



SUOMEN
ILMASTOPANEELI
The Finnish Climate
Change Panel

ILMASTONMUUTOS JA METSÄTUHOT – ANALYYSI
ILMASTON LÄMPENEMISEN SEURAUKSISTA SUOMEN
OSALTA

ANTTI ASIKAINEN, HELI VIIRI, SEPPÖ NEUVONEN, SEPPÖ NEVALAINEN, JUSSI
LINTUNEN, JANI LATURI, JUSSI UUSIVUORI, ARI VENÄLÄINEN, ILARI
LEHTONEN, KIMMO RUOSTEENOJA

Suomen ilmastopaneeli
Raportti 1/2019

Viittausohje

Asikainen, A., Viiri, H., Neuvonen, S., Nevalainen, S., Lintunen, J., Laturi, J., Uusivuori, J., Venäläinen, A., Lehtonen, I., & Ruosteenoja, K., 2019. Ilmastomuutos ja metsätuhot – analyysi ilmaston lämpenemisen seurauksista Suomen osalta. Suomen ilmastopaneelin raportti 1/2019.

Lisätiedot:

info@ilmastopaneeli.fi

Sisälllys

1. Ilmastonmuutos ja metsätuhot – analyysi ilmaston lämpenemisen vaikutuksista metsätuhoihin ja metsien ilmastoviisaaseen käyttöön Suomessa.....	1
2. Suomen ilmasto tulevina vuosikymmeninä abioottisten ja bioottisten metsätuhojen näkökulmasta	4
Ilmastonmuutoksen arviointi.....	4
<i>Raja-arvot allittavien lämpötilojen esiintyminen.....</i>	4
3. Miten bioottiset tuhot vaikuttavat hiilitasaisiin?	12
4. Ilmaston lämpenemisen vaikutusmekanismeja metsätuhoihin.....	15
5. Suomen metsissä esiintyneet tuhot.....	18
6. Massiivisia hyönteistuhoja Pohjois-Amerikassa	21
6.1. Kaarnakuoriaisten aiheuttamat tuhot.....	21
6.2. Lehtiä tai neulasia syövien hyönteisten aiheuttamat tuhot.....	24
7. Tärkeimmät abioottiset ja bioottiset tuhot Suomessa ja lähialueilla ilmastonmuutoksen näkökulmasta.....	26
7.1. Havumetsien tuhot.....	26
<i>Kirjanpainaaja.....</i>	26
<i>Ytimennävertäjät.....</i>	29
<i>Mäntypistiäiset.....</i>	30
<i>Havununna – tulevaisuuden metsätuholainen Suomessa?.....</i>	34
<i>Tukkimiehentäituhot ja ilmastonmuutos.....</i>	36
<i>Juurikäävät malliorganismina</i>	38
<i>Versosuma</i>	41
<i>Uusia potentiaalisia havupuiden tauteja</i>	42
<i>Hirvieläintuhot muuttuvassa ilmastossa.....</i>	45
<i>Miten ilmastonmuutos vaikuttaa myyrätuhoihin?.....</i>	48
7.2. Lehtimetsien tuhot.....	51
<i>Tunturi- ja hallamittari.....</i>	51
<i>Lehtinunna</i>	54
<i>Lehtipuita uhkaavat sienitaudit.....</i>	55
8. Metsätuhojen markkinareaktiot: Skenaariotarkastelu.....	56
8.1. Johdanto.....	56
8.2. Metsätuhot ja yhteiskunta.....	56
<i>Metsätuhojen luokittelu.....</i>	56
<i>Metsänomistajan reaktiot.....</i>	56
<i>Yhteiskunnan rooli.....</i>	57
8.3. Mallitarkastelu.....	58
<i>Tarkastelun rajaus.....</i>	58
<i>Skenaariot.....</i>	58
<i>Malli.....</i>	59
8.4. Tulokset.....	59
<i>Hakkuuvaikutukset</i>	59
<i>Puustovaikutukset.....</i>	61
8.5. Johtopäätökset.....	65
<i>Päätelmät.....</i>	65
<i>Tietotarpeet.....</i>	65
9. Kuinka suuri riski massiivisten metsätuhojen esiintymiselle on Suomessa?	67
10. Loppupäätelmät.....	69

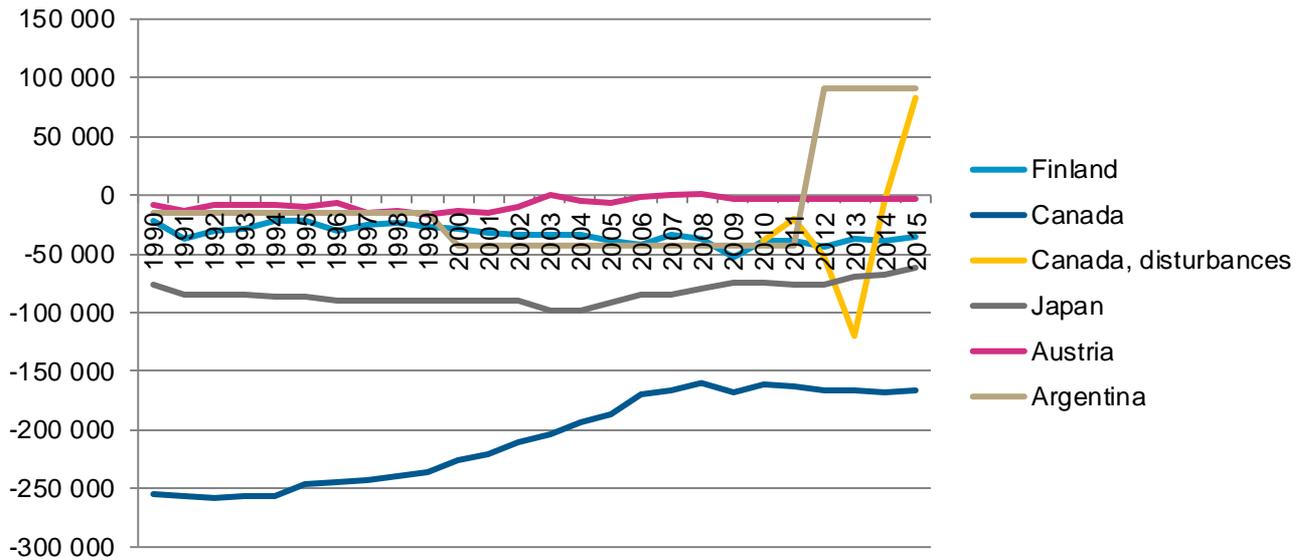
1. ILMASTONMUUTOS JA METSÄTUHOT –ANALYYSI ILMASTON LÄMPENEMISEN VAIKUTUKSISTA METSÄTUHOIHIN JA METSIEN ILMASTOVIISAASEEN KÄYTTÖÖN SUOMESSA

Antti Asikainen

Pariisin ilmastopöytäkirjassa maankäyttösektorin hiilinielut on nostettu tärkeään asemaan maiden ja koko maapallon ilmastomuutoksen hillinnän välineinä. EU:n jäsenmaat, komissio ja parlamentti pääsivät kolmikantaneuvotteluissaan 14.12.2017 alustavaan sopuun EU:n LULUCF-asetuksesta eli siitä, miten hiilinielut ja metsien ja maankäytöstä aiheutuvat päästöt otetaan huomioon EU:n ilmastotavoitteissa vuoteen 2030 saakka. Siten EU:n ilmastopolitiikassa maankäyttösektorista tulee oleellinen osa kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamista koskevaa keinovalikoimaa. Koska maankäyttösektori nielee vuositasolla noin kolmanneksen kasvihuonekaasupäästöistä, on sillä jo nyt suuri merkitys globaalin ilmaston kehittymiselle. Samalla kun maankäyttösektorille on asetettu kunnianhimoisia tavoitteita, uhkat sekä kasvillisuuden että maaperän hiilivarastojen pysyvyydelle ovat kasvaneet. Ilmastomuutos nähdään yhtenä suurimmista uhkista, jotka voivat heikentää kasvillisuuden ja erityisesti metsien kykyä sekä sitoa että pidättää hiiltä. Laajat abiottiset metsätuhot ja hyönteisten sekä patogeenien aiheuttamat tuhot ovat yleistyneet ja esimerkiksi sään ääri-ilmiöiden seurauksena myrskyjen, kuivuuden ja metsäpalojen arvioidaan edelleen lisääntyvän merkittävästi.

Ilmastopaneelin toukokuussa 2017 julkaistussa metsäraportissa todettiin, että muuttuvista olosuhteista aiheutuvat metsien hiilivaraston pysyvyyteen liittyvät riskit ja niiden vaikutusten suuruusluokka olisi selvítettävä, sillä bioottisten ja abiottisten tuhojen vaikutus metsien hiilensidontakapasiteettiin on merkittävä, ja sen on ennustettu edelleen voimistuvan (Schelhaas ym. 2014; Seidl ym. 2014, 2017; Gauthier ym. 2015). Pohjois-Amerikasta on esimerkkejä massiivisista hyönteistuhousta (aiheuttajina mm. vuoristoniluri, kuusikäriäiset) kymmenien miljoonien hehtaarien alueilla (Kurz ym. 2008, 2012; Hicke ym. 2012). Hyönteistuhojen ja niitä seuranneiden metsäpalojen vaikutus näkyy myös Kanadan talousmetsien hiilitaseissa (kuva 1.1). Bioottisten tuhojen vaikutusten metsien hiilivarastoihin on arvioitu olevan karkeasti suuruusluokaltaan Pohjois-Amerikassa (USA & Kanada) 71 Mt C / vuosi ja Euroopassa 24 Mt C / vuosi, mutta havaintoaineistoon liittyvä epävarmuus on suuri erityisesti Euroopan osalta (Kautz ym. 2017).

Euroopassa kaarnakuoriaiset ovat vuosina 1950–2000 tuhonneet keskimäärin 2,8 miljoonaa kuutiometriä puustoa vuodessa (Schelhaas ym. 2003), ja Puolassa kirjanpainajat ja muut kaarnakuoriaiset ovat tuhonneet kuusikoiden suhteellisen pienestä pinta-alasta huolimatta vuosina 1980–1998 keskimäärin 10^6 m³ kuusipuustoa vuodessa (Grodski 1999). Pohjoisimman Euroopan ja erityisesti Suomen osalta arviot ovat kuitenkin puutteellisia ja epätarkkoja. Ilmastomuutoksen vaikutukset eivät ole mitenkään yksioikoisesti kaikkia tuhoriskejä lisääviä, vaan riippuvat sekä lajista, että tarkasteltavasta maantieteellisestä alueesta (Björkman & Niemelä, 2015). Massiivisten hyönteistuhojen riskien arvioimisessa on tarkasteltava ilmastotekijöiden lisäksi muita tuhoriskeihin vaikuttavia tekijöitä riittävän tarkalla alueellisella erottelukyvyllä (Neuvonen & Virtanen 2015).



Kuva 1.1. Eräiden maiden metsien hiilinielujen kehitys vuosina 1990–2015. Lähde: UNFCCC 2018.

Tämän hankkeen tavoitteena oli

- tehdä yhteenveto siitä, mitä tiedetään metsätuhojen esiintymisen laajuudesta ja niiden leviämiseen vaikuttavista ilmastotekijöistä Suomessa sekä muualla Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa
- järjestää monitieteinen asiantuntijatyöpaja, jossa tarkastellaan ilmastomuutoksen ja metsätuhojen välisiä vuorovaikutuksia
- julkaista Ilmastopaneelin raportti ” Ilmastomuutos ja metsätuhot – riskianalyysi ilmaston lämpenemisen seurauksista Suomen osalta” ja toimittaa hankkeen tulokset Ilmastopaneelin metsähankkeen käyttöön.

Viitteet

Björkman, C. & Niemelä, P. (toim). 2015. Climate Change and Insect Pests, CAB International, UK.

Gauthier, S., Bernier, P., Kuuluvainen, T., Shvidenko, A.Z. & Schepaschenko, D.G. 2015. Boreal forest health and global change. *Science* 349: 819-822.

Gregow, H., Laaksonen, A. & Alper, M.E. 2017. Increasing large scale windstorm damage in Western, Central and Northern European forests, 1951-2010. *Scientific Reports* 7, Article number: 46397, 7 s.

Grodzki, W. 1999. Phytosanitary situation in Polish mountain forests in 1998 and forecast for 1999. s. 30–35. Teoksessa B. Forster, M. Knizek, ja W. Grodzki (toim.), *Methodology of forest insect and disease survey in Central Europe*. Proceedings of the Second Workshop of the IUFRO Working Party 7.03.10, April 20-23, 1999, Sion-Châteauneuf, Switzerland. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf, Switzerland.

Hicke, J.A., Allen, C.D., Desai, A.R., Dietze, M.C., Hall, R.J., Hogg, E.H., Kashian, D.M., Moore, D., Raffa, K.F.; Sturrock, R.N. & Vogelmann, J. 2012. Effects of biotic disturbances on forest carbon cycling in the United States and Canada. *Global Change Biology* 18: 7–34, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02543.x

Kautz, M., Meddens, A.J.H., Hall, R.J. & Arneith, A. 2017. Biotic disturbances in Northern Hemisphere forests – a synthesis of recent data, uncertainties and implications for forest monitoring and modelling. *Global Ecology and Biogeography* 26: 533-552.

Kurz ym., 2008a. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452: 987–990.

-
- Kurz ym., 2008b. Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain. PNAS 105: 1551-1555; <https://doi.org/10.1073/pnas.0708133105>
- Lehtonen, I, Kämäräinen, M, Gregow, H, Venäläinen, A, & Peltola, H. 2016. Heavy snow loads in Finnish forests respond regionally asymmetrically to projected climate change. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 16: 2259–2271
- Neuvonen S., Virtanen T. 2015. Abiotic factors, climatic variability and forest insect pests. s. 154–172 Teoksessa: Björkman, C. & Niemelä, P. (toim.) Climate Change and Insect Pests, CAB International, UK.
- Schelhaas, M-J, Nabuurs, GJ & Schuck, A. 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. Global Change Biology 9: 1620–1633.
- Seidl, R., Schelhaas, M., Rammer, W. & Verkerk, P.J. 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. Nature Climate Change 4: 806–810.
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M.J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T.A. & Reyer, C.P.O. 2017. Forest disturbances under climate change. Nature Climate Change 7: 395-402. DOI: 10.1038/NCLIMATE3303
- UNFCCC-United Nations Convention for Climate Change Programme 2018. GHG profiles, Annex 1. http://di.unfccc.int/ghg_profile_annex1

2. SUOMEN ILMASTO TULEVINA VUOSIKYMMENINÄ ABIOTTISTEN JA BIOOTTISTEN METSÄTUHOJEN NÄKÖKULMASTA

Ari Venäläinen, Ilari Lehtonen, Kimmo Ruosteenoja

Ilmastonmuutoksen arviointi

Ilmastonmuutoksen voimakkuus riippuu hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen päästöjen kehitymisestä. Kehitystä ei voida tietää etukäteen, ja sen tähden on luotu useita vaihtoehtoisia kasvihuonekaasuskenaarioita, joissa kussakin on tehty erilaisia oletuksia maapallon väestömäärän ja elintason kehityksestä sekä tulevaisuuden energiantuotantotavoista. Puhutaan pitoisuuksien kehityskulun skenaariosta eli RCP-skenaarioista (van Vuuren ym. 2011; RCP = *Representative Concentration Pathways*). Pahimman skenaarion (RCP8.5) toteutuessa hiilidioksidin päästöt kasvaisivat tämän vuosisadan kuluessa kolminkertaisiksi ja hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä olisi vuonna 2100 jo lähellä 1000 ppm:ää (ppm = tilavuuden miljoonasosa). Ennen teollistumisen aikaa pitoisuus oli 280 ppm. Muut kolme skenaariota, RCP6.0, RCP4.5 ja RCP2.6, olettavat maailmanlaajuisten päästöjen kääntyvän laskuun jossakin vaiheessa tämän vuosisadan aikana.

Tulevaa ilmastoa ennustetaan ilmastomallien avulla. Nämä mallit kuvaavat ilmakehän, merien ja maan pintakerroksen käyttäytymistä fysiikan lakien nojalla. Malleissa ovat mukana myös merivirrat ja merien jääpeite. Maa-alueitten kasvipeitteen vaikutukset ja muutokset on kuvattu yksinkertaistetusti. Eri maissa ja eri tutkimuslaitoksissa on kehitetty kymmeniä erilaisia ilmastomalleja. Mallien antamissa tuloksissa on selviä eroja johtuen malleihin tehdyistä ja eri tavoin toteutetuista välttämättömistä yksinkertaistuksista. Ilmastomallien toimintaperiaatteesta ja ilmastoa muuttavista pakotetekijöistä on kerrottu tarkemmin esimerkiksi Ruosteenojan (2011: 69–91) oppikirja-artikkelissa.

Ilmastomallit kuvaavat olosuhteita maapallonlaajuisesti, ja tällä hetkellä useimmissa maailmanlaajuisissa malleissa laskenta tehdään noin 200 km välein sijaitseviin hilaruutuihin. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia arvioidessa halutaan kuitenkin kuvata muutosta alueellisesti suuremmalla tarkkuudella. Tämän johdosta maailmanlaajuisten mallien antamia tuloksia joudutaan tarkentamaan joko tilastollisin menetelmin tai alueellisten paremman erottelukyvyn omaavien ilmastomallien avulla.

Ilmastomallien avulla tuotetut arviot ilmastosta niin sanotulla vertailujaksolla, kuten esimerkiksi vuosina 1981–2010, poikkeavat usein havaitusta ilmastosta (esim. Cattiaux ym. 2013). Ennusteiden systemaattisia virheitä voidaan korjata muokkaamalla ilmastomallien antamia tuloksia niin, että poikkeama havaitun ja mallinnetun ilmaston välillä minimoituu. Korjaamista kutsutaan mallien harhankorjaukseksi. Esimerkki laajalti käytetystä menetelmästä, jonka avulla voidaan toteuttaa harhankorjaus sekä alueellinen tarkentaminen, on ns. kvantiilisovitus (Räisänen ja Rätty 2013; Rätty ym. 2014).

Yksityiskohtaisia tietoja ilmastonmuutoksen voimakkuudesta Suomessa on annettu Ruosteenojan ym. (2016a) tutkimuksessa. Useiden maailmanlaajuisten ilmastomallien pohjalta laskettujen arvioiden mukaan Suomen keskilämpötila olisi vuosina 2040–2069 talvisin suurimpien kasvihuonekaasupäästöjen skenaarion RCP8.5 tapauksessa 2–7 °C korkeampi kuin vuosien 1981–2010 vastaava lämpötila. Samalla sademäärä lisääntyisi 4–30 %. Tarkasteltaessa metsien abioottisten tuhojen riskiä tarvitaan arvioiden pohjaksi perussuureiden ohella myös johdettuja ilmastosuureita. Nämä suureet sekä niiden laskemiseen käytetyt aineistot sekä menetelmät on selostettu alla.

RAJA-ARVOT ALITTAVIEN LÄMPÖTILOJEN ESIINTYMINEN

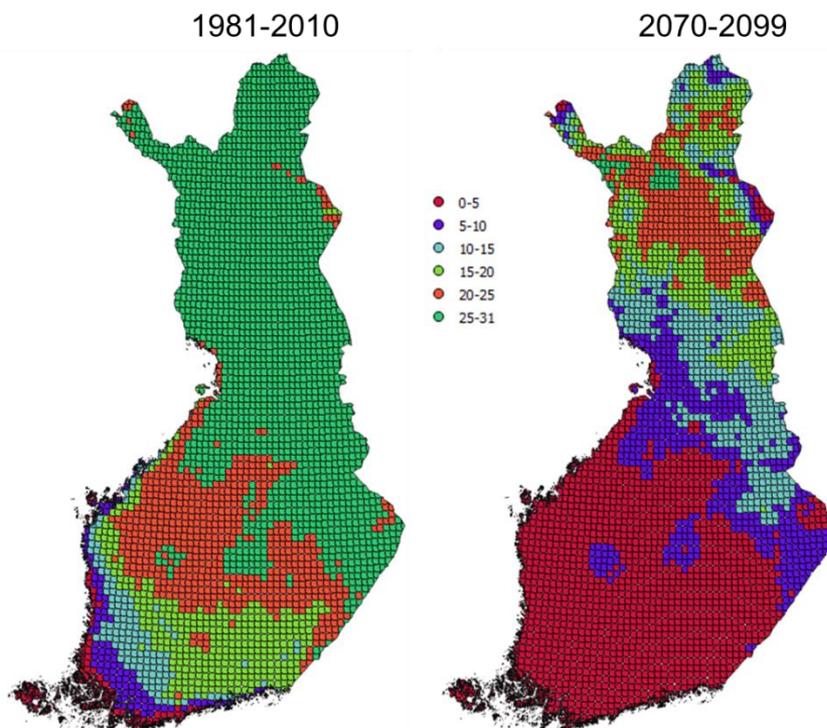
Alhaiset lämpötilat surmaavat joidenkin tuhohyönteisten toukkia. Kotimaisten tuhohyönteisten toukkien kuolleisuuden kannalta kiinnostavia raja-arvoja alhaisille lämpötiloille ovat -27°C, -29°C, -35°C ja -37°C. Näiden raja-arvojen alittavien lämpötilojen esiintymisen todennäköisyydet muuttuvassa ilmastossa määritettiin tässä työssä kuuden eri ilmastomallin ajojen pohjalta (taulukko 2.1).

Taulukko 2.1. Työssä alhaisten lämpötilojen esiintymisen tutkimiseen käytetyt ilmastomallit. L viittaa mallissa olevien laskentatasojen lukumäärään.

Malli	Alkuperämaa	Alueellinen tarkkuus (pit. x lev.), ja mallin tasojen lukumäärä	Viite
CanESM2	Kanada	1.875° x 1.875°, L35	von Salzen ym. 2013
CNRM-CM5	Ranska	1.4° x 1.4°, L31	Voldoire ym. 2013
GFDL-CM3	Yhdysvallat	2.5° x 2.0°, L48	Donner ym. 2011
HadGEM2-ES	Iso-Britannia	1.25° x 1.875°, L38	Collins ym. 2011
MIROC5	Japani	1.4° x 1.4°, L40	Watanabe ym. 2010
MPI-ESM-MR	Saksa	1.9° x 1.9°, L95	Giorgetta ym. 2013

Mallien avulla tehtyjen ilmastosimulaatioiden systemaattinen harha on korjattu ns. kvantiili-sovituksen avulla (Räisänen ja Rätty 2013; Rätty ym. 2014). Aineiston alueellinen tarkkuus leveys- ja pituusasteina on 0,1°x 0,2° ja aineiston harhankorjauksessa on käytetty samaan hilaruudukkoon interpoloituja sääasemilla mitattuja lämpötiloja vuosilta 1981–2010 (Aalto ym. 2013).

Aineistojen pohjalta laskettiin, kuinka monena talvena lämpötila laskee 30 vuoden aikana vähintään kerran tarkastellun raja-arvolämpötilan alle. Laskelmat tehtiin päästöskenaariolle RCP4.5 ja RCP8.5. Lopullinen aineisto oli kuuden käytetyn mallin antamien tulosten keskiarvo. Kuvassa 2.1 on esitetty esimerkkinä, kuinka -27 °C alitusten lukumäärä muuttuu RCP4.5-skenaarion toteutuessa. Arvion mukaan tämän vuosisadan lopulle mentäessä lounaisimman Suomen sisämaan olosuhteet ovat "edenneet" Oulun seudulle.



Kuva 2.1. Niiden talvien lukumäärä 30 vuoden aikana, jolloin vuorokauden alin lämpötila on laskenut vähintään kerran -27 °C alapuolelle RCP4.5-skenaarion toteutuessa. Kuvassa esitetyt arvot ovat kuuden ilmastomallin antamien ennusteiden keskiarvoja.

Lämpötilan pysyminen nolla-asteen yläpuolella

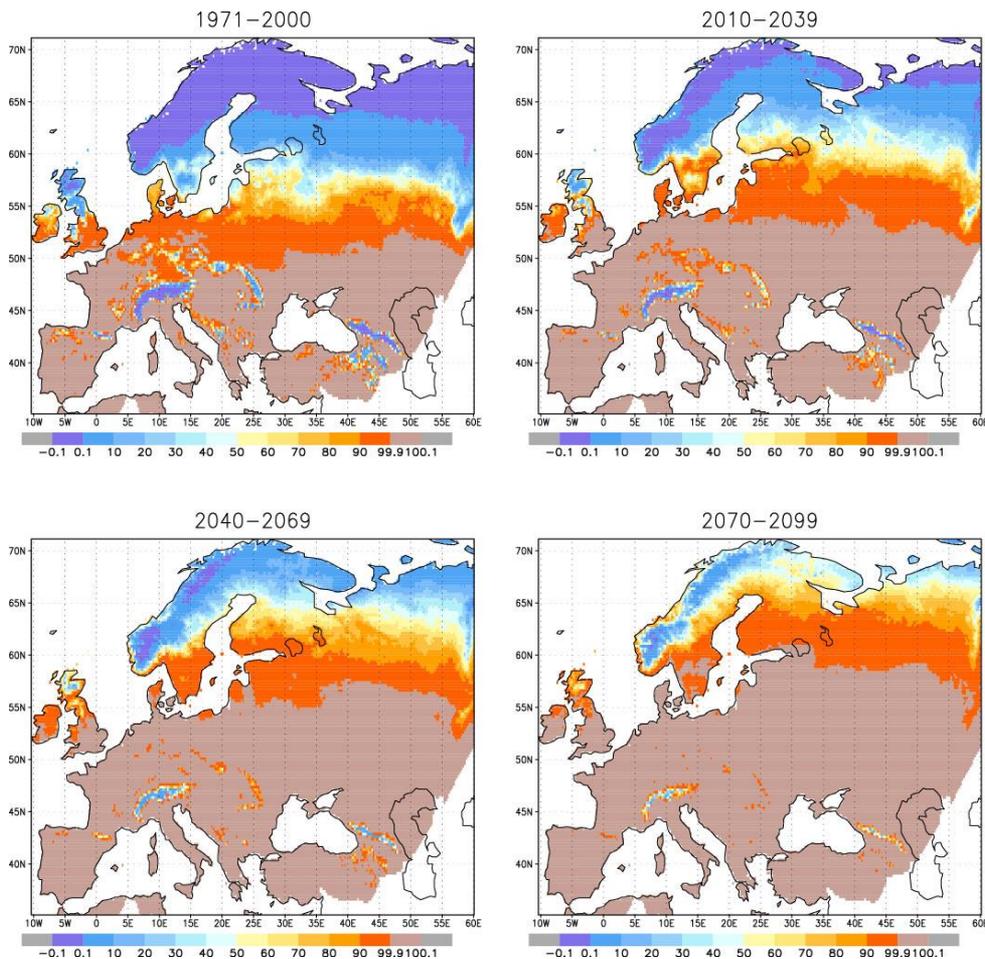
Yli nollan (°C) olevat lämpötilat mahdollistavat juurikäävän kantaitiöiden vapautumisen ja lisäävät juurikäävän rihmaston kasvua. Tässä laskennassa hyödynnettiin samaa aineistoa (taulukko 2.1) kuin raja-arvot alittavien lämpötilojen tarkastelussa. Tarkastelu tehtiin vuodenajoittain; maaliskuu-toukokuu (kevät), kesä-elokuu (kesä), syys-marraskuu (syksy) ja marras-helmikuu (talvi). Työssä laskettiin, kuinka monta sellaista päivää kussakin hilaruudussa 30 vuoden aikana oli kunakin vuodenaikana, jolloin vuorokauden alin lämpötila oli korkeampi kuin 0 °C.

