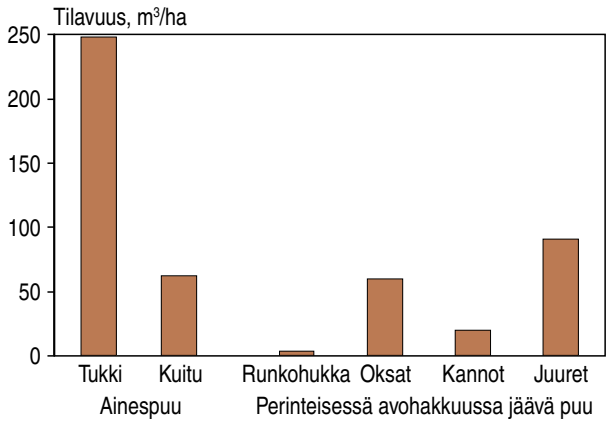
2.6.2 Lahopuusta riippuvaiset eliöt

Metsätalouden vaikutus lahopuulajistoon

Lahopuusta riippuvaisia lajeja eli saproksyylejä on eri eliöryhmissä yhteensä noin 4000–5000 lajia eli vähintään viidennes kaikista metsälajeista (Siitonen 2001, Siitonen ja Hanski 2004). Lajimäärältään suurimpia ryhmiä ovat lahottajasienet, kovakuoriaiset, kaksisiipiset ja loispistiäiset. Lahopuun määrän väheneminen tehokkaan metsien käytön seurauksena on tärkein yksittäinen metsälajien uhanalaistumisen syy. Uhanalaisia ja silmälläpidettäviä metsälajeja on uusimman uhanalaisarvioinnin mukaan 1590 lajia, joista 523 lajille (33 %) lahopuun väheneminen on yksi uhanalaisuuden syy (Rassi ym. 2010).

Luonnontilaisissa vanhoissa metsissä lahopuun keskimääräinen tilavuus on noin 60–120 m^3/ha kasvupaikkatyypistä riippuen (Siitonen 2001, Ranius, Jonsson ja Kruys 2004). Luonnontilaisessa metsässä lahopuun määrä on kuitenkin suurimmillaan sukkession alussa heti metsikön uudistumiseen johtavan häiriön, kuten metsäpalon jälkeen, jolloin kuollutta puuta voi olla jopa satoja kuutiometrejä hehtaarilla. Määrä riippuu lähinnä elävän puuston tilavuudesta ennen häiriötä sekä puuston kuolleisuudesta häiriössä. Järeän lahopuun (minimiläpimitta 10 cm, minimipituus 1,3 metriä) tilavuus Etelä-Suomen talousmetsissä on keskimäärin 3,2 m^3/ha valtakunnan metsien kymmenennen inventoinnin tulosten perusteella (Ihalainen ja Mäkelä 2009). Järeän lahopuun määrä talousmetsissä on siten yli 95 % pienempi kuin luonnonmetsissä.

Pieniläpimittaisen lahopuun (< 10 cm) määrä – samoin kuin kantojen määrä – puolestaan on lisääntynyt metsätalouden seurauksena. Talousmetsissä säännöllisesti toistuvat harvennus- ja päätehakkuut tuottavat pieniläpimittaista kuollutta puuta vähintään yhtä paljon kuin mitä luontaisten häiriöiden kautta voi syntyä luonnontilaisessa metsässä. Pieniläpimittaisen tai hakkuukannoissa olevan lahopuun keskimääräisiä tilavuuksia eri ikäisissä talousmetsissä ei ole selvitetty esimerkiksi valtakunnan metsien inventoinneissa. Päätehakkuussa tai harvennushakkuussa kantoihin ja latvuksiin jäävän pieniläpimittaisen lahopuun biomassa ja tilavuus voidaan kuitenkin laskea korjattavan puuston tunnusten avulla (Hakkila 1991, Hynynen 2001). Vanhan kuusikon päätehakkuissa tuoreilla kankailla lahopuupoistuma on alle 5 m^3/ha latvuksissa (runkohukkapuu), noin 10 m^3/ha kantojen maanpäällisissä osissa sekä noin 50 m^3/ha oksissa (kuva 2.6.1). Lisäksi maanalaisiin juuriin jää useita kymmeniä motteja lahopuuta.



Kuva 2.6.1. Kokonaispoistuma päätehakkuussa jaettuna lahopuuositteisiin. Esimerkkitapaus on tuoreen kankaan istutuskuusikko Etelä-Suomessa, joka hakataan 65-vuotiaana ja jossa runkopuun tilavuus päätehakkuussa on noin 315 m^3/ha. Ositteiden tilavuudet on laskettu MOTTI-metsikkösimulaattorilla.

Järeä lahopuu on uhanalaisen lahopuusta riippuvaisen lajiston kannalta tärkeämpi elinympäristö kuin pieniläpimittainen lahopuu. Suurin osa uhanalaisista lahopuulla elävistä lajeista suosii vähintään 20 cm läpimittaisia kuolleita puita (Dahlberg ja Stokland 2004). Lajit, jotka tulevat toimeen myös pieniläpimittaisella lahopuulla tai kannoilla, eivät ole yleensä metsätalouden seurauksena uhanalaistuneet. Pieniläpimittaisen lahopuun ja kantojen merkitykseen lahopuusta riippuvaisen lajiston kannalta on alettu kiinnittää enemmän huomiota vasta lähiaikoina. Kun merkitystä arvioidaan, ensimmäinen tehtävä on selvittää, mitä lajeja hakkuutähteillä ja kannoilla ylipäätään elää. Tämä tieto sinänsä ei kuitenkaan riitä näiden lahopuuositteiden merkityksen arvioimiseen. Oleellinen kysymys on se, mikä osuus eri lajien koko populaatiosta elää hakkuutähteillä ja kannoilla suhteessa muihin talousmetsämaisemassa saatavilla oleviin lahopuulaatuihin.

Suomen saproksyylilajeista ei ole arviota siitä, mikä osuus näistä lajeista elää < 10 cm läpimittaisilla kuolleilla puilla tai hakkuukannoilla. Ruotsissa on tehty katsaus lahopuulla elävien lajien isäntäpuuvaatimuksista perustuen tietokantaan, joka sisälsi tietoja noin 3600 lajin elintavoista (Dahlberg ja Stokland 2004). Vaikka katsaus onkin alustava ja koskee Ruotsin lajistoa, voidaan tuloksia suuruusluokka-arviona soveltaa Suomeenkin. Noin puolet lajeista pystyi käyttämään läpimitaltaan monenlaisia lahopuita. Pieniläpimittaisella, 1–5 cm lahopuulla esiintyi 2072 lajia eli lähes 60 % tarkastelluista lajeista. Tuloksen perusteella pieniläpimittaisen lahopuun merkitys saproksyylilajiston monimuotoisuudelle näyttäisi olevan suurempi kuin mitä aiemmin on uskottu (Miljöeffekter av skogsbränsleuttag … 2006).

Hakkuutähteiden ja hakkuukantojen korjuu muuttaa lahopuulajien määrää

Hakkuutähteissä ja kannoissa esiintyvää lajistoa on selvitetty useissa uusissa tutkimuksissa Ruotsissa (Nittérus ym. 2004, Abrahamsson ja Lindblad 2006, Hedgren 2007, Jonsell ym. 2007, Caruso ym. 2008, Caruso ja Rudolphi 2009, Hjältén ym. 2010, Jonsell 2011, Jonsell ja Hansson 2011) sekä Suomessa (Rudolphi ym. 2011). Hakkuutähteissä lisääntyvään kovakuoriaislajistoon keskittyvässä tutkimuksessa selvitettiin puulajin, läpimitan ja hakkuusta kuluneen ajan vaikutusta lajistoon (Jonsell ym. 2007). Kasvatukseen otetuista hakkuutähteistä kuoriutui 160 lajia, joista 20 on Ruotsissa luokiteltu silmälläpidettäväksi ja kaksi uhanalaiseksi. Lajimäärässä ei ollut suuria eroja eri läpimittaluokkien (1–4 cm, 4–8 cm ja 8–15 cm) välillä. Lajimäärässä ei myöskään ollut merkittäviä eroja eri puulajien (kuusi, koivu, haapa, tammi) välillä yhden kesän ikäisessä hakkuutähteessä, mutta vanhemmassa hakkuutähteessä lajimäärä kuusella oli selvästi alhaisempi kuin muilla puulajeilla. Haavalta tavattiin eniten silmälläpidettäviä lajeja: haavalla näitä oli 11 lajia, koivulla 8 ja kuusella vain 2 lajia (Jonsell ym. 2007). Lajimäärä on suurempi vanhassa, kolmesta viiteen vuoden ikäisessä hakkuutähteessä, kuin tuoreessa yhden kesän ikäisessä hakkuutähteessä (Nittérus ym. 2004, Jonsell ym. 2007).

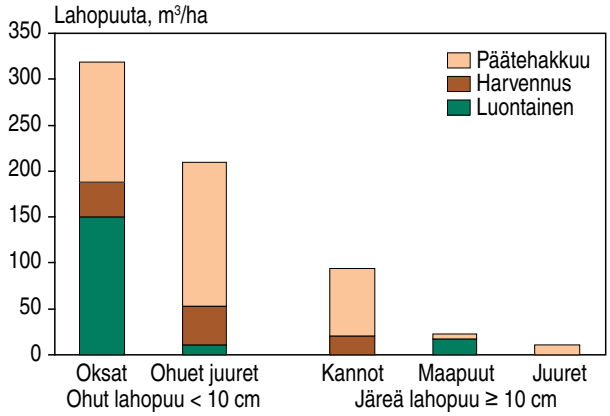
Tutkimustulosten mukaan hakkuukannoissa elää tilavuusyksikköä kohti yhtä lajirikas lahopuusta riippuvainen kovakuoriaislajisto kuin tekopökkelöissä tai maapuissa (Abrahamsson ja Lindblad 2006, Hedgren 2007, Hjältén ym. 2010, Jonsell ja Hansson 2011). Kannoilla ja hakkuutähteillä esiintyy myös runsaasti epiksyylistä, lahopuulla kasvavaa jäkälälajistoa (Caruso ym. 2008). Kannoilla voi olla merkitystä harvinaisten epiksyylisten jäkälien säilymiselle talousmetsämaisemassa (Caruso ym. 2008, Caruso ja Rudolphi 2009). Epiksyylisammalille kannot eivät ole yhtä merkittävä kasvualusta (Caruso ja Rudolphi 2009); hakkuuaukeilla tämä johtuu useimmille sammallajeille liian paahteisesta ja kuivasta mikroilmastosta (Rudolphi ym. 2011).

Edellä viitatut tutkimustulokset osoittavat, että sekä hakkuutähteillä että hakkuukannoilla elää yhtä rikas saproksyylilajisto kuin luontaisesti syntyneillä lahopuulaaduilla. Hakkuutähteiden ja kantojen korjuun laajan mittakaavan ja pitkän aikavälin vaikutuksia lahopuusta riippuvaisten lajien popu-

laatiokokoihin ei kuitenkaan pysty arvioimaan edellä kuvattujen tapaustutkimusten avulla. Näiden vaikutusten arvioiminen edellyttää mallitusta, jossa yhdistetään tiedot (tai kvantitatiiviset mallit) lajien isäntäpuuvaatimuksista metsikön kehitystä kuvaaviin malleihin. Mallien avulla voidaan selvittää, miten eri lahopuuositteiden määrät muuttuvat erilaissa metsänkäsittelyvaihtoehdoissa.

Ensimmäinen tällainen julkaistu tutkimus selvitti kuusen hakkuutähteiden korjuun pitkän aikavälin vaikutuksia 577 kuusella elävään saproksyylilajiin (Dahlberg ym. 2011). Tutkimuksessa mallitettiin eri lahopuuositteiden tilavuuksia yli kiertoajan. Tulosten mukaan pieniläpimittaista lahopuuta syntyy kiertoajan kuluessa moninkertainen tilavuus järeään (≥ 10 cm) lahopuuhun verrattuna (kuva 2.6.2). Pieniläpimittaista lahopuuta syntyy oksien kuolemisen ja putoamisen seurauksena kiertoajan kuluessa suunnilleen yhtä paljon kuin hakkuissa. Niinpä hakkuutähteiden korjuu sekä päätehakkuussa että harvennuksissa vähensi pieniläpimittaisen lahopuun määrää koko kiertoajan kuluessa (tai metsämaisemassa, jossa ikäluokkajakauma on tasainen) vain noin 40 % . Tulosten perusteella arvioitiin, että nykytilanteessa kuusen hakkuutähteiden korjuu Ruotsissa (noin 70 % tähteistä korjataan noin puolelta hakkualoista) ei olennaisesti lisää kuusesta riippuvaisten saproksyylilajien alueellista häviämisriskiä. Järeiden hakkuukantojen tilavuus kiertoajan kuluessa oli moninkertainen luontaisesti syntyneisiin maapuihin verrattuna (kuva 2.6.2). Tutkimukset kantojen korjuun vaikutuksista lahopuuhun tai lajistoon ovat käynnistyneet, mutta tuloksia ei vielä ole käytettävissä (Ranius ym. 2011).

Kantojen merkitystä lajien lisääntymispaikkana suhteessa muihin lahopuuositteisiin on mahdollista selvittää myös riittävän laajan otantatutkimuksen avulla, jossa selvitetään ensin eri lahopuuositteiden tilavuus tarkasteltavassa maisemassa ja sen jälkeen sopivalla otannalla eri lajien esiintymisfrekvenssi tai tiheys eri lahopuuositteilla. Kertomalla tiheydet lahopuuositteiden tilavuuksilla saadaan arvio populaatiokoosta eri ositteilla. Jonsellin (2011) tutkimuksessa analysoiduista 40 kovakuoriaislajista kahdeksalla vähintään 50 % populaatiosta eli hakkuukantojen varassa. Näillä lajeilla kantojen korjuu voi vaikuttaa siten huomattavasti populaatiokokoihin maisematasolla.



Kuva 2.6.2. Eri lahopuuositteiden tilavuuden kertymä yli koko kiertoajan eteläruotsalaisessa kuusikossa (Dahlberg ym. 2011). Pylväät kuvaavat päätehakkuussa ja harvennushakkuissa syntyvän sekä luontaisesti syntyvän lahopuun osuuksia.

Hakkuutähteiden korjuuseen liittyy saproksyylilajiston kannalta lisääntymispaikkojen vähenemisen lisäksi myös haitallinen pyydysvaikutus (Jonsell ym. 2007, Hedin ym. 2008). Tuoreet hakkuutähteet houkuttelevat ympäristöstä vastakuolleessa puussa eläviä lajeja lisääntymään hakkuutähteissä. Jos hakkuutähteet poistetaan vasta hyönteisten (nilaa ja puuta syövät lajit sekä niiden pedot ja loiset) iskeytymisen jälkeen, samalla poistetaan huomattava osa näiden lajien lisääntyvästä paikallispopulaatiosta. Tämän tekijän mahdollisista vaikutuksista lajimääriin ja populaatiokoostumukseen ei ole määrällisiä arvioita.

Riittävästä lahopuun määrästä tulee huolehtia

Lahopuun merkitys metsäluonnon monimuotoisuudelle on tiedostettu, ja lahopuun määrän lisääminen on sisällytetty keskeisenä tavoitteena talousmetsien luonnonhoidon suosituksiin (Hyvän metsänhoidon … 2006, Saaristo ym. 2009). Järeän lahopuun määrää voidaan lisätä säästämällä kuolleet puut harvennushakkuissa ja jättämällä päätehakkuualoille eläviä ja kuolleita säästöpuita. Pääteakkuualoille on 2000-luvulla jätetty yksityismailla keskimäärin noin 6 m^3/ha elävää ja kuollutta säästöpuustoa (Kuusinen 2006; http://www.metsavastaa.net/aikasarja_saastopuut_1995_2010). Elävän ja kuolleen säästöpuuston kokonaistilavuus kaikkien omistajaryhmien mailla on suuruusluokkaa 1 milj. m^3 vuodessa.

Energiapuun korjuu vähentää lahopuun määrää ja samalla saproksyylilajeille sopivien elinympäristöjen määrää kolmella eri tavalla: (1) Pieniläpimittaisen hakkuutähteen ja kantojen määrä vähenee korjuukohteilla huomattavasti (hakkuutähteen noin 70 % ja kantojen > 90 %). (2) Hakkuutähteen mukana korjataan myös järeää lahopuuta kuten lumppeja, ainespuun korjuussa palstalle jääneitä pöllejä, järeitä latvuksia ja tuulenkaatoja. (3) Energiapuun korjuukohteilla ajetaan koneilla useampaan kertaan, jolloin suurempi osuus lahoista maapuista tuhoutuu kuin pelkän uudistushakkuun yhteydessä.

Hakkuutähteen mukana korjattavan järeän lahopuun määrää ei yleensä ole arvioitu erikseen. Ruotsalaisessa tutkimuksessa kolmasosa avohakkuun jälkeen uudistusaloilla olleista järeistä maapuista korjattiin hakkuutähteen korjuun yhteydessä (Rudolphi ja Gustafsson 2005). Huomattava osa uudistuskypsässä metsässä ennen hakkuuta olevista maalahopuista tuhoutuu hakkuun ja maanmuokkauksen yhteydessä. Avohakkuun ja äestyksen seurauksena maapuuston tilavuus pieneni keskimäärin 70 % murskaantumisen ja hautautumisen seurauksena (Hautala ym. 2004). Mätästys on todennäköisesti keskimäärin säästeliäämpi maanmuokkausmenetelmä. Toisessa tutkimuksessa avohakkuun, mätästyksen ja joko pelkän hakkuutähteen korjuun tai hakkuutähteen ja kannonnoston seurauksena maapuuston tilavuus pieneni keskimäärin noin 40 % (Rabinowitsch-Jokinen ja Vanha-Majamaa 2010).

2.6.3 Maaperäeliöstö

Maaperäeliöstö on metsämaan moottori, joka vastaa maaperän hajotusprosesseista ja vaikuttaa siten oleellisesti metsän ravinnekiertoihin. Maaperäeliöstö vaikuttaa sekä kasvupaikan lyhyen aikavälin tuottokykyyn orgaanisen aineen hajotusnopeuden ja ravinteiden vapautumisen kautta että kasvupaikan pitkän aikavälin tuottokykyyn metsämaan rakenteen ja uuden metsämaan muodostamisen kautta. Maaperäeliöstön, erityisesti bakteerien ja sienten, kokonaislajimäärästä ja lajikoostumuksen vaihtelusta tiedetään hyvin vähän. Kiinnostuksen kohteena eivät näissä ryhmissä yleensä olekaan yksittäiset lajit vaan yhteisön rakenne lajia korkeammissa taksonomisissa ryhmissä (esim. bakteeribiomassa) tai toiminnallisissa eli funktionaalisissa ryhmissä (esim. hajottajien, sienensyöjien ja petojen lukumäärät ja runsaussuhteet).

Metsätalous ja bioenergian korjuu muuttavat maaperäeliöstön elinoloja

Päätehakkuu ja hakkuutähteiden poisto vaikuttavat puolestaan maaperäeliöiden fysikaaliseen ympäristöön ja saatavilla olevaan ravintovarastoon. Hakkuutähteiden poistolla voi olla monia eri vaikutuksia maaperäeliöstön koostumukseen ja toimintaan (mm. Bengtsson ym. 1998, Persson ym. 2005, Laurén ja Palviainen 2007). Maaperäeliöille ravinnonlähteenä käytettävissä olevan biomassan määrä pienenee, lämpötila ja kosteusolot humuskerroksessa muuttuvat äärevämmiksi suojaavien hakkuutähteiden puuttuessa, hajottajille tärkeä hiili-typpi-suhde muuttuu ja maaperän happamuus kasvaa.

Päätehakkuun vaikutuksista maaperäeliöstöön on Pohjoismaissa julkaistu melko paljon tutkimuksia, ja myös hakkuutähteiden poiston vaikutuksia maaperäeliöstöön on selvitetty useissa tutkimuksissa, joko heti korjuun jälkeen tai enimmillään 15–30 vuotta korjuusta. Lyhyellä aikavälillä pelkän päätehakkuun tai päätehakkuun sekä hakkuutähteiden ja kantojen korjuun vaikutuksilla maaperäeliöstöön ei usein ole oleellisia eroja (Persson ym. 2005, Kataja-aho ym. 2011a). Kantojen korjuun merkittävin vaikutus lyhyellä aikavälillä on se, että häiriintymättömän metsämaan osuus pienenee selvästi ja vastaavasti paljastuneen mineraalimaan osuus kasvaa. Useimpien hajottajaeliöryhmien tiheydet ovat pienempiä mineraalimaassa (Kataja-aho ym. 2011b). Pitkällä aikavälillä kokopuun korjuun on havaittu vähentäneen useiden maaperäeliöryhmien runsauksia (Bengtsson ym. 1997, 1998); vaikutus liittyy hajottajille käyttökelpoisen orgaanisen aineen määrän pienenemiseen hakkuutähteiden poiston seurauksena. Muutokset maaperäeliöstössä voivat osaltaan vaikuttaa kasvupaikan pitkän aikavälin tuottokykyä alentavasti. Vaikutukset olisivat siis saman suuntaisia kuin hakkuutähteiden poiston aiheuttama maaperän ravinnevaraston väheneminen; käytännössä molemmat vaikutukset näkyvät alentuneena puuston kasvuna.

Tämän hetkisen tutkimustiedon valossa hakkuutähteen korjuu ei näytä vaikuttavan oleellisesti lahottajasienten tai mykorritsasienten lajirikkauteen, lajikoostumukseen, biomassaan tai sienirihmaston määrään maassa (Bengtsson ym. 1998, Mahmood ym. 1999, Hagerberg ja Wallander 2002, Allmér ym. 2009). Kuitenkin kokeissa, joissa on korjattu sekä hakkuutähde päätehakkuun yhteydessä että pienpuu harvennushakkuiden yhteydessä, humuskerros oli ohuempi ja sienijuurten määrä pienempi kuin verrokkialoilla (Mahmood ym. 1999). Sienijuurten määrän pieneneminen voi puolestaan vaikuttaa puiden ravinnonottoon ja kasvuun. Kantojen noston vaikutuksista maaperän mykorritsaverkostoon ja sienilajistoon tiedetään edelleen hyvin vähän (Timonen ja Pennanen 2007).

2.6.4 Johtopäätökset ja suositukset

Vaikka hakkuutähteen korjuun vaikutuksista monimuotoisuuteen onkin runsaasti uusia tutkimustuloksia, on silti selvää, että nopeasti lisääntyvän korjuun laajan mittakaavan ja pitkän aikavälin vaikutuksista lajistoon ei ole riittävän hyvää käsitystä. Kannonnoston vaikutuksista lajistoon on toistaiseksi vähän tutkimustuloksia. Kannonnosto vaikuttaa hakkuutähteiden korjuuta selvästi voimakkaammin moniin lajiston kannalta tärkeisiin metsikön rakennepiirteisiin, kuten lahopuun määrään tai rikkoutumattoman pintakasvillisuuden ja humuskerroksen osuuteen.

Jotta mahdollisia haitallisia vaikutuksia voitaisiin ehkäistä ennakolta, energiapuun korjuun suosituksia (Äijälä ym. 2010) on syytä noudattaa ja korjuun työjälkeä seurata. Suositukset ovat pääpiirteissään seuraavat: (1) Hakkuutähteestä jätetään noin 30 % korjaamatta mahdollisimman tasaisesti koko korjuualalle. (2) Korjaamatta jätetään eri puulajien järeitä tuoreita kantoja ≥ 25 kpl/ha (hienojakoisilla mailla ≥ 50 kpl/ha) sekä vanhat kannot. (3) Säästetään olemassa oleva lahopuusto. (4) Jätetään metsäluonnon arvokkaat elinympäristöt korjuun ulkopuolelle. (5) Ei korjata kantoja jyrkistä rinteistä, kivikoista tai kalliokoista, kosteikoista, vesistöjen suojakaistoilta eikä säästö- ja lahopuiden lähiympäristöstä.

Avohakkuu sinänsä muuttaa huomattavasti metsikön olosuhteita. Näihin muutoksiin verrattuna hakkuutähteiden korjuun lisävaikutus kasvilajistoon on useimmissa tapauksissa merkitykseltään vähäinen. Suurin osa uhanalaisista ja vaateliaista kasvilajeista esiintyy tavanomaisista kangasmetsistä poikkeavilla kasvupaikoilla, jotka useimmissa tapauksissa tulee jättää energiapuun korjuun ulkopuolelle. Kuitenkin myös yleisten ja runsaiden kasvilajien, kuten mustikan, mahdollisella vähenemisellä kannonnoston seurauksena voi olla lajiston kannalta merkittäviä seurannaisvaikutuksia.

Lahopuun väheneminen on merkittävin yksittäinen talousmetsien monimuotoisuutta vähentävä tekijä. Tästä syystä metsänhoitosuosituksissa on kiinnitetty erityistä huomiota järeäläpimittaisen lahopuun lisäämiseen jättämällä eläviä säästöpuita ja säästämällä mahdollisuuksien mukaan olemassa oleva järeä lahopuu hakkuissa. Jos lahopuun määrä talousmetsissä edelleen merkitsevästi laskee energiapuun korjuun seurauksena, lajien uhanalaistuminen kiihtyy. Energiapuun korjuu ei saisi johtaa siihen, että järeä kuollut puusto otetaan metsistä yhä tarkemmin talteen vastoin ekologisen kestävyyden ja monimuotoisuuden säilyttämisen tavoitteita.

Järeäläpimittainen lahopuu on lajiston monimuotoisuuden kannalta yleensä tärkeämpää kuin pieniläpimittainen latvus- ja oksapuu. Pelkästään korjuuteknologisista syistä noin 30 % hakkuutähteistä jäänee joka tapauksessa uudistusaloille korjaamatta, joten varsinkaan pieniläpimittaisen kuusen hakkuutähteen korjuulla ei todennäköisesti ole merkitystä lahopuulla elävien lajien alueellisen säilymisen kannalta. Männyn ja koivun järeitä latvuksia ja hukkapuuta tulisi pyrkiä säästämään korjuun yhteydessä. Haavan hakkuutähteitä ei pitäisi korjata lainkaan. Kannonnoston vaikutuksista lahopuulajistoon ei ole riittävästi tietoa.

Orgaanisen aineen poistamisen vaikutuksista maaperäeliöstöön, metsämaan rakenteeseen ja toimintaan sekä uuden metsämaan muodostumiseen tiedetään edelleenkin aivan liian vähän. Kaikki nämä tekijät yhdessä vaikuttavat kasvupaikan pitkän aikavälin tuottokykyyn. Pohjoisissa havumetsissä metsämaa on varsin hyvin puskuroitunut kestämään erilaisia kertaluonteisia tai harvoin toistuvia voimakkaitakin häiriöitä, kuten metsäpaloja tai maanmuokkausta. Ainakaan kertaluonteinen energiapuun korjuu päätehakkuun tai harvennusten yhteydessä tuskin aiheuttaa pysyviä vaikutuksia metsämaan eliöstöön.

Kirjallisuus

Abrahamsson, M. & Lindbladh, M. 2006. A comparison of saproxylic beetle occurrence between man-made high- and low-stumps of spruce (*Picea abies*). Forest Ecology and Management 226: 230−237.

Allmér, J., Stendlid, J. & Dahlberg, A. 2009. Logging-residue extraction does not reduce the diversity of litter-layer saprotrophic fungi in three Swedish coniferous stands after 25 years. Canadian Journal of Forest Research 39: 1737−1748.

Bengtsson, J., Persson, T. & Lundkvist, H. 1997. Long-term effects of logging residue addition and removal on macroarthropods and encytracheids. Journal of Applied Ecology 34: 1014–1022.

Bengtsson, J., Lundkvist, H., Sohlenius, B. & Solbreck, B.1998. Effects of organic matter removal on the soil food web: Forestry practices meet ecological theory. Applied Soil Ecology 9: 137–143.

Berquist, J., Örlander, G. & Nilsson, U. 1999. Deer browsing and slash removal affect field vegetation on south Swedish clearcuts. Forest Ecology and Management 115: 171–182.

Bråkenhielm, S. & Liu, Q. 1998. Long-term effects of clear-felling on vegetation dynamics and species diversity in a boreal pine forest. Biodiversity and Conservation 7: 207–220.

Caruso, A., Rudolphi, J. & Thor, G. 2008. Lichen species diversity and substrate amounts in young planted boreal forests: a comparison between slash and stumps of *Picea abies*. Biological Conservation 141: 47−55.

Caruso, A. & Rudolphi, J. 2009. Influence of substrate age and quality on species diversity of lichens and bryophytes on stumps. The Bryologist 112: 520−531.

Dahlberg, A. & Stokland, J. 2004. Vedlevande arternas krav på substrat – sammanställning och analys av 3600 arter. Rapport 7/2004, Skogstyrelsen, 75 s.

Dahlberg, A., Thor, G., Allmér, J., Jonsell, M., Jonsson, M. & Ranius, T. 2011. Modelled impact of Norway spruce logging residue extraction on biodiversity in Sweden. Canadian Journal of Forest Research 41: 1220−1232.

Dynesius, M., Åström, M. & Nilsson, C. 2008. Microclimatic buffering by logging residues and forest edges reduces clear-cutting impacts on forest bryophytes. Applied Vegetation Science 11: 345−354.

Hagerberg, D. & Wallander, H. 2002. The impact of forest residue removal and wood ash amendment on the growth of ectomycorrhizal external mycelium. FEMS Microbiology Ecology 39: 139–146.

Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. Folia Forestalia 773, 24 s.

Hautala, H., Jalonen, J., Laaka-Lindberg, S. & Vanha-Majamaa, I. 2004. Impacts of retention felling on coarse woody debris (CWD) in mature boreal spruce forests in Finland. Biodiversity and Conservation 13: 1541–1554.

Hedgren, P. O. 2007. Early arriving saproxylic beetles (Coleoptera) and parasitoids (Hymenoptera) in low and high stumps of Norway spruce. Forest Ecology and Management 241: 155−161.

Hedin, J., Isacsson, G., Jonsell, M. & Komonen, A. 2008. Forest fuel piles as ecological traps for saproxylic beetles. Scandinavian Journal of Forest Research 23: 348−357.

Hjältén, J., Stenbacka, F. & Andersson, J. 2010. Saproxylic beetle assemblages on low stumps, high stumps and logs: implications for environmental effects on stump harvesting. Forest Ecology and Management 260: 1149−1155.

Hynynen, J. 2001. Energiapuuvarat. Julkaisussa: Nurmi, J. & Kokko, A. (toim.). Biomassan tehostetun talteenoton seurannaisvaikutukset metsässä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 816, s. 9–16.

Hyvän metsänhoidon suositukset. 2006. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Helsinki, 100 s.

Ihalainen, A. & Mäkelä, H. 2009. Kuolleen puuston määrä Etelä- ja Pohjois-Suomessa 2004−2007. Metsätieteen aikakauskirja 1/2009: 35−56.

Jonsell, M. 2011. Avverkningstubbarnas bidrag till vedlevande skalbaggars populationsstorlekar i ett skogslandscap i norra Hälsingland. Slutrapport till Energimyndigheten för project 31183-1, mars 2011. Instituten för Ekologi, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.

Jonsell, M. & Hansson, J. 2011. Logs and stumps in clearcuts support similar saproxylic beetle diversity: implications for bioenergy harvest. Silva Fennica 45(5): 1053–1064.

Jonsell, M., Hansson, J. & Wedmo, L. 2007. Diversity of saproxylic beetle species in logging residues in Sweden – comparisons between tree species and diameters. Biological Conservation 138: 89–99.

Kataja-aho, S., Saari, E., Fritze, H. & Haimi, J. 2011a. Effects of stump removal on soil decomposer communities in undisturbed patches of the forest floor. Scandinavian Journal of Forest Research 26: 221−231.

Kataja-aho, S., Fritze, H. & Haimi, J. 2011b. Short-term responses of soil decomposer and plant communities to stump harvesting in boreal forests. Forest Ecology and Management 262: 379−388.

Kuusinen, M. 2006. Yksityismetsien luonnonhoidon laadun seurannan tulokset 1996–2005. Julkaisussa: Horne, P., Koskela, T., Kuusinen, M., Otsamo, A. & Syrjänen, K. (toim.). Metson jäljillä. Etelä-Suomen metsien monimuotoisuusohjelman tutkimusraportti, s. 229–234. MMM, YM, Metla ja SYKE.

Laurén, A. & Palviainen, M. 2007. Päätehakkuu ja orgaanisen aineksen hajotus. Metsätieteen aikakauskirja 2/2007: 283–286.

Mahmood, S., Finlay, R. D. & Erland, S. 1999. Effects of repeated harvesting of forest residues on the ectomycorrhizal community in a Swedish spruce forest. New Phytologist 142: 577–585.

Miljöeffekter av skogsbränsleuttag och askåterföring i Sverige. 2006. En syntes av Energimyndighetens forskningsprogram 1997 till 2004. ER2006:44, 211 s.

Nittérus, K., Gunnarsson, B. & Axelsson, E. 2004. Insects reared from logging residues on clear-cuts. Entomologica Fennica 15: 53–61.

Olsson, B. A. & Staaf, H. 1995. Influence of harvesting intensity of logging residues on ground vegetation in coniferous forest. Journal of Applied Ecology 32: 640–654.

Persson, T., Ahlström, K. & Lindberg, N. 2005. Effekter av GROT-uttag på biologisk mångfald hos markfaunan. Slutrapport P13725-1. Energimyndighetens projekt 30424-1.

Rabinowitsch-Jokinen, R. & Vanha-Majamaa, I. 2010. Immediate effects of logging, mounding and removal of logging residues and stumps on coarse woody debris in managed boreal Norway spruce stands. Silva Fennica 44: 51−62.

Ranius, T., Jonsson, B. G. & Kruys, N. 2004. Modeling dead wood in Fennoscandian old-growth forest dominated by Norway spruce. Canadian Journal of Forest Research 34: 1025–1034.

Ranius, T., Allmér, J., Caruso, A., Dahlberg, A., Jonsell, M., Jonsson, M., Hallingbäck, T., Rudolphi, J. & Thor, G. 2011. Modeling dead wood dynamics to predict effects of biomass harvesting for energy production. Julkaisussa: Deadwood and dying trees − a matter of life and biodiversity. International symposium on dynamics and ecological services of deadwood in forest ecosystems, May 15–19, 2011, Rouyn-Noranda, Quebec, Canada. Abstracts, s. 64.

Rassi, P., Hyvärinen, E., Juslén, A. & Mannerkoski, I. (toim.) 2010. Suomen lajien uhanalaisuus − Punainen kirja 2010. Ympäristöministeriö & Suomen ympäristökeskus, Helsinki, 685 s.

Reinikainen, A., Mäkipää, R., Vanha-Majamaa, I. & Hotanen, J. P. 2000. Kasvit muuttuvassa metsäluonnossa. Tammi, Helsinki, 384 s.

Rosenberg, O. & Jacobsson, S. 2004. Effects of repeated slash removal in thinned stands on soil chemistry and understorey vegetation. Silva Fennica 38: 133–142.

Rudolphi, J. & Gustafsson, L. 2005. Effects of forest-fuel harvesting on the amount of deadwood on clear-cuts. Scandinavian Journal of Forest Research 20: 235–242.

Rudolphi, J., Caruso, A., Cräutlein, von M., Laaka-Lindberg, S., Ryömä, R. & Berglund, H. 2011. Relative importance of thinned and clear-cut stands for bryophyte diversity on stumps. Forest Ecology and Management 261: 1911−1918.

Saaristo, L., Kuusinen, M. & Nieminen, M. 2009. Talousmetsien luonnonhoito. Metsäammattilaisen käsikirja. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Helsinki, 157 s.

Salemaa, M., Tonteri, T., Rautio, P., Korpela, L., Tamminen, M. & Ilvesniemi, H. 2011. Mitä olisi metsä ilman mustikkaa? Julkaisussa: Merilä, P. & Joutsimäki, M. (toim.). Metsät muuttuvat. Suomen metsien tilaa seurataan. Metsäntutkimuslaitos, s. 22–24.

Siitonen, J. 2001. Forest management, coarse woody debris and saproxylic organisms: Fennoscandian boreal forests as an example. Ecological Bulletins 49: 11–41.

Siitonen, J. & Hanski, I. 2004. Metsälajiston ekologia ja monimuotoisuus. Julkaisussa: Kuuluvainen, T., Saaristo, L., Keto-Tokoi, P., Kostamo, J., Kuuluvainen, J., Kuusinen, M., Ollikainen, M. & Salpakivi-Salomaa, P. (toim.). Metsän kätköissä. Suomen metsäluonnon monimuotoisuus. s. 76–109. Edita, Helsinki.

Timonen, S. & Pennanen, T. 2007. Sienet, metsien avohakkuut ja kannonnosto. Sienilehti 59(2): 54–58.

Åström, M., Dynesius, M., Hylander, K. & Nilsson, C. 2005. Effects of slash harvest on bryophytes and vascular plants in southern boreal forest clear-cuts. Journal of Applied Ecology 42: 1194–1202.

Äijälä, O., Kuusinen, M. & Koistinen, A. (toim.). 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset. Energiapuun korjuu ja kasvatus. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Helsinki, 56 s.

Metsäenergian tukipolitiikka sekä teknologia ja logistiikka

3

3.1 Uusiutuvan energian tukikeinon valinnalla on merkitystä

Jussi Lintunen, Jussi Uusivuori, Hanna-Liisa Kangas ja Matti Mäkelä

Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM 2010) linjasi uusiutuvan energian velvoitepaketissa biopolttonesteille 7 TWh:n ja pelleteille 2 TWh:n kulutustavoitteen vuodelle 2020. Keskeinen kysymys talouden kannalta on millä ohjauskeinoilla näihin tavoitteisiin päästään, ja mitkä tällöin ovat ohjauskeinojen aiheuttamat kustannukset. Tämän takia on tärkeää vertailla eri ohjauskeinojen kustannusvaikutuksia.

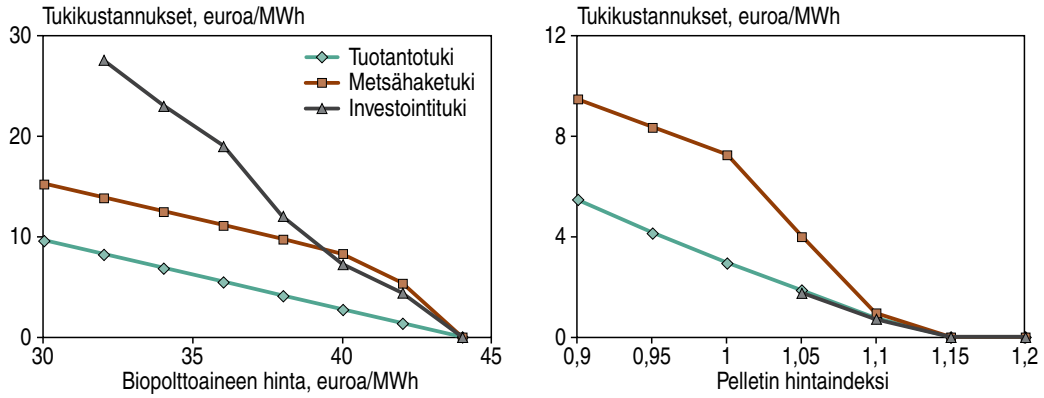
Metsämiesten Säätiön ja Metlan rahoittamassa Metsien käytön tulevaisuus Suomessa -hankkeessa tarkasteltiin Suomen biopolttoneste- ja pellettitavoitteita mikrotaloustieteellisen osittaistasapainomallin FinFEP (Finnish Forest and Energy Policy Model, Kangas ym. 2011b) avulla. Tutkimuksissa vertailtiin eri politiikkakeinojen tehokkuutta ja vaikutuksia sekä biopolttonesteiden (Kangas ym. 2011a) että pellettien (Mäkelä ym. 2011a) tuotantoon. Tutkimuksissa biopolttoneste tuotettiin massa- ja paperiteollisuuden ja pelletit sahateollisuuden yhteydessä (Kangas ym. 2011b ja Mäkelä ym. 2011b).

Tutkimuksissa vertailtiin investointitukea, tuotantotukea ja panostukea metsähakkeen käytölle. Investointituessa valtio maksaa osan investointikustannuksista, mikä alentaa yrityksen maksamia investointikustannuksia. Tuotantotuki on markkinahinnan lisäksi maksettava yksikkötuki. Yritys saa näin tuotteesta markkinahintaa korkeamman hinnan. Panostuessa valtio subventoi raaka−aineen hankintaa maksamalla osan raaka-aineen hankintahinnasta. Siten yritys maksaa raaka-aineestaan markkinahintaa alhaisemman hinnan.

Eri politiikkakeinojen vaikutuksia tutkittiin paitsi keskenään, myös suhteessa ns. peruslaskelmaan, jossa uusiutuvan energian tuotantoa ei tuettu. Peruslaskelmassa tukien puuttuessa ei investoitu biopolttoneste- tai pellettituotantoteknologiaan, joten tukitarve on selvä energiapoliittisiin tavoitteisiin pääsyn kannalta.

3.1.1 Tuotantotuki kustannustehokas ohjauskeino

Tuotantotuki oli vertailtavista tukikeinoista tehokkain: sitä käyttäen suorat tukikustannukset jäivät alhaisimmiksi (Kuva 3.1.1). Metsähakkeen panostuki tuli molemmissa tutkimuksissa tuotantotukea kalliimmaksi, mutta toisaalta se lisäsi tehokkaasti metsähakkeen energiakäyttöä. Metsähakkeen käytön lisääminen on yksi Suomen uusiutuvan energian tavoitteiden kulmakivistä (TEM 2010).



Kuva 3.1.1. Tukikustannukset tuotettua biopolttonestettä tai pellettejä kohden, kun biopolttonesteen tuotantotavoite on 6 TWh ja pelletin 2 TWh. Pellettilaskelmassa oli mukana kaksi pellettilaatua, joten niiden hinnat on indeksoitu niin, että indeksi 1 osoittaa referenssihinnan. Biopolttonesteen referenssihinta oli 38 € / MWh.

Biopolttonestetutkimuksessa investointituki oli huomattavasti tuotantotukea kalliimpi tukikeino, mutta pellettitutkimuksessa investointituen kustannukset olivat suunnilleen samalla tasolla tuotantotuen kustannusten kanssa. Investointituki osoittautui ongelmalliseksi: alhaisella lopputuotteen hinnalla investointituki ei riitä aikaansaamaan investointeja. Investointituen taso nousi myös erittäin korkeaksi (70–90 % investointikustannuksista) biopolttonesteen vertailuhinnoilla (38 €/MWh). Pellettilaskelmassa edes 100 % investointituki ei kannustanut investointeihin pelletin vertailuhinnoilla. Biopolttonesteen tuotanto on huomattavasti pellettituotantoa kalliimpaa (Kuva 3.1.1). Tämän vuoksi biopolttonesteen tuotannon yksikkötukikustannukset tulivat laskelmissa pellettituotannon tukemista kalliimmiksi.

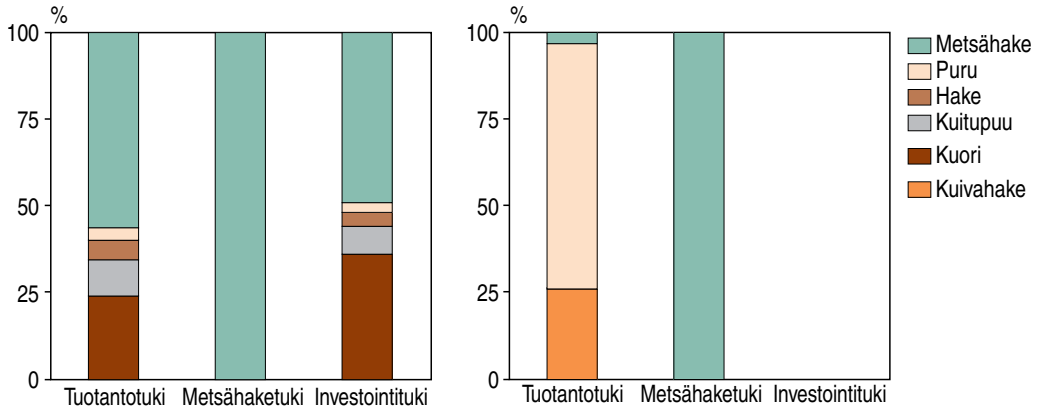
3.1.2 Tukipolitiikka lisää puun energiakäyttöä

Puun käyttöä energiaksi simuloitiin sekä energiatuotteen (biopolttoneste tai pelletit) tuotannossa että sähkön ja lämmön tuotannossa. Sahateollisuus käyttää lähinnä puuta sähkön- ja lämmöntuotantonsa polttoaineena. Massa- ja paperiteollisuudessa polttoainekäyttö jakaantuu puun lisäksi mustalipeän, maakaasun, öljyn sekä turpeen käyttöön.

Puun energiakäyttö lisääntyi kaikissa politiikkalaskelmissa peruslaskelmaan verrattuna. Koska politiikkakeinot eivät juuri vaikuttaneet massan, paperin tai sahatavaran tuotantoon, lisääntyi puun kokonaiskäyttö peruslaskelmaan verrattuna. Tämä johti myös puun hinnan nousuun politiikkalaskelmissa. Massa- ja paperiteollisuuden puun käyttö sähkön ja lämmön tuotannossa väheni politiikkalaskelmissa jopa puoleen peruslaskelmaan verrattuna. Tämä johtui teollisuuden mahdollisuudesta korvata puun käyttöä sähkön ja lämmön tuotannossaan muilla polttoaineilla. Sahateollisuus puolestaan lisäsi puun käyttöä sähkön ja lämmön tuotannossa politiikkakeinojen seurauksena johtuen pellettituotannon aiheuttamasta energiankysynnän lisäyksestä. Koska sahateollisuus käyttää lähinnä puuta energiantuotannossaan, lisääntynyt energiatarve katettiin puun käytöllä hintojen noususta huolimatta.

3.1.3 Ohjautuuko kuitupuuta energiakäyttöön?

Peruslaskelmassa sekä politiikkalaskelmissa kuitupuuta ei ohjautunut sähkön ja lämmön tuotantoon kummassakaan tutkimuksessa. Puutavaralajien käyttö biopolttonesteen ja pelletin tuotannossa riippui merkittävästi politiikkakeinosta (Kuva 3.1.2). Kun metsähakkeen käyttöä tuettiin biopolttonesteen tai pelletin tuotannossa panostuella, käytettiin niiden tuotantoon vain metsähaketta.



Kuva 3.1.2. Puun käyttö puutavaralajeittain biopolttonesteen (vas.) ja pelletin tuotannossa (oik.) biopolttonesteen ja pelletin referenssihinnoilla. Investointituki ei tehnyt pelletti-investoinnista kannattavaa referenssihinnoilla.

Tuotanto- ja investointitukien tapauksissa puutavaralajien käyttö oli monipuolisempaa. Biopolttonesteen tuotannossa käytettiin eniten metsähaketta, mutta lisäksi kuorta, kuitupuuta, haketta sekä purua. Pellettien tuotannossa käytettiin tuotantotuella lähinnä sahanpurua, mutta lisäksi kuivahaketta, haketta sekä hyvin pieniä määriä kuitupuuta.

3.1.4 Metsäsektorin hiilidioksidipäästöt eivät välttämättä laske tukipolitiikan seurauksena

Koska sahateollisuus käyttää lähinnä puupolttoaineita, sektorilla ei juuri ole omasta energiantuotannosta johtuvia hiilidioksidipäästöjä. Massa- ja paperiteollisuus taas käyttää huomattavia määriä fossiilisia polttoaineita, joten myös sektorin hiilidioksidipäästöt ovat merkittävät.

Kun biopolttonesteen tuotantoa tuettiin massa- ja paperiteollisuudessa, puuta korvattiin fossiilisilla polttoaineilla sähkön ja lämmön tuotannossa. Tämän seurauksena myös teollisuuden hiilidioksidipäästöt kasvoivat. Hiilidioksidipäästöjen kasvu oli noin 10 % verrattuna peruslaskelmaan kaikilla politiikkakeinoilla. Kymmenen prosentin päästökasvu vastaa noin 6 TWh dieselöljyn hiilidioksidipäästöjä.

3.1.5 Saattaako tukipolitiikka ajaa kannattamattomiin investointeihin?

Investointituki on suosittu uusiutuvan energian tukikeino ja Suomessakin on maksettu investointitukea muutamille pellettitehtaille. Molempien tutkimusten mukaan investointituki ei kannusta investointeihin, jos valmistettavan energiatuotteen hinta on alhainen (tai puun hinta korkea). Tämä tulos päti myös 100 % investointituella, eli tilanteessa, jossa valtio maksaa koko investoinnin. Tuloksen tulkinta on se, että biopolttonesteen ja pellettien myyntihintojen ollessa alhaisia niiden tuotanto ei ole kannattavaa ilman pääomakustannuksiakaan, koska tuotantokustannukset kohoavat joka tapauksessa niin korkeiksi.

Todellisuudessa tehtyä investointia saattaa olla kannattava käyttää vain korkeiden biopolttonesteiden ja pellettien hintojen tai alhaisten puun hintojen aikaan. Kun investointeja ei käytetä koko kapasiteetilla, on energiapoliittisiin tavoitteisiin pääsy hankalaa. Vieläkin epätoivottavampi tilanne on se, että tehty investointi suljetaan lyhyen käytön jälkeen. Tästä on Suomessakin kokemusta esimerkiksi Vöyrin pellettitehtaan yhteydessä. Investointituen heikkous liittyy päätöksentekijän näkökulmasta siihen, että myönnettävä tuen määrä ei ole sidoksissa tuotannon määrän kanssa. Investointituen tapauksessa tuotannon keskeyttäminen siis aiheuttaa tehottomuutta tukipolitiikan näkökulmasta. Toisaalta poliittiset päättäjät saattavat pitää investointituen kertaluonteista maksua houkuttelevana tukimuotona.

Tuotanto- ja metsähaketuki eivät välttämättä myöskään kannusta täysimääräisesti investointeihin, jos lopputuotteiden hinnoista tai puun hinnasta on epävarmuutta. Tätä epävarmuuteen liittyvää riskiä voitaisiin vähentää antamalla tuotanto- tai metsähaketuki syöttötariffin tyylisenä kiinteänä hintatakuuna. Hintatakuu olisi tällöin rajakustannusten mukainen ja tuottaja saisi takuuhinnan ja markkinahinnan erotuksen tukena. Tuotantotuen takuuhinta olisi biopolttonesteen hinta ja metsähaketuen takuuhinta takaisi tietyn hintatason puun käytölle biopolttonesteen tai pelletin tuotannossa. Tämän kaltainen uusiutuvan energian tukijärjestelmä on käytössä lähes kaikissa EU-valtioissa. Esimerkiksi biopolttonesteen takuuhinnan tulisi olla tuotantotuen tapauksessa noin 44 €/MWh biojalostamotutkimuksen perusteella.

3.1.6 Hajautettu vs. keskitetty tuotantorakenne

Tukikeinon valinta vaikuttaa biopolttonesteen sekä pelletin tuotantorakenteeseen. Tutkimuksissa tuotantotuki kannusti suuriin tuotantoyksiköihin ja metsähakkeen panostuella tuotantoyksiköt olivat pienempiä. Investointituella tuotantolaitokset olivat referenssihinnoilla biopolttonestelaskelmassa pienempiä kuin muilla politiikkakeinoilla. Pellettilaskelmassa investointituki ei referenssihinnoilla riittänyt kannustamaan investointeihin. Laskelmissa oli huomioitu tuotannon skaalaedut investointikustannuksissa, jolloin suurten tuotantolaitosten yksikköinvestointikustannukset olivat pieniä laitoksia alhaisemmat.

Metsähakkeen käytön tuki ohjasi tuotantolaitokset käyttämään vain metsähaketta biopolttonesteen ja pelletin raaka-aineena. Tämän seurauksena laitokset joutuivat kuljettamaan metsähaketta pidempiä matkoja laitokselle kuin toisten politiikkakeinojen tapauksissa, jolloin puutavaralajien käyttö oli hajautetumpaa. Pidemmät kuljetusmatkat aiheuttivat suurempia kuljetuskustannuksia, jolloin metsähaketuella laitosten koko jäi pienemmäksi kuin tuotantotuella.

Investointituki johti pieniin laitoksiin ja hajautettuun tuotantorakenteeseen biopolttonesteen tuotannossa, koska investointituen taso oli korkea energian nykyhinnoilla. Valtio maksoi suuren osan investointikustannuksista, joten pienetkin laitokset tulivat kannattaviksi.

Tuotantotuki kannustaa siis keskitettyyn tuotantorakenteeseen, jossa muutama tuottaja tyydyttää Suomen biopolttonesteen tai pellettien kysynnän. Metsähaketuki taas kannustaa hieman hajautetumpaan tuotantorakenteeseen. Politiikkakeinon valinnalla saattaa siis olla myös aluepoliittisia vaikutuksia.