Raja-arvot ylittävät kasvukauden lämpösummat

Kirjanpainajan toisen sukupolven esiintymisen edellytyksenä on, että kasvukauden lämpösumma kohoaa yli 1500 °C vrk. Tällaisten tilanteiden todennäköisyyden arviointi pohjautuu aiemmassa tutkimuksessa (Ruosteenoja ym. 2016b; Ruosteenoja ym. 2016c) tehtyihin laskelmiin. Laskelmat pohjautuvat 23 eri ilmastomallin antamiin arvioihin tulevaisuuden ilmastosta. Kaikki malliajot on kalibroitu kuvaamaan 1900-luvun lopun ilmastoa niin, että tuolle ajanjaksolle keskilämpötilat ja lämpötilojen vuosienvälinen hajonta vastaavat havaittuja arvoja. Näin on luotu keinotekoinen, yli 1000 vuoden pituinen ko. ajanjakson ilmasto kuvaava aikasarja. Näin saadaan lämpösummien vuosienvälisen vaihtelun frekvenssijakaumat tilastollisesti paljon luotettavammin kuin suoraan havaintotiedoista. Tulevaisuuden jaksoja tarkasteltaessa on otettu huomioon sekä mallien väliset erot (eri mallit lämmittävät ilmastoa eri tavoin), että lämpötilojen vuosien välinen vaihtelu. Näin ollen mallien väliset erot on jo leivottu sisään näihin todennäköisyyksiin ja ei ole enää mahdollista laskea "todennäköisyyksien todennäköisyysjakamaa".

Tulevat ajanjaksot kuvaavat parhaiten 2020–, 2050–, ja 2080-luvun ilmastoa. Näitten väliin osuville vuosikymmenille kuitenkin saanee muodostettua tyydyttävät arviot interpoloimalla todennäköisyyksiä ajan suhteen. Esimerkiksi todennäköisyys 2040-luvun ilmastolle on likipitään 2/3 kertaa 2050-luvun todennäköisyys + 1/3 kertaa 2020-luvun todennäköisyys.

1900-luvun lopulla yli 1500 astepäivän ylitykset ovat vielä varsin harvinaisia. Vain eteläisimmässä Suomessa todennäköisyys on yli 10 % ja Oulusta pohjoiseen käytännössä nolla. Ilmaston lämmitessä todennäköisyys kasvaa voimakkaasti. Jo meneillään olevan jakson 2010–2039 aikana todennäköisyys on Etelä-Suomessa yli 50 %. Myöhemmin tällä vuosisadalla kehitys riippuu kasvihuonekaasujen päästöistä, mutta molemmilla skenaarioilla 1500 astepäivän raja ylittyy etelässä useimpina vuosina (kuva 2.2).



Kuva 2.2. Suuremman kuin 1500°Cvrk lämpösunnan esiintymisen eli kirjanpainajan toisen sukupolven esiintymisen todennäköisyys RCP8.5-skenaarion toteutuessa vuosina 1971–2000 sekä kolmen tulevaisuuden jakson (2010–2039, 2040–2069, 2070–2099) aikana pohjautuen 23 ilmastomallin antamiin ennusteisiin.

Käytännön sovellutuksissa lienee perusteltua painottaa enemmän RCP4.5-skenaariota, eli olettaa, että maailmanlaajuisia kasvihuonekaasujen päästöjä onnistutaan hillitsemään edes kohtuullisen tehokkaasti. Skenaarioiden eroavaisuudet tulevat selvimmin näkyviin vasta vuosisadan puolivälin tienoilla ja sen jälkeen. Esimerkki Keski-Savossa sijaitsevasta hilapisteestä (62.375°N, 27.625°E): 1900-luvun lopun ilmastossa 1500 astepäivän lämpösunnan ylityksen todennäköisyydeksi saatiin vähän yli 2 %. RCP4.5-skenaarion mukaan ylityksen vuotuinen todennäköisyys olisi jaksolla 2010–2039 jo 42 %, jaksolla 2040–2069 72 % ja jaksolla 2070–2099 peräti 84 %. RCP8.5-skenaarion toteutuessa todennäköisyydet olisivat vieläkin korkeampia. Todennäköisyyksiä tulkittaessa on siis tietysti muistettava, että eri mallit ennustavat erisuuruista ilmaston lämpenemistä. Yleisestikin pätee, että jo melko pienikin ilmastomuutos lisää tiettyjen kynnyksarvojen (tässä 1500 astepäivän lämpösunnan) ylityksen todennäköisyyttä varsin voimakkaasti.

Maan kuivuus ja metsäpalovaara

Maan pintakerroksen kosteuden muutoksen arviot pohjautuivat kahteen eri aineistoon. Ensimmäinen ns. kanadalaiseen metsäpalovaaraa kuvaavaan indeksiin pohjautuva aineisto on esitelty yksityiskohtaisesti Lehtosen ym. (2016a) julkaisussa. Toinen aineisto, joka pohjautuu ilmastomallien antamiin arvioihin maan pintakerroksen kosteudesta, on puolestaan esitelty yksityiskohtaisesti Ruosteenojan ym. (2018) tutkimuksessa.

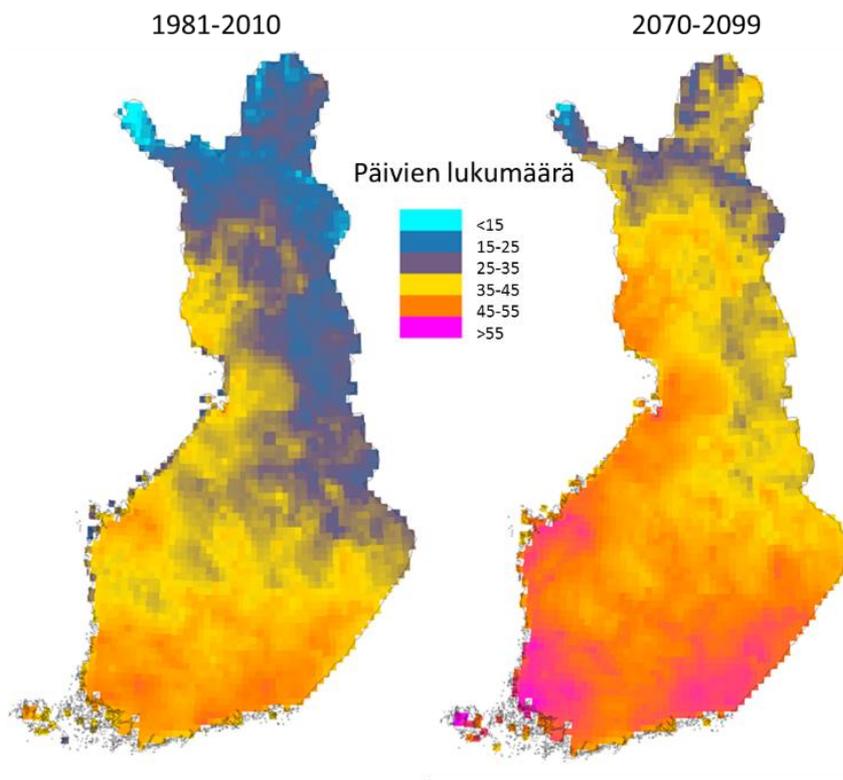
Metsäpaloindeksiin pohjautuvat arviot laskettiin viiden ilmastomallin antamiin ilmastomuutosarvioihin pohjautuen. Käytetyt mallit ovat samat kuin taulukossa 1 pois lukien saksalainen MPI-ESM – malli. Tässä

työssä käytettiin kahta eri kanadalaisen metsäpaloindeksin antamaa arviota maan pintakerroksen kosteudesta. Ensimmäinen "duff moisture code" (DMC) kuvaa kosteusoloja 5–10 cm syvyydellä. Toinen "drought code" (DC) kuvaa puolestaan oloja 10–20 cm syvyydellä. DMC vastaa parhaiten suomalaista metsäpaloindeksiä, joskin se menee jonkin verran syvemmälle. Näiden indeksien pohjalta olosuhteet luokiteltiin kolmeen eri luokkaan:

- "melko kuiva": DMC välillä 30–90
- "erittäin kuiva": DMC välillä 90–125 tai yli 125, jos DC on alle 500
- "äärimmäisen kuiva": DMC yli 125 ja DC yli 500

Jokaiselle tarkastellulle 30-vuoden jaksolle (1981–2010, 2021–2050 ja 2070–2099) laskettiin keskimääräiset lukumäärät niille touko-elokuun päiville, jotka osuivat luokkiin "melko kuiva", "erittäin kuiva" tai "äärimmäisen kuiva". Luokan "melko kuiva" päivät eivät sisällä vielä kuivempien luokkien päiviä, eivätkä "erittäin kuivat" päivät "äärimmäisen kuivia" päiviä.

Luokkien raja-arvot haarukoitiin siten, että "melko kuivia" päiviä tuli jotakuinkin saman verran kuin päiviä, jolloin Suomessa on metsäpalovaroitus voimassa. "Erittäin kuivia" päiviä esiintyy vain harvoin kesinä sekä "äärimmäisen kuivia" päiviä vain aivan poikkeuksellisesti. Kuvassa 2.3 on esitetty, kuinka "melko kuivien" päivien lukumäärän arvioidaan muuttuvan RCP4.5-skenaarion toteutuessa tämän vuosisadan loppupuolelle mentäessä. Arvion mukaan tällaisten päivien lukumäärä lisääntyisi noin 10 päivää kesässä.



Kuva 2.3. Sellaisten päivien lukumäärä touko-elokuussa kahden 30-vuotisjakson aikana, milloin metsäpaloindeksiä kuvaava DMC on välillä 30–90 (= "melko kuiva") RCP4.5-ilmastoskenaarion tapauksessa.

Toinen arvio maanpinnan kuivuuden mahdollisille muutoksille saatiin Ruosteenojan ym. (2018) tutkimuksen tuloksena. Tutkimuksessa hyödynnettiin suoraan ilmastomalleista saatavaa maanpinnan kosteuden arviota. Analyysissä haettiin jakson 1961–2005 simuloituista mallituloksista kussakin hilapisteessä ja kunakin vuoden kuukautena sellainen maan kosteuden kuukausikeskiarvo, jonka alittumisen todennäköisyys tuona

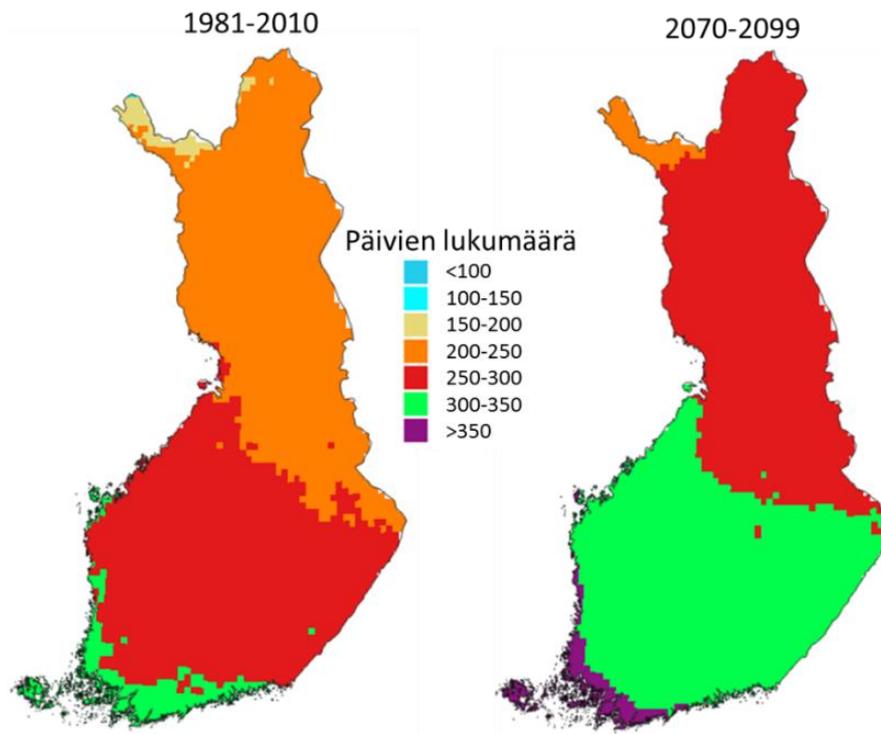
ajanjaksona on ollut 10 % (erikseen kullekin mallille). Sen jälkeen käytiin läpi kukin tulevaisuuden jakso ja katsottiin, kuinka usein tuo arvo alittuu kyseisen jakson aikana. Lopuksi yhdistettiin 26 eri mallin tuottamat todennäköisyysarviot ja laskettiin kuukausittaisista todennäköisyyksistä vuodenaikojen keskiarvot.

Maan kantavuus

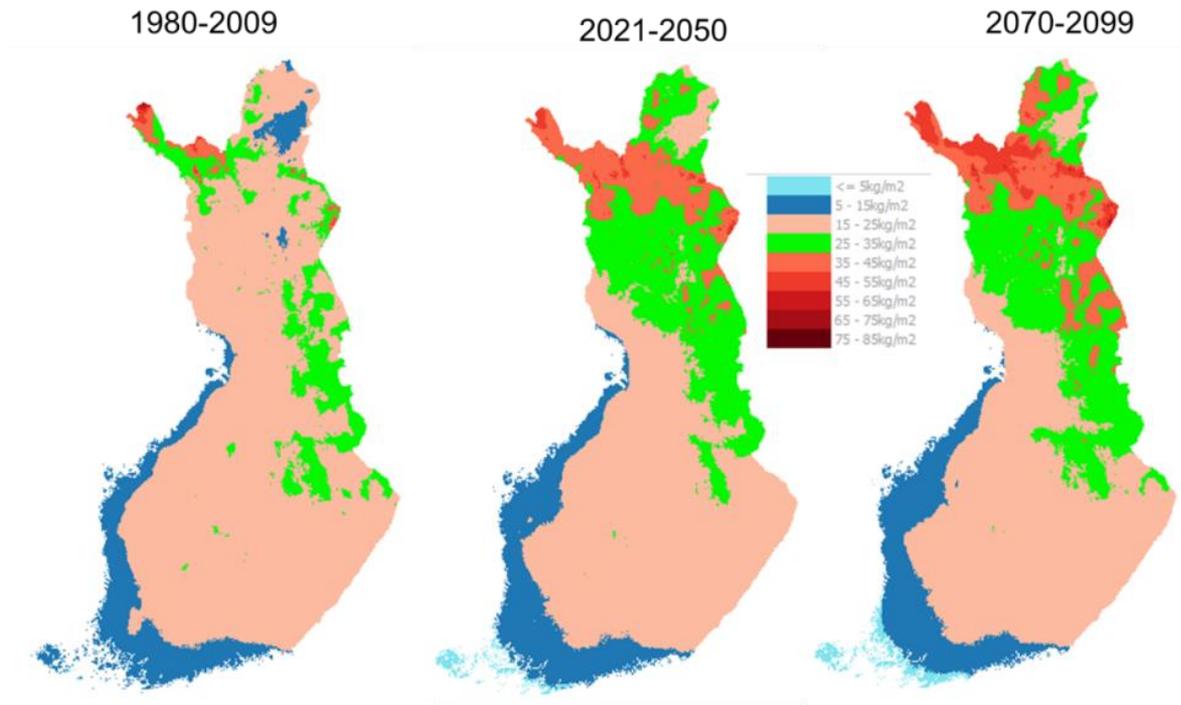
Maan kantavuuden arviot pohjautuvat Lehtosen ym. (2018) artikkelissa julkaistuun laskentamenetelmään. Aineistossa esitetään keskimääräinen vuosittainen niiden päivien lukumäärä, jolloin routaa on alle 20 cm ja lunta alle 40 cm. Tiedostot kattavat jaksot 1981–2010, 2021–2050 ja 2070–2099. Jokaiselta jaksolta arviot on esitetty RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioiden mukaisesti kuuden ilmastomallin (taulukko 2.1) tulosten keskiarvojen pohjalta. Jaksolta 1981–2010 arviot on esitetty lisäksi havaintoihin perustuvasta sääaineistosta laskettuina. Aineistot on luotu erikseen kuusimetsille silttimaalla, mäntymetsille hiekkakankailla sekä mäntymetsille turvemailla. Esimerkki ilmaston lämpenemisen vaikutuksista turvemaan tapauksessa on esitetty kuvassa 2.4. Tämän arvion mukaan menneen ilmaston lounaisimman Suomen olosuhteet ovat vuosisadan lopulla tyypillisiä Oulu – Ilomantsi linjan vaiheilla.

Lumikuorma puiden oksilla

Puiden lumikuorma-aineistossa on arvioitu 30 vuoden jakson keskimääräinen vuoden suurin lumikuorma arvioitu vuosille 1981–2010 säähavaintoihin pohjautuen ja jaksoille 2021–2050 sekä 2070–2099 arviot on laskettu kuuden ilmastomallin (taulukko 2.1) antamien ilmastomuutosarvioiden pohjalta. Arviot on laskettu kahdelle ilmastomuutoskenaariolle (RCP4.5 sekä RCP8.5). Lumikuorman laskentamenetelmä on esitelty Lehtosen ym. (2016b) tutkimuksessa. Lumikuormat interpoloitiin 100 m x 100 m hilaruudukkoon kriging-interpolointimenetelmää käyttäen (Aalto ym. 2013). Interpoloinnissa alueellista vaihtelua selitettiin maaston korkeuden avulla. Kuvassa 2.5 on esitetty talven suurin keskimääräinen lumikuorma vuosina 1980–2009, 2021–2050 ja 2070–2099 RCP4.5-skenaariota vastaavassa tilanteessa.



Kuva 2.4. Sellaisten päivien lukumäärä, milloin maassa on routaa alle 20 cm ja lunta vähemmän kuin 40 cm. Laskelmat edustavat RCP4.5-skenaariota ja turvemaalla kasvavaa mäntymetsää.



Kuva 2.5. Keskimääräinen talven suurin lumikuorma kuuden ilmastomallin (taulukko 2.1) keskiarvona RCP4.5-ilmastonmuutos-skenaarion mukaan.

Viitteet

Aalto, J., Pirinen, P., Heikkinen, J., & Venäläinen, A. 2013. Spatial interpolation of monthly climate data for Finland: comparing the performance of kriging and generalized additive models, *Theor. Appl. Climatol.*, 112: 99–111.

Cattiaux, J., Douville, H. & Peings, Y. 2013. European temperatures in CMIP5: origins of present-day biases and future uncertainties, *Clim. Dynam.*, 41: 2889–2907.

Collins, W., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C.D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A. & Woodward, S. 2011. Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2, *Geosci. Model Dev.*, 4, 1051–1075.

Donner, L.J., Wyman, B.L., Hemler, R.S., Horowitz, L.W., Ming, Y., Zhao, M., Golaz, J-C, Ginoux, P., Lin, S-J., Schwarzkopf, M.D., Austin, J., Alaka, G., Cooke, W.F., Delworth, T.L., Freidenreich, S.M., Gordon, C.T., Griffies, S.M., Held, I.M., Hurlin, W.J., Klein, S.A., Knutson, T.R., Langenhorst, A.R., Lee, H-C., Lin, Y., Magi, B.I., Malyshev, S.L., Milly, P.C.D., Naik, V., Nath, M.J., Pincus, R., Ploshay, J.J., Ramaswamy, V., Seman, C.J., Sheviakova, E., Sirutis, J.J., Stern, W.F., Stouffer, R.J., Wilson, R.J., Winton, M., Wittenberg, A.T. & Zeng, F. 2011. The dynamical core, physical parameterizations, and basic simulation characteristics of the atmospheric component AM3 of the GFDL global coupled model CM3. *J. Climate*, 24: 3484–3519.

Giorgetta, M. A., ym., 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESMs simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5: 572–597, doi:10.1002/jame.20038

Lehtonen, I., Venäläinen, A., Kämäräinen, M., Peltola, H. & Gregow, H. 2016a. Risk of large-scale forest fires in boreal forests in Finland under changing climate. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16: 239–253, doi:10.5194/nhess-16-239-2016.

Lehtonen, I., Kämäräinen, M., Gregow, H., Venäläinen, A. & Peltola, H. 2016b. Heavy snow loads in Finnish forests respond regionally asymmetrically to projected climate change. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16: 2259–2271, doi:10.5194/nhess-16-2259-2016.

- Ruosteenoja, K. 2011. Miten ja miksi ilmasto muuttuu? Teoksessa: Virtanen, A. & Rohweder, L. (toim). Ilmastomuutos käytännössä - hillinnän ja sopeutumisen keinoja. Gaudeamus. s. 69–108.
- Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Kämäräinen, M. 2016a. Climate Projections for Finland under the RCP Forcing Scenarios. *Geophysica*, 51: 17–50, (http://www.geophysica.fi/pdf/geophysica_2016_51_1-2_017_ruosteenoja.pdf).
- Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Kämäräinen, M. & Pirinen, P. 2016b. Terminen kasvukausi lämpenevässä ilmastossa (Thermal growing seasons in a warming climate). *Terra*, 128: 3–15. <https://en.ilmatiiteenlaitos.fi/plumes>
- Ruosteenoja K., J. Räisänen, A. Venäläinen & M. Kämäräinen, 2016c. Projections for the duration and degree days of the thermal growing season in Europe derived from CMIP5 model output. *Int. J. Climatology*, 36: 3039–3055. doi:10.1002/joc.4535.
- Ruosteenoja, K., Markkanen, T., Venäläinen, A., Räisänen, P. & Peltola, H. 2018. Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century. *Climate Dynamics*, 50: 1177–1192, doi:10.1007/s00382-017-3671-4.
- Räisänen, J. & Räty, O. 2013. Projections of daily mean temperature variability in the future: cross-validation tests with ENSEMBLES regional climate models. *Climate Dynamics*, 41: 1553–1568, doi:10.1007/s00382-012-1515-9.
- Räty, O., Räisänen, J. & Ylhäisi, J. S., 2014. Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations. *Climate Dynamics*, 42: 2287–2303, doi:10.1007/s00382-014-2130-8.
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J. & Rose, S. K., 2011. The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change*, 109: 5–31, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.
- Voltaire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méliá, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maissonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L. & Chauvin, F. 2013. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics* 40: 2091–2121.
- von Salzen, K., Scinocca, J.F., McFarlane, N.A., Li, J., Cole, J.N.S., Plummer, D., Versegny, D., Reader, M.C., Ma, X., Lazare, M. & Solheim, L. 2013. The Canadian fourth generation atmospheric global climate model (CanAM4). Part I: representation of physical processes, *Atmos. Ocean* 51: 104–125.
- Watanabe, M., Suzuki, T., Oishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., & Kimoto, M. 2010. Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, 23: 6312–6335.

3. MITEN BIOOTTISET TUHOT VAIKUTTAVAT HIILITASEISIIN?

Abioottisten tuhojen ja näiden seuraustuhojen vaikutus metsien hiilensidontakapasiteettiin on merkittävä, ja sen on ennustettu voimistuvan (Schelhaas ym 2014). Pohjoisimman Euroopan ja erityisesti Suomen osalta arviot ovat kuitenkin puutteellisia ja epätarkkoja. Ilmastomuutoksen vaikutukset eivät ole mitenkään yksioikoisesti kaikkia biottisia tuhoriskejä lisääviä, vaan riippuvat sekä lajista että tarkasteltavasta maantieteellisestä alueesta (Björkman & Niemelä, 2015). Massiivisten hyönteistuhojen riskien arvioimisessa on tarkasteltava ilmastotekijöiden lisäksi muita tuhoriskeihin vaikuttavia tekijöitä riittävän tarkalla spatiaalisella resoluutiolla (Neuvonen & Virtanen 2015).

Metsätuhot voidaan jakaa luonteeltaan "äkillisiin (outbreak-tyyppisiin)" ja "kroonisiin" tuhoihin. Näiden vaikutukset hiilensidontaan ja muihin ilmaston kannalta merkittäviin muuttujiin ovat luonteeltaan jossain määrin erilaisia (Taulukot 3.1, 3.2). Äkillisissä tuhoissa, joissa tuhojakso ("outbreak") useimmiten kestää vain muutaman vuoden, metsän hiilensitomiskyky romahtaa ja metsä voi muuttua hiilinielusta hiilen päästölähteeksi. Lievemmissä tuhoissa (esim. ruskomäntypistiäistuhot) puuston kasvutappiot voivat jatkua 2-3 vuoden tuhojakson jälkeen lähes 10 vuotta (Lyytikäinen-Saarenmaa & Tomppo, 2002). Vakavimmissa tuhoissa puustoa kuolee ja metsä on uudistettava jo ennen normaalin kiertoajan täyttymistä. Vakavalla tuholla on myös vaikutuksia esim. albedoon ja seuraustuhojen (mm. metsäpalot) esiintymiseen (Kulakowski & Jarvis, 2011; Nelson ym., 2016).

Taulukko 3.1. Erityyppisten tuhojen vaikutukset eri-ikäisissä metsiköissä hiilensidonnan yms. kannalta.