Metsähakkeen käyttötavoitteita ei saavuteta ilman elinvoimaista sahateollisuutta

Maarit Kallio, Perttu Anttila ja Antti Asikainen

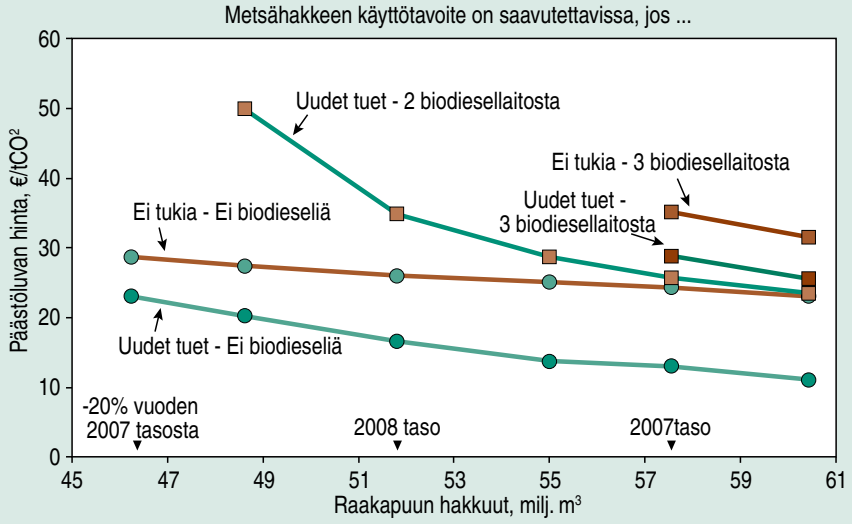
Metsähakkeen käyttö polttoaineena on kasvanut vauhdikkaasti lähes koko viime vuosikymmenen ajan. Silti ollaan vielä kaukana vuodelle 2020 asetetusta 13,5 miljoonan kuutiometrin tavoitteesta. Uudeksi hakkeen käyttömuodoksi on kaavailtu biodieselin valmistusta, jolle asetetun tavoitteen saavuttamiseen tarvittaisiin noin viisi miljoonaa kiintokuutiota metsähaketta. Metsähakkeen tarjonta ei kuitenkaan riitä, jolleivat raakapuun kysyntä ja hakkuut nouse selvästi.

Metsähake koostuu nuorten metsien kunnostuksista ja ensiharvennuksista saatavasta pienpuusta sekä päätehakkuiden latvusmassasta ja kannoista. Hakkuuaukeilta kerättävistä oksista ja latvuksista koostuva latvusmassa on korjuukustannuksiltaan edullisin metsäenergiajae (ks. luku 3.2.6). Latvusmassan ja kantojen korjuumahdollisuudet ovat kuitenkin suoraan sidoksissa päätehakkuiden määrään, johon vaikuttaa ennen kaikkea kotimaisen tukkipuun kysyntä.

Suomessa tukkipuuta jalostavan saha- ja vaneriteollisuuden tuotanto on supistunut huomattavasti viime vuosina. Lisäksi Venäjän liittyminen WTO:n jäseneksi alentanee puun tuontiin liittyviä tulleja, mikä voi lisätä tuontia. Eräissä sektorin kehityksestä esitetyissä arvioissa kotimaan raakapuun hakkuiden on ennakoitu jäävän tulevaisuudessa reilusti alle 50 miljoonan kuutiometrin. Tällöin velvoitepaketin tavoite metsähakkeen käytölle lämmön ja sähköntuotantossa olisi saavutettavissa vain puolittamalla hakepohjaisen biodieselin tavoite. Näihin käyttömääriin pääseminen edellyttäisi myös erittäin korkeaa hiilidioksidin päästöluvan hintaa tai runsaskätistä tukipolitiikkaa.

Metsähakkeen hinta suhteessa kilpailevien polttoaineiden hintaan ratkaisee metsähakkeen kysynnän. Suuremmilla lämpö- ja voimalaitoksilla metsähakkeen kanssa kilpailevat yleensä turve tai kivihiili, joiden käyttöä rasittavat huomattavat hiilidioksidipäästöt. Päästöluvan hinnan noustessa päästöttömäksi luokitellun metsähakkeen kilpailukyky paranee. Turpeen ja kivihiilen käytölle asetetut verot vaikuttavat samansuuntaisesti.

Ilman raaka-aineesta kilpailevaa biodieselin valmistusta metsähakkeen polttoainekäyttö voisi vähitellen nousta 13,5 miljoonaan kuutiometriin ilman tukiakin, jos päästöluvan hinta vakiintuisi noin 25 euroon hiilidioksiditonnilta ja raakapuun hakkuut palaisivat vuoden 2007 tasolle noin 58 miljoonaan kuutiometriin. Metsähakepohjaisen dieselin tuotanto nostaisi metsähakkeen hintaa heikentäen sen kysyntää sähkön ja lämmöntuotannossa.
Tiukalla päästölupapolitiikalla ja sen myötä nykyistä korkeammilla päästölupien hinnoilla edistettäisiin tukia tehokkaammin metsähakkeen ohjautumista energian tuotantoon. Suunniteltu päästöluvan hintaan sidottu sähkön muuttuva tuotantotuki lieventää kuitenkin metsähakkeen käytön kannattavuuteen liittyvää epävarmuutta. Myös pienpuun energiatuki voitaisiin sitoa päästöluvan hintaan. Muutoin voidaan päätyä tilanteeseen, jossa tukea maksetaan ensiharvennuspuulle, joka muutenkin ohjautuisi polttoaineeksi.



Kuva 3.1.3. Päästöluvan hintojen ja raakapuun hakkuiden yhdistelmiä, joilla metsähakkeen käyttötavoite 25 TWh sähkön ja lämmöntuotannossa toteutui mallilaskelmissa ilman tukia tai pienpuun haketustuen ja muuttuvan sähköntuotannon tuen kanssa, kun oletettiin lisäksi 0, 2 tai 3 (=tavoite) biodieseliä tuottavaa laitosta.

Kallio, M., Anttila, P., McCormick, M., Asikainen, A., 2011. Are the Finnish targets for the energy use of forest chips realistic – Assessment with a spatial market model. Journal of Forest Economics 17: 110–126.

3.1.7 Tutkimusta kohdistettava ohjauskeinojen yhteisvaikutuksiin

Uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön (RES-E) tukipolitiikkaa tutkittiin Metsien käytön tulevaisuus Suomessa -hankkeessa (Kangas ym. 2009, Lintunen & Kangas 2010). Tämän lisäksi esimerkiksi konsultointiyritykset ovat tehneet uusiutuvan energian tukipolitiikkaan liittyviä selvityksiä (esimerkiksi Green Stream Network 2007). Uusiutuvan energian tukipolitiikkaan liittyy vielä paljon tutkimustarpeita. Yksi suuri tutkimuksen haaste on uusiutuvan energian tavoitteiden samanaikainen huomioonottaminen. Tavoitteiden vaikutusten tutkimuksessa tulisi myös ottaa huomioon uusiutuvan energian tukipolitiikan ja ilmastopolitiikan välinen koherenssi ja mahdolliset ristiriidat.

Tukipolitiikan monien tavoitteiden yhtäaikainen tarkastelu edellyttää FinFEP mallin edelleenkehittämistä: on tarpeen yhdistää malliin bioenergian eri sektorit nykyistä monipuolisemmin ja ilmastopolitiikan vaikutus. Tällöin voidaan tutkia esimerkiksi turpeen ja puun käytön korvautuvuutta erilaisten ulkoisten kysyntä- ja hintaskenaarioiden vallitessa erilaisilla ohjauskeinoyhdistelmillä. FinFEP-malliin voidaan lisäksi ottaa mukaan myös esim. metsä- ja energiaverotusta kuvaavia ohjauskeinoja, jolloin voidaan selvittää erityyppisten veroratkaisujen ja verotasojen vaikutuksia metsä- ja energiasektorilla.

Kirjallisuus

Green Stream Network. 2007. Selvitys uusiutuvan energian lisäämisen kustannuksista ja edistämiskeinoista. Raportti Energiateollisuus ry:lle 10.10.2007.

Kangas, H-L., Lintunen, J. & Uusivuori, J. 2009. The cofiring problem of a power plant under policy regulations. Energy Policy 37: 1898–1904.

Kangas, H.-L., Lintunen J., Pohjola, J., Hetemäki, L. & Uusivuori, J. 2011a. Investments into biorefineries under different price and policy structures. Energy Economics 33: 1165–1176.

Kangas, H.-L., Laturi, J., Lintunen J., Mäkelä, M., Niinistö, S., Pohjola, J. & Uusivuori, J. 2011b. FinFEP-malli politiikan työkaluna. Julkaisussa Hetemäki, L., Niinistö, S., Seppälä, R. & J. Uusivuori (toim.) Murroksen jälkeen: Metsien käytön tulevaisuus Suomessa. Metsäkustannus, Hämeenlinna. s. 106–108.

Lintunen, J. & Kangas, H-L. 2010. The case of cofiring: The market level effects of subsidizing biomass co-combustion. Energy Economics 32(4): 694–701.

Mäkelä, M., Lintunen, J., Kangas, H.-L. & Uusivuori, J. 2011a. Pellet promotion in the Finnish sawmilling industry: The cost-effectiveness of different policy instruments. Journal of Forest Economics 17(2): 185–196.

Mäkelä, M., Lintunen, J., Kangas, H.-L. & Uusivuori, J. 2011b. Pelletin tuotanto sahateollisuuden yhteydessä. Julkaisussa Hetemäki, L., Niinistö, S., Seppälä, R. & J. Uusivuori (toim.). Murroksen jälkeen: Metsien käytön tulevaisuus Suomessa. Metsäkustannus, Hämeenlinna. s. 111–112.

TEM. 2010. [Verkkodokumentti]. Finland's national action plan for promoting energy from renewable sources pursuant to Directive 2009/28/EC. Saatavissa: http://www.buildup.eu/system/files/content/resubmitted_nreap_finland_en.pdf [Viitattu 6.8.2012].

3.2 Hankinnan teknologia, logistiikka ja hiilidioksidipäästöt

Juha Laitila, Antti Asikainen, Karri Pasanen

3.2.1 Energiapuun haltuunsaanti ja osto

Energiapuun korjuu on pääosin kytketty osaksi puukauppaa ja ainespuun korjuuta, minkä vuoksi latvusmassan ja kantojen korjuumäärät ovat kytköksissä ainespuun vuotuisiin hakkuumääriin. Latvusmassan ensisijaisia korjuukohteita ovat kuusivaltaiset päätehakkuut, joilla latvusmassan kertymä on kaksinkertainen männiköihin ja koivikoihin verrattuna (Hakkila 2004). Kanto- ja juuripuuta korjataan pääasiassa kuusen päätehakkuukohteilta, mutta myös havupuuvaltaisista sekametsistä. Harvennuksilla energiapuun korjuu voi olla liitetty osaksi ainespuuhakkuuta tai työ tehdään erilliskorjuuna irrallaan teollisuuden puunkorjuusta.

Ensiharvennusleimikoilla on yleistynyt puunkorjuutapa, jossa korjataan samalla kertaa sekä aines- että energiapuuta. Integroidussa korjuussa aines- ja energiapuun kertymään voidaan vaikuttaa muuttamalla kuitupuun katkontapituuksia, laatuvaatimuksia ja latvaläpimittoja markkinatilanteen ja korjuuolosuhteiden mukaan. Energiapuun erilliskorjuussa tyypillinen korjuukohde on lehtipuu- tai mäntyvaltainen nuori kasvatusmetsä, jossa valtaosa poistettavasta puusta ei täytä ainespuun mitta- tai laatuvaatimuksia tai leimikon puulle ei ole markkinatilanteesta johtuen kysyntää tai muuta käyttöä. Energiapuuharvennusten riippumattomuus ainespuun korjuusta antaa tilaa puunjalostukseen integroimattomille yrittäjille, kun raaka-aineen haltuun saanti ei välttämättä edellytä osallistumista ainespuun kauppaan.

Latvusmassan, kantojen ja harvennusmetsien energiapuun hinnoittelusta, korjuusta, varastoinnista ja kuljetuksesta sovitaan puukaupan yhteydessä. Yleensä puunostajaorganisaatio huolehtii metsäenergian korjuusta tienvarsivarastolle, mutta korjuuoikeuden voi luovuttaa metsänomistajan suostumuksella myös kolmannelle osapuolelle. Ainespuuta ostavilla organisaatioilla on käytettävissään erilaisia tapoja organisoida metsäenergian toimituksia kannolta käyttöpaikoille (Tahvanainen 2004). Se voi toteuttaa metsähakkeen oston, korjuun ja toimitukset ainespuun hankinnasta huolehtivalla organisaatiollaan tai keskittää kaikki tai osan toiminnoista erilliseen hankintaorganisaatioon. Vaihtoehtoisesti puunhankkija voi myös liittoutua puupolttoaineisiin erikoistuneen yrityksen kanssa ja toimittaa tälle latvusmassaa, kantoja ja harvennuspuuta tienvarteen korjattuna, josta eteenpäin yrityskumppani toimittaa materiaalin halutussa muodossa loppukäyttäjille. Joissain tapauksissa puunhankkija voi kokonaan ulkoistaa sekä korjuun että metsähakkeen toimitukset metsäenergian kokonaistoimituksiin erikoistuneelle yhteistyökumppanilleen.

Puukauppatapahtuman kannalta on usein koettu luontevaksi ja vaivattomaksi, että sekä myyjä että ostaja voivat tehdä samalla kertaa kaupan kaikista kyseiseltä leimikolta kertyvistä puutavaralajeista. Metsäenergiaa markkinoidaan osana puukauppaa ja metsähakkeesta on tullut yksi uusi puutavaralaji tukki- ja kuitupuiden joukkoon. Latvusmassan ja kantojen kantohinta maksetaan pinta-alaperusteisena korvauksena tai metsähakkeen määrä johdetaan korjatun ainespuun määrästä suhdeluvun avulla. Metsäenergian talteenottoa päätehakkuualoilta on nimellisen kantohinnan ohella markkinoitu mm. alentuneina maanmuokkaus ja viljelykustannuksina sekä sillä, että energiapuun korjuu helpottaa hakkuualueella liikkumista ja virkistyskäyttöä. Harvennusmetsien energiapuun korjuuta on puolestaan markkinoitu etenkin metsänhoidollisilla eduilla. Korjuun markkinoinnissa käytetyt argumentit vastaavat niitä arvoja, joiden vuoksi puunmyyjät kokevat mielekkääksi myydä tai luovuttaa metsähaketta energiantuotantoon (Rämö ym. 2001, Rämö ja Toivonen 2001, Järvinen ym. 2006).

3.2.2 Hankinnan, korjuun ja toimitusten ohjaus

Energiapuun hankinnassa hallittava tietomäärä on suuri ja tiedonhallinnassa korostuu oikea-aikaisuus (Seppänen ym. 2008). Energiapuuvarastot on haketettava oikeaan aikaan hakkeen laadun varmistamiseksi ja hake on toimitettava oikea-aikaisesti oikeisiin käyttökohteisiin. Varastojen pitää lisäksi olla saavutettavissa keliolosuhteiden puolesta. Toimitusvarmuus on hakkeen loppukäyttäjän kannalta tärkeä kriteeri hakkeen toimittajaa valittaessa. Pääomaa sitoutuu varastoihin ja tämä asettaa laadun ohella omat vaatimuksensa varastojen kiertonopeudelle (Seppänen ym. 2008). Hankinnan operatiivisen toiminnan suunnittelun kannalta oleellista on, että hankintaketjuun osallistuvat toimijat saavat tiedot työkohteista hyvissä ajoin. Etenkin haketustyössä ja kuljetuksessa oman haasteensa aiheuttaa epätasaisesti jakautuva työmäärä. Pakkaskausina koneilla ja kuljetuskalustolla on palava kiire, kun taas kesäkuukausina ongelmana on työn puute. Metsähakkeen hankinnan, korjuun ja toimitusten ohjauksessa hyödynnetään paljon internet-pohjaisia paikkatieto-ohjelmistoja sekä perinteistä paperikarttoja ja tietoa välitetään lisäksi eri toimijoiden välillä matkapuhelinten avulla (Seppänen ym. 2008)..

Hakkeen vastaanottojärjestelyt lämpö- ja voimalaitoksella määräävät kuljetuskaluston viipymisajan purkupaikalla ja vaikuttavat sitä kautta koko ketjun tuottavuuteen ja toimivuuteen. Hakkeen vastaanotossa ongelmia aiheuttavat hidas läpimenoaika, pienet varastotilat tai -kentät sekä jonotukset purkupaikalle. Kuljetusten ajo-ohjelmat muuttuvat nopeassa tempossa säätilan vaihtelun ja laitoksella tuotettavan energian muutosten mukaan, minkä vuoksi toimitusten tarkka aikataulutus on lähes mahdotonta (Ranta ym. 2002).

3.2.3 Metsäenergian korjuu

Päätehakkuu

Päätehakkuissa energiaksi korjataan oksia, ainespuuksi kelpaamaton latva ja kantoja. Kun metsähaketta korjataan päätehakkuilta, muutetaan hakkuukoneen työtapaa niin, että oksat ja latvat kasautuvat hakkuu-uran varteen, kun normaalissa työtavassa oksat ja latvat on pyritty keräämään ajouralle suojaamaan maaperää ja parantamaan kantavuutta (Kuva 3.2.1). Latvusten kasaaminen parantaa metsäkuljetuksessa energiapuun talteensaantoa, tehostaa korjuutyötä ja ehkäisee kivien ja kivennäismaan joutumista latvusmassan joukkoon. Kantojen korjuu etenee puunkorjuun ja latvusmassan korjuun sekä metsänuudistamistöiden asettamissa aikarajoissa ja kantojen nostotyö

rajoittuu käytännössä niille kuukausille, jolloin maa on roudaton ja lumeton. Kantojen korjuussa kannot nostetaan, pilkotaan ja kasataan kaivukoneilla, joissa on kantojen nosto- ja pilkontalaite (Kuva 3.2.1). Palstalla olevien kantokasojen koko on 2–6 kantoa. Kantojen korjuuseen on myös kehitetty metsäkoneisiin asennettavia nostolaitteita, mutta niiden tuottavuus on jäänyt alhaiseksi kaivukonealustaiseen kalustoon verrattuna.

Harvennushakkuu

Energiapuuharvennuksissa tai ensiharvennuksissa energiaksi korjataan runkopuuta ja oksia. Myös kantojen talteenottoa on tutkittu, mutta se ei ole edennyt käytännön tasolle. Energiapuuharvennuksessa talteen otetaan pääosin ainespuun mittoja täyttämätöntä pienpuuta kun taas ensiharvennuksien yhteydessä energiajakeen lisäksi ainespuun osuus hakkuukertymästä on merkittävä. Harvennusmetsien puunkorjuu on pääosin koneellistettu ja työ tehdään hakkuukoneella, jossa on keräävä kaatopää (Kuva 3.2.1, Laitila ym. 2004) tai työhön voidaan käyttää joukkokäsittelylaittein varusteltua normaalia hakkuulaitetta (Heikkilä ym. 2005). Harvennuspuiden kouraan keräilyllä ja joukkokäsittelyllä vähennetään kouran ja puomin liikkeitä sekä parannetaan koneen tuottavuutta verrattuna yksinpuin hakkuuseen, joka on valtamenetelmä ainespuun hakkuussa. Joukkokäsittelylaittein varustellut harvesterikourat myös mahdollistavat hakkuukoneiden joustavan käytön varsinaisissa ainespuuhakkuissa ja energiapuuharvennuksissa ilman kahden erillisen hakkuulaitteen investointikustannuksia. Lisäksi karsivilla hakkuulaitteilla voidaan jättää palstalle haluttu määrä oksamassaa työn tuottavuuden säilyessä hyvänä (Heikkilä ym. 2005, Laitila ym. 2010a).

Harvennuspuun korjuussa voidaan käyttää myös yhdistelmäkoneita eli korjureita, jossa sama kone hoitaa sekä pienpuun kaato-kasauksen että metsäkuljetuksen (Kuva 3.2.2). Korjureiden kilpailukyky perustuu hakkuutyön suureen määrään suhteessa metsäkuljetukseen sekä siirtokustannusten pienuuteen verrattuna kahden koneen ketjuihin. Energiapuun korjuuseen on kehitetty myös joukkokäsittelyhakkuuta ja paalaustekniikkaa hyödyntävä paalainharvesteri, joka hakkaa puut ja tiivistää ne sen jälkeen puunipuiksi, joiden pituus on 2,7 m ja halkaisija 65 cm (Kuva 3.2.2). Tutkimusten mukaan energiapuupaaleista tehdyn polttohakkeen hankintakustannukset ovat kuitenkin selvästi korkeammat kuin erilliskorjatun tai integroidusti korjatun kokopuuhakkeen hankintakustannukset (Kärhä ym. 2009). Em. laskelma perustui kehitteillä olleen kokopuupaalaimen tuottavuuteen ja kustannustasoon. Pieniläpimittaisen harvennuspuun korjuussa korjuumenetelmien väliset erot ratkaistaan hakkuuvaiheessa ja hakkuuvaiheessa syntynyttä kustannuseroa on vaikea kuroa kiinni, etenkin kun operoidaan kohtuullisilla metsä- ja kaukokuljetusmatkoilla.

Kuva 3.2.1. Latvusmassan kasoillehakkuuta, kantojen nostoa ja pilkontaa sekä harvennuspuun kaato-kasausta keräävällä kaatopäällä. Kuvat Metla/Juha Laitila.

Kuva 3.2.2. Fixteri II paalainharvesteri, kokopuupaaleja sekä energiapuukorjuri Kuvat Metla/Juha Laitila.

Lähikuljetus

Metsäbiomassan lähikuljetuksen palstalta tienvarsivarastolle suorittaa metsätraktori (Kuva 3.2.3). Palstalle ja varastokasan pohjalle jäävän materiaalin määrä on suurin latvusmassalla, josta varisee neulasia ja katkenneita oksanpätkiä kuormauksen yhteydessä. Kantojen mukana välivarastolle kantautuu kunttaa, kiviä ja kivennäismaata. Harvennuspuulla varastointihävikki on lähinnä varisevia neulasia ja ohuita oksia. Suuren kuiva-ainehävikin vuoksi latvusmassan varastointiaika on maksimissaan yksi vuosi tienvarsivarastossa. Kantopuu- ja harvennuspuu kelpaavat energian tuotantoon myös ylivuotisena, koska materiaali kuivuu ja säilyy varastoinnin aikana.

3.2.4 Metsähakkeen korjuuketjut haketustavan mukaan

Metsähakkeen hankintajärjestelmä rakentuu pitkälti sen mukaan, mihin ketjun vaiheeseen haketustapahtuma sijoitetaan ja missä muodossa materiaalia sen vuoksi kuljetetaan. Metsähakkeen korjuumenetelmät voidaan jakaa haketuspaikkansa mukaan keskitetyn ja hajautetun haketuksen menetelmiin. Haketuksen keskittäminen käyttöpaikalle tai terminaaliin (Kuva 3.2.4) mahdollistaa suuret vuosituotokset, korkeat koneiden käyttöasteet ja alemmat haketuskustannukset. Käyttöpaikka- ja terminaalihaketusketjuissa metsäkuljetusta seuraa tienvarsivarastoinnin jälkeen autokuljetus.

Kuva 3.2.3. Kantojen, harvennusmetsien kokopuun sekä latvusmassan metsäkuljetusta. Kuvat Metla/Juha Laitila.

Käyttöpaikka- ja terminaalihaketus

Käyttöpaikka- ja terminaalihaketuksen heikkoutena on se, että kuljetuksen kuormakoko jää prosessoimattomalla latvusmassalla, kokopuulla sekä kanto- ja juuripuulla pieneksi, mikä kasvattaa kuljetuksen kustannuksia etenkin kaukokuljetuksessa. Kuormakokoa on pyritty kasvattamaan tiivistämällä latvusmassa risutukeiksi, harvennuspuulla puiden karsinnalla ja määrämittaan katkonnalla sekä kanto- ja juuripuulla puuaineksen pilkonnalla. Suurten investointikustannusten vuoksi käyttöpaikalla haketus sopii vain suurille voimalaitoksille. Lisäksi melu- ja pölyongelmat saattavat rajoittaa haketustavan käyttöönottoa, jos haketuspaikan läheisyydessä on pysyvää asutusta.

Terminaaleista haketta voidaan toimittaa eri kokoluokan laitoksille ja terminaali on toimitusvarma puskurivarasto esimerkiksi kelirikkoaikana, jolloin sivuteiden käyttö on rajoitettua raskaalle liikenteelle. Hakkeen ja hakepuun käsittely terminaalissa lisäävät kustannuksia, samoin kuin mahdollinen ristiin kuljetus liikuteltaessa materiaalia ensiksi metsästä terminaaliin ja sitten terminaalista voimalaitokselle. Haketerminaalit sijaitsevat yleensä metsähakkeen käyttöpisteiden läheisyydessä tai turvesoiden yhteydessä. Terminaaleihin voidaan kuljettaa myös valmista haketta varmuusvarastoon. Terminaalitoiminta soveltuu tuotantoketjuun hyvin myös silloin, kun joudutaan yhdistelemään eri kaukokuljetusmuotoja (Karttunen ym. 2009). Autokuljetuksen yhdistäminen terminaalin avulla juna- tai proomukuljetukseen tuo kustannussäästöjä pitkillä kuljetusmatkoilla (Karttunen ym. 2009) ja vähentää kuormauskertojen määrää.

Hajautettu hakkeentuotanto

Hajautetun hakkeentuotannon menetelmiä ovat välivarastolla tai palstalla tapahtuvaan haketukseen perustuvat korjuuketjut. Välivarastohaketuksessa materiaali haketetaan suoraan vieressä odottavan hakeauton kuormatilaan (Kuva 3.2.4). Hakkurin ja hakeauton toiminnot kytkeytyvät kiinteästi toisiinsa, mikä merkitsee sitä, ettei haketusta ja kuljetusta voi limittää. Kaukokuljetusmatkasta riippuen odotusaikoja tulee joko hakkurille tai hakeautolle. Käytettäessä useampia hakeautoja hakkurin odotusaikoja voidaan vähentää, mutta silloin hakeautojen odotusajat saattavat kasvaa. Tämä ns. ”kuuma ketju” on myös altis keskeytyksille. Välivarastohaketusmenetelmässä auton kantavuus ja kuormakoko saadaan hyödynnettyä täysimääräisesti ja menetelmä on kuljetustehokas myös pitkillä kaukokuljetusmatkoilla.

Välivarastohaketusjärjestelmä on hakkeen tuotannon perusratkaisu, joka soveltuu sekä pienille että suurille käyttöpaikoille. Haketus tehdään yleensä kuorma-autoon tai maataloustraktoriin kyt-

Kuva 3.2.4. Harvennuspuun haketusta tienvarsivarastolla, terminaalissa sekä käyttöpaikalla. Kuvat Metla/Juha Laitila

ketyllä hakkurilla. Lisäksi käytössä on muutamia hakkuri-hakeautoja, joilla tapahtuu sekä haketus että kaukokuljetus. Palstahaketusketjussa haketuksen ja metsäkuljetuksen, samoin kuin joissain tapauksissa myös hakkuun tekee yksi ja sama kone yhdellä käyntikerralla. Palstahaketuksella tuotetun hakkeen määrä on erittäin pieni ja korjuumenetelmällä on korkeintaan paikallista merkitystä metsähakkeen tuotannossa Suomessa.

Korjuuketjujen yleisyys

Vuonna 2009 latvusmassahakkeen tuotannosta yli 60 % perustui välivarastolla haketukseen ja terminaaleissa tuotetun hakkeen osuus oli vajaa 10 %. Vajaa kolmannes energiantuotantoon käytetystä latvusmassasta haketettiin käyttöpaikalla (Kärhä 2010). Kantohakkeen tuotannosta lähes 70 % perustui käyttöpaikalla murskaukseen ja vajaa kolmannes kannoista murskattiin terminaaleissa. Pieniä määriä kantoja murskattiin myös tienvarsivarastoilla. Harvennuspuuhakkeen tuotannossa välivarastohaketuksen osuus oli lähes 80 % kokonaismäärästä. Terminaaleissa tuotetun hakkeen osuus oli 16 % ja käyttöpaikalla haketettiin 5 % (Kärhä 2010).