	Pieni taimikko	Varttunut taimikko	Nuori kasvatus-metsikkö	Varttunut kasvatus-metsikkö	Uudistuskypsä metsikkö
Äkillinen tuho ("outbreak")	Viivästynyt metsikön uudistaminen		Hiilensitomiskyvyn romahdus; Metsikön uudistamistarve (?)		
"Krooninen tuhoriski"	Viivästynyt metsikön uudistaminen		Alentunut hiilensitomiskyky		

Kroonisten tuholaisien ja tautien vaikutusten voimakkuus muuttuu yleensä melko hitaasti, eikä selviä tuhojaksoja voida erottaa. Kaikki kasvua hidastavat ja metsien tuottavuutta vähentävät tuhot vähentävät samalla metsien hiilensidontaa aiheuttamiensa taloudellisten tappioiden lisäksi. Tuhojen aiheuttamien kasvutappioiden kokonaislaajuutta ja -merkitystä ei kuitenkaan ole selvitetty. Esimerkiksi kohtalaisen voimakkaiden ruskomäntypistiäistuhojen on arvioitu vähentäneen kasvua 21 %, ja pilkkumäntypistiäistuhojen jopa 86 % (Lyytikäinen-Saarenmaa ja Tomppo 2002). Versosurmaisten metsiköiden tilavuuskasvutappioiden voidaan arvioida olevan noin 20 % (Riihinen ja Uotila 1992). Suomen metsien keskikasvu on 5,1 m³/ha/v puuntuotannon metsämaalla (Korhonen ym. 2017). Jos kaikkien metsiköiden metsänhoidollista laatua alentavien tuhojen aiheuttama kasvunmenetys on luokkaa 20 %, tämä tarkoittaisi karkeasti arvioiden 4,5 milj. m³:n vuotuista kasvutappiota koko maassa (ks. luku 5).

Nykyiset ekosysteemimallit eivät ota huomioon esimerkiksi lahon tai juuristotautien vaikutusta metsien hiilensidontaan. Elävän puun maanpäällinen runko-biomassa on vain yksi hiilivaraston osa (katso esim. Liski 2014). Kuitenkin puuston lahoisuudella voi olla rooli metsien hiilen sitomisessa. Joillakin erityisalueilla, kuten Kalliovuorten alueella Yhdysvalloissa, on ehdotettu, että juuristotaudit vähentävät hiilen varastointia yhtä paljon kuin metsäpalot, ja niiden vaikutus on paljon suurempi kuin korjuutoiminnan tai hyönteistuhojen vaikutukset (Healey ym. 2016). Norjassa tehdyissä laboratoriotutkimuksissa havaittiin puolestaan, että hiilidioksidipitoisuudet olivat kaksi kertaa suuremmat lahoissa puissa terveisiin puihin verrattuna (Hietala ym. 2015). Siten puuston lahoisuudella voi olla jonkun verran vaikutusta hiilen sitomisen ja hiilipäästöjen väliseen tasapainoon.

Suomessa puuston lahoisuuden aiheuttamalla hiilensidonnalla ja varastoitumisen vähenemisellä ei kuitenkaan näytä olevan toistaiseksi kovin suurta merkitystä. Käyttämällä Tammisen (1985) ja Mattilan ja Nuutisen (2007) tutkimusten tuloksia ja VMI 11:n havaintoja (Korhonen ym. 2017) voidaan arvioida että 7,7 % eteläisen Suomen kuusten kuutiomäärästä on lahoa. Tämä tarkoittaisi noin 5,52 miljoonaa kuutiometriä lahoa kuusta, ja karkeasti arvioiden 2,76 milj. hiilitonin sidonnalla vähennystä Etelä-Suomessa.

Eri metsätuholaisten ja tautien vaikutukset ovat suurimmillaan metsän eri kehitysvaiheissa. Taulukossa 3.2 on esitetty joidenkin Suomen kannalta merkittävien tuholaiten ja tautien aiheuttamien tuhojen esiintyminen suhteessa metsikön ikään. Tukkimiehentäi ja myyrät voivat aiheuttaa huomattavaakin pienten taimien kuolleisuutta ja lisääntyneitä uudistuskustannuksia (tarkemmin kohdissa 7.1.5 ja 7.1.10). Varttuneemmat taimikot ovat alttiita hirvieläinten aiheuttamille tuhoille (ks. 7.1.9). Nämä tuhonaiheuttajat vaikuttavat siten, että tehokkaan hiilensidonnalla alku viivästyy. Suomessa määrällisiä arvioita näiden vaikutusten suuruudesta hiilensidontaan ei kuitenkaan ole tiedossamme.

Taulukko 3.2. Taulukossa esitetään, minkä ikäisissä metsiköissä joidenkin merkittävien tuholaiten ja tautien aiheuttamia tuhoja tavallisimmin esiintyy. Värikoodilla (ks. taulukko 3.1) on osoitettu vaikutuksen luonne ("krooninen" vai "outbreaks"-tyyppinen).

Puulaji	Pieni taimikko	Varttunut taimikko	Nuori kasvatus-metsikkö	Vartunut kasvatus-metsikkö	Uudistuskypsä metsikkö
Mänty	Tukkimiehentäi	Hirvi		Pilkkumäntypistiäinen	
	Myyrät		Ruskomäntypistiäinen		
			Ytimennävertäjät		
			Havununna		
		Versosurma			
		Männynjuurikäpä			
		Tervasroso	Tervasroso		
Kuusi	Tukkimiehentäi		Kuusentähtikirjaja	Kirjanpainaja	
	Myyrät		Havununna		
		Juurikäpä			
Koivu	Tukkimiehentäi	Hirvi			
	Myyrät			Tunturi- ja hallamittari	

Metsätuhojen vaikutuksista metsien hiilitaseisiin on arvioita saatavissa erityisesti Kanadasta. Myös eri maiden kasvihuonekaasuraporttien perusteella voidaan tehdä karkeita arvioita siitä, millaisissa suuruusluokissa metsätuhojen aiheuttamat hiilipulssit voivat olla metsäolosuhteissa. Esimerkiksi Natural Resources Canada on vuosiraportissaan arvioinut, että vuonna 2015 Kanadan talousmetsien lähinnä metsäpaloista aiheutuneet päästöt aiheuttivat noin 250 miljoonan tCO₂eqv. päästön ilmakehään. Kun ennen suurten metsätuhojen kautta Kanadan ja Suomen metsien hehtaarikohtaiset nielut ovat olleet samaa suuruusluokkaa, voitaisiin päätellä, että Suomessa vastaavan suuruiset metsätuhot aiheuttaisivat vuositasolla 20–25 miljoonan tCO₂eqv. päästön ilmakehään. Näin laaja-alaiset metsäpalot eivät ole Suomessa käytännössä mahdollisia. Keskimäärin vuosina 2000–2015 metsätuhot ovat pienentäneet Kanadan talousmetsien hiilinielua noin 140 miljoonaa tCO₂eqv. vuodessa (ks. kuva 1.1).

Viitteet

Healey, S., Raymond, C.L., Lockman, B.I., Hernandez, A.J., Garrard, C. & Chengquan Huang. 2016. Root disease can rival fire and harvest in reducing forest carbon storage. *Ecosphere* 7. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1569>

- Hietala, A.M., Dörsch, P., Kvaalen, H. & Solheim, H. 2015. Carbon dioxide and methane formation in Norway spruce stems infected by white-rot fungi. *Forests* 6: 3304–3325. doi:10.3390/f6093304
- Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Viiri, H., Heikkinen, J., Henttonen, H.M., Hotanen, J.-P., Mäkelä, H., Nevalainen, S., & Pitkänen, J. 2013. Suomen metsät 2004–2008 ja niiden kehitys 1921–2008. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2013: 269–608.
- Kulakowski, D., & Jarvis, D. 2011. The influence of mountain pine beetle outbreaks and drought on severe wildfires in northwestern Colorado and southern Wyoming: a look at the past century. *Forest Ecology and Management* 262: 1686–1696.
- Liski, J., Kaasalainen, S. Raunonen, P., Akujärvi, A., Krooks, A., Repo, A. Kaasalainen, M. 2014. Indirect emissions of forest bioenergy: detailed modeling of stump-root systems. *GCB Bioenergy* 6: 777–784. doi:10.1111/gcbb.12091
- Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Tomppo, E. 2002. Impact of sawfly defoliation on growth of Scots pine *Pinus sylvestris* (Pinaceae) and associated economic losses. *Bulletin of Entomological Research* 92: 137–140.
- Mattila, U., Nuutinen, T. 2007. Assessing the incidence of butt rot in Norway spruce in southern Finland. *Silva Fennica* 41: 29–43.
- Nelson, M. F., M. Ciochina, & C. Bone. 2016. Assessing spatiotemporal relationships between wildfire and mountain pine beetle disturbances across multiple time lags. *Ecosphere* 7(10):e01482. 10.1002/ecs2.1482
- Riihinen, A., Uotila, A. 1992. Versosurman vaikutus varttuneiden männiköiden kasvuun. Summary: Effect of Scleroderma canker on the growth of middle-aged Scots pine stands. *Folia Forestalia* 783: 1–10.
- Tamminen, P. 1985. Butt-rot in Norway spruce in southern Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 127. 52 s.

4. ILMASTON LÄMPENEMISEN VAIKUTUSMEKANISMEJA METSÄTUHORISKEIHIN

Ilmastonmuutoksen vaikutukset eivät lisää yksioikoisesti kaikkia metsien hyönteistuhoriskejä, vaan ne riippuvat sekä isäntäpuulajista, hyönteislajista että tarkasteltavasta alueesta.

Tuhohyönteisten populaatiodynamiikassa ravintoketjun tasojen (tuottajat-kasvinsyöjät-pedot) välisillä vuorovaikutuksilla on usein suurempi merkitys kuin säätekijöillä (Virtanen & Neuvonen 1999). Abioottisilla tekijöillä (esim. lämpötiloilla) on vain harvoin riittävän voimakkaita vaikutuksia tuholaisien menestykseen (ml. kuolleisuus), jotta niiden pohjalta voitaisiin kehittää luotettavia ennustemalleja. Kuitenkin monet merkittävistä neulasia ja lehtiä syövästä tuhohyönteisistä (ruskomäntypistiäinen, havu- ja lehtinunna, tunturi- ja hallamittari) talvehtivat munavaiheessa, jolloin ne voivat altistua tappaville lämpötiloille, mikä antaa hyvän perustan mekanistisille ennustemalleille (esim. Virtanen ym. 1998). Pakkas-kestävyydessä on lajikohtaisia eroja, jotka tunnetaan jo varsin hyvin.

Tietolaatikossa 4.1 on esitetty yleistä taustaa, joka on syytä ottaa huomioon tarkasteltaessa arvioita ilmastonmuutoksen vaikutuksia eri tuholaislajeihin.

Tietolaatikko 4.1:

Säätekijöiden ja hyönteistuhojen väliset yhteydet ovat monimutkaisia, ja monen lajin osalta heikosti tunnettuja;

Ilmaston lämpenemisellä voi olla tuholaisien kannalta sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia:

- Hyönteiset ovat hyvin sopeutuneita lämpötilojen vaihteluihin, mutta joillakin alueilla ja lajeilla kovat pakkaset voivat aiheuttaa suurta kuolleisuutta;
- Useimmat metsätuhohyönteisemme (monet perhoset ja sahapistiäiset) syövät (eli saavat energiaa) vain toukkavaiheen aikana ⇔ suurimman osan vuotta (10-11 kk) ne vain kuluttavat energiaa (hengitys) → lämpötilan nousu voi johtaa energiavarastojen ehtymiseen;
- Kirjanpainaja on tässä suhteessa merkittävä poikkeus ⇔ lämpötilan noustessa ja kasvukauden pidentyessä se voi käyttää useampia kuukausia ravinnonottoon ja muodostaa useita sisarusjälkeläistöjä tai sukupolvia;
- Ilmaston lämpeneminen voi tehostaa joidenkin lajien (esim. tunturimittari) luontaisten vihollisten toimintaa;
- *Eri tuhonaiheuttajien vaikutusten välillä voi olla merkittäviä yhdysvaikutuksia; esim. myrskytuhot, juurikäpää, kirjanpainaja*

Ilmastonmuutoksen vaikutukset tuhohyönteisiin ovat lajispesifisiä:

- Vaikutukset riippuvat mm. hyönteislajin talvehtimisasteesta, joka määrittää myös sen, mihin kuukausiin muut elinkierron vaiheet ajoittuvat;
- Se, talvehtiiko laji puiden latvustossa (munana) vai maaperässä lumihangon suojassa (toukat, kotelot), vaikuttaa lajin alttiuteen talven ääriämpötilojen vaikutuksille;

Trofiatasojen välisillä vuorovaikutuksilla on usein suurempi merkitys kannanvaihteluihin kuin säätekijöillä;

Tuhoriskiinkin vaikuttavat myös mm. metsien ikärakenne, puulajikoostumus ja metsänhoito.

Ilmaston lämpeneminen on Suomessa toistaiseksi ollut voimakkainta talvikaudella, ja näin ennustetaan olevan jatkossakin. Talveen liittyvien ilmiöiden (ääripakkaset, routa-ajan lyheneminen) vaikutusmekanismit tuhoriskeihin tunnetaan kohtuullisen hyvin, mutta tietoaukkoja on erityisesti paikallisiin olosuhteisiin

vaikuttavien tekijöiden (topografia, metsiköiden ominaisuuksista johtuvat mikroilmastolliset erot) suhteen. Tarkempia vaikutusmekanismeja talvikauden lämpenemisen vaikutuksista joidenkin tuhojen osalta on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Talvi-ilmaston lämpenemisen vaikutuksia metsätuhoriskeihin.

Vaikutusmekanismit tuholaisiin ja tauteihin		Vaikutus tuhoihin/ tuholaisiin	Huomioita, tietoaukkoja
Kovien pakkasten väheneminen	Munavaiheessa talvehtivien tuhohyönteisten talvikuoletisuus vähenee	Tiettyjen lajien (ruskomäntypistiäinen ^{7.1.1} , havununna ^{7.1.2} ja lehtinunna ^{7.3.2} , tunturi- ja halla-mittari ^{7.3.1}) tuhoriskit lisääntyvät joillakin alueilla	Lajien väliset erot munien pakkas-kestävyydessä; topografian vaikutukset ääripakkasiin huomioitava aiempaa paremmin
Routa-ajan lyheneminen	Myrskytuhojen lisääntyminen	Enemmän kirjanpainajille otollista lisääntymismateriaalia □	Alueelliset, topografiaan ja metsiköiden ominaisuuksiin liittyvät erot riskeissä huomioitava
	Korjuuvaurioiden lisääntyminen juuristossa	Juurikäpäriski lisääntyy	Alueellisten ja hakkuutyypin liittyvien erojen merkitys
Talven sademäärän lisääntyminen	Lumituhot lisääntyvät joillakin alueilla	Enemmän kuusentähtikirjaajille ja kirjanpainajille otollista lisääntymismateriaalia	Alueelliset, topografiaan ja metsiköiden ominaisuuksiin liittyvät erot riskeissä huomioitava
Talvien leudontuminen (kuukausien keskilämpötilat)	Taudinaiheuttajien (esim. versosurma, juurikäpää) rihmasto pystyy kasvamaan puiden lepoaikana	Tällaisten tautien riski lisääntyy	Vaikutuksia ei ole kattavasti tutkittu

Useimmat metsän taudit eivät ole niin selvästi riippuvaisia esimerkiksi tietystä rajoittavasta lämpötilasta kuin jotkut hyönteistuholaiset, vaan lämpötilan lisäksi myös sade tai kosteus vaikuttaa vahvasti useimpien taudinaiheuttajien lisääntymiseen ja leviämiseen. Isäntäkasvien alttius vaikuttaa myös paljon useisiin sienitauteihin. On vaikeampaa ennustaa ilmastonmuutoksen vaikutuksia taudinaiheuttaja-isäntäkasvisuhteisiin kuin yksittäiseen taudinaiheuttajaan. (Lonsdale & Gibbs 2002). Tautien kehittymisen kannalta kriittisinä ajankohtina (eri vuodenaikoina) tapahtuvat muutokset ovat huomattavasti tärkeämpiä kuin esimerkiksi vuoden keskilämpötilojen muutokset. (kts. Tietotaulu 4.2).

Tautien kannalta ns. suotuisan ajan (*conducive days*) pituus, s.o. aika, jossa lämpötila vaihtelee esimerkiksi -5 °C – +5 °C välillä, joka sallii sienten kasvua, mutta rajoittaa puiden toimintaa, saattaa olla ratkaiseva epidemioiden kehitykselle. Lisääntyneet toistuvat kesäsateet, yhdessä lämpötilan kohoamisen kanssa, ovat selvästi yhteydessä punavyökaristeen tuhojen lisääntymisessä Brittiläisen Kolumbian kontortamännyn taimikoissa Kanadassa (Woods 2005).

Abioottisten tuhojen ja äärimmäisten sääilmiöiden ja bioottisten tuhojen välinen vuorovaikutus saattaa olla kaikista tärkein ilmastonmuutoksen vaikutustapa, myös kasvitaujeja ajatellen (Boland ym. 2004).

Taudinaiheuttajien sopeutuminen on paljon nopeampaa kuin niiden isäntien. Korkea taudinaiheuttajan populaationsisäinen perinnöllinen vaihtelu auttaa paikallisia taudinaiheuttajakantoja sopeutumaan muuttuvaan ilmastoon (Sturrock ym. 2011). On erittäin todennäköistä, että monet taudit leviävät uusille

alueille ilmaston lämmitessä. Toisaalta voi syntyä uusia tautiepidemioita, kun taudinaiheuttajille löytyy uusia isäntäkasveja tai uusia potentiaalisia vektoreita. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia arvioitaessa on myös hallittava taudinaiheuttajien epidemiologia. Toistaiseksi tautiepidemioita kuvaavat mallit eivät useimmiten anna mahdollisuuksia ilmastonmuutoksen vaikutuksen tarkkaan ennustamiseen.

Taulukko 4.2. Ilmaston muutoksen vaikutusmekanismeja metsätauteihin.

Muutos	Vaikutus tauteihin + lisää - vähentää	Vaikutusmekanismi ja huomautuksia
Alkukesän sateisuus lisääntyy	Versosurma+ Suopursuruoste+ Männynversoruoste+	Itiölevintä ja infektiotodennäköisyys Kuusenneulasten infektoituminen Männyn infektio talvi-itiöillä
Kasvukauden sateisuus lisääntyy	Versosurma+ Suopursuruoste+ Männynversoruoste+ Punavyökariste+	Itiölevintä, männyn alttius Helmi-itiöiden leviäminen Kesäitiöiden leviäminen Itiölevintä ja infektio; myös lämpötila vaikuttaa
Kevät aikaistuu ja lämpenee	Versosurma+ Juurikäävät+	Itiölevintäaika pitenee Itiölevintäaika pitenee
Syksy pitenee ja lämpenee	Versosurma+ Juurikäävät+	Isäntäkasvin asuttaminen Itiölevintäaika Rihmaston kasvaika
Kuivuusjaksot lisääntyvät	Versosurma- Mesisienet+ Tervasroso- Männynversoruoste-	Itiölevintä, männyn alttius Puiden kuivuusstressi > juuristoinfektiot; vaikutus riippuu mesisienilajista Väli-isäntien tartuttaminen Väli-isäntien tartuttaminen
Talvet leudontuvat	Versosurma+ Juurikäävät+	Isäntäkasvin asuttaminen Korjuuvauriot > juuristoinfektiot

Viitteet

Boland, G.J., Melzer, M.S., Hopkin, A., Higgins, V., Nassuth, A. 2004. Climate change and plant diseases in Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology* 26: 335–350.

La Porta, N., Capretti, P., Thomsen, I.M., Kasanen, R., Hietala, A.M. & Weissenberg, K. 2008. Forest pathogens with higher damage potential due to climate change in Europe. *Canadian Journal of Plant Pathology* 30: 177–195.

Sturrock, R.N., Frankel, 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.

Woods, A. J., Coates, K. D. & Hamann, A. 2005. Is an unprecedented *Dothistroma* needle blight epidemic related to climate change? *Bio-science* 55: 761–769.

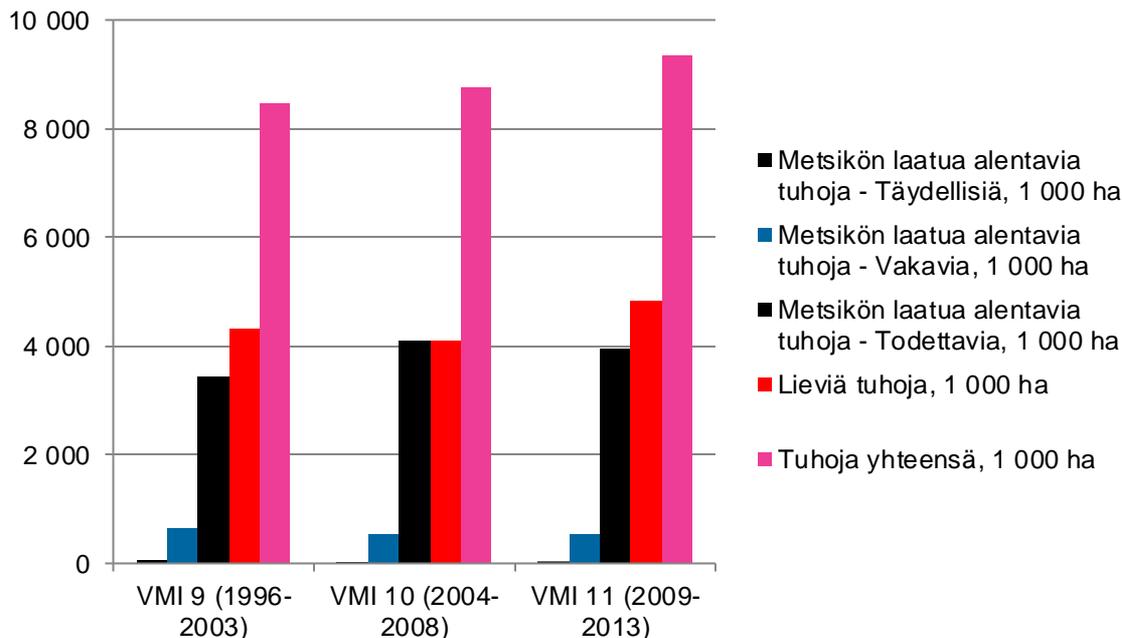
Virtanen, T. & Neuvonen, S. 1999. Performance of moth larvae on birch in relation to altitude, climate, host quality and parasitoids. *Oecologia* 120: 92-101.

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.

5. SUOMEN METSISSÄ ESIINTYNEET TUHOT

Valtakunnan metsien inventoinneissa (VMI) saatava systemaattinen aineisto mahdollistaa yleisimpien ja taloudellisesti tärkeimpien tuhojen ajallisen ja maantieteellisen esiintymisen systemaattisen seurannan suuralueetasolla. Joidenkin lajien aiheuttamien tuhojen esiintymisen osalta saaduissa tuloksissa voi olla jossain määrin harhaa (aliarviota), koska inventointi koealalla on tehty ajankohtana, jolloin k.o. tuholaisen aiheuttamat tuhot eivät vielä ole havaittavissa (ne ilmenevät vasta myöhemmin kesällä). Tuhoja havainnoitiin ensi kertaa monipuolisesti VMI 8:ssa vuosina 1986–1994. Koska mitattava alue vaihtui vuosittain, saattoi laajojakin epidemioita jäädä huomioimatta. VMI 10:ssa (2004–2008) lähtien otantaa muutettiin siten, että maastokoealoja mitataan jokaisena vuonna koko maassa, mikä antaa alueellisesti kattavamman otoksen. Mittausasetelma ei kuitenkaan mahdollista aikasarjojen muodostamista koealoilta.

VMI 11:n (2009–2013) tulosten mukaan (Korhonen ym. 2017) jonkun asteisia tuho-oireita esiintyi noin joka toisessa metsikössä puuntuotannon metsämaalla. Suurin osa tuhoista oli kuitenkin lieviä. Metsiköiden metsänhoidollista laatua alentavien tuhoja esiintyi noin joka neljännessä metsikössä. Vakavia tuhoja, joissa metsikön metsänhoidollinen laatu oli alentunut enemmän kuin yhdellä luokalla, esiintyi vain kolmella prosentilla. Täydellisten, eli metsikön välitöntä uudistamista vaativien tuhojen osuus oli vain 0,2 %, eli noin 34 000 ha. Tuhojen kokonaispinta-ala on hiukan lisääntynyt 1990-luvun lopulta lähtien eri inventoinneissa, ja tämä johtuu lievien tuhojen lisääntymisestä (kuva 5.1). VMI12 ennakkotietojen perusteella kasvutrendi näyttää kuitenkin taittuneen.



Kuva 5.1. Eriasteiset metsätuhot puuntuotannon metsämaalla VMI:ssä eri inventoinneissa. Lähde: Luonnonvarakeskus, Metsävarat

Abioottiset tuhot ovat yleisin tuhoniheuttajaryhmä Suomen metsissä (tietolaatikat 1 ja 2). Tunnistetuista tuhoista olivat lumituhot kaikista yleisimpiä (noin 7 % puuntuotannon metsämaan alasta, laatua alentavia tuhoja 3,8 %). Lumituhoja on eniten mäntyvaltaisissa metsissä. Mäntyvaltaisilla kuvioilla myös hirven, versosurman ja tervasrosion aiheuttamat tuhot ovat yleisiä. Hirvituhoja esiintyy 6,6 %:lla mäntyvaltaisten metsien pinta-alasta (3,7 %:lla laatua alentavia tuhoja). Kuusivaltaisilla kuvioilla tuulituhot ovat kaikista yleisimpiä, ja lehtipuuvallaisilla kuvioilla lahottajasienet (so. muut kuin juurikäävät) ovat yleisimpiä tuhoniheuttajia. Pinta-aloina mitaten hyönteistuhojen osuus on VMI:n tuloksissa pieni.

Globaalisti hyönteistuhojen, kasvitautien ja epäsuotuisten säätekijöiden aiheuttamat häiriöt ovat boreaalisissa metsissä samaa suuruusluokkaa. Hyönteistuhojen osuus korostuu ennen kaikkea lauhkean vyöhykkeen metsissä (van Lierop ym. 2015). Näihin verrattuna abioottisten tuhojen osuus Suomen metsissä korostuu entisestään.

Viitteet

Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Ahola, A., Heikkinen, J., Henttonen, H.M., Hotanen, J.-P., Nevalainen, S., Pitkänen, J., Strandström, M. & Viiri, H. 2017. Suomen metsät 2009–2013 ja niiden kehitys 1921–2013. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 59/2017. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 86 s.

Luonnonvarakeskus, Metsävarat,
http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__06%20Metsavarat/?tablelist=true&rxid=be84d487-e079-4844-ab06-0091ee5dda78

van Lierop, P., Lindquist, E., Sathyapala, S., Franceschini, G. 2015. Global forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events. *Forest Ecology and Management* 352: 78–88.

Taulukko 5.1. Tuhoniheuttajaryhmät VMI 11:ssä 2009–2013 puuntuotannon metsämaalla maan eri osissa. Metsikön metsänhoidollista laatua alentavat tuhot.