Metsätehon arvion mukaan (Kärhä 2007a) käyttöpaikalla tai terminaalissa tuotetun metsähakkeen suhteellinen osuus tulee kasvamaan ja välivarastohaketusmenetelmän valta-asema pienenemään mm. toimitusvarmuuden parantamisen vuoksi. Terminaaleista haketta voidaan toimittaa myös kelirikkoaikaan. Muutokset tuotantomenetelmien suhteellisissa osuuksissa eivät kuitenkaan ole kovin suuria. Samassa tutkimuksessa metsähakkeen tuottajat lisäksi arvioivat, että vuonna 2015 nuorista metsistä korjatun energiapuun osuus on 27 %, kanto- ja juuripuuhakkeen 24 % ja latvusmassahakkeen 43 % energialaitosten käyttämästä metsähakkeesta.

3.2.5 Metsäbiomassan kaukokuljetus

Metsäbiomassan kaukokuljetuksessa oli vuonna 2007 käytössä lähes 200 ajoneuvoyksikköä, joista kaksi kolmasosaa oli hakeautoja (Kärhä 2007b). Hakeautokalustosta arviolta noin kaksi kolmannesta on täysperävaunuyhdistelmiä (Kuva 3.2.5) ja noin kolmannes vaihtolava-autoyhdistelmiä (Asikainen ym. 2001). Runsasta kolmasosaa hakeautoista käytetään metsähakkeen ajon ohella turpeen ja teollisuuden puusivutuotteiden kuljetuksessa. Hakettamattoman metsäbiomassan (kantoja, kokopuuta tai latvusmassaa) autokuljetukseen käytetään puutavara-autoja, jotka on varustettu laidoilla ja pohjalla (Kuva 3.2.5). Risutukkien, kokopuupaalien ja rangan autokuljetukseen käytetään normaaleja puutavara-autoja (Kuva 3.2.5) tai rankoja ja paaleja kuljetetaan samalla autokalustoilla kuin kantoja, kokopuuta tai irtonaista latvusmassaa.

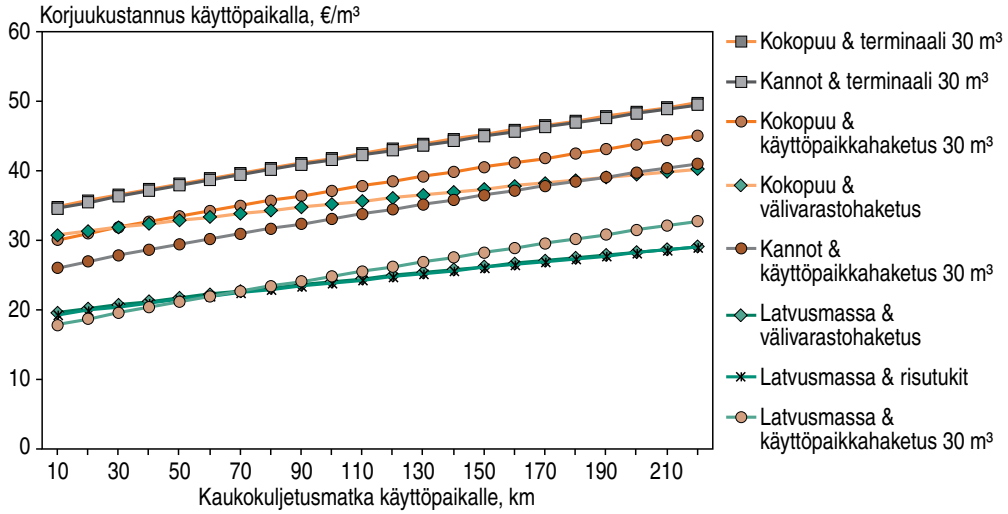
Kuva 3.2.5. Metsäbiomassan autokuljetukseen voidaan käyttää hakeautoja, laidallisia puutavara-autoja tai perinteisiä puutavara-autoja. Kuvat Metla/Juha Laitila.

Liikennepolttoaineiden hintojen nousu ohjaa yrityksiä hakemaan entistä päästö- ja energiataloudellisempia ratkaisuja kuljetuslogistiikkaan ja EU:n kuljetussäännökset kannustavat siirtämään kuljetuksia maanteiltä muille väylille. Metsähakkeen käyttömäärien kasvu merkitsee, että kuljetusmatkat kasvavat tulevaisuudessa. Nykytekniikalla ja toimintatavoilla taloudellisesti kannattava metsähakkeen hankinta-alueen säde on noin 100–150 km tieverkkoa pitkin. Perinteisen autokuljetuksen avulla, ilman autokuorman enimmäispainorajan nostoa, ei juurikaan voida laajentaa metsähakkeen taloudellisesti kannattavaa hankinta-aluetta voimalaitoksen ympärillä (Karttunen ym. 2008). Lisäksi tienvarsihaketukseen perustuvan toimitusketjun tehokkuus kärsii kuljetusmatkojen kasvaessa joko hakkurin tai autojen odotusaikojen lisääntyessä ja metsähakkeen kuljetukseen tarvitaan aiempaa enemmän autokalustoa ja kuljettajia (Korpinen ym. 2010).

Rautatie- ja vesitiekuljetukset ovat ympäristöystävällisempiä ja energiataloudellisesti edullisempia kuin autokuljetukset pitkillä kuljetusmatkoilla (Karttunen ym. 2008, Hiltunen 2010). Lisäksi juna- ja aluskuljetuksissa työvoiman tarve on pieni ja kuljetustehokkuus on suuri. Junakuljetuksia rajoittavat sopivien terminaalialueiden puute, rajattu loppuasiakkaiden määrä (voimalaitoksille ei ole kiskoyhteyttä) sekä kilpailun puute rautatiemarkkinoilla ja vaunukaluston saatavuus (Ranta 2010). Aluskuljetuksen heikkouksia ovat huono kustannuskilpailukyky alle 100 km kuljetusmatkoilla, metsähakkeen lastauspaikkojen rajallinen määrä vesikuljetusreittien varrella, hakkeen lastaus ja purkukustannukset satamissa, proomujen saatavuus ja se, että käytännössä vesitiekuljetus on mahdollista vain talvikauden ulkopuolella.

3.2.6 Metsähakkeen kustannusrakenne

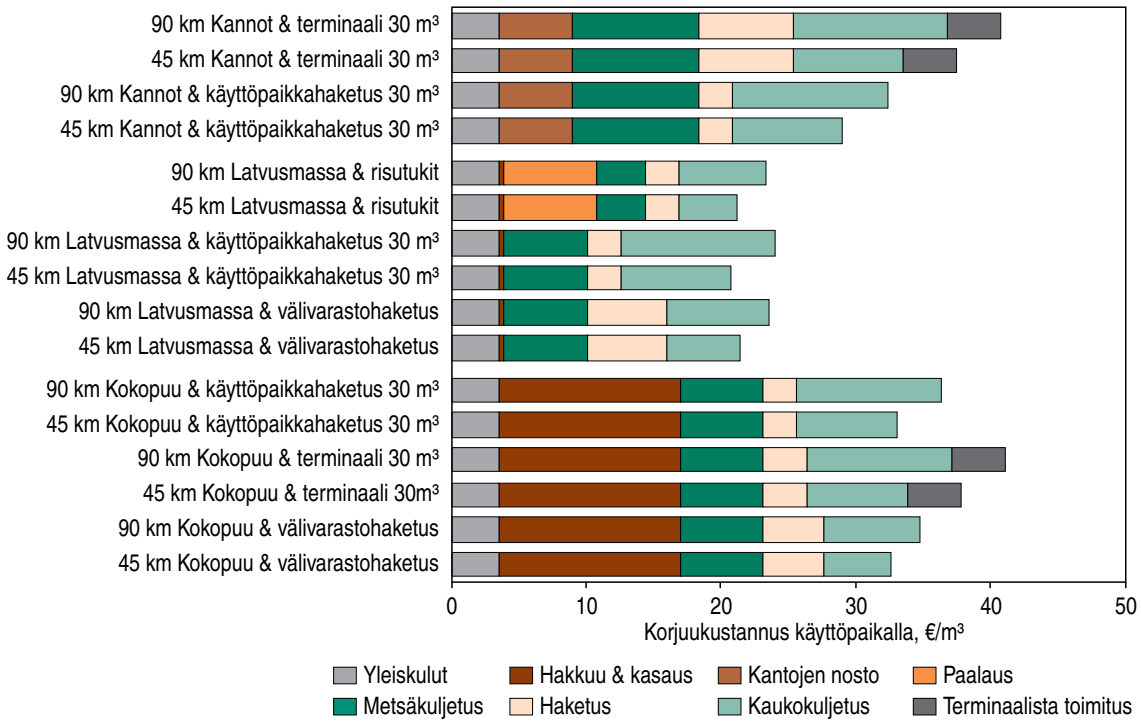
Metlan ja VTT:n tutkimuksessa (Laitila ym. 2010b) selvitettiin latvusmassa-, kokopuu- ja kantohakkeen kustannusrakenne esimerkkileimikoiden avulla, joissa metsäkuljetusmatka oli 250 m ja kaukokuljetusmatka 45 tai 90 km (Kuva 3.2.6). Hakkeen kuljetusmatka terminaalista lämpö- tai



Kuva 3.2.6. Metsähakkeen kustannusrakenne eri korjuumenetelmillä ja metsähakelajeilla. Kuvatekstissä vv = välivarastohaketus ja kp = käyttöpaikkahaketus.Nuorten metsien energiapuun korjuukustannus tienvarressa, organisointikulut mukaan lukien, oli 23,1 €/m³. Risutukkimenetelmällä korjatun latvusmassan korjuukustannus tienvarressa oli 14,1 €/m³ ja paalaamattoman latvusmassan 10,1 €/m³. Kantojen korjuun kustannus tienvarressa oli 18,4 €/m³.

voimalaitokselle oli 10 km. Nuorten metsien energiapuun hakkuussa hakkuupoistuma oli 2000 runkoa hehtaarilta ja poistettavien puiden keskikoko oli 30 litraa. Kantojen korjuussa kuusen kantojen keskiläpimitta oli 37 cm (vastaa tilavuutta 170 litraa) ja nostettavia kantoja oli 500 kappaletta hehtaarilla. Latvusmassan ja nuorten metsien energiapuun kertymä hehtaarilta oli 60 m³ ja kantopuulla hehtaarikertymä oli 85 m³. Hakkeen kaukokuljetuksen kuormakoko oli 44 m³, risutukkien 45 m³ sekä prosessoimattoman latvusmassan, kokopuun ja kantojen 30 m³.

Latvusmassan käyttöpaikkahaketus oli edullisin korjuuketju 60 kilometrin kaukokuljetusmatkaan saakka, kun korjuuketjuja verrattiin kaukokuljetusmatkan mukaan (Kuva 3.2.7). Sitä pidemmillä autokuljetusmatkoilla risutukkimenetelmä oli kustannustehokkain korjuuketju latvusmassahakkeen tuotannossa. Vastaavassa vertailussa latvusmassan käyttöpaikkahaketusketjun ja tienvarsihaketusketjun kustannuskäyrät leikkasivat 70–80 km kaukokuljetusmatkan kohdalla. Välivarastohaketusketjun ja risutukkimenetelmällä tuotetun latvusmassahakkeen tuotantokustannukset olivat likimain samalla tasolla. Vertailun perusteella välivarastolla haketetun latvusmassahakkeen korjuukustannus oli käyttöpaikalla 0,10 – 0,30 €/m³ korkeampi kuin risutukkimenetelmällä tuotetun hakkeen. Kokopuun käyttöpaikkahaketus oli edullisin kokopuuhakkeen tuotantomenetelmä alle 30 km kaukokuljetusmatkoilla ja välivarastolla haketus sitä pidemmillä kuljetusmatkoilla. Kantohakkeen korjuukustannukset olivat kokopuuhakkeen korjuukustannuksia pienemmät aina 200 km kaukokuljetusmatkaan saakka, kun kannot murskattiin käyttöpaikalla. Terminaalihaketukseen perustuvalla korjuumenetelmällä hakkeen tuotantokustannukset olivat vertailun korkeimmat.



Kuva 3.2.7. Metsähakkeen korjuukustannus käyttöpaikalla kaukokuljetusmatkan mukaan eri korjuumenetelmillä ja metsähakelajeilla. Kuvatekstissä vv = välivarastohaketus ja kp = käyttöpaikkahaketus.

3.2.7 Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan kehittämistarpeet 2010-luvulla

Metlan ja VTT:n toteuttamassa kyselytutkimuksessa kartoitettiin vuoden 2020 metsähakkeen käyttötavoitteiden saavuttamin kannalta keskeisiä ongelmia ja kehittämistarpeita. (Laitila ym. 2010b). Kyselyyn osallistunut asiantuntijaryhmä koostui energiateollisuuden, korjuuorganisaatioiden, metsänomistajien, koneyrittäjien sekä tutkimus- ja tuotekehitysorganisaatioiden edustajista. Selvitystyön mukaan tärkeimpiä kehittämiskohteita metsähakkeen hankinnassa 2010-luvulla ovat:

- Harvennuspuuhakkeen tuotantoketjun tehostaminen ja korjuukustannusten alentaminen
- Metsähakkeen toimitusvarmuuden ja kuljetustehokkuuden parantaminen pitkillä kaukokuljetusmatkoilla ja eri kuljetusmuotojen yhdistelmillä
- Kantohakkeen laadun parantaminen epäpuhtauksien osalta ja kuljetuskustannusten alentaminen
- Kuljettajien koulutus ja tehokkaiden työtapojen kehittäminen energiapuun korjuuseen
- Metsänomistajien koulutus ja aktivointi metsäenergiakauppaan
- Metsähakkeen hankinnan liiketoiminnan kehittäminen
- Metsähakkeen korjuun seurannaisvaikutusten ennaltaehkäisy korjuuta ja logistiikkaa kehittämällä
- Tehostaa puubiomassan kasvatusta aines- ja energiapuuksi

Hankinnan teknologian ja logistiikan näkökulmasta harvennusmetsien energiapuun korjuussa tulisi edistää korjuukoneiden ympärivuotista työllistymistä, kehittää integroitua puunkorjuuta sekä hakkuutapoja, jotka parantavat hakettamattoman harvennuspuun kaukokuljetustehokkuutta esim. auto-, alus- ja junakuljetuksissa. Lisäksi pitäisi kehittää aiempaa pelkistetyimpiä ja edullisempia peruskoneita, joilla tulisi päästä samaan tuottavuuteen pienemmillä yksikkökustannuksilla kuin nykykalustolla energiapuun korjuussa. Kuljettajien koulutuksen avulla tulisi varmistaa, että parhaat ja tehokkaimmat työtavat siirtyvät käytäntöön ja huonoista työtavoista päästään eroon.

Metsähakkeen toimitusketjussa tulisi kehittää logistisia toimintamalleja, joilla voidaan tasoittaa ja ratkaista metsähakkeen kulutushuippujen aiheuttamia ongelmia hakkeen vastaanotossa, haketuksessa ja kaukokuljetuksessa sekä samalla taata kone- ja kuljetuskalustoresurssien tehokas ja ympärivuotinen käyttö. Kannoilla tulisi tehostaa metsä- ja kaukokuljetuksessa kantojen kuormaus- ja purkutyötä sekä alentaa kantojen kaukokuljetuskustannuksia. Lisäksi tulisi kiinnittää huomiota epäpuhtauksien poistoon kantopaloista joko korjuu-, kuljetus- tai murskaustyön yhteydessä. Energiapuun varastointitapoja ja toimituslogistiikka tulisi kehittää niin, että niiden avulla voitaisiin ehkäistä mahdollisten hyönteistuhojen synty energiapuuvarastoa ympäröiviin metsiin tai taimikoihin. Puupoltossa syntyvä tuhka tulisi ottaa hyötykäyttöön ja palauttaa se metsään parantamaan puiden kasvua. Metsänhoidon tasoa tulisi nostaa ja samalla parantaa korjuuolosuhteita harvennusmetsien energiapuun korjuussa.

3.2.8 Metsähakkeen toimitusketjujen CO_2 –päästöt

Metsähakkeen toimitusketjujen hiilidioksidipäästöt syntyvät pääasiassa puunkorjuussa, metsä- ja kaukokuljetuksessa sekä haketuksessa käytettävien koneiden polttoaineen kulutuksesta. Toimitusketjuissa käytettävien koneiden koko ja teho sekä kuljetusmatkat vaikuttavat olennaisesti CO_2 -päästöihin. Tässä tarkastelussa käytetyt metsäkoneiden, hakkureiden ja kuljetusautojen tuottavuus- ja polttoaineen kulutusarvot (Taulukko 3.2.1) perustuvat viimeaikaisiin metsäenergian korjuuketjujen aika- ja tuottavuustutkimuksiin (Kärhä ja Mutikainen 2011, Kärhä ym. 2011a, Kärhä ym. 2011b, Kärhä ym.

2011c, Kärhä ym. 2011d, Kärhä ym. 2010, Laitila ja Väätäinen 2011, Laitila 2006, Pajuoja ym. 2011). Tarkastelussa käytettyjen tuottavuus- ja kulutusarvojen osalta on huomioitava, että erilaisten konetyyppien välillä on huomattavia eroja.

Metsähakkeen toimitusketjujen polttoaineen kulutuksen hiilidioksidipäästöt laskettiin kuudelle toimitusketjulle. Raaka-aineina käytettiin päätehakkuiden hakkuutähteitä, kantoja sekä nuorten metsien harvennuksilta saatavaa kokopuuta ja karsittua rankaa. Hiilidioksidipäästöjen laskennassa huomioitiin raaka-aineen tuotantovaihe, metsäkuljetus, haketus tai murskaus, kaukokuljetus, kuormaus ja purkuvaiheet sekä työkoneiden siirrot työmaalle ja takaisin. Korjuussa, kuljetuksissa ja haketuksessa käytettävien työkoneiden polttoaineena käytettiin diesel-öljyä, jonka laskennallisena CO_2- päästönä on 2,6 kg/litra. Kaukokuljetuksen osalta täysperävaunuyhdistelmän (60 t) hiilidioksidipäästöinä käytettiin VTT:n LIPASTO –laskentajärjestelmän (VTT 2011) mukaista päästöarvoa 1041 g/km tyhjänä ajolle ja 1334 g/km täydelle kuormalle. Raaka-aineen kokonaismassa kaukokuljetuksessa vaihtelee eri toimitusketjujen välillä sen mukaan, haketetaanko biomassa tienvarressa, terminaalissa vai käyttöpaikalla. Ero täysperävaunuyhdistelmän kokonaismassassa on kuitenkin usein pieni, sillä

Taulukko 3.2.1. Laskelmissa käytetyt tuottavuus- ja polttoaineenkulutusarvot.

	Tuottavuus	Polttoaineen / Sähkönkulutus
Kaato ja kasaus, hakkuukone	m^3/h	litraa/h
kokopuu	6,5	11,0
karsittu ranka	5,5	11,0
Kannonnosto, kaivinkone	m^3/h	litraa/h
kannot	10,0	18,0
Metsäkuljetus, metsätraktori	m^3/h	litraa/h
kokopuu	11,8	9,0
karsittu ranka	13,0	9,0
hakkuutähteet	10,6	10,0
kannot	7,0	10,0
Tienvarsi- ja terminaalihakkuri	i-m^3/h	litraa/i-m^3
kokopuu, hakkuutähteet	80	0,5
karsittu ranka	100	0,5
Käyttöpaikkamurskain	i-m^3/h	kWh/i-m^3
kokopuu, karsittu ranka	200	1,1
hakkuutähteet	200	0,9
kannot	200	1,0
Kaukokuljetus, täysperävaunurekka	kuormakoko, m^3	polttoaineen kulutus, l/100km tyhjänä – täynnä
kokopuu	30	40,0–51,0
karsittu ranka	48	40,0–51,0
hakkuutähteet, kannot	25	40,0–51,0
hakkeena	44	40,0–51,0

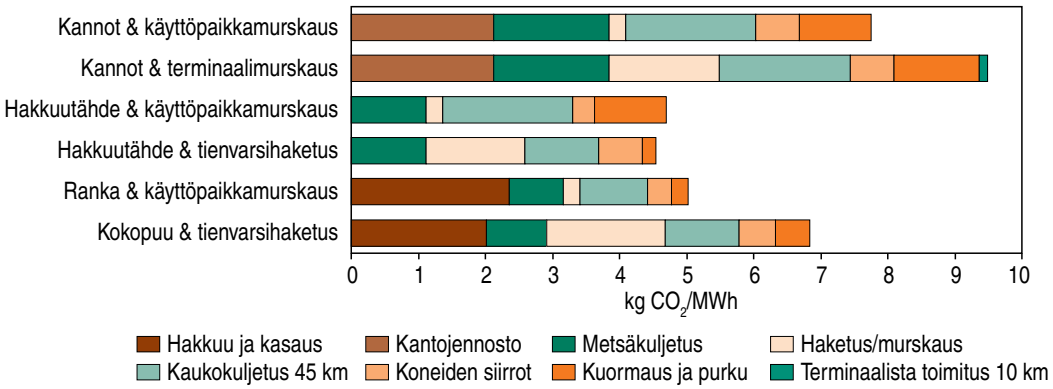
sekä hakkeen että hakettamattoman biomassan kuljettaminen vaatii erilaisia rakenteita kuormatilaan, mikä nostaa yhdistelmän kokonaispainoa. Siksi polttoaineen kulutus laskettiin tässä tarkastelussa aina täydellä kuormalla eli 60 tonnin kokonaismassalla.

Metsäenergian korjuuketjujen välinen vertailu osoittaa, että polttoaineen kulutus ja siitä aiheutuvat päästöt ovat suorassa suhteessa korjuuketjujen rakenteeseen; mitä useammin raaka-ainetta käsitellään ja siirrellään, sitä useampaa konetta joudutaan käyttämään ja sitä enemmän syntyy CO_2-päästöjä (Kuva 3.2.8).

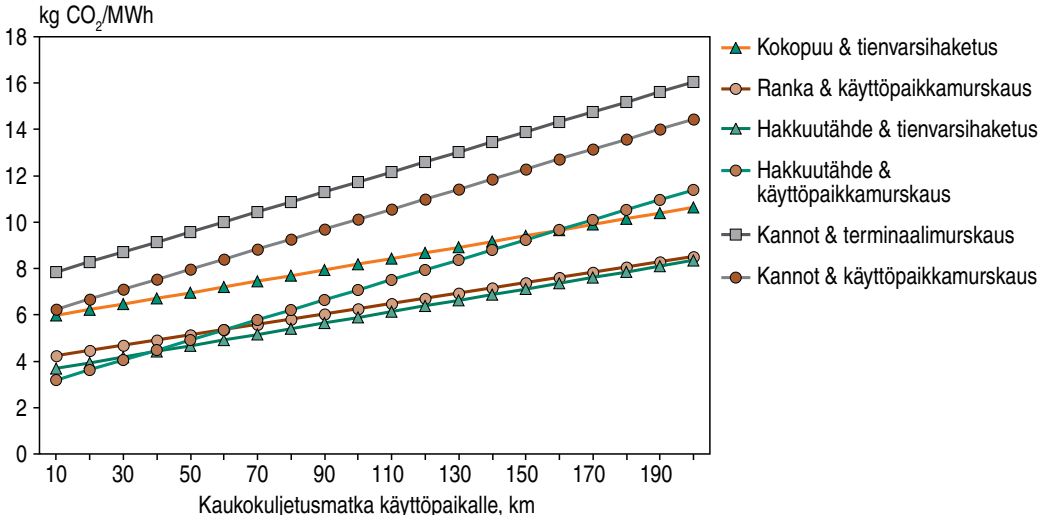
Hakkuutähdettä hyödyntävä, tienvarsihaketukseen perustuva toimitusketju tuottaa vähiten päästöjä 45 km kaukokuljetusmatkalla. Hakkuutähteen osalta hiilidioksidipäästöjen laskenta alkaa metsäkuljetuksesta, sillä tähteet syntyvät ainespuuhakkuun sivutuotteena. Todellisuudessa päästöjä syntyy hakkuukoneen toimiessa päätehakkuualoilla, mutta sekä päästö- että kustannuslaskennassa hakkuukoneen toiminta on yleensä allokoitu ainespuukorjuulle. Tämä laskentatapa vähentää hakkuutähteiden päästöjä huomattavasti muihin tarkastelussa käytettyihin raaka-aineisiin nähden.

Eniten päästöjä tarkastelussa tuottaa puolestaan kantobiomassan korjuuketju, jossa kannot kuljetetaan terminaaliin murskattavaksi ja sieltä edelleen murskeena voimalaitokselle. Kantojen nostoa varten päätehakkuualalle on kuljetettava kaivinkone ja suoritettava erillinen nostotoimenpide, mikä kasvattaa ketjun päästöjä esimerkiksi hakkuutähteen korjuuseen verrattuna. Lisäksi terminaalimurskauksessa kuormauksesta ja kuorman purkamisesta aiheutuvat päästöt kasvavat verrattuna tienvarsihaketukseen tai käyttöpaikkamurskaukseen. Käyttöpaikkamurskauksen hiilidioksidipäästö on raaka-aineen energiasisältöä kohti laskettuna huomattavasti pienempi kuin tienvarsi- tai terminaalihaketuksen päästö. Syynä tähän on se, että käyttöpaikkamurskaimen voimanlähteenä käytetään tässä tarkastelussa sähköä, jonka ominaisuuspäästökerroin on Suomessa keskimäärin 200 g/ kWh (Motiva 2004). Tämä laskee murskauksen laskennallisen päästön huomattavasti alemmalle tasolle kuin polttomoottorikäyttöisten hakkureiden käytöstä aiheutuvat päästöt.

Kuormauksen ja purkamisen osalta hakettamattoman, epäsäännöllisen muotoisen ja irtonaisen raaka-aineen, kuten hakkuutähteen ja kantojen käsittely vie enemmän aikaa ja kuluttaa näin enemmän polttoainetta kuin rankapuun kuormaus ja purku tai hakkeen purkaminen hakeautosta käyttöpaikalla. Toimitusketjujen välisissä vertailuissa on kuitenkin hyvä huomioida, että tienvarsi- ja terminaalihaketuksen osalta hakeauton kuormauksen päästöt kohdistuvat haketusvaiheeseen.



Kuva 3.2.8. Metsähakkeen toimitusketjujen CO_2-päästöt 45 km kaukokuljetusmatkalla.