Aiheuttajaryhmä	% puuntuotannon metsämaan pinta-alasta		
	Koko maa	Etelä-Suomi	Pohjois- Suomi
Abioottiset tuhot	6,8	4	10,9
Ihmisen toiminta	1,4	2,1	0,3
Hirvieläimet ja muut selkärangaiset	3	2,5	3,8
Hyönteiset	0,7	1	0,2
Sienet	3,8	2,5	5,5
Kilpailu elintilasta	1,3	1,2	1,5
Tunnistamaton	7,5	7,4	7,6
Yhteensä	24,5	20,7	29,8
Kaikkien tuhojen pinta-ala km ²	45068	22418	22650

Taulukko 5.2. Laatu alentavien ja kaikkien tuhojen aiheuttajat puuntuotannon metsämaalla VMI 11:ssä 2009–2013.

Aiheuttajaryhmä	Aiheuttaja	Laatua alentavat		Kaikki tuhot		
		km ²	%	km ²	%	
Abioottiset	Kuivuus	118	,06	284	,15	
	Lumi	6920	3,75	12836	6,96	
	Metsäpalo	66	,04	89	,05	
	Muu maaperätekijä	607	,33	1091	,59	
	Muut säätekijät	164	,09	300	,16	
	Pakkanen	592	,32	1519	,82	
	Ravinteiden epätasapaino	1746	,95	2614	1,42	
	Tunnistamaton abioottinen	11	,01	19	,01	
	Tuuli	1963	1,07	4104	2,23	
	Vetisyys	433	,23	646	,35	
	Hirvieläimet	Hirvi	5407	2,93	10001	5,43
Muu hirvieläin		24	,01	39	,02	
Selkärangaiset	Myyrä	315	,17	516	,28	
	Muu selkärangainen	60	,03	87	,05	
Hyönteiset	Muu neulastuholainen	0	,00	10	,01	
	Muu tunnistettu hyönteinen	3	,00	20	,01	
	Piikkumäntypistiäinen	7	,00	27	,01	
	Ruskomäntypistiäinen	962	,52	2703	1,47	
	Tukkimiehentäi	48	,03	78	,04	
	Kirjanpainaja	51	,03	67	,04	
	Tunnistamaton	81	,04	225	,12	
	Ytimennävertäjät	112	,06	414	,22	
	Sienet	Ei tunnistettu sieni	294	,16	576	,31
		Harmaakariste	35	,02	328	,18
Juurikäpää		516	,28	663	,36	
Muu karistesieni		142	,08	432	,23	
Koivunruoste		7	,00	46	,02	
Kuusensuopursuruoste		201	,11	1066	,58	
Muu lahottajasieni		2058	1,12	3425	1,86	
Muu ruostesieni		45	,02	91	,05	
Muu tunnistettu sieni		135	,07	265	,14	
Männynversoruoste		577	,31	1024	,56	
Tervasroso		1649	,89	3223	1,75	
Ihmisen toiminta	Versosurma	1279	,69	4073	2,21	
	Muu	2085	1,13	3229	1,75	
Kilpailu	Puun korjuu	421	,23	1272	,69	
	Kilpailu	2398	1,30	4367	2,37	

6. MASSIIVISIA HYÖNTEISTUHOJA POHJOIS-AMERIKASSA

6.1. Kaarnakuoriaisten aiheuttamat tuhot

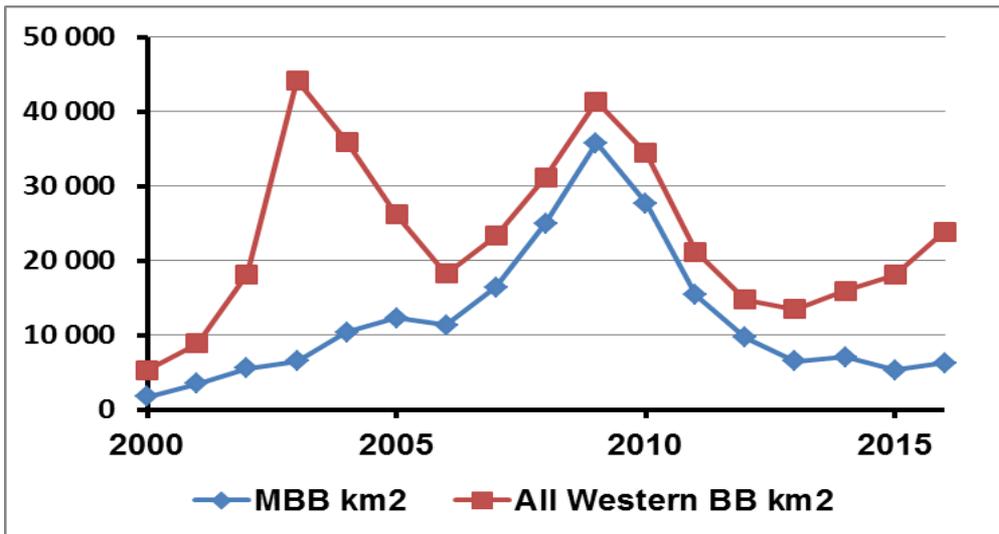
Vuoristoniluri (*Dendroctonus ponderosae*; engl. *Mountain Pine Beetle*) on läntisen Pohjois-Amerikan vuoristoalueiden mäntymetsien (*Pinus contorta* ja muita mäntylajeja) tuhoisimpia hyönteisiä. Viimeisten vuosikymmenien aikana vuoristonilurin suuret joukko-esiintymät ovat tuhonneet miljoonia hehtaareja mäntymetsiä USA:ssa (Kuva 6.1.1) ja Kanadassa (Kurz ym. 2008; Hicke ym. 2012). Lajilla on yleensä yksi sukupolvi vuodessa alemmilla korkeuksilla ja sukupolven kesto on yksi tai kaksi vuotta (= ½ sukupolvea vuodessa) korkeammalla vuoristossa (Bentz ym. 2014). Ilmastomuutos vaikuttaa vuoristoniluriin ainakin kolmella tavalla: 1) kesälämpötilat vaikuttavat elinkierron vaiheiden ajoittumiseen, mikä on tärkeää aikuisten parveilun fenologiselle synkronoinnille - tämä on välttämätön edellytys joukkohyökkäyksille; 2) kylmät talvilämpötilat lisäävät talvehtivien kovakuoriaisten kuolleisuutta; 3) säällä on myös epäsuoria vaikutuksia vuoristonilurien kannanvaihteluihin, erityisesti isäntäpuiden puolustuskyvyn heikentyessä kuivuuden vuoksi.

Vuoristoniluripopulaatioiden välillä näyttää olevan geneettistä vaihtelua herkkyydessä sääolosuhteisiin. Yhden sukupolven kehittymiseen tarvittava lämpösumma on selvästi pienempi viileässä kuin lämpimämissä paikoissa elävissä populaatioissa (Bentz ym. 2011). Kesien lämmitessä levinneisyyden lämpöisimmillä alueilla sukupolviaika pysyy enimmäkseen yhtenä vuotena, mutta pohjoisessa sukupolviaika lyhenee kahdesta vuodesta yhteen, mikä lisää näiden populaatioiden kasvuvauhtia. Levinneisyysalueen viileällä reunalla talvilämpötilojen nousu (talvikuolleisuuden väheneminen) on helpottanut levinneisyyden laajenemista pohjoiseen ja aiempaa korkeammalle.

Tämän ilmastomuutoksesta seuraavan levinneisyysalueen laajenemisen vuoksi vuoristoniluri kohtaa ”naiiveja” (vähemmän puolustettuja) isäntäpopulaatioita ja lajeja (Cudmore ym. 2010; Raffa ym. 2013). Ollaan oltu huolestuneita siitä, että vuoristoniluri voi laajentaa esiintymisaluettaan Pohjois-Amerikan keski- ja itäosien mäntymetsiin (Cullingham ym. 2011). Mallinustyö kuitenkin viittaa siihen, että tämän todennäköisyys pysyy alhaisena tai kohtalaisena tämän vuosisadan aikana (Benz ym. 2010).

Vuoristonilurituhojen seurauksena metsiin on jäänyt runsaasti paloherkkää kuollutta puuainesta. Kesällä 2017 Brittiläisessä Kolumbiassa paloi metsää yli 1,2 miljoonaa hehtaaria, mikä on enemmän kuin kertaakaan edeltävän puolen vuosisadan aikana, ja yli 8-kertaisesti edeltävien 10 vuoden keskiarvoon verrattuna (Kuva 6.1.2; <http://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/area-of-b-c-burned-by-wildfires-at-a-56-year-high-1.4226227>).

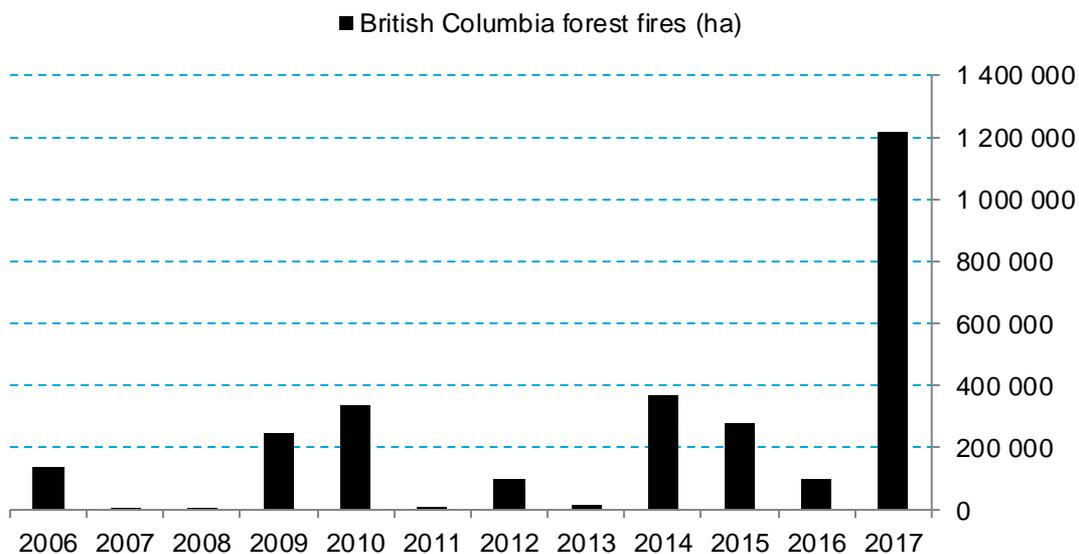
Southern pine beetle (SPB; ”Etelänmäntyniluri”; *Dendroctonus frontalis* Zimmermann), on taloudellisesti tärkein mäntyjen (erityisesti *Pinus taeda* ja *P. echinata*) tuholainen Keski-Amerikasta Etelä-USA:han. Useimmiten SPB elää puissa, jotka ovat heikentyneet tai vahingoittuneet salamaniskujen, myrskytuhojen tai tautien vuoksi, mutta satunnaisissa joukkoesiintymissä, jotka kestävät yleensä 2–3 vuotta, nämä kovakuoriaiset voivat tappaa tuhansia terveitä mäntyjä. SPB:n vuosittaiset taloudelliset tappiot voivat ylittää 200 miljoonaa dollaria (Price ym. 1997). Lämpötilasta riippuen SPB:llä voi olla yhdestä yhdeksään sukupolvea vuodessa. Ilmastomuuttujien ja SPB:n joukkoesiintymisten alkamisen väliset suhteet ovat monimutkaisia ja ne voivat olla vuorovaikutuksessa muiden ympäristövaikutusten ja hallintatoimien kanssa. Tärkein tekijä, joka rajoittaa SPB:n leviämistä pohjoiseen, on talven minimilämpötila (Ungerer ym. 1999; Tran ym. 2007; Friedenber ym. 2008). Ilman lämpötilan laskeminen alle -16 °C:n aiheuttaa talvehtivien hyönteisten lähes täydellisen kuolleisuuden. SPB:n aiheuttamia tuhoja on äskettäin todettu New Jerseyssä, historiallisen tautipesäkkeen pohjoispuolella, ja lajin levinneisyysalueen on ennustettu laajenevan pohjoiseen, uhaten Koillis-USA:n ja Kanadan kaakkoisosan metsä-taloutta (Lesk ym. 2017).



Kuva 6.1.1. Vuoristonilurin (MBB) ja kaikkien kaarnakuoriaisten aiheuttamien tuhojen laajuus (km²) USA:n länsiosassa vuosina 2000–2016. Lähde:

https://www.fs.fed.us/foresthealth/technology/pdfs/MpbWestbb_Summary Historiatietoja tuhojen laajuudesta pidemmällä ajanjaksolla löytyy seuraavista julkaisuista: Kurz ym. (2008), Hicke ym. (2012).

Myös muut läntiset kaarnakuoriaislajit ovat aiheuttaneet massiivisia tuhoja (kuva 6.1.1), mutta näiden suhdetta ilmastonmuutokseen on tutkittu vähemmän.



Kuva 6.1.2. Metsäpalojen vuosittaisia pinta-aloja Brittiläisessä Kolumbiassa 2006–2017. Lähde:

<https://www2.gov.bc.ca/gov/content/safety/wildfire-status/wildfire-statistics/wildfire-averages>

Viitteet

Bentz, B.J., Regniere, J., Fettig, C.J., Hansen, E.M., Hayes, J.L., Hicke, J.A., Kelsey, R.G., Negrón, J.F. & Seybold, S.J. 2010. Climate change and bark beetles of the western United States and Canada: Direct and Indirect Effects. *Bioscience* 60: 602–613.

Bentz, B.J., Bracewell, R.R., Mock, K.E. & Pfrender, M.E. 2011. Genetic architecture and phenotypic plasticity of thermally-regulated traits in an eruptive species, *Dendroctonus ponderosae*. *Evolutionary Ecology* 25: 1269–1288.

Bentz, B.J., Vandygriff, J.C., Jensen, C., Coleman, T., Maloney, P., Smith, S., Grady, A. & Schen-Langenheim, G. 2014. Mountain pine beetle voltinism and life history characteristics across latitudinal and elevational gradients in the western United States. *Forest Science*.

Cudmore, T.J., Bjorklund, N., Carroll, A.L. & Lindgren, B.S. 2010. Climate change and range expansion of an aggressive bark beetle: evidence of higher beetle reproduction in naive host tree populations. *Journal of Applied Ecology* 47: 1036–1043.

Cullingham, C.I., Cooke, J.E., Dang, S., Davis, C.S., Cooke, B.J. & Coltman, D.W. 2011. Mountain pine beetle host-range expansion threatens the boreal forest. *Molecular Ecology* 20: 2157–2171.

Friedenberg, N.A., Sarkar, S., Kouchoukos, N., Billings, R.F. & Ayres, M.P. 2008. Temperature extremes, density dependence, and southern pine beetle (Coleoptera: Curculionidae) population dynamics in east Texas. *Environmental Entomology* 37: 650–659.

<http://www.bioone.org/doi/abs/10.1603/0046-225X%282008%2937%5B650%3ATEDDAS%5D2.0.CO%3B2>

Hicke, J.A., Allen, C.D., Desai, A.R., Dietze, M.C., Hall, R.J., Hogg, E.H., Kashian, D.M., Moore, D., Raffa, K.F., Sturrock, R.N. & Vogelmann, J. 2012. Effects of biotic disturbances on forest carbon cycling in the United States and Canada. *Global Change Biology* 18: 7–34, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02543.x

Kurz ym., 2008a. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452: 987–990.

Lesk, C., Coffel, E., D'Amato, A.W., Dodds, K. & Horton, R. 2017. Threats to North American forests from southern pine beetle with warming winters. *Nature Climate Change* 7: 713–717.

Price, T.S., Dogget, H.C., Pye, J.M. & Smith, B. 1997. A history of southern pine beetle outbreaks in the southeastern United States, 72 pp. Georgia Forestry Commission, Macon, Georgia.

Raffa, K.F., Powell, E.N. & Townsend, P.A. 2013. Temperature-driven range expansion of an irruptive insect heightened by weakly coevolved plant defenses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110: 2193-8.

Tran, J.K., Ylioja, T., Billings, R., Régnière, J. & Ayres, M.P. 2007. Impact of minimum winter temperatures on the population dynamics of *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Scolytinae). *Ecological Applications* 17: 882–899.

Ungerer, M.J., Ayres, M.P. & Lombardero, M.J. 1999. Climate and the northern distribution limits of *Dendroctonus frontalis* Zimmermann (Coleoptera: Scolytidae). *Journal of Biogeography* 26: 1133-1145.
<http://www.sysecol2.ethz.ch/Refs/EntClim/U/Un027.pdf>

6.2. Lehtiä tai neulasia syövien hyönteisten aiheuttamat tuhot

Seppo Neuvonen

Pohjois-Amerikassa on myös esiintynyt laajoja ja pitkäkestoisia neulasia syövien hyönteisten aiheuttamia tuhoja (Millers ym. 1989; Mattson ym. 1991; Hicke ym. 2012; Tietotaulu 6.2). Pikkuperhosiin kuuluvien kuusikäriäisten (*Choristoneura* spp.) aiheuttamat tuhot voivat kestää yli 10 vuotta (Suomessa esiintyvillä tuholaissilla joukkoesiintymät kestävät kerrallaan yleensä enintään pari kolme vuotta). Levinneisyydeltään itäisemmän kuusikäriäislajin (*C. fumiferana*) tuhoalue Kanadan boreaalisissa metsissä oli 1970-luvun loppupuolella yli 40 miljoonan hehtaarin laajuinen, ja läntisemmän lajin (*C. occidentalis*) tuhoalue Yhdysvalloissa oli 1980-luvun puolivälissä yli 5 miljoonaa hehtaaria (Hicke ym. 2012). Viime vuosina kuusikäriäistuhot ovat taas olleet jonkin verran koholla: esim. Quebecissä tuhoala oli vuonna 2013 noin 2,6 miljoonaa hehtaaria (Natural Resources Canada 2018).

Vuoristonilurin aiheuttamien tuhojen lisäksi kuusikäriäistuhot voivat aiheuttaa erittäin merkittäviä muutoksia Pohjois-Amerikan metsien hiilitaseisiin. Samalla tuholaiskantojen kehityksen vaikea ennustettavuus tuo suurta epävarmuutta hiilitaseiden kehityksen ennustamiseen: yhden mallinnustutkimuksen mukaan Kanadan metsät ovat jo muuttuneet hiilinielusta päästölähteeksi, ja arviot päästölähteen voimakkuudesta vaihtelivat ajanjaksona 2008–2012 välillä 30–245 Mt CO₂e yr⁻¹ (Kurz ym. 2008).

Pohjois-Amerikassa on myös merkittäviä lehtipuita syövien hyönteisten aiheuttamia tuhoja. Näistä merkittävimpiä ovat enemmän tai vähemmän syklisesti esiintyvät perhoslajit *Malacosoma disstria* (Forest Tent Caterpillar) ja lehtinunna (*Lymantria dispar*, Gypsy Moth; Pohjois-Amerikassa vieraslaji; Morin & Liebhold 2016). *M. disstria* huippujen aikana tuhoalat Yhdysvalloissa ovat vaihdelleet noin viiden ja 25:n miljoonan hehtaarin välillä, ja lehtinunnan tuhoalat olivat 1980- ja 1990-luvuilla kolmesta viiteen miljoonaa hehtaaria, mutta ovat tämän jälkeen pysyneet alhaisemmalla tasolla (Hicke ym. 2012).

Viitteet

Hicke, J.A., Allen, C.D., Desai, A.R., Dietze, M.C., Hall, R.J., Hogg, E.H., Kashian, D.M., Moore, D., Raffa, K.F.; Sturrock, R.N. & Vogelmann, J. 2012. Effects of biotic disturbances on forest carbon cycling in the United States and Canada. *Global Change Biology* 18: 7–34, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02543.x

Mattson, W.J., Herms, D.A., Witter, J.A. & Allen, D.C. 1991. Woody plant grazing systems: North American outbreak folivores and their host plants. Teoksessa: Baranchikov, Y.N., Mattson, W.J., Hain, F.P. & Payne, T.L. (Toim.) *Forest Insect Guilds: Patterns of Interaction with Host Trees*. U.S.D.A., Forest Service, NE Forest Exp. Station. Gen. Tech. Rep. NE-153: 53-84.

Millers, I., Shriner, D.S. & Rizzo, D. 1989. History of hardwood decline in the eastern United States. USDA Forest Service, Northeastern Experiment Station, Gen. Techn. Report NE-126: 1-75.

Morin, R.S. & Liebhold, A.M. 2016. Invasive forest defoliator contributes to the impending downward trend of oak dominance in eastern North America. *Forestry* 89: 284-289.

Natural Resources Canada 2018. Spruce budworm. <http://www.nrcan.gc.ca/forests/fire-insects-disturbances/top-insects/13383> (katsottu viimeksi 11.6.2018)

Tietotaulu 6.2. Merkittäviä Lehtiä tai neulasia syöviä tuhohyönteisiä Pohjois-Amerikassa ja tietoja niiden aiheuttamien tuhojen laajuudesta ja esiintymisestä.

Woody plant outbreak folivores North America (from Mattson et al, 1991); taulukossa esitetyistä lajeista erityisesti **punaisella merkittyjen lajien** ja ilmastomuutoksen suhteita on tutkittu

Data derived from Furniss and Carolin 1977, Drooz 1985, and others.

Outbreak insect species	Family	Maximum area	percentage of 28 study years		Primary host plant
			Frequency (%)	Average area (ha) / year	
<i>Choristoneura occidentalis</i>	Tortricidae		100 %	2 290 445	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Douglaskuusi)
<i>Choristoneura fumiferana</i>	Tortricidae		93 %	1 285 940	<i>Abies balsamea</i> (Palsamipihta)
<i>Malacosoma disstria</i>	Lasiocampidae	13 461 538	100 %	934 676	<i>Populus, Acer, Quercus, Nyssa</i> (Lehtipuut)
<i>Lymantria dispar</i>	Lymantriidae	5 263 158	93 %	718 970	<i>Quercus</i> spp. (Tammilajit + muut lehtipuut)
<i>Coleophora laricella</i>	Coleophoridae		43 %	507 103	<i>Larix laricina</i> (Lehtikuusi)
<i>Paleacrita vernata</i>	Geometridae	10 931 174	7 %	390 413	<i>Acer, Ulmus, Betula, Prunus, Quercus</i> (Lehtipuut)
<i>Choristoneura conflictana</i>	Tortricidae		68 %	245 843	<i>Populus tremuloides</i> (Haapa)
<i>Rheumaptera hastata</i>	Geometridae	2 359 919	32 %	156 197	<i>Betula papyrifera</i> (Koivu)
<i>Neodiprion</i> spp. (9 taxa)	Diprionidae			138 161	<i>Pinus</i> spp.
<i>Heterocampa manteo</i>	Notodontidae	2 226 721	21 %	116 648	<i>Quercus alba</i> (Tammi)

+ ~70 vähämerkityksellisempää tuholaislajia

7. TÄRKEIMMÄT ABIOTTISET JA BIOOTTISET TUHOT SUOMESSA JA LÄHIALUEILLA ILMASTONMUUTOKSEN NÄKÖKULMASTA

7.1. Havumetsien tuhot

KIRJANPAINAJA

Seppo Neuvonen

Kaarnakuoriaisiin kuuluva kirjanpainaja on yksi Euroopan pahimmista metsätuholaisista (Tietolaatikko 7.1.1; Christiansen & Bakke 1988; Gregoire & Evans 2004). Kirjanpainaja-kannan ollessa alhainen laji elää enimmäkseen tuulen kaatamissa tai muuten vaurioituneissa tai heikentyneissä kuusissa. Kirjanpainajakanta voi kasvaa erityisesti myrskytuhojen jälkeen, koska tällöin sopivaa lisääntymismateriaalia on runsaasti (Marini ym. 2013, 2017). Kun kirjanpainajakanta on riittävän korkea, kuoriaiset pystyvät joukkovoimansa avulla torjumaan puiden puolustuksen (pihkavuoto) ja tappamaan myös eläviä kuusia. Kuivuus heikentää kuusen puolustusta ja näin edesauttaa tuhojen syntyä. Kirjanpainajalla on sitä suurempi merkitys, mitä enemmän kuusta on metsikössä (Worrell 1983; Wermelinger 2004).

Tietolaatikko 7.1.1 – esimerkkejä kirjanpainajan aiheuttamista tuhoista:

Euroopassa kaarnakuoriaiset ovat vuosina 1950–2000 tuhonneet keskimäärin 2,8 miljoonaa m³ puustoa vuodessa (Schelhaas ym. 2003)

Puolassa kirjanpainajat ja muut kaarnakuoriaiset ovat tuhonneet (kuusikoiden suhteellisen pienestä pinta-alasta huolimatta) vuosina 1980–1998 keskimäärin miljoona m³ kuusipuustoa vuodessa (Grodski 1999).

Norjan kirjanpainajatuhoissa 1970–1980 -luvuilla tappiot olivat yhteensä yli kuusi miljoonaa kuutiota.

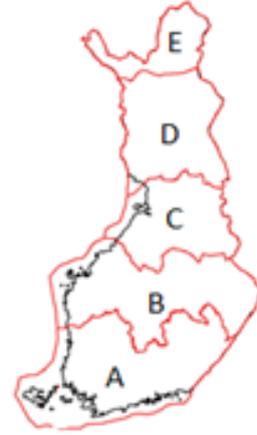
Ruotsissa tämän vuosituhannen alun myrskytuhojen jälkeen kirjanpainajat ovat tuhonneet noin neljä miljoonaa kuutiota kuusia (Långström ym. 2009).

Kirjanpainajakannat ovat Suomessa olleet pitkään alhaisia (Martikainen ym. 1996, Valkama ym. 1997), mutta tämän vuosikymmenen alkupuolella esiintyneet myrskytuhot ja lämpimät kesät ovat laukaisseet tuhoja myös elävissä kuusissa (Siitonen & Pouttu 2014; Neuvonen ym. 2015; Neuvonen & Viiri 2017; Viiri & Neuvonen 2016). Lämpimät kesät edesauttavat kirjanpainajakannan nousua, koska ne mahdollistavat useampien sisarusjäkeläistöjen ja jopa toisen sukupolven kehittymisen samana kesänä (Annala 1969; Baier ym. 2007; Öhrn ym. 2014). Suomessa kirjanpainajan toinen sukupolvi havaittiin ensimmäisen kerran vuonna 2010 (Pouttu & Annala 2010).