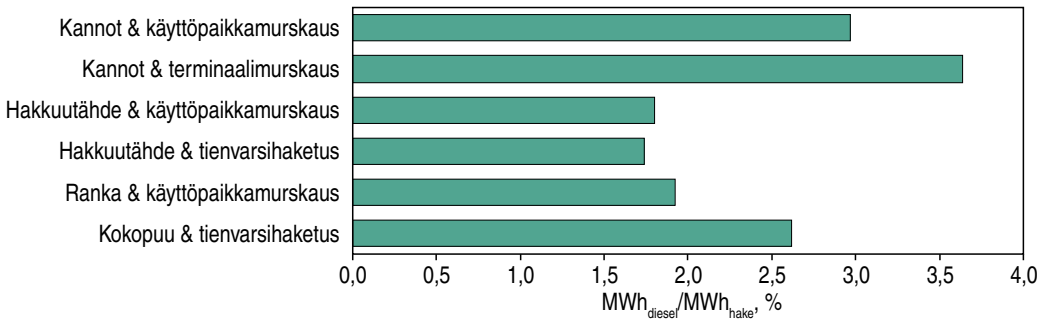


Kuva 3.2.9. Metsähakkeen toimitusketjujen CO_2-päästöt kuljetusmatkan mukaan.

Toimitusketjujen kokonaispäästöjä vertailtiin 10–200 km kaukokuljetusmatkan mukaan. Kaukokuljetusmatkan kasvaessa toimitusketjujen välinen järjestys muuttuu (Kuva 3.2.9). Lyhyillä alle 30 km etäisyyksillä hakkuutähteen kuljettaminen hakettamattomana käyttöpaikalle murskattavaksi aiheuttaa vähiten hiilidioksidipäästöjä. Kuljetusetäisyyden kasvaessa yli 30 km pitkäksi, hakkuutähteen tienvarsihaketuksella voidaan parantaa kuljetusten tehokkuutta ja siten pienentää CO_2-päästöjen määrää verrattuna hakettamattoman hakkuutähteen kuljetukseen.

Johtopäätökset

Tarkastelussa mukana olleiden korjuuketjujen polttoaineen kokonaiskulutuksen energiasisältö on 1,7–3,6 % 45 km kaukokuljetusmatkalla toimitetun metsäbiomassan energiasisällöstä (Kuva 3.2.10). Vaikka kuljetusmatkat tulevaisuudessa kasvaisivatkin, fossiilisten tuotantopanosten tarve ei kasva. Tämä johtuu korjuu- ja kuljetuskoneiden paranevasta polttoainetaloudesta ja toisaalta toimitettavan polttoaineen kehittyvästä laadunhallinnasta. Voidaankin perustellusti todeta, että metsähakkeen korjuu, haketus ja kuljettaminen käyttöpaikalle kuluttavat hyvin vähän energiaa toimitetun metsähakkeen energiasisältöön nähden ja niiden merkitys metsäenergian hiilitaseelle on vähäinen.



Kuva 3.2.10. Metsähakkeen tuotantoketjuissa käytetyn dieselpolttoaineen energiasisältö suhteessa toimitetun metsähakkeen energiasisältöön.

Kirjallisuus

Asikainen, A., Ranta, T., Laitila, J. ja Hämäläinen, J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 131. 107 s.

Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999–2003. Loppuraportti. Teknologiaohjelmaraportti 5/2004. 135 s.

Heikkilä, J., Laitila, J., Tanttu, V., Lindblad, J., Sirén, M., Asikainen, A., Pasanen, K. ja Korhonen, K.T.. 2005. Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. Metlan työraportteja 10. 56 s.

Hiltunen, J. 2010. Metsähakkeen vesitiekuljetuksen simulointi Saimaan vesistössä. Metsä- ja puuteknologian kandidaatin tutkielma. Itä-Suomen yliopisto. Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta. 25 s.

Järvinen, E., Rämö, A-K. ja Silvennoinen, H. 2006. Energiapuun tuotanto ja markkinat: Metsäomistajakysely. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen raportteja nro 199. 88 s.

Karttunen, K., Föhr, J. ja Ranta, T. 2009. Energiapienpuun hankintalogistiikka. Esiselvitys ”Energiapuuta Etelä-Savosta” -projektille. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 26 s. + liitteet 5.

Karttunen, K., Jäppinen, E., Väätäinen, K. ja Ranta, T. 2008. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus proomukalustolla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, tutkimusraportti EN B-177. 54 s. + liitteet 3 s.

Korpinen, O-J., Saranen, J., Väätäinen, K., Karttunen, K. ja Ranta, T. 2010. Viability of forest fuel transportation in the Finnish rail and waterway networks. Forest bioenergy 2010 31.8.–4.9.2010. Book of proceedings, s. 197–205.

Kärhä, K. 2010. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2009. Metsätehon tuloskalvosarja 9/2010. 22 s. Saatavana: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2009_09_Puupolttoaineiden_saatavuus_ja_kaytto_kk.pdf [viitattu 22.4.2012]

Kärhä, K., Laitila, J., Jylhä, P., Nuutinen, Y. ja Keskinen, S. 2009. Kokopuun paalaus – tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset. Metsätehon raportti 211. 68 s.

Kärhä, K. 2007a. Metsähakkeen tuotannon visiot. BioEnergia 2/2007, s. 8–12.

Kärhä, K. 2007b. Metsähakkeen tuotantokalusto vuonna 2007 ja tulevaisuudessa. Metsätehon katsaus nro 28. 4 s.

Kärhä, K. & Mutikainen, A. 2011. Jenz HEM 820 DL runkopuun terminaalihaketuksessa. Metsätehon tuloskalvosarja 13/2011. Saatavana: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2011_13_Jenz_HEM_820_DL_kk_am.pdf [viitattu 17.8.2012]

Kärhä, K., Kumpare, T., Keskinen, S. & Petty, A. 2011a. Ponsse Ergo/H7 rankapuun hakkuussa ensiharvennuksella. Metsätehon tuloskalvosarja 1/2011. Saatavana: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2011_01_PonsseErgoH7_kk_ym.pdf [viitattu 17.8.2012]

Kärhä, K., Hautala, A. & Mutikainen, A. 2011b. Jenz HEM 581 DQ hakkuutähteiden ja pienpuun tienvarsihaketuksessa. Metsätehon tuloskalvosarja 5/2011. Saatavana: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2011_05_Jenz_Hem_581DQ_hakkuutahteiden_ja_pienpuun_kk_ah_am.pdf [viitattu 17.8.2012]

Kärhä, K., Mutikainen, A., Hautala, A. 2011c. Saalasti Murska 1224 HF käyttöpaikkamurskauksessa. Metsätehon tuloskalvosarja 7/2011. Saatavana: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2011_07_Saalasti_Murska_kk_am_ah.pdf [viitattu 17.8.2012]

Kärhä, K., Hautala, A. & Mutikainen, A. 2011d. HEINOLA 1310 ES hakkuutähteiden ja pienpuun tienvarsihaketuksessa. Metsätehon tuloskalvosarja 9/2011. Saatavana: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2011_09_HEINOLA_1310_ES_hakkuutahteiden_kk.pdf [viitattu 17.8.2012]

Kärhä, K., Mutikainen, A., Hautala, A. 2010. Vermeer HG6000 terminaalihaketuksessa ja –murskauksessa. Metsätehon tuloskalvosarja 15/2010. Saatavana: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2010_15_Vermeer_HG6000_terminaalihaketuksessa_kk_am_ah.pdf [viitattu 17.8.2012]

Laitila, J., Asikainen, A., Sikanen, L., Korhonen, K.T. ja Nuutinen, Y. 2004. Pienpuuhakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogistiikka. Metlan työraportteja 3. 57 s. Saatavana: http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2004/mwp003.htm [viitattu 17.8.2012]

Laitila, J., Heikkilä, J. ja Anttila, P. 2010. Harvesting alternatives, accumulation and procurement cost of small-diameter thinning wood for fuel in Central-Finland. Silva Fennica 44(3), s. 465–480.

Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M. & Asikainen, A. 2010. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. VTT Tiedotteita 2564. 143 s. Saatavana: http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2564.pdf [viitattu 20.8.2012]

Laitila, J. & Väätäinen, K. 2011. Kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketustuottavuus. Metsätieteen aikakauskirja 2/2011: 107–126. Saatavana: http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff11/ff112107.pdf [viitattu 20.8.2012]

Laitila, J. 2006. Cost and sensitive analysis tools for forest energy procurement chains. Metsanduslikud Uurimused – Forestry Studies 45: 5–10.

Motiva 2004. Yksittäisen kohteen CO_2 -päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO_2-päästökertoimet. Saatavana: http://www.motiva.fi/files/209/Laskentaohje_CO2_kohde_040622.pdf [viitattu 15.5.2012].

Pajuoja, H., Kärhä, K. & Mutikainen, A. 2011. Kesla C645A pienpuun tienvarsihaketuksessa. Metsätehon tuloskalvosarja 17/2011. Saatavana: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2011_17_Kesla_C645A_pienpuun_tienvarsihaketuksessa_hp_kk_am.pdf [viitattu 20.8.2012]

Ranta, T. 2010. Metsäenergian tehokkaat kuljetusmuodot – LUT Energia. Esitelmä Itä-Suomen Bioenergiapäivillä, 22.3.2010, Snowpolis Oy, Vuokatti. 29 s.

Ranta, T., Asikainen, A., Lehikoinen, M., Väätäinen, K., Halonen, K. ja Frilander, P. 2002. Metsähakkeen autokuljetuksen logistiikka. Tutkimusselostus PRO/T6042/02. VTT Prosessit. 31 s.

Rämö, A-K. ja Toivonen, R. 2001. Metsänomistajien energiapuun tarjontahalukkuus alueittain. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen työpapereita 46. 53 s.

Rämö, A-K., Toivonen, R. ja Tahvanainen, L. 2001. Yksityismetsänomistajien energiapuun tarjonta ja suhtautuminen puun energiakäyttöön. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen raportteja 175. 101 s.

Seppänen, A., Harstela, P. ja Rantala, J. 2008. Informaatio- ja kommunikaatioteknologia (ICT) metsänhoitoyhdistysten metsäpalveluiden hallinnassa. Metlan työraportteja 82. 50 s. Saatavana: http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2008/mwp082.htm [viitattu 17.8.2012]

Tahvanainen, T. 2004. Metsähake ja puukauppa. Julkaisussa: Hakkila, P. Metsähake ja metsätalous. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 913. 80 s.

VTT 2011. LIPASTO – Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. Saatavana: http://lipasto.vtt.fi/index.htm [viitattu 15.5.2012]

Skenaariotarkastelu – Puun teollisuus- ja energiakäytön vaikutukset ja ilmasto

4

4.1 Skenaarioiden lähtökohdat ja kuvaus

Risto Sievänen, Olli Salminen, Kimmo Ruosteenoja

Valtakunnan metsien inventoinnit ovat tuottaneet 1920-luvulta lähtien tietoa Suomen metsävaroista. Niiden perusteella on tehty valtakunnallisia arvioita metsiemme hakkuumahdollisuuksista MELA–ohjelmistolla (Redsven ym. 2011) 1980-luvun lopulta lähtien. MELA–ohjelmistoon perustuvissa arvioissa tarkastellaan puuston määrää ja rakennetta (so. metsiköiden ikäjakauma, puulajisuhteet ym.) sekä hakkuiden kohdentumista (harvennus-, päätehakkuut jne.) tulevaisuudessa. Hakkuumäärät saadaan joko laskennan tuloksena tai ne voidaan antaa lähtötietoina, jolloin tarkastellaan ko. hakkuumäärille ehdollista metsien kehitystä

Viime aikoina on ennustettu myös puun tulevaa käyttöä. Nämä ennusteet perustuvat selvityksiin metsäteollisuuden tuotannon kehityksestä, bioenergian kysynnästä sekä tuontipuun tarjonnasta. Kun puun käytön ennusteet muutetaan hakkuumääriksi, niitä voidaan käyttää MELA-ohjelmiston laskelmien syöttötietoina. Tällä tavalla on mahdollista tuottaa metsien puuston määrän ja rakenteen kehitykselle vaihtoehtoisia skenaarioita, jotka perustuvat ennakoituun raaka-aineen kysyntään.

Tässä luvussa esitetään muutamia toisistaan poikkeavia puunkäytön skenaariota ja arvioidaan puun käytön vaikutusta metsien puuston määrään, rakenteeseen ja metsänhoitoon. Lisäksi tarkastellaan metsien hiilitaseita. Skenaarioita laadittaessa on hyödynnetty olemassa olevia puun käytön arvioita ja täydennetty niitä oletuksilla. Tarkasteluväli kattaa vuodet 2007–2042, joka talouden ja globaalien muutostrendien näkökulmasta on pitkä aika mutta metsäluonnon muutosten kannalta lyhyt. Eri skenaarioiden toteutumisen todennäköisyyksiin ei oteta kantaa.

4.1.1 Puun kysynnän vaihtoehdot

Skenaariot tehtiin kolmen ainespuun käytön ja kahden puun bioenergiakäytön vaihtoehdon pohjalla. Alla on lyhyt kuvaus vaihtoehdoista, joiden numeeriset oletukset on esitetty liitteessä 4.1.1.

Ainespuun käyttö

Molemmat ainespuun käytön skenaariot pohjautuvat teollisuuden puun ennakoituun kysyntään. Puunkulutusskenaarioista korkeampi vastaa Työ- ja elinkeinoministeriön (TEM 2010) perusskenaariota, ja siinä vuotuinen ainespuun käyttö vuonna 2020 on 59,4 milj. m^3 ja tuontipuun määrä on oletettu alhaiseksi eli 2,8 milj. m^3:ksi, jolloin kotimaisen puun käyttö on 56,6 milj. m^3. Matalampi ainespuun käytön skenaario (51,7 milj. m^3 vuonna 2020) perustuu Hetemäen ja Hännisen (2009) tutkimukseen, jossa on oletettu massa- ja paperiteollisuuden tuotanto TEM:in (2010) arvioita pienemmäksi. Lisäksi tässä skenaariossa oletetaan alkuperäisestä Hetemäen ja Hännisen arviosta poi-

keten tuontipuun määrä korkeammaksi (7,8 milj. m^3), jolloin kotimaista ainespuuta käytettäisiin vuonna 2020 yhteensä 43,9 milj. m^3. Näiden kahden vaihtoehdon lisäksi tarkasteltiin vielä metsien puuntuotannollisesti suurimman kestävän kertymän mukaisia hakkuita, joka antaa käsityksen siitä, mitä tapahtuisi, jos metsiä käytettäisiin voimakkaasti. Suurin kestävä kertymä tarkoittaa korkeinta hakkuiden tasoa, jota voidaan jatkuvasti pitää yllä metsien kasvuvauhti huomioon ottaen. Tässä vaihtoehdossa ainespuuta poistuu metsistä vuonna 2020 74,8 milj. m^3.

Sekä TEM (2010) perusskenaario että Hetemäki ja Hännisen (2009) arvio ulottuvat vain vuoteen 2020. Vuoden 2020 jälkeen ainespuun käytön oletettiin säilyvän tarkastelujakson loppuun vuoden 2020 tasolla. Oletus ei perustu lopputuotemarkkinoiden kehitysarvioihin vuoden 2020 jälkeen, vaan ko. oletuksella mahdollistetaan laskelmien ulottaminen vuoteen 2042.

On huomattava, että puun käytön skenaarioista puuttuu kokonaan kytkös kansainväliseen bioenergian raaka-aineiden kauppaan. Eri maiden väliset erot bioenergiapolitiikassa ja ohjauskeinoissa saattavat lisätä kansainvälistä raaka-ainekauppaa huomattavastikin. Tästä aihepiiristä ei kuitenkaan ollut käytettävissä Suomea koskevia tutkimuksia.

Energiapuu

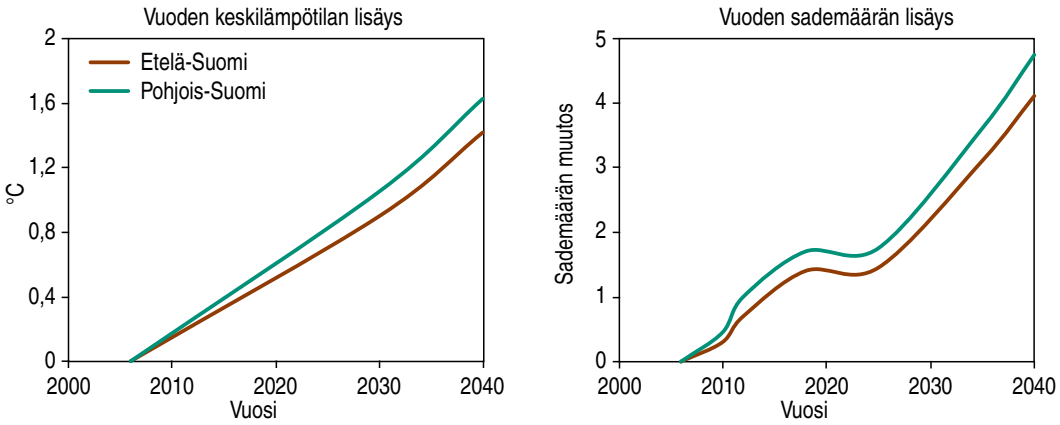
Energiapuun käyttöä arvioitaessa tarkasteltiin kahta määrällisesti erilaista vaihtoehtoa.

Risupaketti+ kuvaa tilannetta, jossa energiapolitiikka suosii metsäenergian runsasta käyttöä. Metsäenergian käytön kehitys vastaisi tällöin Uusiutuvan energian velvoitepaketin tavoitteita. Tällainen kehitys edellyttää muun muassa sitä, että PETU-tuki vaikuttaa tulevaisuudessa toivotulla tavalla ja että Suomessa toimii vuonna 2020 kolme isoa biodiesellaitosta. Metsähaketta käytetään lämmön ja energian tuottamiseen noin 13,5 milj. m^3, kotitalouksien polttopuun käyttö säilyy nykyisenä noin 5,5 milj. m^3 ja puuenergian kokonaiskäyttö on 25,5 milj. m^3 vuonna 2020.

Risupaketti- tapauksessa metsäenergiaa käytetään vähemmän kuin on arvioitu tapahtuvan. Tämä vaihtoehto kuvastaa tilannetta, että ohjauksella ei ole ollut toivottua vaikutusta metsänomistajien ylläpitämään tarjontaan ja kantojen nostoa ei tapahdu ollenkaan. Suomessa on yksi biodiesellaitos. Metsähaketta käytetään noin 6,5 milj. m^3, kotitalouksien polttopuun käyttö on 5,5 milj. m^3 ja puuenergian kokonaiskäyttö on 18,0 milj. m^3 vuonna 2020.

4.1.2 Ilmastonmuutos

Ilmaston tulevalle kehitykselle on käytetty kahta vaihtoehtoa. Niistä ensimmäisessä (Nykyilmasto) annetaan olosuhteiden pysyä nykyisellään ja toisessa (Muuttuva ilmasto) vaihtoehdossa lämpötilan, sademäärän ja ilman hiilidioksidipitoisuuden oletetaan muuttuvan IPCC:n A1B-skenaarion (Jylhä ym. 2009) mukaisesti. Näiden laskelmien avulla haarukoidaan ilmastonmuutoksen vaikutusta ainespuun ja energiapuun käytön eri vaihtoehdoissa. A1B-skenaariossa oletetaan kasvihuonekaasujen päästöt melko suuriksi, jolloin hiilidioksidipitoisuus kasvaisi vuoden 2006 382 ppm:stä jo 536 ppm:ään vuonna 2050. MELA -laskelmia ja metsien hiilivaraston arvioimista varten laskettiin vuoden keskilämpötilan ja sademäärän muutokset suhteessa vuoden 2006 arvoihin kaikkien metsäkeskusten alueille. Laskelmien taustaoletuksena on, että mallit (puiden kasvun ja hiilivaraston muutosten) kuvaavat laskentajakson alkuhetkellä (vuosina 2006–2007) vallinneen metsien tilan oikein. A1B-skenaariota vastaavat vuoden keskilämpötilan ja sademäärän muutokset on esitetty kuvassa 4.1.1. Tulevaisuudessa myös lämpötilan ja sademäärien vaihtelu eri vuodenaikojen välillä tasaantuu jonkin verran; tätä ei kuitenkaan ole otettu laskelmissa huomioon.



Kuva 4.1.1. Vuoden keskilämpötilan ja sademäärän muuttuminen Etelä- ja Pohjois-Suomessa A1B-ilmastoskenaarion mukaan (Jylhä ym. 2009). Etelä- Suomeen kuuluvat metsäkeskusalueet 1–10 (eli suurin piirtein linjan Valtimo – Kalajoki eteläpuoliset alueet) ja Pohjois-Suomeen metsäkeskukset 11–13. Muutokset on annettu suhteessa vuoden 2006 tienoilla vallinneeseen ilmastoon. Lämpötilan nousu on esitetty asteina, sademäärän muutos prosentteina.

Keskilämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden muutosten vaikutus puiden kasvuun on yhdistetty MELA-ohjelmiston kasvumalleihin aikaisemmassa projektissa (Matala ym. 2005). Kasvun muutokset perustuvat FinnFor-mallilla (Kellomäki ja Väisänen 1997) tehtyihin laskelmiin. Laskelmat tehtiin erikseen eri metsäkeskusalueille siten, että Rannikon metsäkeskus oli jaettu kahteen ja Lapin metsäkeskus kolmeen alueeseen. Yhteensä tarkastelualueita oli täten 16 kappaletta.

4.1.3 Kolme puun käytön pääskenaariota

Edellä esitetyistä aines- ja energiapuun käytön vaihtoehdoista muodostettiin kolme skenaariota, jotka vastaavat vähäistä, voimakkaampaa ja maksimaalista puunkäyttöä (Taulukko 4.1.1). Alhaisen puunkäytön (Alhainen) skenaariossa sekä ainespuun sekä energiapuun käyttö (Risupaketti-) on vähäistä. Maltillisen puunkäytön (Maltillinen) skenaariossa kulutetaan ensimmäistä vaihtoehtoa enemmän sekä ainespuuta että energiapuuta (Risupaketti+). Suurimman kestävän kertymän (Suurin kestävä) skenaariossa metsiä hakataan täysimääräisesti kestävän kertymän mukaisesti. Energiapuuta käytetään tässä tapauksessa 24 milj. m^3, joka on hieman alhaisempi kuin Risupaketti+ -vaihtoehdon mukainen käyttö. Laskelmat tehtiin olettaen sekä nykyilmasto että ympäristötekijöiden muutos muuttuvan ilmaston skenaarion mukaan.

Taulukko 4.1.1. Puun käyttö kolmessa skenaariossa vuonna 2020.

Puunkäyttöskenaario	Ainespuuhakkuut v. 2020 milj. m^3	Energiapuun käyttö v. 2020 milj. m^3
Alhainen	43,6	18,0
Maltillinen	56,6	25,5
Suurin kestävä	74,8	24,0

4.1.4 Skenaarioiden tuottaminen MELA-ohjelmistolla

MELA on Suomen oloihin kehitetty metsätalouden analyysi- ja suunnitteluohjelmisto (Redsven ym. 2011), jonka avulla voidaan tuottaa valtakunnallisia ja alueellisia metsien käyttömahdollisuusarvioita ja niitä vastaavia metsien lähivuosikymmenien kehitysvaihtoehtoja. MELA-ohjelmisto koostuu käsittely- ja kehitysvaihtoehtoja tuottavasta, yksittäisten puitten kasvun laskentaan perustuvasta metsikkösimulaattorista ja eri kehitysvaihtoehtoja vertailevasta optimointiosiosta. Simulaattorissa metsänhoitotoimenpiteet ja hakkuut toteutetaan Tapion (2007) ohjeiden mukaisesti. Optimoinnissa maksimoidaan taloudellista kannattavuutta: metsiköiden käsittely- ja kehitysvaihtoehdoista valitaan ne, jotka tuottavat suurimman nettotulojen nykyarvon. Korkokantana laskelmissa käytettiin neljää prosenttia.

Tulosten maantieteellinen laskentayksikkö on metsäkeskusalue, tulosteena ovat mm. yksittäisten puutavaralajien kertymät, hakkuupinta-alat sekä puuston tilavuuden kehittyminen puu- ja puutavaralajeittain.

Kirjallisuus

Hetemäki, L. ja Hänninen, R. 2009. Arvio Suomen puunjalostuksen tuotannosta ja puunkäytöstä vuosina 2015 ja 2020. Metlan työraportteja 122. www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2009/mwp122.htm.

Hyvän metsänhoidon suositukset. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2007.

Jylhä, K.; Ruosteenoja, K.; Räisänen, J.; Venäläinen, A.; Tuomenvirta, H.; Ruokolainen, L.; Saku, S. & Seitola, 2009. T. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen loppuraportti. Ilmatieteen laitos, Raportteja No. 2009: 4.

Kellomäki, S., Väisänen, H., 1997. Modelling the dynamics of the forest ecosystem for climate change studies in the boreal conditions. Ecol. Modell. 97: 121–140.

Matala, J., Ojansuu, R., Peltola, H., Sievänen, R ja Kellomäki, S. 2005. Introducing effects of temperature and CO_2 elevation on tree growth into a statistical growth and yield model. Ecological Modelling 181: 173–190.

Redsven, V., Hirvelä, H., Härkönen, K., Salminen, O., Siitonen, M. 2011. MELA2009 Reference Manual (2nd edition). Metsäntutkimuslaitos. 664 p. ISBN 978-951-40-2283-3.

TEM skenaarioraportti. 2010. Kiinteiden puupolttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa vuonna 2020. TEM julkaisuja Energia ja Ilmasto 66/201

Liite 4.1.1 Skenaarioiden numeeriset oletukset.

Ainespuun kysynnän skenaarioiden numeeriset oletukset

1. Korkeampi ainespuun käyttö

Käytetään TEM raportin (2010) perusskenaarion lukuja: metsäteollisuuden ainespuun käyttö 59,4 milj. m³/v, josta tuontipuuta 2,8 milj. m³/v . TEM peruskenaario arvioi saha- ja vaneriteollisuuden tuotannon vuonna 2020 olevan 11,5 milj. m³, mikä vastaa n. 25 milj m³ raakapuun kysyntää. Vastaavasti massan valmistus on vuonna 2020 10,5 milj. t, ja merkitsee – ottaen huomioon jätepuun käytön – n. 34,5 milj. m³ raakapuun tarvetta. Puulajeittain raakapuun kysyntä on jaettu vuoden 2009 käytön suhteessa (Taulukko 1). Vuosina 2020–2042 käytetään vuoden 2020 arvoja.

2. Matalampi ainespuun käyttö

Hetemäki ja Hännisen(2009) mukaan metsäteollisuuden ainespuun kokonaiskäyttö on vuonna 2020 51,8 milj. m³/v, josta tuontia 4,4 milj. m³/v. Raportissa arvioidaan massatuotannon tasoa: sellu 4,6 milj. t. ja mekaaninen massa 2,8 milj. t. Tämän pohjalta massateollisuuden puunkäyttö on vuonna 2020 arviolta 33,1 milj. m³, josta kotimaisen puun osuus on 22,2 milj. m³ (tuonti 3 milj. m³ sekä hake ja puru 8 milj. m³). Tässä puun tuonnin oletetaan olevan 7,8 milj m³/v eli 15 % ainespuun kokonaiskäytöstä. Puun tuonnin puutavaralajijakauma on v. 2010 tiedoista. Vuosina 2020–2042 käytetään vuoden 2020 arvoja.

3. Hintoina ovat vuoden 2010 hinnat.

4. Puutavaralajijakaumat kuten 2010 **(Taulukko 4.1.2).**

Liite 4.1.1 Jatkuu.

Taulukko 4.1.2. Ainespuun kysyntä vuonna 2020 puutavaralajeittain teollisuuden puun käytön skenaarioissa (korkeampi ja matalampi). MÄ = mänty, KU = kuusi, LE = lehtipuu, T = tukki, K = kuitupuu.

Ainespuun kysyntä, milj. m^3/v		
	(TEM perus)	(H & H)
Yhteensä	59,4	43,9
MÄT	11,9	12,2
KUT	12	12,3
KOT	1,115	1,2
MÄK	13,65	10,35
KUK	8,64	6,55
LEK	12,01	9,1
Tuonti	2,8	7,8
MÄT	0,08	0,23
KUT	0,065	0,17
KOT	0,005	0
MÄK	0,27	0,74
KUK	0,22	0,61
LEK	2,16	6,05
Kotimainen	56,6	43,9
MÄT	11,85	11,97
KUT	11,95	12,13
KOT	1,15	1,2
MÄK	13,38	9,61
KUK	8,42	5,94
LEK	9,85	3,05

Puun energiakäytön skenaarioiden numeeriset oletukset

Energiapuun vuotuinen käyttö:

	Vuotuinen käyttö milj. m^3	
Käyttömuoto	Risupaketti+	Risupaketti-
Metsähake ja käyttö biodiesellaitoksissa	20,0	12,5
Pientalojen polttopuu	5,5	5,5
Yhteensä	25,5	18,0

Metsähakkeen hinta on 18 €/MWh molemmilla puuenergiakäytön tasoilla

4.2 Metsävarojen kehitys ja vaikutukset metsätalouteen

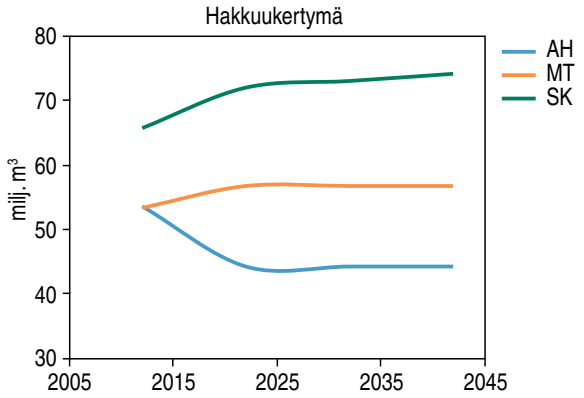
Antti Asikainen, Olli Salminen ja Risto Sievänen

4.2.1 Hakkuukertymä

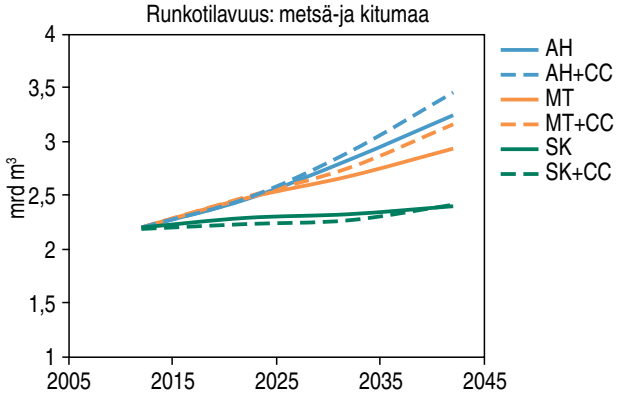
Skenaarioiden hakkuukertymän määrällinen ja laadullinen muutos ovat merkittävimmät tekijät, jotka heijastuvat niiden muihin tuloksiin, kuten hakkuupinta-aloihin, metsäenergiakertymän määrään ja rakenteeseen sekä metsiemme puustopääomiin ja ikärakenteisiin. Suurimman kestävän hakkuukertymän mukaisen skenaarion voidaan katsoa kuvaavan metsävarojemme mahdollistamaa metsien käytön ylärajaa. Runkopuun hakkuukertymää on mahdollista kasvattaa lähes 75 milj. kuutiometriin vuositasolla vuoteen 2042 mennessä. Maltillisen puunkäytön skenaario edustaa vuosituhannen alun hakkuukertymän tasoa. Alhaisen puunkäytön skenaarioissa hakkuukertymä laskee pysyvästi alle 45 miljoonan kuutiometrin metsäteollisuuden ainespuukysynnän matalan tason vuoksi. (Kuva 4.2.1).

4.2.2 Runkotilavuus ja puuston keskitilavuus

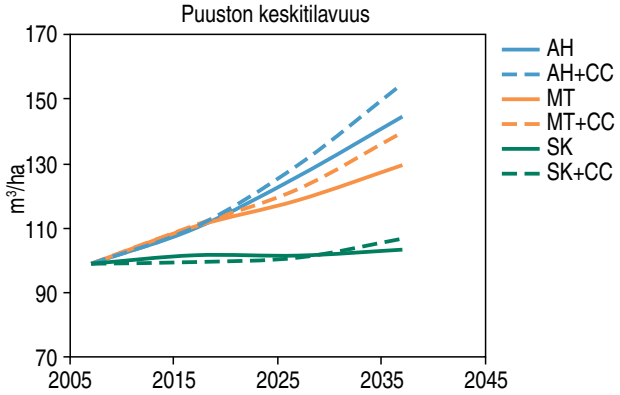
Suomen metsien puustopääoma (runkotilavuus) kasvaa hitaasti eli 2,4 miljardiin m^3:iin, kun metsiä hakataan Suurimman kestävän hakkuukertymän skenaarion mukaisesti. Kaikissa muissa skenaarioissa metsien puustopääoma kasvaa varsin nopeasti (Kuva 4.2.2). Ilmastonmuutoksen metsien kasvua kiihdyttävän vaikutuksen mukaan ottaminen nopeuttaa puustopääoman kehitystä ja maksimissaan puustopääoma nousee yli 3 miljardin kuutiometrin vaihtoehdossa, jossa teollisuuden puunkäyttö pienenee merkittävästi nykytasosta ja ilmastonmuutoksen oletetaan kiihdyttävän kasvua. Samalla metsiemme puuston keskitilavuus nousee jopa 60 prosentilla (Kuva 4.2.3).



Kuva 4.2.1 Hakkuukertymä eri skenaarioissa. AH on Alhaisen , MT on Maltillisen ja SK on Suurimman kestävän kertymän skenaario.



Kuva 4.2.2. Metsien puustopääoman kehitys. Kuvaajat on merkitty kuten kuvassa 4.2.1, CC tarkoittaa, että ilmastonmuutos (ks. Alaluku 4.1) on mukana laskelmissa.



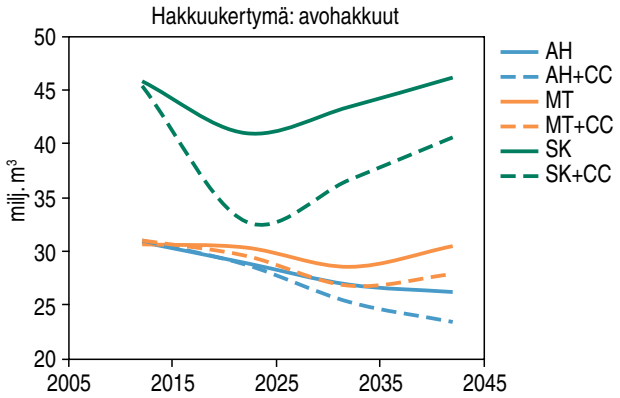
Kuva 4.2.3. Puuston keskitilavuuden kehittyminen. Kuvaajien merkintä on kuten kuvassa 4.2.2.

4.2.3 Puuhuolto harvennusleimikoista kasvaa

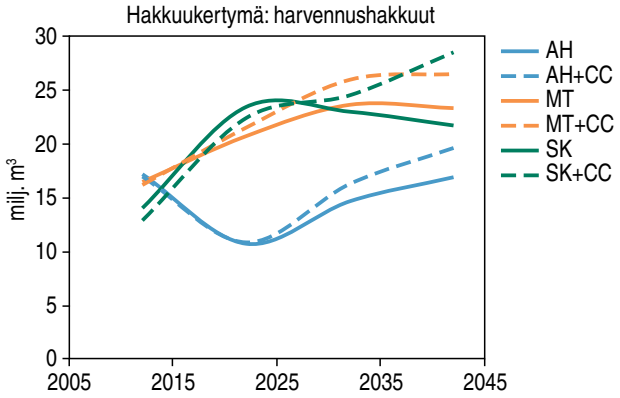
Metsäenergian hankinnan kannalta merkittävä muutos on hakkuukertymän painopisteen siirtyminen harvennusleimikoihin (Kuvat 4.2.4 ja 4.2.5). Skenaarioista riippumatta avohakkuiden ainespuukertymä laskee. Tämä vaikuttaa suoraan hakkuutähde- ja kantohakkeen saatavuuteen. Maltillisen ja Alhaisen puunkäytön skenaarioissa lasku on muutamia miljoonia kuutiometrejä. Suurimman kestävän hakkuukertymänkin skenaariossa lasku on voimakasta kuluvalla vuosikymmenillä, mikä aiheutuu metsien ikäluokkarakenteen tuomasta harvennushakkuiden tarpeesta.

Harvennushakkuiden osalta Alhaisen puunkäytön skenaario poikkeaa muista: Koska teollisuuden puunkäyttö laskee voimakkaasti, hakkuukertymä saadaan aluksi päätehakkuilta. Muissa skenaarioissa harvennuspuun määrä kasvaa noin 60 % nykytasoon verrattuna. Näiltä leimikoilta kantojen korjuu ei ole nykyisellä tai näköpiirissä olevalla teknologialla mahdollista. Lisäksi korjattava hakkuutähde on kustannuksiltaan päätehakkuutähdettä huomattavasti kalliimpaa.

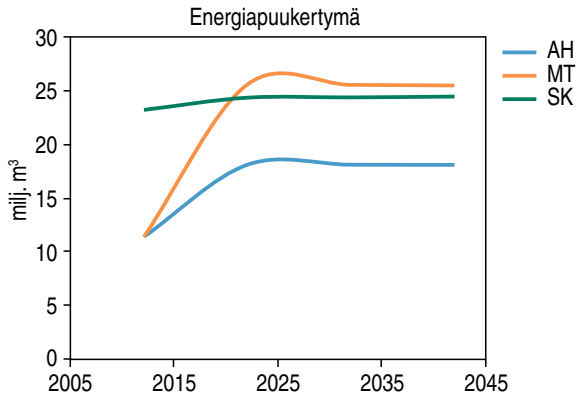
Metsämme mahdollistavat noin 25 miljoonan kuutiometrin metsäenergian hankinnan, mikäli teollisuuden ainespuuhakkuut säilyvät nykytasolla tai niitä hakataan suurimman kestävän hakkuusuunnitteen mukaan (Kuva 4.2.6). Alhaisten hakkuiden skenaariossa energiapuukertymä jää alle 20 miljoonan kuutiometrin lähinnä siksi, että hakkuutähteitä ja päätehakkuualojen kantoja on niukemmin saatavilla (Kuvat 4.2.7, 4.2.8 ja 4.2.9). Ilmastonmuutos ei juurikaan vaikuta energiajakeen kokonaismääriin tai koostumukseen.



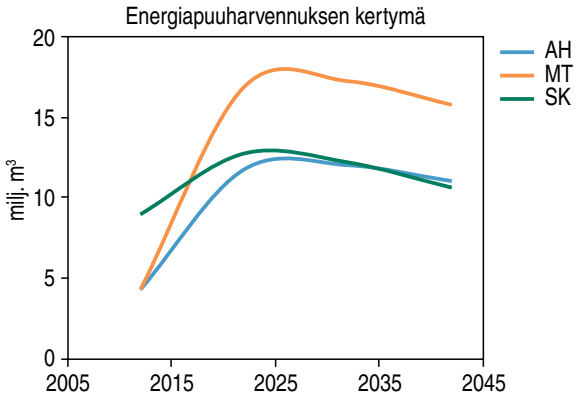
Kuva 4.2.4. Avohakkuiden hakkuukertymät laskevat. Kuvaajien merkintä on kuten kuvassa 4.2.2.



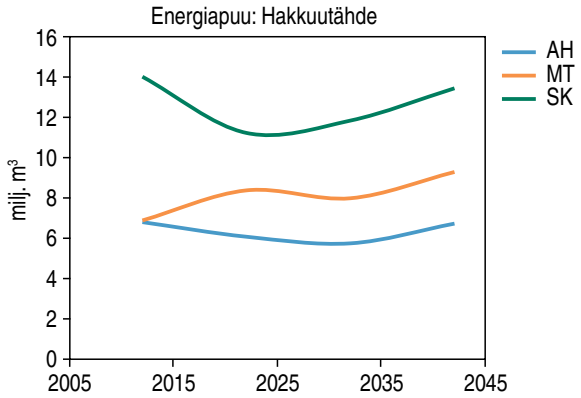
Kuva 4.2.5. Harvennushakkuista yhä merkittävämpi osa puuhuoltoa. Kuvaajien merkintä on kuten kuvassa 4.2.2.



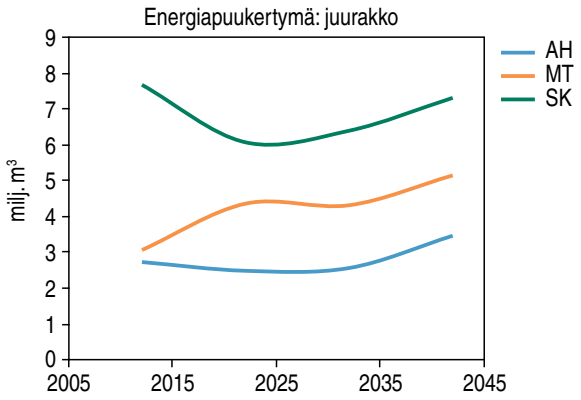
Kuva 4.2.6 Energiapuukertymien (hakkuutähteet, kanto- ja juuripuu, pienpuu) kehittyminen eri skenaarioissa. Ilmastonmuutoksen vaikutus oli vähäinen, kuvaajat on jätetty pois. Kuvaajien merkintä on kuten kuvassa 4.2.1.



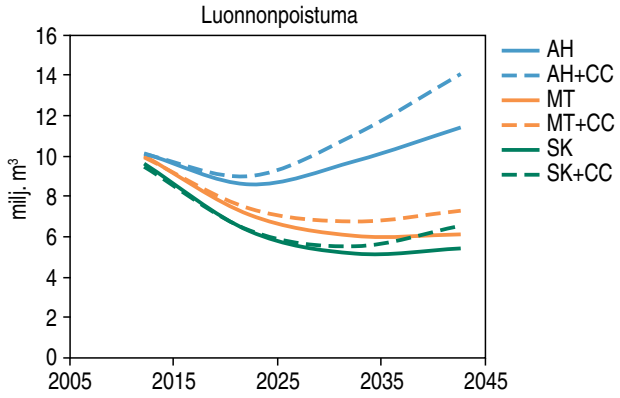
Kuva 4.2.7 Energiapuun kertymä harvennushakkuista. Ilmastonmuutoksen vaikutus oli vähäinen, kuvaajat on jätetty pois. Kuvaajien merkintä on kuten kuvassa 4.2.1.



Kuva 4.2.8 Hakkuutähteen kertymä päätehakkuualoilta. Ilmastonmuutoksen vaikutus oli vähäinen, kuvaajat on jätetty pois. Kuvaajien merkintä on kuten kuvassa 4.2.1.



Kuva 4.2.9. Kanto- ja juuripuun kertymä päätehakkuualoilta. Ilmastonmuutoksen vaikutus oli vähäinen, kuvaajat on jätetty pois. Kuvaajien merkintä on kuten kuvassa 4.2.1.



Kuva 4.2.10. Luonnonpoistuman kehitys. Kuvaajien merkintä on kuten kuvassa 4.2.2.

4.2.4 Kasvava puuston tiheys aiheuttaa puiden kuolemista

Luonnonpoistuman määrä kasvaa nopeasti, kun metsiä ei harvenneta. Alhaisimman metsien käytön skenaariossa, jossa lisäksi ilmastonmuutoksen tuoma kasvun kiihtyminen on mukana, luonnonpoistuma nousee 17 miljoonaan kuutiometriin vuodessa (luonnonpoistuma oli 4,74 miljoonaa kuutiometriä vuonna 2010) (Kuva 4.2.10). Siten puuta kuivaa pystyyn metsissämme koko metsäenergian tavoitekäytön verran enemmän vuonna 2042. Vastaavasti luonnonpoistuma pysyy lähellä nykytasoa, mikäli hakkuut toteutuisivat Suurimman kestävän tai Maltillisen puunkäytön skenaarion mukaisesti.

4.2.5 Skenaariotarkasteluiden yhteenveto

Skenaariotarkastelut osoittavat metsäenergiahuollon riippuvuuden teollisuuden ainespuuhakkuista: Jos metsäteollisuuden kotimaan puunhankinta pienenee, on tulevaisuuden metsäenergia hankittava harvennushakkuukohteista. Metsäenergian kokonaissaatavuudessa erityisesti alhaisen hakkuutason skenaario poikkeaa muista skenaarioista ja edullisimpien biomassajakeiden (hakkuutähteet ja kannot) saatavuus on alhainen. Kaikissa skenaarioissa harvennushakkuiden merkitys puunhankinnassa kasvaa tulevina vuosikymmeninä. Tämä voidaan nähdä myös signaalina korjuuteknologian tutkimus- ja kehitystyön suuntaamiselle harvennushakkuuteknologiaan.

Metsien rakenteessa tapahtuu erittäin suuria muutoksia. Puuston kokonaisvolyymi kasvaa, puuston keski-ikä nousee ja puustot ovat nykyistä tiheämpiä. Samalla metsien sisältämä hiilivarasto kasvaa erityisesti skenaariossa, jossa metsäteollisuuden puunkäyttö on alhainen ja ilmastonmuutos kiihdyttää puuston kasvua. Nämä kehitystrendit suurentavat kuitenkin metsien myrskytuhoriskiä, metsien herkkyyttä hyönteistuhoriskeille sekä mahdollisesti myös metsäpalojen riski suurenee, kun kuolleen pystypuuston määrä kasvaa. Siten hiilivarasto kasvaa, mutta ”hiilitallettajan sijoitusriski” suurenee. Olisikin kyettävä arvioimaan sitä, miten suuria nämä riskit todellisuudessa ovat ja kuinka niihin voidaan tehokkaimmin vaikuttaa.

4.3 Metsien hiilitaseet

Risto Sievänen, Aleksi Lehtonen, Paavo Ojanen ja Olli Salminen

Metsien hiilivarastot ovat puissa ja muussa kasvillisuudessa sekä maaperässä. Metsät ovat hiilen nielu, jos varastot kasvavat ja niiden vähetessä hiilen lähde. Suomen metsien puustossa hiiltä on noin 820 Tg (Liski ym. 2006), kivennäismaiden maaperässä 921 Tg (Ilvesniemi ym. 2002) ja soiden turpeessa 5600 Tg (Minkkinen 1999). Puuston kasvussa hiiltä sitoutuu biomassaan ja puista tuleva karike (kuolleet lehdet, neulaset, oksat ja juuret sekä kokonaiset kuolleet puut) kartuttaa maaperän hiilivarastoja. Puuston hiilivaraston vaihtelu on tällä hetkellä määrällisesti tärkein metsien hiilitaseeseen vaikuttava tekijä. Maaperän varastomuutokset ovat pienemmät, mutta sen sisältämät isot hiilivarastot voivat olosuhteista riippuen orgaanisen aineen hajotustoiminnan kiihtyessä aiheuttaa suuriakin päästöjä. Kivennäismaiden ja soiden maaperän hiilivarastojen kokoero johtuu karikkeen erilaisesta hajoamisnopeudesta: suon märissä, vähähappisissa oloissa kasvinosat maatuvat hyvin hitaasti kivennäismaihin verrattuna, mikä on johtanut suureen suomaiden hiilivarastoon. Aluskasvillisuudella on yleensä pieni osuus kivennäismaiden hiilenkierrossa, mutta suometsissä sen vaikutus voi olla merkittävä.

Kasvihuonekaasuraportoinnissa YK:n ilmastosopimusta ja Kioton pöytäkirjaa varten metsien hiilivarastojen muutoksia seurataan vuosittain (www.metla.fi/ghg/index-su.htm). Viimeisen viiden vuoden aikana puuston nielu on ollut 10 Tg C /v. Kivennäismaiden maaperän noin 2 Tg C /v nielu ja ojitettujen soiden maaperän vastaavan kokoinen lähde ovat likimääräisesti kumonneet toisensa. Näin ollen metsät ovat olleet kokonaisuutena noin 10 Tg C /v nielu.

Puunkäyttö vaikuttaa metsien kasvuhuonekaasutaseisiin kahdella tavalla. Ensinnäkin hakkuut vaikuttavat suoraan puuvaraston kokoon ja sen kasvuun. Toiseksi hakkuut ja hakkutähteiden korjuu energiapuuna vaikuttavat maaperään tulevaan karikesyötteeseen, joka on hiilivarastoja kasvattava tekijä. Tässä alaluvussa tarkastellaan puun käytön skenaarioiden (Alhainen, Maltillinen ja Suurin kestävä) vaikutusta metsien hiillitaseeseen. Lisäksi tarkastellaan energiapuun käytön (Risupaketti+/Risupaketti-) ja ilmastonmuutoksen vaikutuksia erikseen.

4.3.1 Menetelmä

Menetelmä, jolla hiilivarastojen muutoksia arvioitiin, oli pääpiirteissään sama, jota käytetään kasvihuonekaasuinventaariossa (Greenhouse gas emissions in Finland ... 2011). Puuston hiilivaraston muutokset lasketaan biomassafunktioiden avulla puustotiedoista. Maaperän hiilivaraston muutokset puolestaan arvioidaan puusto- ja puuston poistumatietojen avulla. Laskennassa otetaan huomioon maaperään tuleva karikesyöte, orgaanisen aineen hajoitus kivennäismailla sekä ojitettujen soiden emissiokertoimet. Menetelmää on selostettu julkaisussa Sievänen ym. (2007).

Kasvihuonekaasuraportoinnissa puuston lähtötiedot saadaan Valtakunnan metsien inventoinnin mittauksista ja hakkuutilastoista. Skenaariotarkasteluamme varten lähtötiedot tulivat kuitenkin MELA–laskelmista (alaluku 4.1). MELA–laskelmat tehtiin Etelä- ja Pohjois-Suomelle (raja kulkee noin Valtimo – Kalajoki linjalla) erikseen, mikä vastaa kasvihuonekaasuinventoinnin aluejakoa. MELA–laskelmat koskivat puuntuotannossa olevia (ensisijainen tai rajoitettu) sekä suojeltuja metsä- ja kitumaita. Kokonaispinta-ala oli 20,8 milj. ha, josta kivennäismaita oli 16,1 milj. ha ja ojitettuja soita 4,7 milj. ha.

Ilmastonmuutoksen skenaariossa vuotuinen keskilämpötila, sademäärä ja ilman hiilidioksidipitoisuus muuttuivat IPCC:n skenaarion A1B mukaisesti (alaluku 4.1).

Kivennäismailla orgaanisen aineen hajoamisen arviointiin käytettiin Yasso07 -mallia (Tuomi ym. 2009, 2011). Siinä hajoamisnopeus riippuu vuoden keskilämpötilasta, kuukausittaisten lämpötilojen vaihteluvälistä sekä vuotuisesta sadannasta. Yasso07 -malli tarvitsee arvion maaperän hiilivaraston määrästä laskelman alkuarvoksi. Varaston alkuarvo otettiin kasvihuonekaasuraportoinnin mukaisista laskelmista vuodelle 2007. Alkuvarastoa lisättiin 7 %, minkä arvioitiin ottavan huomioon skenaarioiden alun kasvihuonekaasuraportointia suuremman karikesyötteen.

Ojitettujen soiden maaperän hiilivaraston vuotuinen muutos lasketaan karikesyötteen ja turpeen hajoamisen erotuksena. Hajotus arvioidaan suotyypeittäisten (viisi eri suotyyppiä) emissiokertoimien ja suotyyppien pinta-alojen avulla (Greenhouse gas emissions in Finland ... 2011). Kasvihuonekaasuraportoinnissa turpeen hajoaminen (emissiokerroin) ei riipu puuston määrästä tai ilmasto-oloista vaan ainoastaan turvekangastyypistä. Skenaariolaskelmissamme emissiokertoimien riippuvuus puuston määrästä ja ilmasto-oloista otettiin kuitenkin huomioon, jotta laskelmiin perustuvat kasvihuonekaasuarviot olisivat turvemaiden maaperän suhteen yhdenmukaiset muiden hiilivarastoarvioiden kanssa. Ojanen ym. (2010) ovat tarkastelleet emissiokertoimien riippuvuutta puuston keskitilavuudesta ja vuoden keskilämpötilasta. Tämän tutkimuksen perusteella 10 m^3 keskitilavuuden lisäys nostaa emissiota 0,8 %:a ja yhden asteen lisäys keskilämpötilassa 13 %:a. Jos tilavuus tai keskilämpötila vähenevät emissiokertoimet vähenevät vastaavasti. Laskelmissamme näitä kertoimia sovellettiin siten, että skenaarioiden alussa (vuosi 2007) emissiokertoimet olivat kasvihuonekaasuraportoinnin mukaiset. Jos ojitettujen soiden keskitilavuus tai koko maan keskilämpötila muuttuivat skenaarioiden alun tilanteesta, emissiokertoimet muuttuivat edellä kuvatun mukaisesti.