Kirjanpainajan aiheuttamat tuhot ovat lisääntyneet Euroopassa ja ne voivat lisääntyä edelleen ilmaston lämmetessä (Seidl ym. 2008, 2009, 2011; Økland ym. 2015). Kuivuus altistaa kuusia kirjanpainajatuhoille. Ilmaston lämpenemisen vaikutuksia kirjanpainajan sukupolvien määriin on tutkittu erityisesti Ruotsissa ja osassa näistä tutkimusalue käsittää myös Suomen (Jönsson & Barring 2011; Jönsson ym. 2007, 2009, 2011, 2012). Tässä raportissa havainnollistamme ilmaston lämpenemisen potentiaalisia vaikutuksia käyttämällä lämpösumman 1500 dd5 (tämä mahdollistaa toisen kirjanpainajasukupolven kehittymisen) esiintymisen todennäköisyyksiä (Kuva 7.1.1.1). Tämän vuosisadan loppupuolella erityisesti RCP8.5 skenaarion mukaan kirjanpainajalla voi kehittyä kaksi sukupolvea lähes joka kesä noin Oulun korkeudelle saakka, ja vastaava tilanne on eteläisimmässä Suomessa myös RCP4.5 skenaarion mukaan.

Kirjanpainajan kahden sukupolven kehitykseen vaadittavan lämpösumman (1500 dd5) esiintymistodennäköisyys (%) ennustetuissa "tulevissa" ilmastoissa

	Alueet	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RPC 4.5	Mean_A	62,2	84,6	91,4
RPC 4.5	Mean_B	29,1	58,7	73,4
RPC 4.5	Mean_C	10,3	33,6	51,1
RPC 4.5	Mean_D	1,1	8,3	18,1
RPC 4.5	Mean_E	0,1	1,0	3,0
	Alueet	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RPC 8.5	Mean_A	59,4	90,9	99,3
RPC 8.5	Mean_B	33,1	75,9	96,7
RPC 8.5	Mean_C	12,9	53,9	87,5
RPC 8.5	Mean_D	1,7	21,6	61,2
RPC 8.5	Mean_E	0,1	5,1	34,9



10

1.6.2018

© Luonnonvarakeskus



Kuva 7.1.1. Kirjanpainajan kahden sukupolven kehitykseen vaadittavan lämpösumman esiintymistodennäköisyyksiä eri alueilla ja ajanjaksoilla RCP4.5 ja RCP8.5 skenaarioiden pohjalta.

Viitteet

Annala, E., 1969. Influence of temperature upon the development and voltinism of *Ips typographus*, (L.) (Coleoptera, Scolytidae). Annales Zoologici Fennici 6, 161–208.

Baier, P., Pennerstorfer, J. and Schopf, A. 2007. PHENIPS - A comprehensive phenology model of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation. Forest Ecology and Management 249: 171–186.

Christiansen, E. and Bakke, A. 1988. The spruce bark beetle of Eurasia. In: Berryman, A.A. (ed.) Dynamics of forest insect populations, patterns, causes, and implications. Plenum Press, New York, NY, USA, pp. 480–505.

Gregoire, J.-C. & Evans, H.F. 2004. Damage and control of BAWBILT organisms. An overview. Sivut 19-37 julkaisussa Lieutier ym. (toim.) Bark and wood boring insects in living trees in Europe, a synthesis. Kluwer Academic Publishers. Alankomaat.

Grodzki, W. 1999. Phytosanitary situation in Polish mountain forests in 1998 and forecast for 1999. s. 30–35. Teoksessa B. Forster, M. Knizek, ja W. Grodzki (toim.), Methodology of forest insect and disease survey in Central Europe. Proceedings of the Second Workshop of the IUFRO Working Party 7.03.10, April 20-23, 1999, Sion-Châteauneuf, Switzerland. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf, Switzerland.

Jönsson, A.M. & Barring, L. 2011. Future climate impact on spruce bark beetle life cycle in relation to uncertainties in regional climate model data ensembles. - Tellus Series a-Dynamic Meteorology and Oceanography 63: 158–173.

- Jönsson, A.M., Appelberg, G., Harding, S. & Barring, 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.
- Jönsson, A.M., Harding, S., Barring, L. & Ravn, H.P. 2007. Impact of climate change on the population dynamics of *Ips typographus* in southern Sweden. - *Agricultural and Forest Meteorology* 146: 70-81.
- Jönsson, A.M., Harding, S., Krokene, P., Lange, H., Lindelow, A., Økland, B., Ravn, H. P. & Schroeder, L. M. 2011. Modelling the potential impact of global warming on *Ips typographus* voltinism and reproductive diapause. *Climatic Change* 109: 695-718.
- Jönsson, A.M., Schroeder, L. M., Lagergren, F., Anderbrant, O. & Smith, B. 2012. Guess the impact of *Ips typographus* -An ecosystem modelling approach for simulating spruce bark beetle outbreaks. *Agricultural and Forest Meteorology* 166: 188-200.
- Långström, B., Lindelöw, Å., Schroeder, M., Björklund, N. & Öhrn, P. 2009. The spruce bark beetle outbreak in Sweden following the January-storms in 2005 and 2007. Proceedings of a workshop on "Insects and Fungi in Storm Areas" organised by the IUFRO WG7.03.10 "Methodology of Forest Insect and Disease Survey in Central Europe" on September 15 to 19, 2008 in Štrbské Pleso, Slovakia
- Marini, L., Lindelöw, Å., Jönsson, A.M., Wulff, S. & Schroeder, L.M. 2013. Population dynamics of the spruce bark beetle: a long-term study. *Oikos* 122, 1768-1776.
- Marini, L., Økland, B., Jönsson, A.M., Bentz, B., Carroll, A., Forster, B., Grégoire, J.-C., Hurling, R., Nageleisen, L.M., Netherer, S., Ravn, H.P., Weed, A. & Schroeder, M. 2017. Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography* 40: 001-010, doi: 10.1111/ecog.02769
- Martikainen, P., Siitonen, J., Kaila, L & Punttila, P. 1996. Intensity of forest management and bark beetles in non-epidemic conditions: a comparison between Finnish and Russian Karelia. *Journal of Applied Entomology* 120: 257-264.
- Neuvonen, S., Tikkanen, O.-P., Pouttu, A. & Silver, T. 2015. Kirjanpainajatilanne 2014 ja vertailua aiempiin vuosiin. Sivut 16-22 julkaisussa *Metsätuhot vuonna 2014 / Esa Heino ja Antti Pouttu (toim.). Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 39/2015.
- Neuvonen, S. & Viiri, H. 2017. Changing Climate and Outbreaks of Forest Pest Insects in a Cold Northern Country, Finland. Chapter 5 (s. 49-59) Teoksessa: Latola, K. & Savela, H. (Eds.): *The Interconnected Arctic — UArctic Congress 2016*; Springer Polar Sciences. https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-57532-2_5
- Pouttu, A. & Annala, E. 2010. Kirjanpainajalla kaksi sukupolvea kesällä 2010. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2010: 521-523.
- Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Schuck, A., 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology* 9, 1620-1633.
- Seidl, R., Rammer, W., Jäger, D. & Lexer, M.J., 2008. Impact of bark beetle (*Ips typographus* L.) disturbance on timber production and carbon sequestration in different management strategies under climate change. *Forest Ecology and Management* 256: 209-220.
- Seidl, R., Schelhaas, M.-J. & Lexer, M. J. 2011. Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. *Global Change Biology* 17: 2842-2852.
- Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Lindner, M. & Lexer, M. 2009. Modelling bark beetle disturbances in a large scale forest scenario model to assess climate change impacts and evaluate adaptive management strategies. *Regional Environmental Change* 9: 101-109.
- Siitonen, J. & Pouttu, A. 2014. Kirjanpainajatuhot Rörstrandin vanhojen metsien suojelualueella sekä ympäröivissä talousmetsissä Sipoossa. *Metsätieteen aikakauskirja vuosikerta 3/2014 artikkeli id 5810*. <https://doi.org/10.14214/ma.5810>

Valkama, H., Rätty, M., Niemelä, P. 1997. Catches of *Ips duplicatus* and other non-target Coleoptera by *Ips typographus* pheromone trapping. *Entomologica Fennica* 8: 153–159.

Öhrn, P., Långström, B., Lindelöw, Å. & Björklund, N. 2014. Seasonal flight patterns of *Ips typographus* in southern Sweden and thermal sums required for emergence. *Agricultural and Forest Entomology* 16: 147–157.

Økland, B., Netherer, S. & Marini, L. 2015. The Eurasian spruce bark beetle - role of climate. Teoksessa: Björkman, C. & Niemelä, P. (toim) *Climate change and insect pests*. CABI.

Viiri, H. & Neuvonen, S. 2016. Kirjanpainajasta on tullut pysyvä ongelma Suomen kuusimetsille – Mitä olisi tehtävä? *Kasvinsuojelulehti* 2/2016: 57–61.

Wermelinger, B. 2004. Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* – a review of recent research. *Forest Ecology and Management* 202: 67–82.

Worrell, R. 1983. Skoglige bestandsfaktorer som påvirker omfanget av granbarkbilleskade i Sør-Norge. (Stand factors affecting the occurrence of damage by *Ips typographus* in South Norway). *Rapp. Nor. inst. skogforsk.* 18/83: 1–9.

YTIMENNÄVERTÄJÄT

Heli Viiri

Pystynävertäjä on merkittävin männyn runkotuholainen (ks. Taulukko 5.2), joka aiheuttaa Pohjoismaissa pääasiassa kasvaintappioita. Se lisääntyy hakkuun jälkeen metsään jääneissä rungoissa, latvuksissa tai tuulenkaadoissa ja kuljettaa mukanaan värivikaa aiheuttavia sieniiä. Etelä-Euroopassa pystynävertäjä voi tappaa mäntyjä yhdessä muiden kaarnakuoriaisten kanssa (Leveux ym. 1985, Piou & Lieutier 1989). Kiinassa pystynävertäjä tappaa täysin terveitä *Pinus yunnanensis* mäntyjä Kunmingin alueella (Hui 1991). Pohjoismaissa pystynävertäjät voivat tappaa esimerkiksi metsäpalon tai voimakkaan neulassyönnin heikentämiä puita (Långström & Hellqvist 1993, Annala ym. 1999, Cedervind ym. 2003), mutta eivät käytännössä terveitä puita. Vaakanävertäjät iskeytyvät yleensä sekundäärilajina pystynävertäjän jälkeen (Långström & Hellqvist 1993).

Aikuiset hyönteiset tekevät keväällä ravintosityönnin latvuksissa saavuttaakseen sukukypsyyden. Tällöin ne porautuvat isojen mäntyjen latvusversoihin, jotka syövät ontoiksi. Ontoksi syödyt kasvaimet putoavat maahan. Ravintosityönti aiheuttaa merkittäviä kasvutappioita etenkin puutavaran varastointialueiden läheisyydessä.

Ytimennävertäjillä on vain yksi sukupolvi vuoden aikana, mutta naaraat voivat tuottaa useita jälkeläistöjä otollisissa olosuhteissa saman kesän aikana (Långström 1980, 1983), joten lisääntymismateriaalin läsnä ollessa populaatiokoko voi kasvaa nopeasti. Näiden ns. sisarusjälkeläistöjen määrä kasvaa mentäessä pohjoisesta etelään. Populaatiotiheyden ollessa korkea, lajin sisäinen kilpailu voi olla merkittävä kuoren resurssien hyödyntämistä rajoittava tekijä ja yhdessä puun puolustusmekanismien kanssa ne ovat merkittävimmät kuolleisuuden aiheuttajat.

Ilmastolliset tekijät voivat vaikuttaa pystynävertäjän populaatiodynamiikkaan vaikuttamalla lisääntymismateriaalin määrään. Mikäli tuulenkaatojen määrä, puiden kuivuusstressi, metsäpalojen määrä tai hyönteisten aiheuttamat neulastuhot yleistyvät, niin ytimennävertäjien aiheuttamien seuraustuhojen määrä voi kasvaa.

Pystynävertäjän merkitys tulee todennäköisesti lisääntymään merkittävästi ilmaston muuttuessa, koska se pystyy tappamaan neulasia menettäneitä puita ja aiheuttamaan voimakkaita kasvainvaurioita eläville puille ravintosityönnin aikana. Vaikka sen kehitysaika todennäköisesti pysyy yksivuotisena lämpimämmässäkin

ilmastossa, vastakuoriutuneet kuoriaiset voivat menestyksellisesti lisääntyä mäntypölleissä ilman talvehtimista ja ravintosityöntiä.

Viitteet

- Annala, E., Långström, B., Varama, M., Hiukka, R., Niemelä, P. 1999. Susceptibility of defoliated Scots pine to spontaneous and induced attack by *Tomicus piniperda* and *Tomicus minor*. *Silva Fennica* 33: 93–106.
- Hui, Y. 1991. On the bionomy of *Tomicus piniperda* (L.) (Col., Scolytidae) in the Kunming region of China. *Journal of Applied Entomology* 112: 366–369.
- Levieux, J., Lieutier, F., Delplanque, A. 1985. Les scolytes ravageuses du pin sylvestre. *Revue Forestiere Francaise* 37: 431–440.
- Långström, B. 1980. Life cycles of the pine shoot beetles with particular reference to their maturation feeding in the shoots of Scots pine. *Sveriges Lantbruks universitet, Avdelningen Skogsentomologi*. 123 s.
- Långström, B. 1983. Life cycles and shoot-feeding of the pine shoot beetles. *Studia Forestalia Suecica* 163: 1–29.
- Långström, B. & Hellqvist, C. 1993. Induced and spontaneous attack by pine shoot beetles on young Scots pine trees: tree mortality and beetle performance. *Journal of Applied Entomology*. 115: 25–36.
- Piou, D. & Lieutier, F. 1989. Observations symptomatologiques et rôles possibles d'*Ophiostoma minus* Hedge (ascomycete: Ophiostomatales) et de *Tomicus piniperda* L. (Coleoptera: Scolytidae) dans le dépérissement du pin sylvestre en forêt d'Orléans. *Annals Des Sciences Forestieres* 46: 38–54.
- Cedervind, J., Pettersson, M. & Långström, B. 2003. Attack dynamics of the pine shoot beetle, *Tomicus piniperda* (Col.; Scolytinae) in Scots pine stands defoliated by *Bupalus piniaria* (Lep.; Geometridae). *Agricultural and Forest Entomology* 5: 253–261.

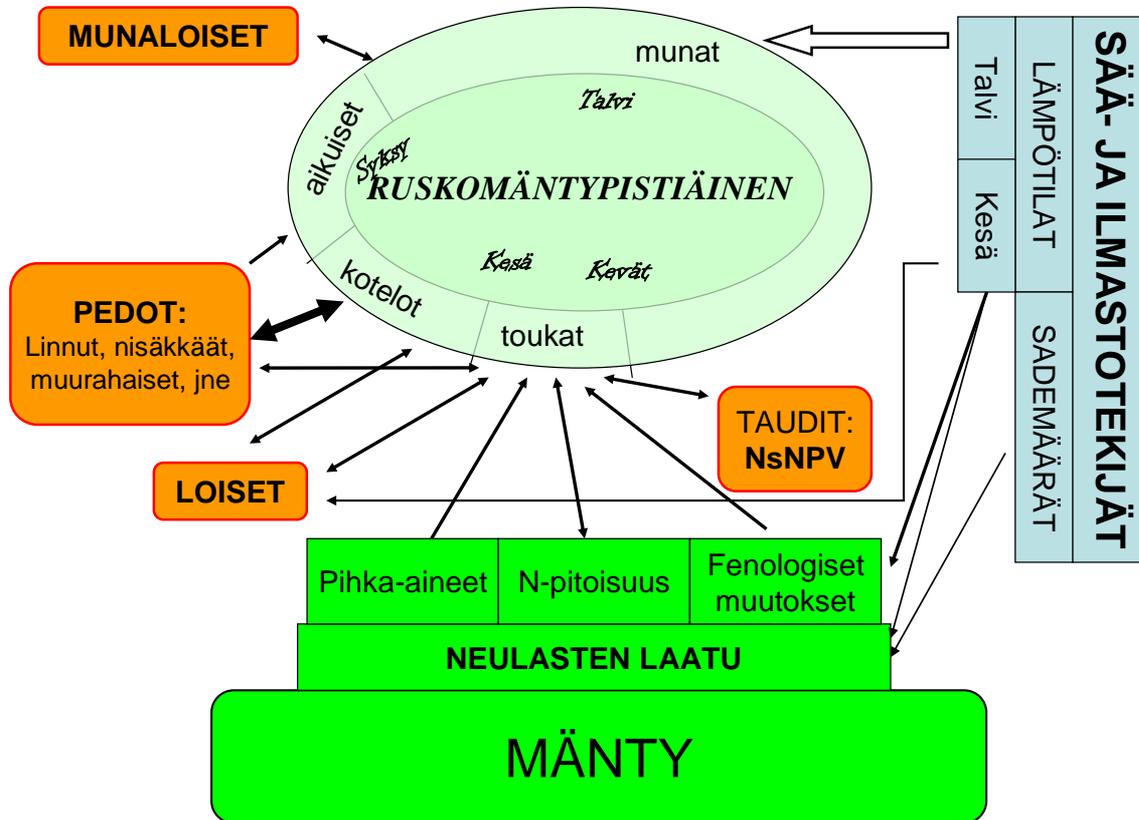
MÄNTYPISTIÄISET

Seppo Neuvonen

Varttuneempien männiköiden pahimpia neulasia syöviä tuhohyönteisiä ovat mäntypistiäiset (ks. Taulukko 5.2; Varama ja Niemelä 2001). Suomessa esiintyvistä mäntypistiäislajeista vain ruskomäntypistiäinen ja pilkkumäntypistiäinen ovat aiheuttaneet maassamme merkittäviä tuhoja. Normaalia kuivemmat kesät voivat laukaista epäsäännöllisin välein mäntypistiäisten joukkoesiintymiä. Tuhoja esiintyy yleisimmin karuilla ja kuivilla kasvupaikoilla (Nevalainen ym. 2015).

Ruskomäntypistiäinen on Suomessa tavallisempi tuhoniheuttaja, ja sen toukat syövät edellis-vuotisia tai vanhempia neulasia. Yksittäinen tuho kestää metsikössä yleensä pari kolme vuotta, mutta sen haitalliset vaikutukset mäntyjen kasvuun voivat näkyä pidempään (Lyytikäinen ja Tomppo 2002). Ruskomäntypistiäinen talvehtii munina, jotka naaras on sahumaisella munanasettimellaan sijoittanut neulasten sisään. Munat ovat siis alttiina talvipakkasille, ja niiden on todettu kestävän noin -37 °C:en lämpötiloja. Tätä kovemmat pakkaset ovat olleet historiallisessa ilmastossa tavallisia Itä- ja Pohjois-Suomessa, minkä ansiosta ruskomäntypistiäistuhot ovat olleet harvinaisia näillä alueilla (Virtanen ym., 1996). Poikkeuksena ovat Saariselän tuntureiden metsänrajamänniköiden lähes krooniset mäntypistiäistuhot; kovilla pakkasilla kylmä ilma valuu tunturimaastossa laaksojen pohjalle ja korkeammat lämpötilat ylärinteiden metsänrajavöhykkeellä mahdollistavat pistiäismunien säilymisen elossa.

Mäntypistiäisten kannanvaihteluihin vaikuttavat ilmaston lisäksi myös monet muut tekijät, usein monimutkaisena ”verkostona” hyönteisen elämänkierron eri vaiheissa. Alla on yksinkertaistettu kaavakuva (Kuva 7.1.3.1) tärkeimmistä **ruskomäntypistiäisen** kannanvaihteluihin vaikuttavista tekijöistä.



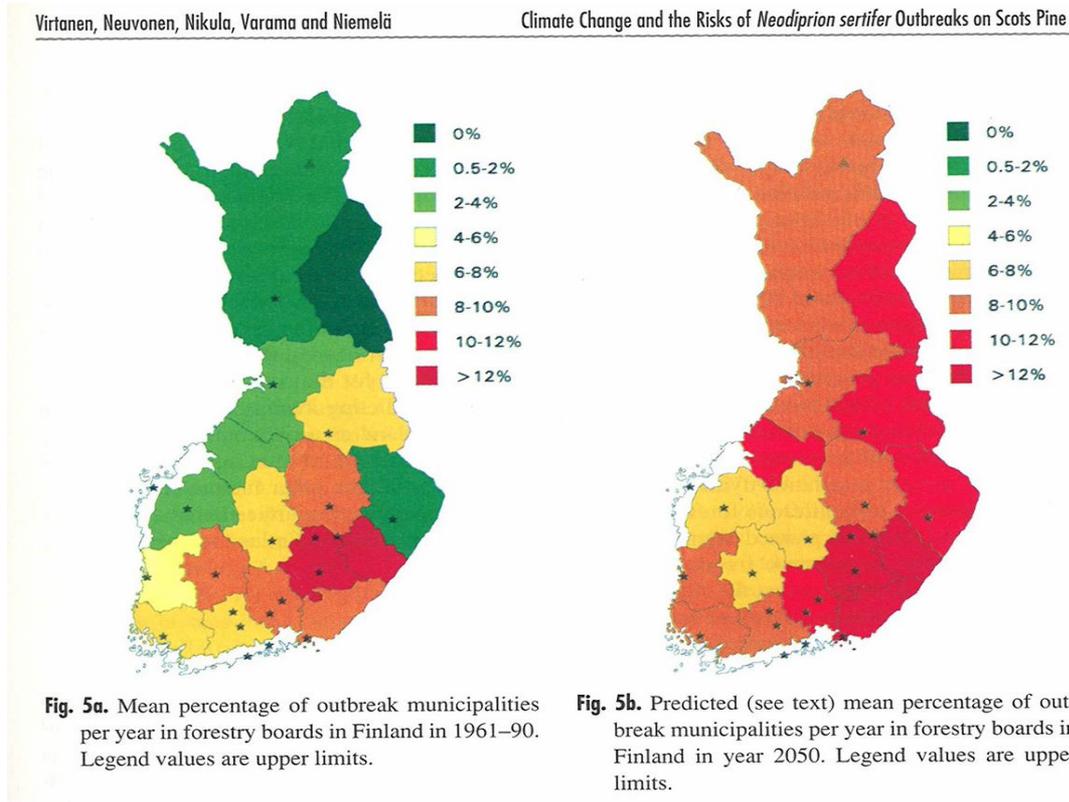
Kuva 7.1.3.1. Ruskomäntypistiäisen vuotuinen elinkierto (ovaali) ja lajin kehityksen eri vaiheisiin vaikuttavat tärkeimmät tekijät.

Ruskomäntypistiäisen kannanvaihtelut kytkeytyvät sää- ja ilmastotekijöihin mm. talvipakkasiin (munat kestävät noin -37 °C lämpötiloja) ja kosteusolosuhteisiin (koteloiden saalistus on vähäisempää kuivina jaksoina ja karuilla alueilla). Nykyilmastossa ruskomäntypistiäisen aiheuttamia tuhoja esiintyy yleisimmin Etelä-Suomessa, erityisesti Etelä- ja Itä-Savossa (Virtanen ym., 1999; Soubeyrand ym., 2009).

Kesälämpötilojen vaihtelulla ei liene kovin suurta suoraa vaikutusta tässä systeemissä, mutta munakuolleisuuteen vaikuttavien talvien minimilämpötilojen merkitys on suuri etenkin Itä- ja Pohjois-Suomessa. Talvi-ilmaston lämpeneminen voi siis lisätä tuhoriskiä näillä alueilla (ks. kuva 7.1.3.2). Myös UV-säteilyn lisääntyminen voi vaikuttaa ruskomäntypistiäisen kannanvaihteluihin, koska ruskomäntypistiäisen tumamonisärmiovirus tuhoutuu helposti UV-säteilyn vaikutuksesta.

Talvilämpötilojen kohotessa karujen männiköiden alttius ruskomäntypistiäistuhonille voi lisääntyä erityisesti Itä- ja Pohjois-Suomessa (Kuvat 7.1.3.2, 7.2.1.(2) & 7.2.2.(2)). Etelä-Suomen osalta ruskomäntypistiäistuhoriski ei ole niinkään riippuvainen talvilämpötiloista (harvoin rajoittavia nykyilmastossa), vaan siitä mikä merkitys kuivilla kesillä on tuhojen synnylle. Kuivuus voi edesauttaa mäntypistiäistuhonien syntymistä kahden eri mekanismin kautta (eivät toisiaan poissulkevia): (1) Männynneulasten laatu

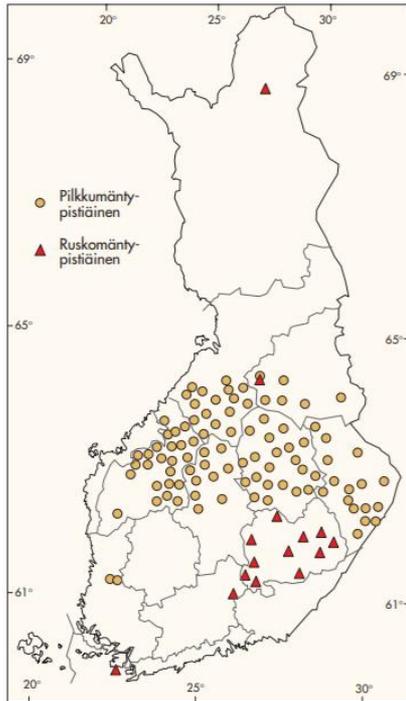
pistiäistoukkien ravintona voi parantua kuivuuden ansiosta (Saikkonen ym., 1995); (2) Pikkunisäkkäiden (päästäiset ja myyrät) saalistus mäntypistiäisten kotelovaiheessa lienee tärkein yksittäinen mäntypistiäiskantojen vaihtelua säätelevä tekijä (Hanski, 1987), ja kuivuus vaikuttaa tähän negatiivisesti (Kollberg ym., 2014). Koska kotelovaiheen saalistuksella on suuri merkitys mäntypistiäisten kannanvaihteluille, ja pikkunisäkkäiden kannat vaihtelevat suuresti ja vaikeasti ennustettavasti (ks. 7.1.10), ilmastonmuutoksen vaikutuksia pistiäistuhojen esiintymiseen on vaikea ennustaa.



Kuva 7.1.3.2. Ruskomäntypistiäistuhojen esiintyminen Suomessa alueittain vuosina 1961-1990 (5a) sekä "skenaario-tarkastelu" kuluvaan vuosisadan puolivälille (5b) (talvi-)ilmaston lämmetessä 3,6 °C jakson 1961-1990 lämpötiloista (Virtanen ym., 1996).

Tämän ilmastopaneelihanke puitteissa ruskomäntypistiäisen munien elossa säilyvyyden kannalta kriittisten lämpötilojen esiintymisen todennäköisyyksiä eri ilmastoskenaarioissa on tarkasteltu usean ilmastomallin keskiarvojen pohjalta, ja tulokset on esitetty kuvissa 7.2.1.(2) ja 7.2.2.(2) (relevantti lämpötila on kutakuinkin sama kuin tunturimittarilla). Kuluvaan vuosisadan jälkipuoliskolla ruskomäntypistiäisen munia tappavien pakkasten todennäköisyys tulee ennusteiden mukaan olemaan alhainen koko Suomessa sekä RCP4.5 että RCP8.5 skenaarion toteutuessa.