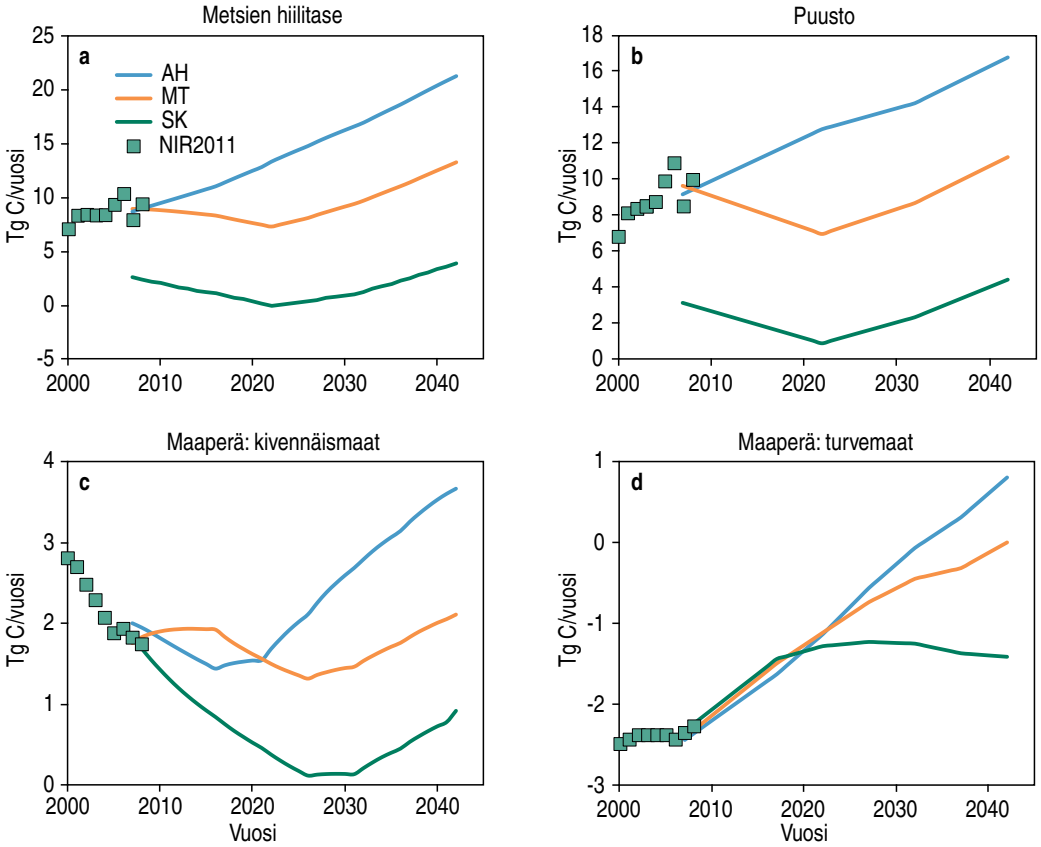
4.3.2 Puunkäyttöskenaarioiden vaikutus

Kaikissa skenaarioissa puusto on koko tarkastelujakson ajan hiilen nielu (Kuva 4.3.1b). AH ja MT skenaarioissa puuston kasvu on selvästi suurempi kuin poistuma, joten puuvarat lisääntyvät merkittävästi. Tämä näkyy puuston selkeänä nieluna (Kuva 4.3.1b). Nielu kasvaa ajan mukana, koska puuston kokonaiskasvu lisääntyy, mutta poistuma säilyy vakiotasolla (ks alaluku 4.2). SK skenaariossa puuston kasvu on vain hieman suurempi kuin poistuma ja puusto on pieni nielu (Kuva 4.3.1b).

Kivennäismaiden maaperän nielu vähenee alussa kaikissa skenaarioissa (Kuva 4.3.1c), koska maaperässä on vanhaa 1990-luvun lopun hakkuiden tuottamasta korkeasta karikemäärästä periytyvää varastoa, joka hajoaa. Tämä nielu kääntyy 10–20 vuodessa kasvuun, koska lisääntyvä puusto tuottaa yhä enemmän kariketta.

Ojitettujen soiden maaperän varastomuutokset eivät juuri eroa toisistaan skenaarioiden välillä ennen vuotta 2020 (Kuva 4.3.1d). Suot pysyvät hiilen lähteenä, lukuun ottamatta AH skenaariota, jossa ne muuttuvat skenaariojakson loppupuolella nieluksi. MT skenaariossa soiden hiililähde saavuttaa jakson lopussa nollatason. Ojitetuista soista vapautuvan hiilen määrä kuitenkin pienenee kaikissa skenaarioissa. Tämä johtuu puuston lisääntyneestä kariketuotoksesta (Kuva 4.3.2) , joka kasvattaa maaperän varastoa. SK skenaariossa kariketuotos on niin vähäinen vuoden 2025 jälkeen, että ojitettujen soiden maaperän lähde ei vähene.

MT skenaariossa on AH skenaariota noin 14 milj. m^3 suuremmat vuotuiset hakkuut. Ne aiheuttavat selvät erot metsien hiilitaseissa (Kuva 4.3.1a). Vuotuisten nielujen ero kasvaa skenaariojakson loppua kohden ollen suurimmillaan yhteensä noin 9 Tg C (Kuva 4.3.1a), josta suurin osa, runsaat 5 Tg C, on puustossa (Kuva 4.3.1b).



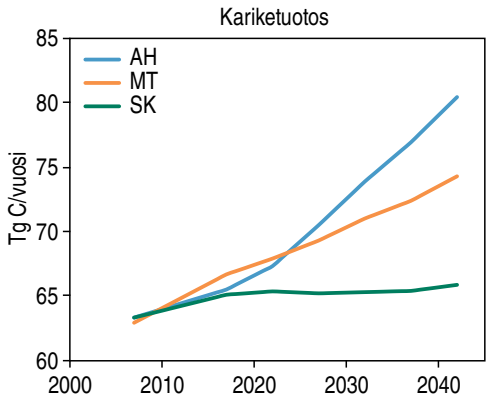
Kuva 4.3.1. Metsien (= kaikki varastot yhteensä, a), puuston (b), kivennäismaiden (c) ja ojitettujen soiden maaperän (d) hiilivarastojen muutokset eri skenaarioissa; Alhainen (sininen viiva), Maltillinen (oranssi viiva) ja Suurin kestävä (vihreä viiva) puun käyttö. Vihreät neliöt ovat kasvihuonekaasuraportoinnin vuotuiset arviot vuosina 2000–2009 vuonna 2011 tehdystä inventaariosta (Greenhouse gas emissions in Finland 2011). Positiiviset arvot tarkoittavat nielua ja negatiiviset lähdettä.

4.3.3 Kariketuotos

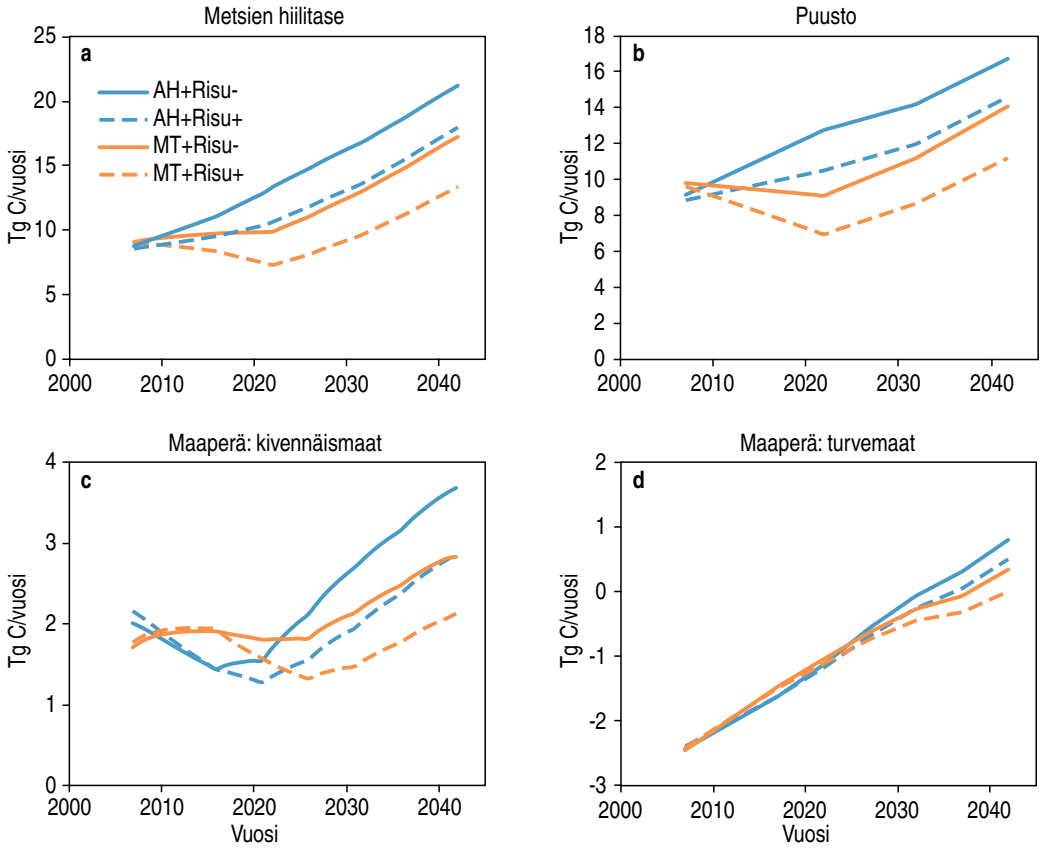
Kariketuotos, joka kasvattaa maaperän hiilivarastoja, koostuu elävästä puustosta tulevasta materiaalista (kuolleet lehdet, neulaset , oksat ja juuret tai niiden osat) sekä metsään jäävästä hakkuutähteestä (puiden latvaosat, oksat, kannot, juuret), luonnonpoistumana kuolleista puista ja aluskasvillisuuden karikkeesta (Kuva 4.3.2). Suurin kariketuotos tulee elävästä puustosta, joka on yli puolet kokonaiskarikkeesta. Tämä näkyy myös kariketuotoksen kehityksessä: skenaarioiden alussa erilaiset hakkuumäärät aiheuttavat hyvin pieniä eroja kariketuotantoon. Vasta kun puuston määrät ovat erilaiset skenaariotarkastelujakson puolivälissä, syntyy eroja myös karikkeen määrissä. Skenaariossa, jossa metsää hakataan suurimman kestävän hakkuukertymän mukaisesti, puuston määrä (Kuva 4.3.1b) eikä myöskään kariketuotos (Kuva 4.3.2) juuri kasva.

4.3.4 Energiapuun korjuun vaikutus

Energiapuun korjuu vaikuttaa metsien hiilenkiertoon kahdella tavalla: elävästä puustosta otettava energiapuu pienentää puuston määrää ja puuston nielua sekä sen kariketuotosta. Hakkuutähteistä otettu energiapuu vähentää vain kariketuotosta ja vaikuttaa näin vain maaperän varastomuutoksiin. Käytetyissä skenaariovaihtoehdoissa energiapuun vuotuisen käytön ero Risupaketti+:n ja Risupaketti-:n välillä on 8 milj. m^3. Risupaketti+ vähentää puuston ja kivennäismaiden maaperän hiilinieluja sekä AH että MT skenaariossa (Kuva 4.3.3). Keskimääräinen vähenemä on kummassakin tapauksessa likimain sama: vuotuinen kokonaisnielu vähenee noin 3,2 Tg C (Kuva 4.3.3a), puuston vuotuinen nielu vähenee noin 2,1 Tg C (Kuva 4.3.3b) ja kivennäismaiden maaperän vuotuinen nielu vähenee vuonna 2042 noin 0,8 Tg C (Kuva 4.3.3c). Ojitetuilla soilla energiapuun korjuun vaikutus maaperän hiilivaraston muutoksiin on samansuuntainen kuin puustossa, ja se alkaa näkyä selvemmin vasta vuoden 2020 jälkeen (Kuva 4.3.3d).



Kuva 4.3.2. Vuotuinen kariketuotos Alhaisen (AH, sininen viiva), Maltillisen (MT, oranssi viiva) ja Suurimman kestävän hakkuutason (SK, vihreä viiva) skenaarioissa.



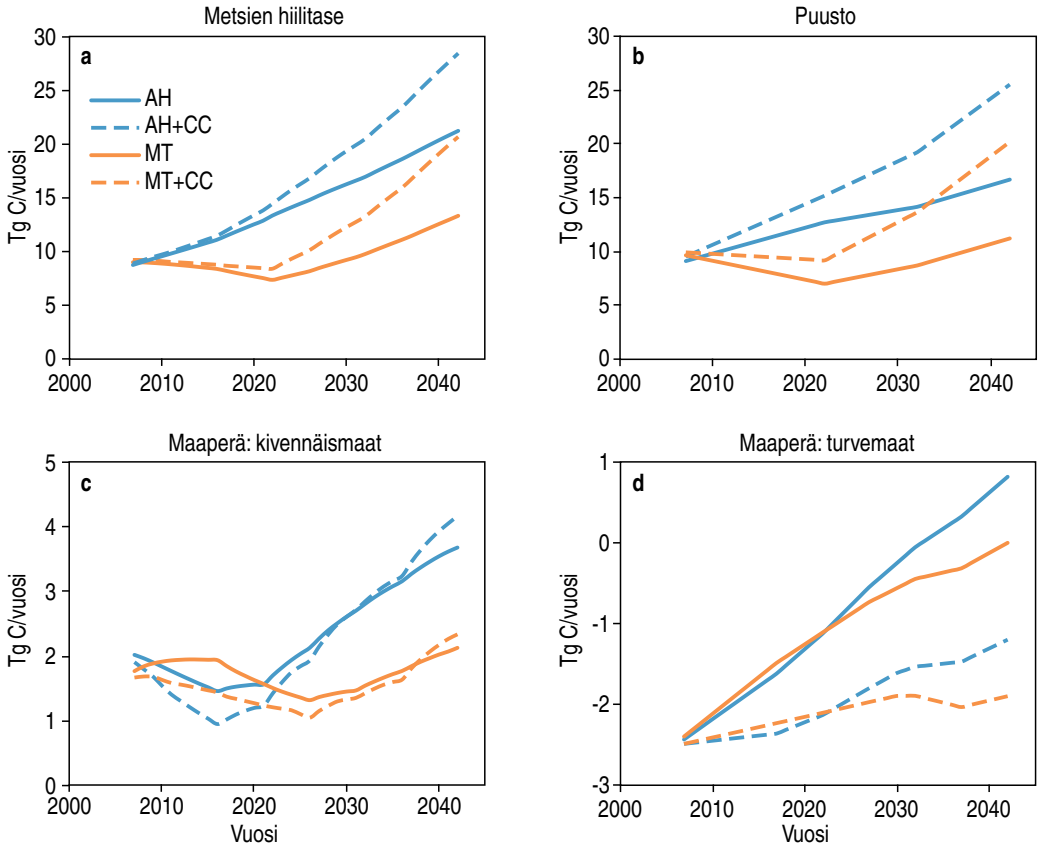
Kuva 4.3.3. Metsien (= kaikki varastot yhteensä, a), puuston (b), kivennäismaiden (c) sekä ojitettujen soiden maaperän hiilivarastojen muutokset (d) skenaarioissa, joissa puun teollisuuskäyttö oli Alhaisen (AH) tai Maltillisen (MT) skenaarion mukainen ja energiapuun käyttö oli joko runsasta (Risu+, katkoviivat) tai vähäisempää (Risu-, yhtenäiset viivat). Positiiviset arvot tarkoittavat nielua ja negatiiviset lähdettä.

4.3.5 Ilmastonmuutoksen vaikutus

Ilmastonmuutoksen mahdollista vaikutusta tarkastellaan A1B -kasvihuonekaasupäästöskenaarion pohjalta (Jylhä ym. 2009). Siinä vuoden keskilämpötila nousee noin 2 astetta vuoden 2006 tasosta ja sademäärä lisääntyy noin 6 % vuoteen 2050 mennessä (ks. Alaluku 4.1). Tutkimustulosten mukaan ilmastonmuutos lisää Suomessa puiden kasvua ja sitä kautta myös kariketuotosta. Myös karikkeen hajoaminen nopeutuu sekä kivennäis- että turvemailla, ja sademäärän lisääntymisestä johtuen hajotustoiminta nopeutuu kivennäismailla.

AH ja MT skenaariolaskelmien mukaan ilmastonmuutos lisää tulevien vuosikymmenten aikana selvästi puuston kasvua ja hiilinielu lisääntyy voimakkaasti nykyilmastoon verrattuna (Kuva 4.3.4b). Maaperän hiilivarastot sen sijaan käyttäytyvät eri tavalla. Kivennäismailla (Kuva 4.3.4c) kohoava vuoden keskilämpötila ja sadanta lisäävät karikkeen hajotusta, mikä pienentää maaperän hiilinielua vuosina 2007–2030. Tämän jälkeen puustosta tulevan karikkeen lisääntyvä määrä kompensoi lisääntyneen hajotuksen. Skenaariojakson lopussa kivennäismaiden maaperä on hieman suurempi hiilinielu kuin ilman ilmastonmuutosta molemmissa tarkastelluissa skenaarioissa.

Ojitetuilla soilla (Kuva 4.3.4d) ilmastonmuutos lisää maaperän hiililähdettä, ja suomaa säilyy hiilen lähteenä myös molemmissa puunkäyttöskenaariossa. Lähde pienenee ajan mukana, mutta erot ilman ilmastonmuutosta tehtyihin skenaarioihin ovat huomattavat. Ojitetuilla soilla lämpötilan nousu ja myöskin puuston tilavuuden lisääntyminen nopeuttavat karikkeen hajoamista, joka on suhteellisesti suurempi kuin kivennäismailla.



Kuva 4.3.4. Metsien (= kaikki varastot yhteensä, a), puuston (b), kivennäismaiden (c) sekä ojitettujen soiden (d) hiilivarastojen muutokset Alhaisen puunkäytön (AH; sininen) ja Maltillisen puunkäytön (MT; punainen) skenaarioissa (ehyet viivat) ja samoissa skenaarioissa ilmastonmuutoksen oloissa (CC, katkoviivat). Positiiviset arvot tarkoittavat nielua ja negatiiviset lähdettä.

Metsien hiilinielu (Kuva 4.3.4a) kasvaa selvästi ilmastonmuutoksen oloissa, vaikka maaperän varastomuutoksissa vaikutukset ovat päinvastaisia. Tämä johtuu siitä, että puustoon sitoutuvan hiilen määrä on selvästi suurempi kuin maaperän hiilen varastomuutokset.

4.3.6 Tulosten luotettavuudesta

Kasvihuonekaasuinventoinnin arvioiden mukaan epävarmuudet hiilen varastomuutosten estimoinnissa ovat huomattavat erityisesti maaperän osalta. Maaperän varastomuutosten virhearvion 95 % luottamusväli on likimääräisesti ±1,5× (laskettu arvo). Näin ollen luottamusväliin kuuluu aina negatiivisia ja positiivisia arvoja, joten ei voida varmasti tietää, onko kyseessä nielu vai lähde. Samat epävarmuudet kertautuvat myös skenaarioihin. MELA –ohjelmistolla tehdyille laskelmille ei voida antaa luotettavuusarvioita, ne ovat vain mahdollisia puuvarojen kehityspolkuja. Niiden toteutumisen todennäköisyyksiin ei oteta kantaa.

Tämän perusteella skenaarioita hiilivarastomuutoksista on pidettävä vain suuntaa antavina. Yksittäisiin lukuarvoihin ei kannata panna liian suurta painoa. Erityisesti on huomattava, että ojitettujen soiden emissiokertoimien riippuvuus lämpötilasta ja puuston keskirunkotilavuudesta on on toteutettu keskiarvoistaen. Tästä johtuen mallissa kaikki suotyypit kaikissa osissa maata reagoivat lämpötilaan ja runkotilavuuteen samalla tavalla.

On myös huomattava, että laskelmissa oli mukana ilmastonmuutoksen vaikutus (lämpötilan ja sadannan kautta) vain puiden kasvuun sekä orgaanisen aineen hajoamiseen. Ilmastonmuutoksen myötä erilaiset riskit (esim. kuivuusjaksot, hyönteis- tai tuulituhot) voivat toteutua. Niiden ennustaminen on vaikeaa, eivätkä ne ole laskelmissa mukana.

4.3.7 Päätelmiä

Kasvihuonekaasuinventoinnin mukaan metsät kokonaisuutena, ja myös varastoittain, ojitettujen soiden maaperää lukuunottamatta, ovat tällä hetkellä hiilinielu. Puunkäyttöpohjaisissa skenaarioissa (Alhainen ja Maltillinen) nielut säilyvät ja kasvavat tarkastelujaksolla, kun ilmastonmuutoksen vaikutuksia ei ole otettu huomioon. Ojitettujen soiden maaperä on tämänhetkisen arvion mukaan lähde ja säilyy sellaisena koko skenaariojakson, joskin lähde pienenee. Se voi muuttua nieluksi, jos puuston määrä lisääntyy voimakkaasti (Alhaisen puunkäytön skenaario). Myöskin suurimman kestävän puunkäytön skenaarion laskelmissa metsät ovat hiilinielu, joskin jaksolla 2020–2030 metsien hiilitase on melkein nolla. Ottaen huomioon laskelmiin liittyvät epävarmuudet, ei voida kuitenkaan varmuudella sanoa, olisivatko metsät suurimman kestävän käytön oloissa nielu vai lähde.

Puun vuotuisen hakkuupoistuman ero Maltillisen ja Alhaisen puunkäytön skenaarioiden välillä on noin 14 milj. m^3. Metsien hiilinielun ero näiden skenaarioiden välillä on suurimmillaan 9 Tg C. Myös Maltillisen puunkäytön skenaariossa metsät ovat selvä hiilinielu koko tarkastelujakson 2007–2042.

Energiapuun korjuun intensiteetti vaikuttaa metsien hiilinieluun. Vuotuisen korjuun lisäys 8 miljoonalla kuutiometrillä aiheuttaa nieluun noin 3 Tg C vähennyksen. Ojitettujen soiden maaperän varastomuutokseen energiapuun korjuulla on vähäinen vaikutus ennen vuotta 2020.

Lämpötilan kohoaminen ja lisääntyvä sadanta lisäävät puuston kasvua ja karikkeen hajotusta ilmastonmuutoksen skenaariossa. Puuston hiilinielu kasvaa ja kasvattaa metsien hiilinielua. Kivennäismaiden maaperän hiilinielu vähenee aluksi vuoteen 2030, mutta sen jälkeen ilmastonmuutoksen vaikutus on vähäinen. Skenaariolaskelman perusteella ojitettujen soiden maaperän hiilipäästöt vähenevät vain vähän ilmastonmuutoksen oloissa. Ottaen huomioon yksinkertaisen ja keskiarvoistavan tavan arvioida lämpötilan vaikutusta ojitettujen soiden hiilivarastomuutokseen, turvallinen johtopäätös lienee, että ilmastonmuutos tuskin lisää merkittävästi hiilen sidontaa ojitettujen soiden maaperään.

Kioton toisella velvoitekaudella vuodesta 2013 alkaen Suomen metsien hiilinielulle on ensimmäistä velvoitekautta tiukemmat vaatimukset. Tällä hetkellä Suomi hyötyy metsänielustaan 0,6 milj. t hiilidioksidia, mikä määrä voidaan vähentää päästöistä. Toiselle velvoitekaudelle on määritelty kansalliset vertailutasot, jotka vuotuisten metsänielujen on ylitettävä, jotta ne voidaan laskea hyväksi päästölaskennassa. Mikäli metsänielu jää alle vertailutason, alitus lisätään päästöihin. Suomelle vertailutaso on 20,1 milj. t hiilidioksidia (5,48 Tg C), mikä vastaa puuston noin 16 milj. m^3:n nettokasvua. Tässä alaluvussa esitettyjen skenaarioiden valossa (Kuvat 4.3.1a, 4.3.3a ja 4.3.4a) vertailutaso ylitetään kaikissa tapauksissa paitsi SK skenaariossa. Puun käytön taso, jossa metsänielu on vertailutason suuruinen, on MT ja SK skenaarioiden välissä. Vertailutaso sallii puuvarojen käytön teollisuuden raaka-aineena ja bioenergiana, mutta vähentää pelivaraa Kioton ensimmäiseen velvoitekauteen verrattuna.

Kirjallisuus

Greenhouse gas emissions in Finland 1990–2009 National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol, 15. Aprl 2011. [Verkkodokumentti] Tilastokeskus.
Saatavissa: http://www.stat.fi/tup/khkinv/ fin_nir_ 20110415.pdf [Viitattu 14.12.2011]

Kellomäki, S., Väisänen, H., 1997. Modelling the dynamics of the forest ecosystem for climate change studies in the boreal conditions. Ecol. Modell. 97: 121–140.

Matala, J., Ojansuu, R., Peltola, H., Sievänen, R ja Kellomäki, S. 2005. Introducing effects of temperature and CO_2 elevation on tree growth into a statistical growth and yield model. Ecological Modelling 181: 173–190.

Ojanen, P., Minkkinen, K, Alm, J. ja Penttilä, T. 2010 Soil–atmosphere CO_2, CH_4 and N_2O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. Forest Ecology and Management 260: 411–421

Sievänen, R., Kareinen, T., Hirvelä, H. & Ilvesniemi, H. 2007. Hakkuumahdollisuusarvioihin perustuvat metsien kasvihuonekaasutaseet. Metsätieteen aikakauskirja 4/2007: 329–339.

Tuomi, M., Thum, T., Järvinen, H, Fronzek, S., Berg, B., Harmon, M., Trofymow, J.A., Sevanto, S. and Liski, J. (2009). Leaf litter decomposition – Estimates of global variability based on Yasso07 -model. Ecological Modelling 220: 3362–3371.

Tuomi, M., Laiho, R., Repo, A. and Liski, J. 2011a. Wood decomposition model for boreal forests. Ecological Modelling 222: 709–718.

4.4 Metsät vuonna 2042 eri skenaariovaihtoehdoissa

Heikki Henttonen, Otso Huitu, Hannu Ilvesniemi, Juho Matala, Michael Müller, Raisa Mäkipää, Seppo Neuvonen, Timo Saksa, Maija Salemaa, Juha Siitonen, Tiina Tonteri, Elina Vapaavuori ja Risto Sievänen

Luvuissa 4.1–4.3 esitettyjen skenaariolaskelmien perusteella metsissä ja metsäluonnossa on mahdollista havaita muutoksia jo tarkasteluvälillä vuosina 2007–2042. Muutokset ovat suurimmat Suurimman kestävän kertymän (SK) skenaariossa, mutta myös Alhaisen puunkäytön (AH) skenaarion mukaisesti toteutettuna uudistushakkuita ja metsänuudistamista tehtäisiin seuraavien 30 vuoden aikana noin kolmella miljoonalla hehtaarilla, koska MELA-laskelmissa sovellettu neljän prosentin korkokanta tuotti kaikissa skenaarioissa ajallaan tehdyt uudistushakkuut. Seuraavassa tarkastelemme skenaariolaskelmien pohjalta, millaisia muutoksia metsissä voidaan todennäköisesti havaita eri skenaarioissa. Arviot perustuvat tutkijoiden asiantuntijanäkemyksiin metsien kasvusta, kehityksestä, biologisista vuorovaikutuksista ja häiriödynamiikasta, joiden pohjalta on pyritty hahmottamaan kuvaa skenaarioihin liittyvistä mahdollisuuksista ja riskeistä tulevaisuuden metsissä ja metsätaloudessa vuoteen 2042 mennessä. Arviot on tehty metsiä koskevien keskimääräislukujen perusteella (Alaluku 4.2).

Teemme katsauksen metsänhoitoon, metsien terveyteen, metsämaan kuntoon, metsäkasvillisuuteen ja metsien monimuotoisuuteen vuonna 2042. Skenaarioista kaksi (Alhaisen (AH) ja Maltillisen (MT) puunkäytön) perustuvat kasvua selvästi vähäisemmille hakkuille ja niissä puuvaranto ja puuston tiheys kasvavat. Näiden kahden skenaarion osalta esitämme myös arvioita, millaisia lisävaikutuksia ilmastonmuutoksella voi olla metsiin ja metsätalouteen. Suurimman kestävän kertymän (SK) tapauksessa puuvaranto ei kasva, vaan uudistus- ja käsittelypinta-alat ovat korkealla tasolla. Skenaarioiden tärkeimmät vaikutukset metsien puustotunnuksiin, metsänuudistamiseen ja energiapuukertymiin on koottu Taulukkoon 4.4.1 ja tarkemmat luonnehdinnat skenaariovaikutuksista ovat Taulukossa 4.4.2 (Liite 4.4.1).