Pilkkumäntypistiäisen toukat syövät männynneulasia loppukesällä, ja ne käyttävät ravinnokseen myös samana kesänä syntyneitä neulasia. Seuraukset tällaisesta syönnistä ovat männyn kannalta vakavammat kuin ruskomäntypistiäisen syönnöksestä, jossa uusin neulaskerta jää useimmiten jäljelle (Lyytikäinen ja Tomppo, 2002). Mäntypistiäisten heikentämien kimppuun voi myös hyökätä muita tuholaisia, kuten kaarnakuoriaisiin kuuluvat ytimennävertäjät (ks. 7.1.2).



Kuva 1. Pilkumäntypistiäisen ja ruskomäntypistiäisen joukkoesiintymäalueet vuosina 1997–2000 kunnittain ja metsäkeskuksittain.

Pilkumäntypistiäinen viettää talven kotelovaiheessa maassa, lumen suojassa, joten talvipakkaset eivät rajoita sen menestystä. Suomessa pilkkumäntypistiäisen aiheuttamat tuhot ovat olleet harvinaisia, mutta vuosituhanen vaihteessa Keski-Suomessa oli laaja pilkkumäntypistiäisen aiheuttama tuho: noin 200 000 hehtaarella tuhot olivat kohtalaisia tai ankaria ja noin 300 000 hehtaarella lieviä (Kuva 7.1.3.3; Varama & Niemelä, 2001). Keski-Euroopassa pilkkumäntypistiäinen aiheuttaa tuhoja yleisemmin kuin ruskomäntypistiäinen, joten on mahdollista, että pilkkumäntypistiäistuhot yleistyvät ilmaston lämmetessä, ja erityisesti jos kuivuusjaksot yleistyvät.

Kuva 7.1.3.3. Mäntypistiäistuhojen esiintyminen Suomessa vuosina 1997–2000 Varaman ja Niemelän (2001) mukaan.

Viitteet

- Hanski, I. 1987. Pine sawfly population dynamics: patterns, processes, problems. *Oikos* 50:327–335
- Kollberg, I., Bylund, H., Huitu, O. & Björkman, C. 2014. Regulation of forest defoliating insects through small mammal predation: reconsidering the mechanisms. *Oecologia* 176: 975. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-3080-x>
- Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Tomppo, E., 2002. Impact of sawfly defoliation on growth of Scots pine *Pinus sylvestris* (Pinaceae) and associated economic losses. *Bulletin of Entomological Research* 92, 137–140.
- Nevalainen, S., Sirkiä, S., Peltoniemi, S. & Neuvonen, S. 2015. Vulnerability to pine sawfly damage decreases with site fertility but the opposite is true with *Scleroderris* canker damage; results from Finnish ICP Forests and NFI data. *Annals of Forest Science* 72: 909-917.
- Saikkonen, K., Neuvonen, S. & Kainulainen, P. 1995. Oviposition and larval performance of European pine sawfly in relation to irrigation, simulated acid rain, and resin acid concentration in Scots pine. *Oikos* 74, 273-282.
- 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.
- Varama, M., Niemelä, P., 2001. Männiköiden neulastuholaiset. *Metsätieteen aikakauskirja* 2, 275–279.
- 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.

HAVUNUNNA – TULEVAISUUDEN METSÄTUHOAINEN SUOMESSA?

Seppo Neuvonen

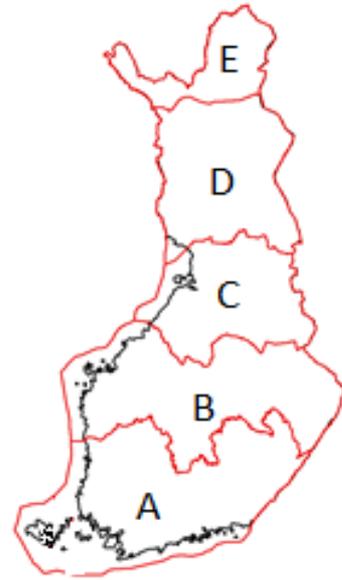
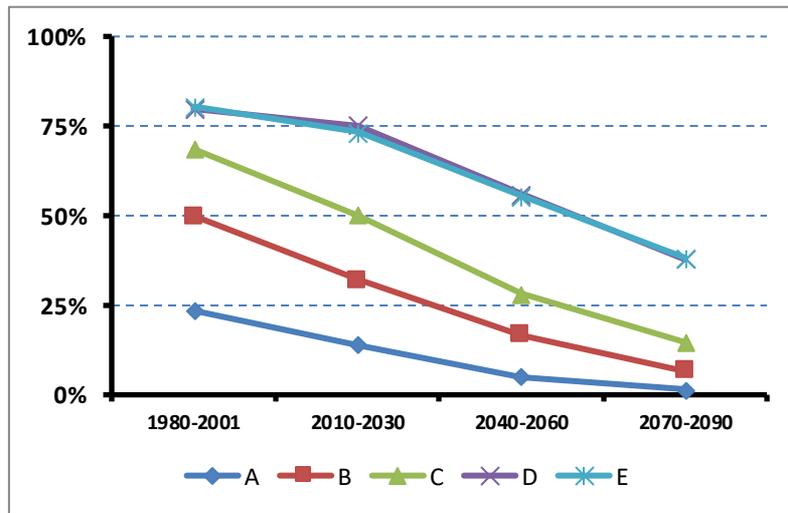
Havununna on perinteisesti ollut paha havumetsien tuholainen Keski-Euroopassa, erityisesti Itämeren eteläpuolisella alueella (Bejer 1988). Esimerkiksi vuosina 1853–1863 oli Venäjällä ja Itä-Preussissa valtava havununnan aiheuttama tuho, joka tappoi 147 miljoonaa m³ puustoa, ja jonka seurauksena laajoja alueita muuttui metsättömiksi ja otettiin maatalouskäyttöön (Bejer 1988). Esim. Puolassa myrkytettiin tämän lajin torjumiseksi 1978–1984 yhteensä 6,3 miljoonaa hehtaaria metsiä; puuston kuolleisuus (enimmäkseen kuusia) oli kuitenkin vähäistä. Havununnan joukkoesiintymät ovat olleet jossain määrin syklisiä, mutta viime vuosikymmeninä syklien säännöllisyys näyttäisi heikentyneen (Haynes ym. 2014).

Ennen 1990-lukua havununna oli Suomessa harvinainen (Marttila ym. 1996). Ilmaston lämmitessä havununna on levinnyt pohjoiseen ja yleistynyt (Leinonen ym. 2016), ja jopa aiheuttanut pienialaista tuhoa lounaisaariostossamme (Heino & Pouttu 2014). Luonnontieteellisen Keskusmuseon Lajitietokantaan (VIHKO) on viime vuosina (2015–2017) ilmoitettu havaintoja useasta tuhannesta havununnasta. Pohjoisimmat havainnot olivat noin Vaasan leveysasteelta, mutta havainnot olivat melko vähälukuisia Tampereen pohjoispuolelta (Neuvonen ym. 2018). Havununnan levinneisyyden pohjoisrajan on ennustettu siirtyvän ilmaston lämmitessä pohjoiseen useita satoja kilometrejä (Vanhanen ym. 2007; Fält-Nardmann ym. 2018a).

Havununnalla on yksi sukupolvi vuodessa, ja laji talvehtii munavaiheessa. Munien pakkaskestävyys vaihtelee havununnalla välillä -28 – -31 °C (Fält-Nardman ym. 2018a). Viime vuosisadalla eteläisessäkin Suomessa on esiintynyt usein pakkasia, jotka ovat voineet aiheuttaa huomattavaa kuolleisuutta talvehtivissa munissa, ja näin rajoittaneet lajin leviämistä pohjoiseen (Fält-Nardman ym. 2018b). Kasvatuskokeet ovat osoittaneet, että myös kesien lämpötilat Etelä-Suomessa ovat riittävät havununnan kehityksen kannalta (Fält-Nardman ym. 2017). Ilmaston lämpenemisen jatkuessa on todennäköistä, että laji leviää huomattavasti aiempaa levinneisyysaluettaan pohjoisemmaksi (Fält-Nardman ym. 2018a).

Kuvassa 7.1.4.1 on esitetty, miten havununnan kannalta kriittisen lämpötilan (-29°C) esiintymistodennäköisyys muuttuu eri alueilla RCP4.5 skenaarion tapauksessa. Ruskomäntypistiäisten aiheuttamien metsätuhojen ja kriittisten talvilämpötilojen esiintymisestä saatujen tulosten (Virtanen ym. 1996) pohjalta voidaan arvioida, että tuhojen esiintyminen on epätodennäköistä, jos kriittisten lämpötilojen esiintymistodennäköisyys on yli 35 %. Historiallisessa ilmastossa (1980–2001) tällainen tilanne on ollut havununnan osalta suurimmassa osassa Suomea (vyöhykkeet B–E). Tämän vuosisadan lopulla (2070–2090) vastaava tilanne olisi vain Lapissa (vyöhykkeet D–E; Kuva 7.1.4.1).

Havununnatuhojen esiintymistä valtion omistamissa mäntymetsissä Kaakkois-Saksassa (Pohjois-Baijerissa sijaitsevat Oberfranken, Mittelfranken ja Oberpfalz) suhteessa erilaisiin ilmastotekijöihin on tutkittu pitkän aikasarjan (1800–2011) pohjalta, mutta mitään kovin selkeitä tuhojen esiintymistä selittäviä tekijöitä ei kuitenkaan löydetty (Haynes ym. 2014).



Kuva 7.1.4.1. Niiden talvien todennäköisyys, jolloin vuorokauden alin lämpötila on laskenut vähintään kerran $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ (= havununnan munien keskimääräinen kylmänkestävyys) alapuolelle RCP4.5 skenaarion toteutuessa. Todennäköisyydet on esitetty aluekohtaisina (aluejako oikealla) keskiarvoina eri ajanjaksoille (perustuu kuuden ilmastomallin antamiin ennusteisiin; ks. Taulukko 2.1).

Viitteet

Bejer, B. 1988. The nun moth in European spruce forests. Sivut 211–231 teoksessa Berryman, A.A. (toim.) Dynamics of Forest Insect Populations, Springer Science + Business Media, New York. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0789-9>

Fält-Nardmann, J.J.J., Klemola, T., Ruohomäki, K., Niemelä, P., Roth, M. & Saikkonen, K. 2017. Local adaptations and phenotypic plasticity may render gypsy moth and nun moth future pests in northern European boreal forests. Can. J. For. Res. 48(3) DOI10.1139/cjfr-2016-048

Fält-Nardmann, J.J.J., Ruohomäki, K., Tikkanen, O.-P. & Neuvonen, S. 2018a. Cold hardiness of *Lymantria monacha* and *L. dispar* (Lepidoptera: Erebidæ) eggs to extreme winter temperatures: implications for predicting climate change impacts. Ecological Entomology DOI: <https://doi.org/10.1111/een.12515>

Fält-Nardmann, J.J.J., Tikkanen, O.-P., Ruohomäki, K., Otto, L.-F., Leinonen, R., Pöyry, J., Saikkonen, K. & Neuvonen, S. 2018b. The recent northward expansion of *Lymantria monacha* in relation to realised changes in temperatures of different seasons. Forest Ecology and Management <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.053>

Haynes, K., Allstadt, A. & Klimetzek, D. 2014. Forest defoliator outbreaks under climate change: effects on the frequency and severity of outbreaks of five pine insect pests. Glob. Change Biol. 20: 2004–2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12506>

Heino, E. & Pouttu, A. (toim.), 2014. Metsätuhot vuonna 2013. Metlan työraportteja 295: 24–25. URL: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp295.htm>

Leinonen, R., Pöyry, J., Söderman, G. & Tuominen-Roto, L. 2016. Suomen yöperhosseuranta (Nocturna) 1993–2012. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 15/2016, Suomen ympäristökeskus SYKE.

Marttila, O., Saarinen, K., Haahtela, T. & Pajari, M. 1996. Suomen kiitäjät ja kehrääjät: nirkot, villakkaat, siilikkäät Kirjayhtymä, Helsinki.

Neuvonen, S., Kullberg, J., Kämäräinen, M., Lehtonen, I., Nevalainen, S., Siljamo, P. & Venäläinen, A. 2018. Havununna ja lehtinunna – tulevaisuuden metsätuholaisiin on syytä varautua ennakolta. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus **/2018: xx-xx.

Neuvonen, S. & Viiri, H. 2017. Changing Climate and Outbreaks of Forest Pest Insects in a Cold Northern Country, Finland. Teoksessa: Latola, K., Savela, H. (eds.) The Interconnected Arctic — UArctic Congress 2016; Springer Polar Sciences, Cham. Sivut 49–59. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-57532-2_5

Neuvonen, S. & Virtanen, T. 2015. Abiotic factors, climatic variability and forest insect pests. Sivut 154–172 teoksessa: Björklund, C. & Niemelä, P. (toim.) Climate Change and Insect Pests, CABI, UK.

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.

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.

TUKKIMIEHENTÄITUHOT JA ILMASTONMUUTOS

Heli Viiri

Tukkimiehentäin elinkierto

Tukkimiehentäi on viljelymetsätaloudessa merkittävin taimituhojen aiheuttaja. Aikuiset kärsäkkäät lähtevät liikkeelle talvehtimispaikoistaan karikkeen alta, kun ilman lämpötila keväällä lähenee kymmentä astetta. Ne liikkuvat aluksi kävellen ja keräävät voimia parveilua varten nakertelemalla puuvartisten kasvien, varsinkin havupuiden, nilaa ja jälttä. Säiden lämmettyä ne alkavat lentää ja parveilevat lämpötilan noustua +18-19°C asteeseen. Naaraat munivat tuoreisiin havupuun kantoihin tai niiden juurten läheisyyteen (Nordlander ym. 1997). Meillä tukkimiehentäi suosii mäntyä, mutta myös kuusen kannot kelpaavat lisääntymispaikoiksi. Muninta alkaa eteläisimmässä Suomessa toukokuun lopussa ja jatkuu elokuulle. Naaraat munivat 1–5 munaa päivässä, yhteensä 60–100 munaa kesässä. Parin viikon kuluttua munista kuoriutuvat toukat etsivät tiensä hajun perusteella kantojen juuristoon, missä ne nilaa syöden vähitellen kehittyvät aikuisiksi. Yhdessä kannossa voi elää yli 300 toukkaa.

Taloudellisesti merkittäviä tuhoja esiintyy männyn ja kuusen istutustaimilla, mutta tukkimiehentäin ravinnoksi kelpaavat myös lehtikuusi, rauduskoivu ja varpukasvit. Sukupolviaika on maan eteläosissa 2 vuotta, Keski-Suomessa ja Pohjanmaan rannikolla 2-3 vuotta, Kainuussa ja Etelä-Lapissa 3 vuotta sekä Kolari-Sodankylä-Kuusamo linjan pohjoispuolella yli 3 vuotta (Bejer ym. 1962, Långström 1982). Ilmaston jo lämmettyä (Mikkonen ym. 2015) kehitys on nopeutunut, mutta tästä ei ole päivitettyjä arvioita. Sukupolviajan ollessa kaksi vuotta keväällä munitusta munasta kehitty ensimmäisen kesän aikana toukka, joka talvehtii. Toukka kotoituu toisena kesänä ja aikuistuu elo-syyskuussa. Uudet aikuiset ovat sukukypsiä vasta kolmantena kesänä. Tukkimiehentäit voivat aikuistuttuaan elää jopa nelivuotiaiksi.

Tukkimiehentäin aiheuttaman taimituhon riski

Suurin tuhoriski on tuoreilla hakkuaukoilla, avohakkuun jälkeisenä kesänä. Etelä-Suomessa tukkimiehentäi on yleinen hakkuuaukolla kolme vuotta hakkuun jälkeen, mutta pohjoisempaan esiintymishuiput ovat ensimmäisenä sekä neljäntenä tai viidentenä kasvukautena tukkimiehentäin kehitysajan pituudesta riippuen (Långström 1982).

Metsänuudistamismenetelmämme ovat muuttuneet tukkimiehentäitä suosiviksi. Metsänviljelyssä käytetään yhä enemmän yksivuotiaita kuusen ja männyn paakkutaimia. Paakkutaimet ovat alttiimpia syönnille kuin avojuuritaimet johtuen niiden kapeammasta tyviläpimitasta. Maanmuokkaus vähentää tuhoja olennaisesti (Pettersson ym. 2005, Luoranen ym. 2017), koska tukkimiehentäi välttää kulkemasta paljaalla

kivennäismaalla. Suomessa istutetaan vuosittain noin 170 miljoonaa taimea, joista arviolta noin puolet männyn ja kuusen taimista suojataan kemiallisilla kasvinsuojeluaineilla tukkimiehentäitä vastaan. Kasvinsuojeluaineella käsiteltyjen taimien kuolleisuus on yleensä alle 5 %. Tuhot aiheuttavat taimikkoon aukkoisuutta. Ruotsissa on yleistynyt viime vuosina taimien suojaus Conniflex käsittelyllä, jossa taimien tyvi käsitellään hiekka-liimaseoksella (Nordlander ym. 2009).

Ilmastonmuutoksen vaikutus tukkimiehentäituhoihin

Lämpimämmän ilmaston odotetaan lisäävän tukkimiehentäituhoja koko Pohjois-Euroopassa. Pohjois-Ruotsissa ennustetaan saavutettavan samanlainen tukkimiehentäituhoriskitaso, mikä on nykyään Etelä-Ruotsissa (Nordlander ym. 2017). Englannin pohjois- ja länsiosissa tukkimiehentäin elinkierto on yleensä nykyään 2–3 vuotta, mutta etelässä ja idässä 2-vuotinen elinkierto vallitsee. Vuodesta 2030 eteenpäin ennustetaan 80 %:lle populaatioista 2-vuotista elinkiertoa Pohjois- ja Länsi-Englantiin ja 1–2-vuotista kiertoa maan etelä- ja itäosiin (Wainhouse ym. 2014). Tukkimiehentäiden kehitys on suoraan riippuvainen lämpötilasta ja nopeutuu ennustetussa ilmastossa. Tukkimiehentäiden yksilönkehityksen aikana paino lisääntyy aina lämpötilan noustessa 20 °C asteeseen, mutta laskee 25 °C asteen jälkeen noin 10 % toukilla ja 14 % aikuisilla (Inward ym. 2012). Isot yksilöt syövät enemmän kuin pienemmät (Wainhouse ym. 2004), joten yksilökoon kasvu lisää taimituhojen määrää. Tukkimiehentäiden syönti- ja muninta-aika pitenevät, yksilönkehitys nopeutuu sekä talvehtimiskyky paranee kasvukausien pidentyessä ja lämmitessä (Tan ym. 2010, Inward ym. 2012). Kaikki ovat ominaisuuksia, joiden seurauksena taimien syöntivioitukset lisääntyvät.

Tällä hetkellä meillä ei suojata taimia kemiallisesti tai mekaanisesti tukkimiehentäitä vastaan Kainuussa ja Lapissa, mutta eteläisessä Suomessa suojausta tehdään. Ilmaston lämmitessä torjuntatarve siirtyy yhä pohjoisemmaksi, myös Kainuuseen ja Lappiin, ja taimiin kohdistuva syöntipaine lisääntyy eteläisimmässä Suomessa kasvukausien pidetessä ja lämmitessä. Esimerkiksi Etelä-Ruotsissa käytetään uudistamisessa kookkaita taimia ja tehdään tarvittaessa taimien uudelleen suojaus maastossa kemiallisella kasvinsuojeluaineella reppuruiskulla. Lisäksi täydennysviljely on yleistä. Mikäli meillä luovutaan avohakkuista ja siirrytään jatkuvaan kasvatukseen laajassa mittakaavassa, niin tämä vähentää tukkimiehentäituhoja ja niiden torjuntatarvetta. Myös luontaisen uudistamisen lisääntyminen tai sekametsien yleistyminen vähentäisivät tukkimiehentäituhoja.

Viitteet

Bejer-Petersen, B., Juutinen, P., Kangas, E., Bakke, A., Butovitsch, V., Eidmann, H., Heqvist, K.J. & Lekander, B. 1962. Studies on *Hylobius abietis* L. I. Development and life cycle in the Nordic countries. Acta Entomologica Fennica 17: 1–106.

Inward, D..G., Wainhouse, D. & Peace, A. 2012. The effect of temperature on the development and life cycle regulation of the pine weevil *Hylobius abietis* and the potential impacts of climate change. Agricultural and Forest Entomology <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2012.00575.x>

Luoranen, J., Viiri, H., Sianoja, M., Poteri, M. & Lappi, J. 2017. Predicting pine weevil risk: effects of site, planting spot and seedling level factors on weevil feeding and mortality of Norway spruce seedlings. Forest Ecology and Management 389: 260–271. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.006>

Långström, B. 1982. Abundance and seasonal activity of adult *Hylobius*-weevils in reforestation areas during first years following final felling. Communicationes Instituti Forestalis Fennica 106: 1–23.

Mikkonen, S., Laine, M., Mäkelä, H., Gregow, H., Tuomenvirta, H., Lahtinen, M. & Laaksonen, A. 2015. Trends in the average temperature in Finland, 1847–2013. Stoch. Environ. Res. Risk. Assess. 29: 1521–1529. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-014-0992-2>

Nordlander, G., Mason, E.G., Hjelm, K., Nordenhem, H., Hellqvist, C. 2017. Influence of climate and forest management on damage risk the pine weevil *Hylobius abietis* in northern Sweden. *Silva Fennica* vol. 51 no. 5 article id 7751. <https://doi.org/10.14214/sf.7751>

Nordlander, G., Nordenhem, H. & Bylund, H. 1997. Oviposition patterns of the pine weevil *Hylobius abietis*. *Entomologica Experimentalis et Applicata* 85: 1–9.

Nordlander, G., Nordenhem, H. & Hellqvist, C. 2009. A flexible sand coating (Conniflex) for the protection of conifer seedlings against damage by the pine weevil, *Hylobius abietis*. *Agricultural and Forest Entomology* 11: 91–100. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2008.00413.x>

Petersson, M., Örländer, G., Nordlander, G. 2005. Soil features affecting damage to conifer seedlings by the pine weevil *Hylobius abietis*. *Forestry* 78: 83-92. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpi008>

Tan, J.Y., Wainhouse, D., Day, K.R. & Morgan, G. 2010. Flight ability and reproductive development in newly emerged pine weevil *Hylobius abietis* and potential effects of climate change. *Agricultural and Forest Entomology* 12: 427–434.

Wainhouse, D., Boswell, R. & Ashburner, R. 2004. Maturation feeding and reproductive development in adult pine weevil, *Hylobius abietis* (Coleoptera: Curculionidae). *Bulletin of Entomological Research* 94: 81–87.

Wainhouse, D., Inward, D.J.G. & Morgan, G. 2014. Modelling geographical variation in voltinism of *Hylobius abietis* under climate change and implications for management. *Agricultural and Forest Entomology*. <https://doi.org/10.1111/afe.12043>

JUURIKÄÄVÄT MALLIORGANISMINA

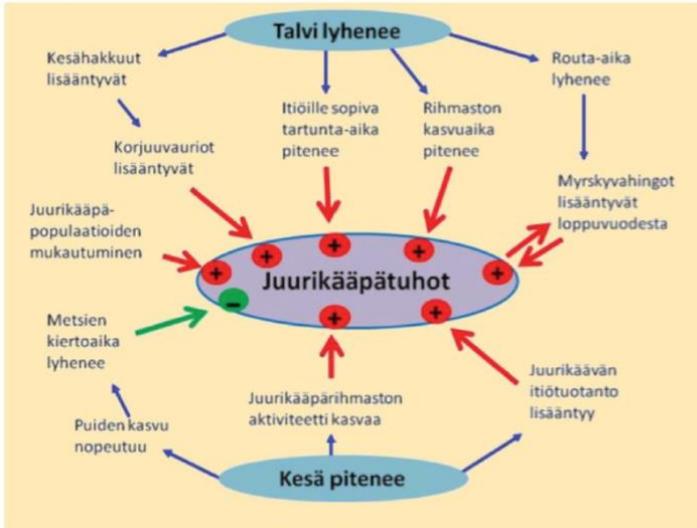
Seppo Nevalainen

Juurikäävät, joista meillä toistaiseksi esiintyy männynjuurikäpä (*Heterobasidion annosum*) ja kuusenjuurikäpä (*Heterobasidion parviporum*) ovat yleismaailmallisesti tärkeimpiä havupuiden lahottajia. EU:n alueella vuotuisten tappioiden on arvioitu olevan jopa 800 milj. € jo yli 20 vuotta sitten (Woodward ym. 1998). Kuusentyvi laho on hyvin yleinen Etelä-Suomessa, ja sitä tavataan paljon myös Pohjanlahden rannikolla. Etelä-Suomen kuusista arviolta 15–20 prosenttia on tyvilahoisia. Valtaosa kuusen tyvilahosta tuolla alueella on kuusenjuurikäävän aiheuttamaa. Männynjuurikäpää tavataan eniten maan kaakkoisosassa.

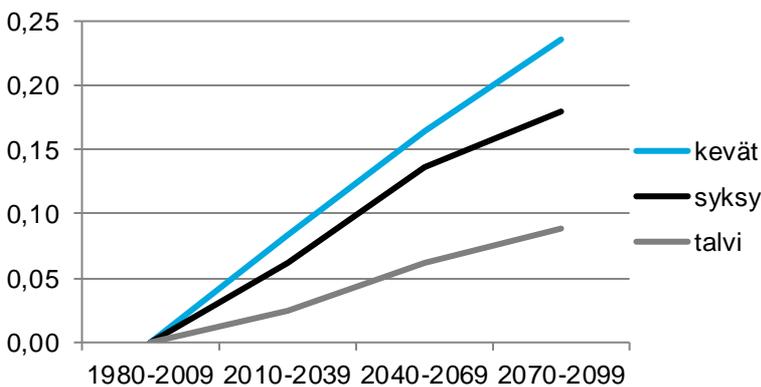
Suomessa juurikäpätuhojen taloudellisesta merkityksestä on voitu esittää vain arvioita. Pelkästään lahoisuudesta aiheutuvat menetykset on arvioitu useiksi kymmeniksi miljooniksi euroiksi.

Ilmastonmuutos lisää juurikäpätuhoja. Talvien leudontuminen ja kesien lämpeneminen lisää juurikäpätuhoja monen eri vaikutusmekanismien kautta (kts kuva 7.1.6.1).