Alhaisen puun käytön skenaariossa vuotuiset hakkuut ovat nykytasoa huomattavasti pienemmät (Taulukko 4.4.2). Samalla myös *metsänviljelyyn* liittyvä toiminta supistuu ja tarve kehittää kustannuksiltaan edullisempia luontaisia uudistamismenetelmiä kasvaa. Metsätalouden *vesistövaikutukset* ovat vähäisemmät, kun uudistus- ja maanmuokkauspinta-ala laskevat. Hakkuiden vähentyessä puuston tilavuus ja samalla myös puuston hiilisisältö kasvavat, ja metsät vanhenevat. Metsien tihentyessä ja ikääntyessä riskit sienitautien ja tuhohyönteisten aiheuttamista *tuhoista* lisääntyvät. *Ilmastonmuutos* voimistaa näitä trendejä, kun metsien kasvu, tihentyminen ja ikääntyminen sekä niistä aiheutuvat riskit seurannaisvaikutuksineen yhä kasvavat

Taulukko 4.4.1. Kolmen eri skenaariovaihtoehdon vaikutukset puustoon, metsien rakenteeseen, uudistushakkuu-, maanmuokkaus- ja metsänviljelypinta-aloihin sekä metsäbioenergian korjuupinta-aloihin.

	Vaikutus eri skenaarioissa v. 2042		
	Alhaisen puun käytön skenaario (AH)	**Maltillisen puun** käytön skenaario (MT)	**Suurimman kestävän** kertymän skenaario (SK)
Puusto ja metsien rakenne			
Puuston keskitilavuus	150–160 m^3/ha (suurempi, jos ilmastonmuutoksen aiheuttama lisäkasvu otetaan huomioon), kasvava trendi.	130–140 m^3/ha (suurempi, jos ilmastonmuutoksen aiheuttama lisäkasvu otetaan huomioon), kasvava trendi.	Pysyy nykyisessä n. 100 m^3/ha.
Metsien ikäluokat	Alle 30-v. metsien pinta-ala pienempi kuin nykyään.	Alle 30-v. metsien pinta-ala pienempi kuin nykyään.	Alle 40-v. metsien pinta-ala suurempi kuin nykyään.
	Yli 60-v. metsien pinta-ala suurempi kuin nykyään.	Yli 60-v. metsien pinta-ala suurempi kuin nykyään.	Yli 50-v. metsien pinta-ala pienempi kuin nykyään.
Taimikoiden määrä	Lähes nykyisellä tasolla.	Lähes nykyisellä tasolla.	Lähes kaksinkertainen nykyiseen verrattuna.
Metsänuudistaminen			
Uudistushakkuuala	90 000 ha/v, selvästi viime vuosia pienempi.	110 000 ha/v, hieman viime vuosia pienempi.	210 000 ha/v, viime vuosia suurempi.
Maanmuokkausala	80 000 ha/v, viime vuosia pienempi.	100 000 ha/v, viime vuosien tasolla.	Lähes 200 000 ha/v, paljon suurempi kuin viime vuosina.
Metsänviljelyala	n. 80 000 ha/v, viime vuosia pienempi.	Hieman alle 90 000 ha/v, viime vuosia pienempi.	n.180 000 ha/v, selvästi nykyistä suurempi.
Energiapuun potentiaali ja korjuu			
Latvusbiomassan määrä/ha	Kasvaa nykyisestä.	Kasvaa nykyisestä.	Nykyisellä tasolla.
Latvusbiomassan korjuuala	70 000 ha/v	90 000 ha/ha	165 000 ha/ha
Latvusbiomassan korjuumäärä	9–10 milj. m^3/v	12–13 milj. m^3/v	8–9 milj. m^3/v
Kantojen korjuumäärä	3–4 milj. m^3/v	5 milj. m^3/v	7–8 milj. m^3/v
Energiapuuharvennuksen kertymä	Hehtaarikohtainen kertymä ennallaan.	Hehtaarikohtainen kertymä ennallaan.	Hehtaarikohtainen kertymä ennallaan.
Energiapuuharvennusten pinta-ala	95 000 ha/v	130 000 ha/v	110 000 ha/v
Energiapuuharvennusten korjuumäärä	11–12 milj. m^3 /v	15–16 milj. m^3 /v	10–11 milj. m^3/v

Muutokset metsien ikärakenteessa ja tiheydessä heijastuvat myös metsien *aluskasvillisuuteen*: varpukasvit runsastuvat, seurauksena mahdollisesti marjasatojen lisääntyminen. Valoa suosivat heinät ja ruohot puolestaan vähenevät. Sammalet ja jäkälät toisaalta hyötyvät metsien ikääntymisestä, mutta toisaalta metsien ja varpukasvillisuuden tihentymisestä aiheutuva kasvillisuuskilpailu voi myös heikentää niiden elinmahdollisuuksia. Tiheissä metsissä ei myöskään löydy kasvutilaa nykymetsiin kuulumattomille kasvilajeille, jotka voisivat lisätä kasvilajiston monimuotoisuutta ja sopeutumista muuttuvaan ilmastoon. Muuttuvassa ilmastossa kevään varhentuminen voi johtaa mustikan ja mustikkasatojen vähenemiseen, kun riskit kukinnan epäonnistumisesta keväthallojen tai pölyttävien hyönteisten puutteen vuoksi kasvavat. Ilmaston muuttuessa kasvillisuuskilpailu vähentää myös heinien, ruohojen ja jäkälien määriä, kun puolestaan kuivuutta hyvin sietävät sammalet voivat hyötyä ilmastonmuutoksesta ja lisääntyvistä syksyn sateista.

Metsien tihentymis- ja ikääntymiskehityksestä johtuen lahopuun määrä kasvaa luontaisten häiriöiden lisääntyessä. Tämä ylläpitää edellytyksiä lahopuulajiston menestymiselle ja edistää metsien *monimuotoisuutta*. Nämä muutokset kompensoivat energiapuun korjuusta aiheutuvaa lahopuun määrän vähenemistä. Ilmastonmuutoksen aiheuttamat häiriöt edistävät näitä kehitystrendejä. Mustikkavarvikoiden runsastuminen ikääntyvissä metsissä luo myös edellytykset kasvinsyöjälajiston menestymiselle.

Maltillisen puun käytön skenaario myötäilee alhaisen puun käytön skenaarion kehityspolkuja, mutta tavoitteet aines- ja energiapuun käytön osalta ovat suuremmat. Metsien käyttö bioenergian tuotannossa kasvaa ilmasto- ja energiapoliittisten päätösten mukaisesti, kun taas uudistushakkuissa on nykytilanteeseen nähden laskeva trendi. Tästä johtuen puuston keski-ikä kasvaa hieman nykyisestä ja puusto on tilavuudeltaan 1,3–1,4-kertainen nykytilanteeseen verrattuna. *Ilmastonmuutos* lisää metsien kasvua, minkä vuoksi puuston keskitilavuus yhä kasvaa. Uudistushakkuiden väheneminen merkitsee *metsänviljelyyn* liittyvien toimien ja metsänviljelypinta-alojen pienemistä nykyiseen verrattuna. Bioenergian tuotannon ja korjuun lisääntyessä *metsämaan* rikkoutuminen voimistuu, seurauksena vesakoituminen ja vesakonhoitotöiden lisääntyminen. Intensiivinen bioenergian korjuu kasvattaa metsätalouden *vesistökuormitusta*, jota toisaalta kompensoi hakkuupinta-alojen vähentyminen.

Metsien *terveyden* osalta tämän skenaarion aiheuttamat riskit liittyvät metsien tihentymiseen ja vanhenemiseen ja ovat yhtenevät alhaisen puun käytön skenaarion kanssa. Myös metsien *aluskasvillisuuden* osalta vaikutukset ovat pääpiirteissään samanlaiset. Tässä skenaariossa, intensiivisemmän energiapuun korjuun vuoksi, mustikkakasvustojen ja siten myös mustikkasatojen voidaan olettaa vähenevän sekä lisäävän korjuualoilla valoa suosivien heinien ja ruohojen runsastumista. *Ilmastonmuutoksen* aiheuttamat riskit metsän terveydelle ja aluskasvillisuuden menestymiselle ovat alhaisen puun käytön skenaarion mukaiset.

Suurimman kestävän kertymän skenaariossa metsien käyttö ainespuuksi ja metsäbioenergiaksi on selvästi nykyistä suurempi, ja puuta korjataan runsaasti myös suometsistä. *Metsänhoitotöiden* koneellistaminen on tarpeen kustannus- ja työvoimapoliittisten syiden vuoksi. Metsät nuortuvat, mikä edistää metsien kykyä sopeutua muuttuvaan ympäristöön, Toisaalta kuitenkin hakkuiden lisääntyessä *puustovaurio- ja ympäristöriskit* kasvavat, minkä vuoksi metsänhoidossa ja puunkorjuussa on kehitettävä puustoa ja ympäristöä suojelevia toimintatapoja. Metsänviljelypinta-alojen lisääntyessä myös taimituhoriskit kasvavat ja *ilmastonmuutoksesta* johtuen riskit ovat todennäköisesti yhä suuremmat. Metsien *aluskasvillisuus* muuttuu: varpukasveista mustikkavarvikot ja mustikkasadot kärsivät, kun taas puolukka palautuu nopeammin uudistushakkuun jälkeen. Heinät ja ruohot lisääntyvät uudistusaloilla, jotka mahdollistavat myös *uusien lajien*, myös metsälajistoon kuulumattomien rikkakasvien ja vieraslajien leviämisen. Sammalet ja jäkälät kärsivät metsien intensiivisestä käsittelystä. Intensiivisen metsien käytön vuoksi *lahopuun* määrä metsissä vähenee ja lahopuusta riippuvaisten lajien kannat taantuvat.

Liite 4.4.1

Taulukko 4.4.2. Kolmen eri skenaariovaihtoehdon ja ilmastonmuutoksen (skenaarioissa Alhainen ja Maltillinen) vaikutukset metsiin, metsien terveyteen, aluskasvillisuuteen ja metsien monimuotoisuuteen.

Aihealue	Muuttuja	Vaikutus eri skenaarioissa v. 2042		
		Alhaisen puun käytön skenaario (AH)	**Maltillisen puun** käytön skenaario (MT)	**Suurimman kestävän** käytön skenaario (SK)
Metsänhoito	*Metsänuudistus kangasmailla*	Puun kysynnän pienentyessä investoinnit metsänuudistamiseen tulevat vähemmän kannattavaksi ja luontaisen uudistamisen osuus kasvaa (myös kuusen uudistamisessa).	Biomassan korjuun myötä uudistusalojen maanpintaa rikotaan voimakkaasti mikä lisää vesakkoja ja taimikoiden raivaustarvetta. Energiapuun ja ainespuun integroitu kasvatus yleistyy.	Metsien käyttöä pyritään lisäämään metsäpoliittisin keinoin ja siirrytään koneelliseen metsänviljelyyn ja taimikonhoitoon.
	Taimituotanto	Pienenee noin kolmanneksen nykyisestä.	Pienenee hieman nykyisestä.	Kasvaa kolmanneksen nykyisestä.
	Suometsien uudistus	Suometsien edullisten uudistamismenetelmien (luontainen, kylvö) menetelmäkehityksen tarve lisääntyy, kun investointihalukkuus kalliiseen metsänviljelyyn pienenee.	Runsaspuustoisten ojitettujen korpimetsien päätehakkuut lisääntyvät, Turvemaiden uudistamis- ja puunkorjuumenetelmien kehittämisen tarve lisääntyy.	Suometsistä korjataan puuta runsaasti, ja erityisesti sulan maan aikana tehtävän puunkorjuun menetelmien ja kaluston kehittämiselle on suuri tarve. Latvusbiomassaa korjataan runsaasti myös turvemaan kuusivaltaisilta päätehakkuualoilta, mistä seuraa tarve kehittää menetelmiä ravinnetalouden hoitoon.
	Metsätalouden vesistövaikutukset	Vähenevät, kun metsänuudistamis- ja maanmuokkauspinta-alat pienenevät.	Vähenevät, kun metsänuudistamis- ja maanmuokkauspinta-alat pienenevät. Toisaalta kantojen noston aiheuttamat ympäristövaikutukset kasvavat.	Vaikutuksien hallitsemiseksi erityisesti turvemaiden metsänhoitokäytäntöjä on kehitettävä ja minimoitava kantojen noston aiheuttamat ympäristövaikutukset.
Metsien terveys	*Metsien elinvoimaisuus*	Metsien kyky reagoida ympäristömuutoksiin heikkenee ja alttius metsätuhoille kasvaa kun keskitilavuus ja keski-ikä kasvavat.	Energiapuuharvennuksien laadun merkitys korostuu. Metsien kyky reagoida ympäristömuutoksiin heikkenee ja alttius metsätuhoille kasvaa.	Ikäjakaumaltaan ja puulajisuhteiltaan monipuoliset metsät kykenevät sopeutumaan ympäristömuutoksiin. Lisääntyneiden hakkuiden vuoksi on kiinnitettävä erityistä huomiota metsien terveyttä edistäviin toimintatapoihin.
	Versotaudit	Sekä metsien tihentyminen että *ilmastonmuutos* lisäävät versotauteja.	Sekä metsien tihentyminen että *ilmastonmuutos* lisäävät versotauteja	Ei vaikutuksia metsien tiheyteen eikä siten niiden versotautialttiuteen, mutta *ilmastonmuutos* lisää versotauteja.
	Lahottajasienten aiheuttamat tuhot	Lahottajasienten aiheuttamat tuhot lisääntyvät metsien ikääntyessä. *Ilmastonmuutos* lisää juurikäpätuhoja.	Lahottajasienten aiheuttamat tuhot lisääntyvät metsien ikääntyessä. *Ilmastonmuutos* lisää juurikäpätuhoja.	Puuston keski-ikä laskee, mikä vähentää lahottajien aiheuttamia tuhoja. *Ilmastonmuutos* kuitenkin lisää juurikäpätuhoja ja sen vaikutus tulee olemaan suurempi.
	Myyrätuhot	Metsänviljelypinta-alojen väheneminen vähentää taimituhojen kokonaismäärää ja taimikkokohtainen tuhoriski pienenee.	Metsänviljelypinta-alojen väheneminen vähentää taimituhojen kokonaismäärää ja taimikkokohtainen tuhoriski pienenee.	Metsänviljelypinta-alojen lisääntyminen lisää taimituhojen kokonaismäärää ja taimikkokohtainen tuhoriski kasvaa.

Liite 4.4.1 jatkuu

Aihealue	Muuttuja	**Taulukko 4.4.2 jatkuu.**		
		Vaikutus eri skenaarioissa v. 2042		
		Alhaisen puun käytön skenaario (AH)	**Maltillisen puun** käytön skenaario (MT)	**Suurimman kestävän** käytön skenaario (SK)
Metsien tervyys	*Hirvieläintuhot hirvieläinkantojen pysyessä nykytasolla*	Taimikkokohtainen tuhoriski ja tuhojen vakavuus kasvavat vähenevissä taimikoissa.	Taimikkokohtainen tuhoriski ja tuhojen vakavuus kasvavat vähenevissä taimikoissa.	Taimikkopinta-alan lisääntyessä kuviokohtaiset tuhot vähenevät.
	Hyönteistuhot	Puuston keski-iän kasvaessa kirjanpainaja- ja pilkkumänty-pistiäistuhojen riski kasvaa, mutta ruskomäntypitiäistuhojen riski laskee. *Ilmastonmuutos* voi lisätä erityisesti kirjanpainaja- ja ruskomänty-pistiäistuhojen riskiä.	Puuston keski-iän kasvaessa kirjanpainaja- ja pilkkumänty-pistiäistuhojen riski kasvaa; myös *ilmastonmuutos* ja myrskytuhot lisäävät tuho-riskejä.	Puuston keski-iän laskiessa kirjanpainaja- ja pilkkumänty-pistiäistuhojen riski pienenee, mutta *ilmastonmuutos* voi lisätä tuhoriskejä. Metsänviljelypinta-alan kasvu lisää tukkimiehen-täi- ja juuriniluri tuhojen määrää.
Metsäkasvillisuus	*Varvut*	Peittävyys suurenee merkittävästi nuorten metsien pinta-alan vähentyessä ja varttuneiden metsien pinta-alan kasvaessa. *Ilmastomuutos*: Keväthallat ja kuivat kesät voivat hidastaa mustikan runsastumista, mutta eivät vaikuta puolukkaan.	Peittävyys suurenee jonkin verran nuorten metsien pinta-alan vähentyessä ja varttuneiden metsien pinta-alan kasvaessa. Mustikka kärsii hakkuista ja energiapuun korjuusta enemmän kuin puolukka. *Ilmastomuutos*: Keväthallat ja kuivat kesät voivat hidastaa mustikan runsastumista, mutta eivät vaikuta puolukkaan.	Varpujen peittävyys pienenee nuorten metsien pinta-alan kasvaessa ja varttuneiden metsien pinta-alan vähentyessä.
	Marjasadot	Varpujen runsastuessa niiden marjasadot suurenevat. Puuston varjostuksen lisääntyminen heikentää etenkin mustikkasatoa. *Ilmastonmuutos*: Kevään aikaistuminen voi lisätä keväthallojen riskiä ja pölytyksen epäonnistumista mustikalla. Myös kesän kuivuudet	Varpujen runsastuessa niiden marjasadot suurenevat jonkin verran. Intensiivinen energiapuun korjuu pienentää marjasatoja. *Ilmastonmuutos*: Kevään aikaistuminen voi lisätä keväthallojen riskiä ja pölytyksen epäonnistumista	Uudistushakkuupinta-alan kas-vaessa erityisesti mustikkasato pienenee.
	Heinät	Valoa suosivien heinien peittävyys pienenee nuorten metsien ja uudistusalojen pinta-alojen vähentyessä. *Ilmastomuutos*: Varttuneiden metsien lisääntynyt tilavuus (varjostus) ja pitkäaikainen kuivuus vähentävät heiniä.	Valoa suosivien heinien peittävyys pienenee nuorten metsien ja uudistusalojen pinta-alojen vähentyessä. Energiapuun korjuu uudistusaloilla luo heinille kasvupaikkoja. *Ilmastomuutos*: Varttuneiden metsien lisääntynyt tilavuus (varjostus) ja pitkäaikainen kuivuus vähentävät heiniä.	Heinien peittävyys suurenee selvästi valon lisääntyessä, koska uudistushakkuupinta-alat kasvavat ja nuorten ikäluokkien pinta-ala kasvaa.
	Ruohot	Valoa suosivat ruohot vähenevät nuorten metsien osuuden pienentyessä ja varttuneiden metsien osuuden suurentuessa. *Ilmastonmuutos*: Metsien lisääntynyt tilavuus (varjostus) ja kuivat kesät vähentävät ruohoja. Jos lämpötilan nousu lisää ravinteiden saatavuutta maaperässä, ruohot lisääntyvät edellyttäen, että kosteutta ja valoa on riittävästi.	Valoa suosivat ruohot vähenevät nuorten metsien osuuden pienentyessä ja varttuneiden metsien osuuden suurentuessa. Myös energiapuun korjuu vähentää ruohoja. *Ilmastonmuutos*: Metsien lisääntynyt tilavuus (varjostus) ja kuivat kesät vähentävät ruohoja. Jos lämpötilan nousu lisää ravinteiden saatavuutta maaperässä, ruohot lisääntyvät edellyttäen, että kosteutta ja valoa on riittävästi.	Ruohot lisääntyvät selvästi valon lisääntyessä, koska uudistushakkuupinta-alat kasvavat ja nuorten ikäluokkien pinta-ala kasvaa.

Liite 4.4.1 jatkuu

Aihealue	Muuttuja	**Taulukko 4.4.2 jatkuu.**		
		Vaikutus eri skenaarioissa v. 2042		
		Alhaisen puun käytön skenaario (AH)	**Maltillisen puun** käytön skenaario (MT)	**Suurimman kestävän** käytön skenaario (SK)
Metsäkasvillisuus jatkuu	*Sammalet*	Varjoisilla kasvupaikoilla viihtyvät sammalet lisääntyvät nuorten metsien osuuden pienentyessä ja varttuneiden metsien osuuden suurentuessa. Varpujen runsastuminen voi kuitenkin vähentää sammalia. *Ilmastomuutos*: Sammalet sietävät hyvin kesän kuivia jaksoja ja hyötyvät sademäärien lisääntymisestä varsinkin syksyisin.	Varjoisilla kasvupaikoilla viihtyvät sammalet lisääntyvät jonkin verran nuorten metsien osuuden pienentyessä ja varttuneiden metsien osuuden suurentuessa. Energiapuun korjuu kuitenkin vähentää sammalia. *Ilmastomuutos*: Sammalet sietävät hyvin kesän kuivia jaksoja ja hyötyvät sademäärien lisääntymisestä varsinkin syksyisin.	Sammalet vähenevät selvästi, koska uudistushakkuupinta-alat ja nuorten metsien pinta-alat lisääntyvät.
	Jäkälät	Poronjäkälät hyötyvät metsien ikääntymisestä, mutta samanaikainen puuston tilavuuden (varjostuksen) lisääntyminen johtaa niiden peittävyyden vähentymiseen Etelä-Suomessa. Pohjois-Suomessa jäkälien määrän muutokset riippuvat paljolti porotalouden kehityksestä. *Ilmastonmuutos*: Jäkälät vähenevät sammalien ja muun kasvillisuuden kilpailupaineen vuoksi.	Jäkälät vähenevät Etelä-Suomessa sekä puuston tilavuuden (varjostuksen) lisääntymisen että energiapuun korjuun vuoksi, vaikka ne hyötyvät metsien ikääntymisestä. Pohjois-Suomessa jäkälien määrän muutokset riippuvat paljolti porotalouden kehityksestä. *Ilmastonmuutos*: Jäkälät voivat vähentyä sammalien ja muun kasvillisuuden kilpailupaineen vuoksi.	Jäkälät vähenevät metsien intensiivisen käsittelyn vuoksi. Pohjois-Suomessa jäkälien määrän muutokset riippuvat paljolti porotalouden kehityksestä.
	Metsäkasvillisuuteen kuulumattomat lajit	Löytävät vain vähän kasvupaikkoja, jos aluskasvillisuus pysyy yhtenäisenä ja sulkeutuneena. *Ilmastonmuutos*: Leudot talvet ja maaperän ravinteiden määrän lisääntyminen lisäävät uusien lajien leviämisen todennäköisyyttä hiukan.	Maanpinnan rikkoutuminen energiapuun korjuussa mahdollistaa metsäkasvillisuuteen kuulumattomien lajien, esim. rikkakasvien, ja mahdollisesti myös vieraslajien, leviämisen. *Ilmastonmuutos*: Uusien lajien leviämisen todennäköisyys lisääntyy selvästi.	Suuret metsänuudistamispinta-alat mahdollistavat metsäkasvillisuuteen kuulumattomien lajien, esim. rikkakasvien, ja mahdollisesti myös vieraslajien, leviämisen.

Liite 4.4.1 jatkuu

Aihealue	Muuttuja	**Taulukko 4.4.2 jatkuu.**		
		Vaikutus eri skenaarioissa v. 2042		
		Alhaisen puun käytön skenaario (AH)	**Maltillisen puun** käytön skenaario (MT)	**Suurimman kestävän** käytön skenaario (SK)
Metsien monimuotoisuus	*Lahopuusta riippuvaiset lajit (saproksyylit)*	Keskimäärin vanhemmissa ja runsaspuustoisemmissa metsissä muodostuu nykyistä enemmän lahopuuta erilaisten luontaisten häiriöiden (myrskytuhot, kaarnakuoriaisten ja lahottajasienten aiheuttama kuolleisuus) seurauksena. Nämä tekijät kompensoivat energiapuun korjuun lahopuuta vähentävää vaikutusta. Useimpien lahopuusta riippuvaisten lajien (mukaan lukien uhanalaiset lajit) kannat pysyvät ennallaan tai kasvavat. Erityisesti kuusilahopuusta riippuvaisten uhanalaisten lajien määrä saattaa pienentyä. *Ilmastonmuutos*: Lisää häiriöiden toistuvuutta ja voimakkuutta, lisää lahopuuston muodostumista.	Keskimäärin hieman vanhemmissa ja runsaspuustoisemmissa metsissä muodostuu nykyistä enemmän lahopuuta. Tämä kompensoi jossain määrin nykyistä selvästi laajemman energiapuu korjuun lahopuuta vähentävää vaikutusta. Useimpien lahopuusta riippuvaisten lajien kannat pysyvät ennallaan. Erityisesti avoimia ympäristöjä suosivat, kantoja elinympäristönään käyttävät lahopuulajit saattavat kuitenkin taantua tai uhanalaistua, ellei säästöpuustoa jätetä riittävästi. *Ilmastonmuutos*: Lisää häiriöiden toistuvuutta ja voimakkuutta, lisää lahopuuston muodostumista.	Keskimäärin nuoremmissa metsissä muodostuu nykyistä vähemmän lahopuuta. Voimaperäinen kantojen korjuu ja maanmuokkaus vähentävät voimakkaasti lahopuun määrää uudistusaloilla ja niistä kehittyvissä nuorissa metsissä. Useimpien lahopuusta riippuvaisten lajien kannat taantuvat. Uhanalaisten lahopuusta riippuvaisten lajien määrä (nyt noin 550 lajia) voi kasvaa nopeasti yli 1 000 lajiin. *Ilmastonmuutos*: Vaikuttaa lahopuuston muodostumiseen vähemmän kuin edellisissä skenaarioissa.
	Kasvinsyöjät (herbivorit)	Metsälajistoon kuuluvien kasvinsyöjien lajirikkauteen vaikuttavat eniten mustikan, lehtipuiden sekä ruoholajiston peittävyys. Mustikan runsastuminen lisää siitä riippuvaisten kasvinsyöjälajien runsauksia. Energiapuun korjuulla ei merkittäviä vaikutuksia kasvinsyöjälajistoon.	Ei oleellisia eroja edelliseen skenaarioon verrattuna.	Nykyistä suurempi uudistushakkuupinta-ala ja selvästi laajamittaisempi maanmuokkaus ja kantojen korjuu vähentävät selvästi mustikan ja muiden varpujen peittävyyttä ja samalla niistä riippuvaista lajistoa. Metsäkasvilajistoon kuulumattomien rikka- ja vieraskasvilajien myötä myös kasvinsyöjälajisto muuttuu varsinkin uudistusaloilla.
	Maaperäeliöt	Ei tunnistettuja pitkän aikavälin vaikutuksia lajistoon.	Ei tunnistettuja pitkän aikavälin vaikutuksia lajistoon.	Ei tunnistettuja pitkän aikavälin vaikutuksia lajistoon.