Juurikäpä tuottaa kantaitiöitä yli 0°lämpötiloissa. Yli 0°lämpötilojen todennäköisyys eri vuodenaikoina Suomessa lisääntyy Ilmatieteen laitoksen tekemien mallien mukaan. Muutokset ovat suurimpia keväällä ja syksyllä (kuva 7.1.6.2). Erityisesti syksyllä lämpötilojen muutos on sitä suurempi, mitä pohjoisemmaksi Suomessa siirrytään. Tästä johtuen itiöitä syntyy aiempaa pidemmällä aikavälillä keväisin ja syksyinen.



Kuva 7.1.6.1. Ilmastomuutoksen vaikutus juurikääpätuhoihin talvien lyhentymisen ja kesien pitenemisen seurauksena (Müller ym. 2012). Kahdeksasta juurikääpätuhoihin vaikuttavasta tekijästä seitsemän lisää (+) ja yksi vähentää (-) tuhoja.



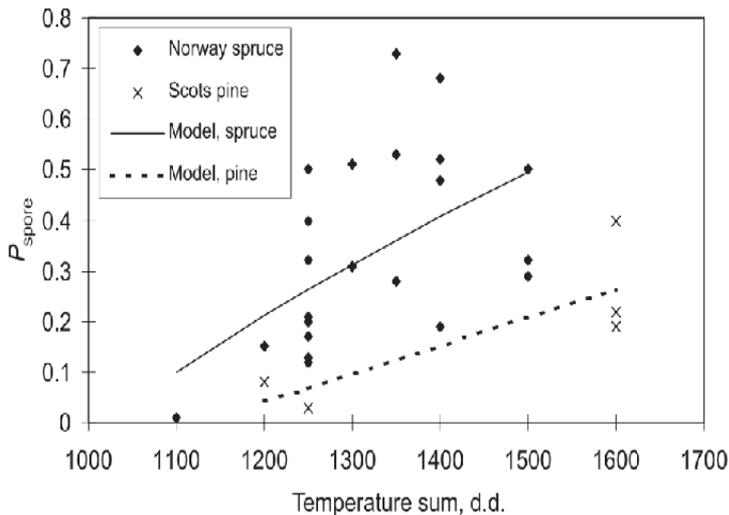
Kuva 7.1.6.2. Yli 0° C lämpötilojen todennäköisyys eri vuodenaikoina koko Suomessa RCP4.5 –skenaarion toteutuessa. Perustuu kuuden ilmastomallin antamiin ennusteisiin; ks. taulukko 2.1.

5 °C: n nousu vuotuisessa keskilämpötilassa lisää kuusenjuurikäävän keskimääräistä vuosittaista aktiivisuutta kuusen juuristossa 40–91 %:lla. Suhteellinen muutos on suurinta alhaisissa lämpötiloissa (Müller ym. 2014).

Kantojen infektoitumisen todennäköisyys kasvaa lämpösumman kasvaessa mallilaskelmien mukaan (Pukkala ym. 2005), vaikka hajonta maastohavaintoihin nähden onkin suurta (kuva 7.1.6.3).

Maan huono kantavuus lisää juuristovaurioiden riskiä. Vuosisadan loppuun mennessä sellaisten päivien todennäköisyys, jolloin routaa on maassa alle 20 cm ja lunta alle 40 cm, lisääntyy. Esimerkiksi Oulu–Joensuu-linjan eteläpuolella tällaisten päivien todennäköisyys on yli 70 %, ja vuosisadan loppuun mennessä vastaava tilanne on lähes koko Suomessa (Kuva 2.4).

Kaikkien näiden muutosten johdosta kuusenjuurikäävän yleisen esiintymisen pohjoisrajan voidaan arvioida siirtyvän huomattavasti pohjoisemmaksi, noin Pello–Kuusamo-linjalle asti (kuva 7.1.6.4). Männynjuurikäävällä sääriippuvuudet ovat toistaiseksi epäselvempiä. Laji puuttuu jostakin syystä Pohjois-Suomesta. Männynjuurikäävän ennustetaan muuttuvan yleiseksi koko eteläisen Suomen alueella.



Kuva 7.1.6.3. Kantojen infektoitumisen todennäköisyys juurikäävällä Pohjois-Euroopassa lämpösunnan funktiona (Pukkala ym. 2005). Ylempi viiva kuvaa kuusikoita ja alempi viiva männiköitä. Neliöt ovat maastohavaintoja kuusikoista ja ristit maastohavaintoja männiköistä.



Kuva 7.1.6.4. Kuusenjuurikäävän nykyinen yleisen esiintymisen alue (tumman vihreä alue) (lähde: Luke) ja yleisen esiintymisen uusi ennustettu raja vuosisadan loppuun mennessä (oranssi viiva).

Viitteet

Müller, M.M., Piri, T., Hantula, J. 2012. Ilmaston lämpeneminen haastaa nykyistä tehokkaampaan juurikäävän torjuntaan. Metsätieteen aikakauskirja 4/2012: 312–315.

Müller, M.M., Sievänen, R., Beuker, E., Meesenburg, H., Kuuskeri, J., Hamberg, L., Korhonen, K. 2014. Predicting the activity of *Heterobasidion parviporum* on Norway spruce in warming climate from its respiration rate at different temperatures. Forest Pathology 44: 325–336.

Pukkala, T., Moykkynen, T., Thor, M., Ronnberg, J., Stenlid, J. 2005. Modeling infection and spread of *Heterobasidion annosum* in even-aged Fennoscandian conifer stands. Canadian Journal of Forest Research 35: 74–84.

Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R. & Hüttermann, A. 1998. *Heterobasidion annosum*. Biology, ecology, impact and control. CAB International. Wallingford. 589 s.

VERSOSURMA

Seppo Nevalainen

Versosurmatauti, jonka aiheuttaa *Gremmeniella abietina*-niminen kotelosieni, on aiheuttanut Suomessa laaja-alaisia tuhoja männiköissä. Tauti on yleisempi maan eteläosissa, joskin sitä tavataan koko maassa, eivätkä ilmastolliset tekijät siis estä taudin esiintymistä.

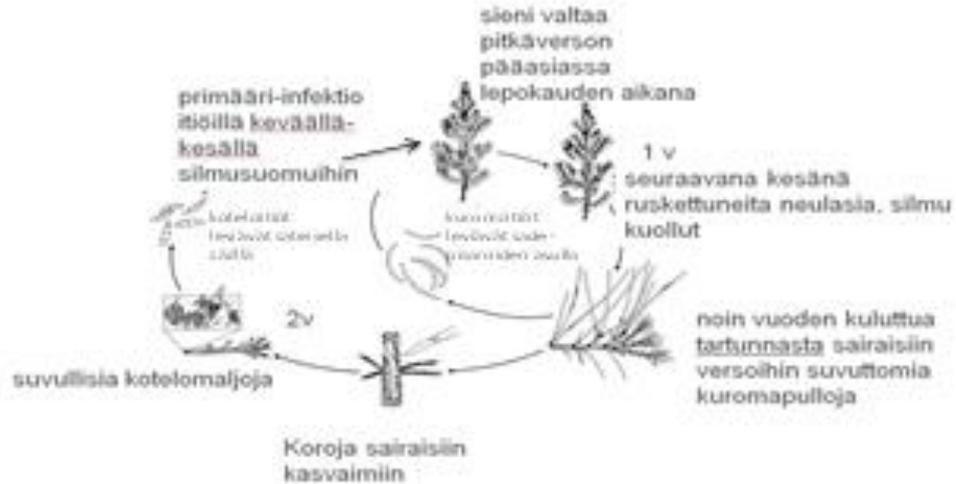
Taudin esiintymisessä on huomattavaa sekä ajallista että paikallista vaihtelua ja alueellista keskittymistä. Paikallinen vaihtelu osoittaa, että metsikkö- ja ympäristötekijät, mm. topografia, vaikuttavat merkittävästi taudin esiintymiseen. Valtakunnan metsien inventoinnin tulosten mukaan versosurmaepidemia oli laajimmillaan 1980-luvun lopulla, jolloin tuhoja esiintyi VMI 8:n mukaan 691 000 ha:n alalla Etelä-Suomen männiköissä. Metsikön metsänhoidollista laatua alentavia tuhoja näistä oli 172 000 ha. Myöhemmissä inventoinneissa versosurmaa on tavattu vähemmän (Nevalainen 2007; Taulukko 5.2).

Versosurmatautia esiintyy jatkuvasti jonkin verran männiköissä, mm. latvustojen alaoksissa. Nykyään yleisesti hyväksytyyn teorian mukaan (kts. esim. Stenlid & Oliva 2018) laajojen epidemioiden synty vaatii 2–3 peräkkäistä viileää ja sateista kasvukautta, jotka toisaalta lisäävät alkuinfektioita mäntyjen silmusuomuihin, ja toisaalta mahdollistavat runsaan itiöinnin seuraavina kesinä (kts tietolaatikko??). Lämmin syksy ja talvi mahdollistavat sienien tunkeutumisen männyn pitkäversoihin ja auttavat isäntäkasvin asuttamisessa. On huomattava, että epidemian synty vaatii myös alttiit isäntäkasvit ja alttiit kasvupaikat.

On oletettavaa, että versosurmatuhoja tulee siintymään myös tulevaisuudessa, mutta kenties ei yhtä laajoina kuin aiemmin. Tulevaisuudessa laajan ja vakavan epidemian suuruusluokaksi voidaan arvioida 100 000 ha. Nämä aiheuttaisivat arviolta 100 000 m³ suuruiset vuotuiset kasvutappiot huomioimatta kuolleen puuston määrää ja metsän odotusarvon menetystä. Versosurmatuhojen frekvenssiä tulevina vuosina on kuitenkin vaikea ennustaa yllä kuvatuista monimutkaisista tekijöistä johtuen.

Vesiosuomaisen epidemiologia ja elinkierro

- epidemian synty vaatii 2-3 peräkkäistä viileää kasvukautta (kevät ja kesät), joka mahdollistaa toisaalta primaari-infektiot, ja toisaalta runsaan itikinnin 1-2 vuoden päästä infektiosta
- kälmemin syksy ja talvi auttaa sientä tunkeutumaan isäntäkasvin kasvaimeen ja valtaamaan isäntäkasvin
- epidemioiden synty vaatii myös alttiit isäntäkasvit ja alttiit kasvupaikat



Alkuperäinen kuva Taimen, F.H. & Baker, F.A. 1996. Principles of Forest Pathology

Viitteet

Nevalainen, S. 2007. Spatial and Temporal Variation in the Occurrence of *Gremmeniella abietina* in Scots Pine in Finland. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica. Special Edition 2007: 127–136.

Stenlid, J. & Oliva, J. 2016. Phenotypic interactions between tree hosts and invasive forest pathogens in the light of globalization and climate change. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 371: 1–10.

UUSIA POTENTIAALISIA HAVUPUIDEN TAUTEJA

Seppo Nevalainen

Asiantuntijakatsauksia ilmastonmuutoksen vaikutuksesta kasvitauteihin on tehty melko runsaasti, mutta ne eivät useimmiten sovellu hyvin Suomen olosuhteisiin. Poikkeuksena on La Porta ym. (2008) katsaus, mutta siinäkin fokus on Etelä- ja Keski-Euroopassa (kts. tietotaulu).

Ilmastonmuutos aiheuttaa, ja osittain jo on aiheuttanut, monenlaisia vaikutuksia metsätauteihin: Juurikäpäläjien tuhoalue on jo laajentunut pohjoiseen ja tuhot lisääntyvät (katso kuvat ?? ja tietotaulu ??). Tulevaisuuden tuhojen pinta-alaa tai vakavuutta on toistaiseksi vaikea arvioida. Juurikävät aiheuttavat paikallisia, kroonisia tuhoja, ja niiden merkitys yksittäisissä metsiköissä voi olla huomattavan suuri. Tässä yhteydessä on syytä muistaa, että juurikäpien lahottamat puut, varsinkin kuuset ovat alttiimpia myrskytuhoille ja toisaalta myrskytuho puut ovat kirjanpainajan lisääntymismateriaalia.

Uusia tauteja ja tulokaslajeja leviää, ja aiemmin huomaamattomina olleet lajit aiheuttavat tuhoja jatkossa. Tuhot tapahtunevat lähinnä havupuutaimikoissa sekä lehtipuilla. Esimerkki taudista, joka on meillä esiintynyt jo kauan, mutta tuhoja aiheuttamatta, on punavyökariste (*Dothistroma septosporum*). Lajin tuhot taimikoissa ovat dramaattisesti lisääntyneet myös pohjoisella pallonpuoliskolla, mitä ilmeisimmin taudille suotuisiksi muuttuneiden kesien johdosta (kts. Sturrock ym.2011 ja sen viitteet). Etelänverosurma (*Diplodia pinea*) on löydetty Suomestakin männyn kävyistä, mutta toistaiseksi lähin mäntytaimikossa oleva tuhoalue on havaittu Ruotsissa.

Uusia aggressiivisia taudinaiheuttaja rotuja voi ilmaantua nopeasti. Aggressiivinen muoto tervasrososta nuorissa männiköissä Pohjois- Suomessa voi olla yksi esimerkki, vaikka tutkimustuloksia ilmiön perimmäisistä syistä ei vielä olekaan.

Joistakin aiemmin epidemialuonteisista taudeista voi tulla kroonisia ongelmia ympäristön muuttuessa tautien kehitystä suosivaksi. Suopursuruosteen jatkuva esiintyminen viime vuosina Pohjois- Suomessa saattaa olla yksi esimerkki tällaisesta tapauksesta.

Pahin mahdollinen skenaario on se, että meille tulee taudinaiheuttajia, joita vastaan paikallisille isäntäkasvipopulaatioille ei ole ehtinyt kehittyä vastustuskykyä. Valitettavasti kasvipatologian historia on täynnä varoittavia esimerkkejä. Suomen tapauksessa eräs pelätymmistä tällaisista potentiaalisista uhkista on lännenpahkaruoste (*Endocronartium harknessii*). Se aiheuttaa metsämännyllä merkittäviä tuhoja Yhdysvalloissa ja Kanadassa. Sieni on mikrosyklinen, eli leviää männystä mäntyyn. Se voisi aiheuttaa Suomessa hyvin laajoja ja nopeasti leviäviä tuhoja, joissa kuollutta puuta syntyisi enemmän kuin laajoissa myrskytuhoissa.

Viitteet:

Hantula, J. 2012. Emerging pathogen risks in forestry. Presentation at Evira 10.9.2012.

La Porta, N., Capretti, P., Thomsen, I.M., Kasanen, R., Hietala, A.M., Weissenberg, K. 2008. Forest pathogens with higher damage potential due to climate change in Europe. Canadian Journal of Plant Pathology 30: 177–195.

Oliva, J., Boberg, J., Hopkins, A., Stenlid, J. 2013. Chapter 1 concepts of epidemiology of forest diseases. Teoksessa: Gonthier, P., Nicolotti, G., (toim.). Infectious forest diseases. CAB International, s. 1–28.

Sturrock, R.N., Frankel, 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.

Tietotaulu: Asiantuntijoiden tekemiä katsauksia metsätaudeista ja ilmastonmuutoksesta

Tekijät	Alue ja vyöhyke	Huom.
Ayres ja Lombardero 2000	Pohjois-Amerikka	Hyönteistuhot ja taudit
Boland ym. 2004	Ontario	Kasvitaudit yleensä
Moore ja Allard 2008	Globaali	Yleisellä tasolla
La Porta ym. 2008	Eurooppa	Fokus Keski- ja Etelä-Eurooppa
Dukes ym. 2009	Kaakkois-USA, Itä-Kanada	Hyönteistuhot ja taudit
Kliejunas ym. 2009	Läntinen Pohjois-Amerikka	
Tubby ja Webber 2010	Lähinnä Britannia	Kaupunkipuut
Sturrock ym. 2011	Globaali	Tautiryhmät
Desprez-Loustau ym. 2016	Globaali	Teoreettinen
Freer-Smith ja Webber 2017	Kaakkois-USA, Eurooppa	Biodiversiteettinäkökulma

Viitteet

Ayres, M.P., Lombardero, M.J. 2000. Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *The Science of the total environment* 262: 263–286.

Boland, G.J., Melzer, M.S., Hopkin, A., Higgins, V., Nassuth, A. 2004. Climate change and plant diseases in Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology* 26: 335–350.

Desprez-Loustau, M., Aguayo, J., Dutech, C., Hayden, K.J., Husson, C., Jakushkin, B., Marçais, B., Piou, D., Robin, C., Vacher, C. 2016. An evolutionary ecology perspective to address forest pathology challenges of today and tomorrow. *Annals of Forest Science* 73:45–67. DOI 10.1007/s13595-015-0487-4

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., Lerda, M., Stinson, K., Wick, R., Ayres, M. 2009. Responses 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.

Freer-Smith, P., Webber, J. 2017. Tree pests and diseases: the threat to biodiversity and the delivery of ecosystem services. *Biodiversity & Conservation* 26: 3167.

La Porta, N., Capretti, P., Thomsen, I.M., Kasanen, R., Hietala, A.M., Weissenberg, K. 2008. Forest pathogens with higher damage potential due to climate change in Europe. *Canadian Journal of Plant Pathology* 30: 177–195.

Kliejunas, J.T., Geils, B.W., Glaeser, J.M., Goheen, E.M., Hennon, P., Kim, M.-, Kope, H., Stone, J., Sturrock, R., Frankel, S.J. 2009. Review of literature on climate change and forest diseases of western North America. General Technical Report (GTR), USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 225: 54 s.

Moore B.A., Allard G.B. 2008. Climate change impacts on forest health. Forest Health and Biosecurity Working Paper FBS/34E. Forest Assessment, Management and Conservation Department, FAO, Rome, Italy. 38

Sturrock, R.N., Frankel, 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. DOI 10.1111/j.1365-3059.2010.02406.x.

Tubby, K.V., Webber J.F. 2010. Pests and diseases threatening urban trees under a changing climate. *Forestry* 83: 451–459.

HIRVIELÄINTUHOT MUUTTUVASSA ILMASTOSSA

Heli Viiri & Juho Matala

Ilmastomallien ennakoimat muutokset etenkin talven pituudessa ja lumisuudessa voivat heijastua hirvieläinten elinpiirien käyttöön ja siirtymisiin uusille elinalueille, ja edelleen sitä kautta metsätuhojen määrään, laatuun ja alueelliseen jakaumaan (Niemelä ym. 2001; Härkönen 2008). Myös kasvillisuuden levinneisyysalueiden muutokset, puurajan siirtyminen ja kasvillisuuden rehevöitymien voivat muuttaa hirvieläinten ravinnonkäyttöä (Moen ym. 2006). Lisäksi suurpetokannat ovat kasvamassa ja levittäytymässä. On arvioitu, että muuttuvat ilmasto-olosuhteet johtavat monenlaisiin ravintoketjujen eri tasojen välisiin vaikutuksiin (Post ym. 1999). Nämä vaikutukset monimutkaistavat hirvieläinlajien kannan kehitykseen vaikuttavia tekijöitä ja siten vaikeuttavat metsätuhojen määrän ennustamista. Lisäksi hirvieläinkantojen metsästyksen voimakkuuden vaihtelu vaikeuttaa metsätuhojen ennustamista.

Hirvieläinten ravinnonkäyttö voi merkittävästi muokata metsäekosysteemin rakennetta ja toimintaa. Suomessa hiri on talousmetsien merkittävin tuhonaiheuttaja männyn ja koivun taimikoissa (Korhonen ym. 2010, 2017; Nevalainen ym. 2016). 8. valtakunnan metsien inventoinnissa (VMI8, vuosina 1986–1994) hirvituhojen määrä oli 443 000 hehtaaria, VMI9:ssä (1996–2003) 653 000 ha ja VMI10:ssä (2004–2008) 990 000 ha. Nämä pinta-alat edustavat 2,2 %, 3,2 % ja 4,9 % koko metsäpinta-alasta (Nevalainen ym. 2016). VMI11 mukaan vuosina 2009–2013 hirvituhojen pinta-ala on ollut edelleen lähes yhtä korkealla tasolla, 960 000 ha (Korhonen ym. 2017). Valtakunnan metsien inventointiaineistojen mukaan haapa-koivu, haapa-kuusi ja haapa-mänty sekametsiköissä ovat suurimmat hirvien aiheuttamien taimituhojen osuudet (Nevalainen ym. 2016). Lisäksi erityisesti haapaan ja pihlajaan kohdistuva hirven ravinnonkäyttö vaikuttaa myös metsien monimuotoisuuteen luonnonsuojelualueilla (Heikkilä & Tuominen 2009).

Mäntytaimikoiden määrä on vähentynyt VMI8. ja VMI10:n välillä 3,3 milj. hehtaaria (Tomppo ym. 2001) 2,4 milj. hehtaariin (Korhonen ym. 2013) ja edelleen VMI11:ssä 2,0 milj. hehtaariin (Korhonen ym. 2017) kuusen yleistyttyä pääasiallisena viljeltävänä puulajina Etelä-Suomessa. Männyntaimikoiden väheneminen on lisännyt niihin kohdistuvaa hirvien syöntipainetta, ja myös varttuneiden kuusikoiden kuoren syönnistä on ilmennyt havaintoja hirvien talvialueilla.

Metsä- ja valkohäntäkauriin merkitys vahinkoeläiminä ja metsäekosysteemin muokkaajina on ollut hirveä pienempi. Kuitenkin myös metsä- ja valkohäntäkauriit voivat hyödyntää erityisesti pieniä taimikoita ravinnokeeseen ja aiheuttaa merkittäviä vahinkoja (Heikkilä ym. 2003).

Kauriit leviävät pohjoisemmaksi

Metsä- ja valkohäntäkauriiden kantojen nousu ei hirven tavoin liity metsien rakenteessa tapahtuneeseen muutokseen, vaan kyse on niiden siirroista luonnonolosuhteiden puolesta hyvin soveltuville alueille: valkohäntäkauris on tuotu Pohjois-Amerikasta 1930-luvulla (Salmi 1949) ja metsäkauriin maansisäisiä siirtoja on tehty Perämeren rannikolta ja Ahvenanmaalta Etelä-Suomeen 1980- ja 1990-luvuilla. Leudot talvet 1990-luvulla ja 2000-luvun alussa, ja varsinkin valkohäntäkauriin paikoin voimakas talviruokinta, ovat edistäneet lajien levittäytymistä ja kantojen runsastumista (Härkönen 2008). Metsä- ja valkohäntäkauriit elävät täällä levinneisyysalueensa rajalla. Lumipeitteen paksuus vaikuttaa selvästi molempien kaurislajien ravinnon ja elinympäristön valintaan ja selviämiseen talvesta (Telfer 1970, Mystlerud ym. 1997). Valkohäntäkauris menestyy parhaiten Etelä- ja Länsi-Suomessa alueilla, jotka vastaavat lumipeitteen paksuuden ja kylmimmän kuukauden keskilämpötilan perusteella sen alkuperäaluetta Pohjois-Amerikassa (Salmi 1949, Telfer 1970). Luonnonvarakeskuksen arvion mukaan Suomessa on keväällä 2018 noin 98 000 valkohäntäkaurista (93 100–103 800). Kasvaa edellisvuodesta on noin 13 prosenttia. Tiheimmillään valkohäntäkauriita on yli 50 tuhannella hehtaarilla Satakunnan, Pohjois- ja Etelä-Hämeen ja Varsinais-Suomen riistakeskusten raja-alueilla. Myös Uudenmaan riistakeskuksen alueella tiheydet ovat korkeita.

Metsä- ja valkohäntäkauriiden seurantatutkimuksessa lumen paksuudella on havaittu olevan selkeä yhteys elinpiirin kokoon (Saari ym., käsikirjoitus). Erityisen selvästi lumipeitteen paksuneminen pienensi elinpiiriä pohjoisimmilla yksilöillä. Lumipeitteen paksuus on kriittinen tekijä talvesta selviämisessä. Pohjoisessa ravintoresurssit ovat huonommat, ja niiden tehokas hyödyntäminen edellyttäisi liikkumista laajemmalla alueella kuin lumiolot sallivat.

Hirvi on sopeutunut hyvin Suomen nykyiseen ilmastoon. Lämpimämmät kesät ja talvet voivat aiheuttaa hirvellen 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). USA:ssa hirven levinneisyyden etelärajalla on havaittu ilmastonmuutoksen myötä runsastuneiden puutiaiskantojen aiheuttavan lisääntyvää kuolleisuutta hirvillä. Kyse lienee lämpöstressin ja puutiaisten yhteisvaikutuksesta (DelGiudice & Severud 2016).

Hirvituhot ovat pahimmat sellaisina talvina, jolloin lumipeite tulee aikaisin ja on runsas. Tällöin hirvet kokoontuvat pienille talvelinpiireille, jolloin pienikin hirvikanta aiheuttaa suuria paikallisia vahinkoja. Mikäli talvet muuttuvat vähälumisemmiksi, paikalliset vahinkokeskittymät vähenevät, koska hirvet pääsevät helpommin liikkumaan laajemmalla alueella. Tällöin syöntien vaikutukset jäävät lievemmiksi, mikäli hirvikannan koko on talviravintovaroihin nähden kohtuullinen.

Ilmastonmuutoksen todennäköisin vaikutus hirvieläimiin on talvien lauhtumisesta, lumipeitteen ohentumisesta ja lumisen ajan lyhenemisestä johtuva valkohäntä- ja metsäkauriiden leviäminen pohjoisemmaksi nykyisiltä esiintymisalueiltaan Lounais- ja Etelä-Suomesta yhä laajemmalle alueelle kohti Itä- ja Pohjois-Suomea (Härkönen 2008). Erityisesti ne leviävät alueille, joilta löytyy niiden suosimaa peltojen ja metsien vaihtelun luonnehtimaa maisemarakennetta.

Ilmaston muuttuessa keskeistä on hirvieläinkantojen pitäminen tasolla, jolla metsätuhot jäisivät siedettäväksi. Myös valkohäntä- ja metsäkauriin kannansääätelyn tehostaminen tulee entistä tärkeämmäksi niiden levittäytyessä entistä laajemmille alueille olosuhteiden muuttuessa niille suotuisammiksi. Metsien monipuolinen puulajirakenne ei saa vaarantua, vaikka sekametsien suosiminen ja yleistymisen voivat lisätä hirvieläintuhojen riskiä.

Viitteet

DelGiudice, G.D. & Severud, B. 2016. Studying the Winter Nutritional Status of Moose and its Relationship to Moose Survival, the Population Trend, and Climate Change in a Declining Population in Northeastern Minnesota. Univ. Minnesota.

- 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.
- Heikkilä, R., Annala, M.-L. & Härkönen, S. 2003. Metsäkauris taimikoiden vahinkoeläimenä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 906. 20 s.
- Heikkilä, R. & Tuominen, M. 2009. The influence of moose on tree species composition in Liesjärvi National Park in Southern Finland. *Alces* 45: 49–58.
- Härkönen, S. 2008. Metsäkauris, ilmastonmuutos ja metsävahingot. *Kasvinsuojelulehti* 3/2008. s. 78–81.
- 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.
- Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Viiri, H., Heikkinen, J., Henttonen, H.M., Hotanen, J.-P., Mäkelä, H., Nevalainen, S., Pitkänen, J. 2013. Suomen metsät 2004–2008 ja niiden kehitys 1921–2008. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2013: 269–608.
- Korhonen, K. T., Ihalainen, A., Ahola, A., Heikkinen, J., Henttonen, H. M., Hotanen, J.-P., Nevalainen, S., Pitkänen, J., Strandström, M., Viiri, H. Suomen metsät 2009–2013 ja niiden kehitys 1921–2013. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 59/2017. 86 s.
- 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.
- Moen, J., Andersen, R. ja Illius, A. 2006. Living in a seasonal environment. Kirjassa: Large Herbivore Ecology, Ecosystem Dynamics and Conservation. Danell, K., Duncan, P., Bergström, R. ja Pastor, J. (toim.), Cambridge University Press. s. 50-70.
- Mysterud, 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: 27–33.
- Nevalainen S., Matala J., Korhonen K.T., Ihalainen A., Nikula A. 2016. Moose damage in National Forest Inventories (1986–2008) in Finland. *Silva Fennica* vol. 50 no. 2 article id 1410. 23 s. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1410>.
- Niemelä, P., Chapin, F.S. III, Danell, K. & Bryant, J.P. 2001. Herbivory-mediated responses of selected Boreal forests to climate change. *Climatic Change* 48: 427–440.
- Post, E., Peterson, R. O., Stenseth, N. C. & McLaren, B. E. 1999. Ecosystem consequences of wolf behavioural response to climate. *Nature* 401: 905–907.
- Salmi, A.-M. 1949. Valkohäntäpeura Suomessa. *Suomen Riista* 4: 91–124.
- Saari, A., Matala, J. & Kouki, J. Metsä- ja valkohäntäkauriiden elinpiirien koko ja liikkeet. Käsikirjoitus.
- Telfer, E.S. 1970. Winter Habitat Selection by Moose and White-Tailed Deer. *The Journal of Wildlife Management* 34: 553–559.
- Tomppo E., Henttonen H., Tuomainen T. 2001. Valtakunnan metsien 8. inventoinnin menetelmä ja tulokset metsäkeskuksittain Pohjois-Suomessa 1992–94 sekä tulokset Etelä-Suomessa 1986–92 ja koko maassa 1986–94. *Metsätieteen aikakauskirja* 1B/2001: 99–248.

MITEN ILMASTONMUUTOS VAIKUTAA MYYRÄTUHOIHIN?

Heikki Henttonen, Otso Huitu & Heli Viiri

Myyrien kannanvaihteluissa muutoksia

Myyrät ovat yksi merkittävimmistä metsäpuiden taimikoiden tuholaisista. Esim. 2005-06 talvella myyrät tuhosivat miljoonia taimia tuhansien hehtaarien aloilta (Huitu ym. 2009). Vielä voimakkaamman myyrähuipun aikana talvella 2008–2009 myyrien aiheuttaman täystuhon määräksi arvioitiin 18 000 ha, ja lievempiä, esim. kuusen taimien latvatuhoja, ilmeni useita kymmeniä tuhansia hehtaareja lisää. (Henttonen 2009).

Myyräkannat vaihtelevat monilla alueilla 3–4 vuoden säännöllisissä jaksoissa eli sykleissä, joita aiheuttavat petojen saalistus, talviravinnon puute ja mahdollisesti taudit (Henttonen ym. 1987, Hanski ym. 1991; Huitu ym. 2003; Korpela ym. 2013, Korpela ym. 2014.). Myyrien kannanvaihtelut ovat heikentyneet viimeksi kuluneiden parin vuosikymmenen aikana monin paikoin eri puolilla maailmaa (Cornulier ym. 2013), mutta Suomessa tilanne on ollut vaihteleva. Pitkäaikaiset aineistomme osoittavat selvästi, että lyhytaikaisen 3-4 –vuotisen vaihtelun päällä ilmenee pitkäaikaisempia trendejä. Esimerkiksi maan eteläpuoliskossa voimakkaat syklit vallitsivat vuosikymmeniä 1990-luvun puoliväliin. Vuosikymmenen loppu oli vaimeaa vaihtelua, mutta sitten viime vuosikymmenellä syklit ja huiput voimistuivat säännöllisesti, ja 2008 oli yli puoleen vuosisataan voimakkain myyrähuippu maan eteläpuoliskossa. Sen jälkeen tällä vuosikymmenellä vaihtelut ovat jälleen olleet vaimeat, eikä suuria myyrätuhoja ole esiintynyt. Pohjois-Suomessa myyräsyklit hävisivät 1980-luvun puolivälissä ja palasivat vasta 2010-11, jolloin Lapissa koettiin suuret myyrätuhot. Voimakkaat syklit ovat toistaiseksi jatkuneet pohjoisessa. Mielenkiintoista oli, että kun maailmalla ruvettiin laajemmin puhumaan syklien häviämisestä, mikä ensi kerran dokumentoitiin Lapista 1980-luvun puolivälissä (Henttonen ym. 1987), niin samaan aikaan syklit palasivat Lappiin tämän vuosikymmenen alussa.

Myyrien kannanvaihteluiden heikkenemiselle on esitetty useita hypoteeseja, joista toistuvin on ollut ilmastonmuutos (Hörnfeldt ym. 2005; Bierman ym. 2006; Ims ym. 2008; mutta ks. Brommer ym. 2009). Varsinkin talvien leudontumisen ja lumisen kauden lyhentymisen on katsottu heikentävän myyräsyklejä. Joillakin alueilla on myyräsykliä heikkeneminen voitu kohtalaisen luotettavasti kytkeä muuttuneisiin talviolosuhteisiin. Toisaalta Suomen esimerkki osoittaa, että ilmiö on kaikkea muuta kuin yksiselitteinen. Jos kyse olisi vain lumisuudesta ja talven lyhentymisestä, niin olisi otaksunut syklin muuttumisen tapahtuvan ensin lämpimämmässä etelässä kuin kylmemmässä pohjoisessa. Sykliä häviäminen ja taas palaaminen ei sekään sovellu aivan yksioikoiseen ilmastomuutoksen etenemiseen.

Pitkäaikaisten suomalaisten aineistojen perusteella on mallitettu myyräsykliä esiintymistä ja voimakkuutta (Korpela 2014, Korpela ym. 2013, Korpela ym. 2014). Myyräaineistojen lisäksi analyysiin sisältyivät lumijäljitysaineistot petojen runsaudentuhoista ja esiintymisestä, petolintuseurantojen tulokset sekä alueellinen ilmastodata. Vuosikymmenten seurantoihin perustuvat analyysit osoittivat selkeästi, että keskeinen tekijä myyrävaihteluiden pitkäaikaisissa muutoksissa on ilmastotekijöiden vaikutus myyrien ja pikkupetojen, ennen kaikkea lumikon, interaktioon. Kyse ei siis ole niinkään ilmaston vaikutuksesta suoraan myyriin ja/tai petoihin, vaan miten tuo myyrä-lumikko -interaktio ilmenee. Tässä oli selviä maantieteellisiä eroja. Pohjoisessa talvi on tärkeä, kun taas etelässä, hieman yllättäen kesä on tärkeä. Pikkupetojen merkitys oli siis olennainen, mutta ilmasto vaikutti eri tavalla eri puolilla Suomea. Tunnettuaahan on, että myyräkannat eivät vaihtelee samanaikaisesti koko maassa, vaan alueelliset erot ovat selvät. Lisäksi syklien alueellisessa esiintymisessä tapahtuu muutoksia. Esimerkiksi 1980-luvulla ja 1990-luvun alkupuoliskolla vaihtelu oli samanaikaista länsirannikolta Puulaveteen ja liki Helsingistä. Ouluun. Puulasta itään sykli ilmeni vuoden viiveellä. 2000-luvun alussa syklin taas voimistuessa koko eteläinen Suomi länsirannikolta liki itärajalle ja Kokkola – Pohjois-Savo-linjalle oli samassa rytmissä. Näiden alueellisten synkroniamuutosten taustatekijöiden pohtiminen suhteessa ilmaston vaikutusten merkitykseen pikkupetojen ja myyrien interaktion alueelliseen ilmenemiseen onkin miellyttävää aivovoimistelua. **Mutta on erittäin voimakkaasti korostettava, että tällaiset syvälliset analyysit ovat mahdollisia vain pitkäaikaisten seuranta-aineistojen pohjalta.** Vastaavia aineistoja ei maailmalta juurikaan löydy.

Ilmastonmuutos voi vaikuttaa myyrien kannanvaihteluihin joko suorasti tai epäsuorasti ravintoketjun tasojen (kasvit, myyrät, pedot, taudit) vuorovaikutusten kautta. Muuttuvat ilmasto-olot voivat vaikuttaa joko nisäkäsyhteisöjen monimuotoisuuteen, erilaisten saalis- ja petotyyppien moninaisuuteen, myyriä saalistavien petojen lisääntymis- tai saalistusmenestykseen tai myyrien käyttämien ravintokasvien levinneisyyteen, runsauteen tai ravinnolliseen laatuun ja tätä kautta myyriin. Myyriä syövien petojen runsausmuutokset vaikuttavat myös myyrien dynamiikkaan ja tätä kautta myyrien aiheuttamien tuhojen määrään. Toisaalta Korpela (2014) totesi, että vaikka myyrädynamiikka keskimäärin tasaantuisi ilmaston muutoksesta johtuvan lumettomuuden ja eliöyhteisöjen monipuolistumisen vuoksi, niin mallien perusteella epäsuorasti, todella voimakkaat myyrähuiput ovat mahdollisia. Ilmastonmuutoksen vuoksi siirtyisimme jonkin verran säännöllisestä syklisestä myyrädynamiikasta arvaamattomaan, usein vakaaseen mutta satunnaisesti outbreak-tyyliseen dynamiikkaan. Tämä heijastuisi niin myyrätuhojen kuin myyrien levittämien tautien esiintymisessä.

Ilmaston lämpeneminen saattaa vähentää myyrien levittämän myyräkuumeen esiintymistä Suomessa, koska metsämyyrien kannanvaihtelut voivat tasaantua petoyhteisön monipuolistumisen vuoksi (Hanski ym. 1991), ja lämpenemisen vuoksi viruksen säilyminen luonnossa heikkenee (Kallio ym. 2006). Myös tularemian eli jänisruton esiintyminen voi laskea kesäilmaston muuttumisen takia. Myyrähuippu on välttämätön edellytys tularemian esiintymiselle vuotta myöhemmin, mutta ko. kesän sääolot vaikuttavat hyttysten menestymiseen; tularemiahan on pääsääntöisesti Suomessa hyttysten levittämä tauti. Kuuma kuiva kesä tai kylmä kesä ei suosi hyttysiä, ja tuolloin tularemiaa ei ole kovin runsaasti vaikka edellisenä syksynä olisikin ollut myyrähuippu. Ilmastomuutoksen vaikutuksia zoonoosien esiintymiseen ovat pohtineet meillä mm. Vapalahti ym. (2012) ja Henttonen (2018).

Kevään ja kesän lämpötilojen nousu voi selittää eri alueilla esiintyvät dynamiikan erisuuntaiset muutokset. Muutokset myyrien kannankasvun tiheysriippuvuudessa korreloivat kevään ja kesän lämpötilojen kanssa; muutokset populaatiokasvussa taas korreloivat syksyn ja talven olosuhteiden kanssa. Mainittakoon, että kuiva ja lämmin kesä on varsinkin peltomyyrille haitallinen. Heinäkasvien itävissä sirkkataimissa on estrogeenihormonien esiasteita, jotka tehostavat heinäkasveja syövien myyrien, kuten peltomyyrän, lisääntymistä. Kuivana kesänä kasvillisuus lakastuu ja tämä heikentää peltomyyrien lisääntymistä. Ei liene sattuma, että vuonna 2008 oli ennätysmäinen myyrähuippu. Kyseisenä vuonna luonnostaan kuuluikin olla myyrähuippu, mutta koska kesä 2008 oli hyvin märkä ja viileä, tuoretta itävää heinäkasvillisuutta oli läpi kesän runsaasti saatavilla, ja peltomyyrien tiheydet räjähtivät. Jos kesät ovat jatkossa yhä enemmän kuin 2018, kuivia ja kuumia, niin se ei suosi peltomyyrien, pahimpien taimistotuholaisten, jättihuippuja.

Yleisesti ottaen, ilmaston lämpenemisestä johtuva perustuotannon nousu lisää keskikokoisten petojen kantoja, ja sen seurauksena nykyisin vallitseva myyrien voimakas syklisyys voi heikentyä (vt. Hansson & Henttonen 1988, Hanski ym. 1991). Tässä tapauksessa myyrien suurimmat tiheydet jäisivät nykyistä huomattavasti alemmiksi, mikä puolestaan vähentäisi myyrien aiheuttamia syklisiä, ajoittaisia taimituhoja. Vastaavasti lieviä ja paikallisempia tuhoja voisi esiintyä jatkuvasti jonkin verran.

Tivistäen, useimmat ajatusrakennelmat viittaavat siihen suuntaan, että ilmaston muutos tasaisi myyrien kannanvaihteluita, jolloin syklisesti esiintyvät pahat tuhovuodet jäisivät historiaan, mutta tuhoja voisi esiintyä hiukan tai jonkin verran jatkuvasti ja alueellisesti epämääräisesti. Satunnaisesti esiintyvät pahat myyrähuiput olisivat edelleen mahdollisia, mutta ne todennäköisesti esiintyisivät harvemmin kuin voimakkaan syklisyyden vallitessa esiintyvät säännölliset myyrähuiput.

Myyrät ja päästäiset voivat rajoittaa mäntypistiäisten joukkoesiintymiä

Mäntypistiäisten toukat syövät männynneulasia, ja toisinaan kehitty joukkoesiintymiä, jolloin männiköitä saatetaan syödä paljaaksi tuhansien hehtaarien alueella. Neulasten syönnistä seuraa kasvatappioita, puiden altistumista seuraustuhoille ja puiden kuivumista. Yksi tärkeimmistä mäntypistiäisten joukkoesiintymiä rajoittavista tekijöistä on myyrien ja päästäisten aiheuttama kotelosaalistus (Hanski & Parvainen 1985). Mitä enemmän saalistuspainetta pikkunisäkkäät saavat aikaan, sitä pienempi todennäköisyys on mäntypistiäisten joukkoesiintymiselle. Pikkunisäkkäiden eri mäntypistiäislajien kotelosaalistus tapahtuu eri vuodenaikoina.

Yleisempi laji, ruskomäntypistäinen, on kotelovaiheessa loppukesästä syksyyn, ja talvehtii munana männyn neulasissa. Pilkkumäntypistäinen puolestaan talvehtii kotelona maassa.

Pikkunisäkkäiden runsastuminen ja kantojen vakiintuminen voi vaikuttaa ruskomäntypistiäisten määriin, koska kotelosaalistus tapahtuu lumettomana aikana. Tutkimustulokset osoittavat, että 5 °C:n lämpötilan nousu loppukesän-alkusyksyn olosuhteissa lisää metsämyyrien tekemää ruskomäntypistiäisten kotelosaalistusta yli viidenneksen (Kollberg ym. 2014). Vaikka ilmastomuutoksen on esitetty lisäävän mäntypistiäisten joukkoesiintymisen todennäköisyyttä, myyrä- ja päästäissaalistuksen samanaikainen lisääntyminen saattaa osaltaan hillitä pahimpia mäntypistiäistuhoja. Talvien lämpeneminen vaikuttaa lumen laatuun: lämpökaudet tiivistävät ja jäädyttävät lunta maata vasten, jolloin pikkunisäkkäiden pilkkumäntypistiäisten koteloihin talvella kohdistuva saalistus vaikeutuu tai jopa estyy. Tämä voi puolestaan lisätä pilkkumäntypistiäisten tuhoriskiä.

Viitteet

- 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.
- 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.
- Cornulier, T., Yoccoz, N.G., Bretagnolle, V., Brommer, J.E., Butet, A., Ecke, F., Elston, D.E., Framstad, E., Henttonen, H., Hörnfeldt, B., Huitu, O., Imholt, C., Ims, R.A., Jacob, J., Jedrzejewska, B., Millon, A., Petty, S.J., Pietäinen, H., Tkadlec, E., Zub, K. and Lambin, X. 2013. Europe-wide dampening of population cycles in keystone herbivores. – *Science* 340:63-66.
- Hanski, I., Hansson, L. & Henttonen, H. 1991. Specialist predators, generalist predators and the microtine rodent cycle. *Journal of Animal Ecology*. 60: 353–367.
- Hanski, I. and Parviainen, P. 1985. Cocoon predation by small mammals, and pine sawfly population dynamics. *Oikos* 45: 125–136.
- Hansson, L. & Henttonen, H. 1988. Rodent dynamics as community processes. *Trends in Ecology and Evolution* 3: 195–200.
- Henttonen, H. 2009. Raportti talven 2008–09 myyrätuhoista MMM:lle. Metsäntutkimuslaitos. 2 s.
- Henttonen, H. 2018. Tauteja luonnosta. - Metsäkustannus Oy, 128 ss. ISBN 978-952-338-037-0.
- Henttonen, H., Oksanen, T., Jortikka, A. & Haukialmi, V. 1987. How much do weasels shape microtine cycles in the northern Fennoscandian taiga? *Oikos* 50: 353–365.
- 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., Pietäinen, 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.
- 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.

Kallio, E.R.K., Klingström, J., Gustafsson, E., Manni, T., Vaheri, A., Henttonen, H., Vapalahti, O., and Lundkvist, Å. 2006. Prolonged survival of Puumala hantavirus outside the host: evidence for indirect transmission via the environment - J. Gen. Virol. 87:2127-2134.

Kollberg, I., Bylund, H., Huitu, O. & Björkman C. 2014. Regulation of forest defoliating insects through small mammal predation: reconsidering the mechanisms. *Oecologia* 176: 975-83. doi: 10.1007/s00442-014-3080-x.

Korpela, K. 2014. Biological Interactions in the Boreal Ecosystem under Climate Change – are the vole and predator cycles disappearing? – PhD. Thesis, Jyväskylä: University of Jyväskylä.

Korpela, K., Delgado, M., Henttonen, H., Korpimäki, E., Koskela, E., Ovaskainen, O., Pietiäinen, H., Sundell, J., Yoccoz, N. and Huitu, O. 2013. Non-linear effects of climate on boreal rodent dynamics: warm winters do not negate high-amplitude cycles. - *Global Change Biology* 13:697-710.

Korpela, K., Helle, P., Henttonen, H., Korpimäki, E., Koskela, E., Ovaskainen, O., Pietiäinen, H., Sundell, J., Valkama, J. and Huitu, O. 2014. Predator-vole interactions in boreal Europe: the role of small mustelids revised. – *Proc. R. Soc. B* 281. 20142119.

Vapalahti, O., Ruuhela, R. & Henttonen, H. 2012. Uudet infektiotaudit Suomessa – ilmastonmuutosko syynä? *Duodecim* 128: 1381–87.

7.2. Lehtimetsien tuhot

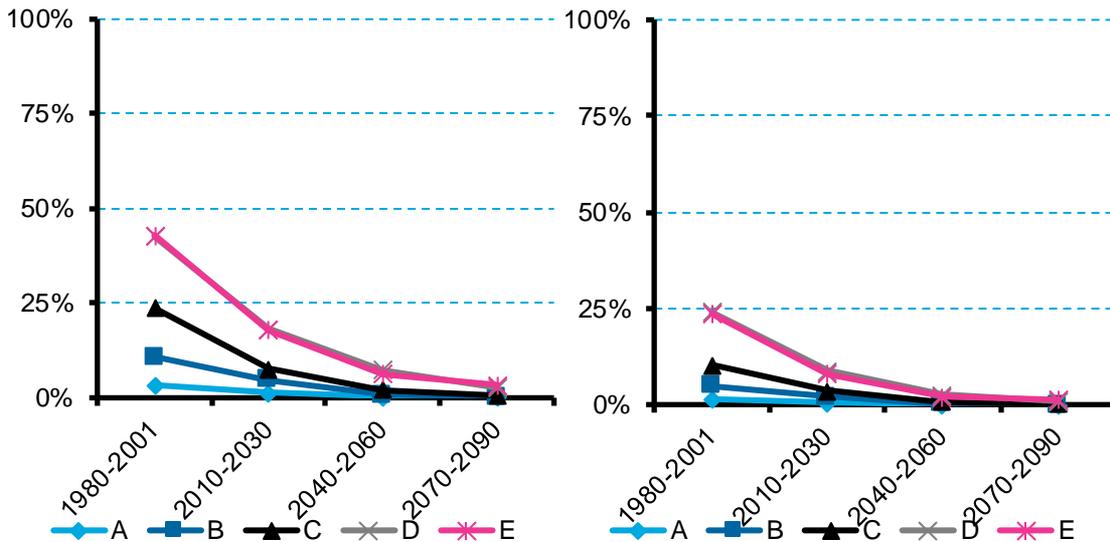
TUNTURI- JA HALLAMITTARI

Seppo Neuvonen

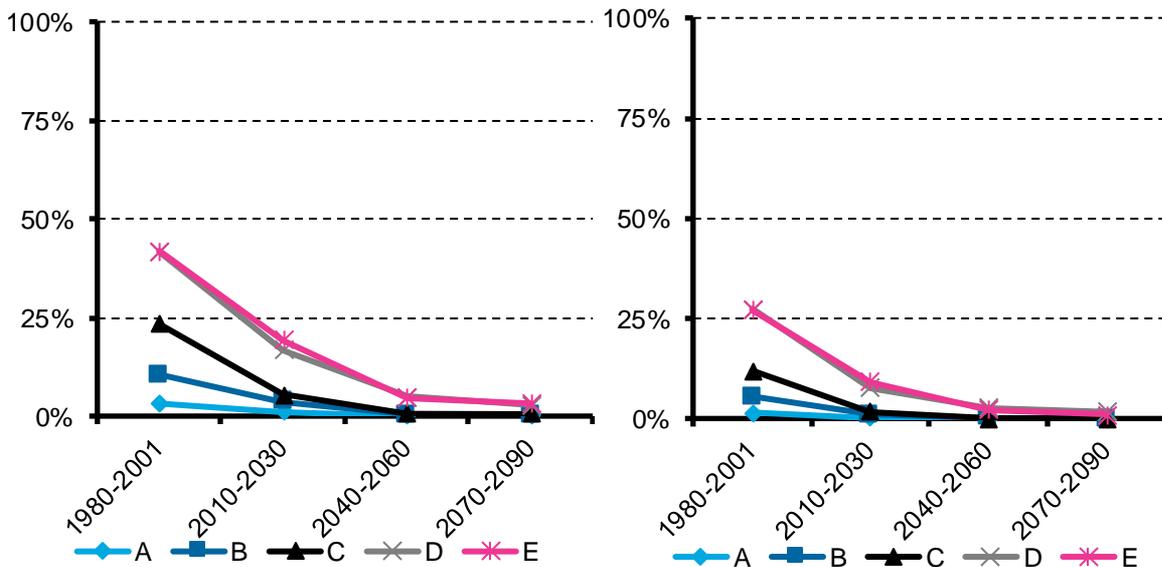
Ylä-Lapissa metsätalousalueen pohjoispuolella sijaitsevat tunturikoivikot kärsivät usein toistuvista hyönteistuhousta, joita on Suomen Lapissa aiheuttanut erityisesti tunturimittari, mutta tällä vuosituhannella myös hallamittari (*Operophtera brumata*) (Haukioja ym. 1988; Jepsen ym. 2008). Näiden lajien kannat vaihtelevat melko säännöllisesti Pohjois-Ruotsissa ja Norjassa: huippuvuosia on yleensä 8-11 vuoden välein (Haukioja ym. 1988). Suomen Lappi on kuitenkin ilmastoltaan mantereisempää aluetta, jolla kovat pakkaset rajoittavat tuhojen esiintymistä (Neuvonen ym. 1999).

Perhostoukkien tiheys huippuvaiheessa ja täten myös tuhon voimakkuus vaihtelee suuresti. Kaikkien huippujen aikana ei synny merkittävää tuhoa, mutta tunturimittarin aiheuttama tunturikoivikon paljaaksi syönti on aiheuttanut laajoja puustokuolemia mm. 1920- ja 1960-luvuilla (Kallio & Lehtonen 1973; Seppälä & Rastas 1980; Haukioja ym. 1988). Utsjoella 1960-luvun puolivälissä tuhoutui yli tuhat neliökilometriä tunturikoivikkoa, minkä seurauksena ”luurankometsät” luonnehtivat alueen maisemaa vielä 1980-luvulla. Viime vuosikymmenellä hallamittarit aiheuttivat vastaavanlaista tuhoa Utsjoen itäosissa Kaldoain erämaa-alueella yli 400 neliökilometrin alueella (Jepsen ym. 2009; Santonen 2011).

Talvien ääriminimilämpötilojen nousu on vähentänyt talvehtivien mittariperhosten munien kuolleisuutta ja johtanut tuhoille alttiiden koivikoiden pinta-alan kasvuun (Virtanen ym. 1998; Ammunet ym. 2012). Ilmastonmuutoksen nettovaikutusta on kuitenkin vaikea arvioida, koska kesälämpötilojen nousu hyödyttää tuhohyönteisten loisia ja saalistajia (Virtanen & Neuvonen 1999; Neuvonen & Virtanen 2015). Nämä voivat lisääntyä ajan mittaan, ja hillitä tuhojen voimakkuutta.



Kuva 7.2.1. Niiden talvien todennäköisyys, jolloin vuorokauden alin lämpötila on laskenut vähintään kerran (1) kerran $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (~ hallamittarin munien kylmänkestävyys); tai (2) $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ (= vastaava lämpötila tunturimittarin ja ruskomäntypistiäisen munille) alapuolelle RCP4.5 skenaarion toteutuessa. Kuvassa esitetyt arvot ovat kuuden ilmastomallin antamien ennusteiden keskiarvoja eri ajanjaksoille ja eri alueille (ks. Taulukko 2.1 ja Kuva z).



Kuva 7.2.2. Niiden talvien todennäköisyys, jolloin vuorokauden alin lämpötila on laskenut vähintään kerran (1) kerran $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (~ hallamittarin munien kylmänkestävyys); tai (2) $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ (= vastaava lämpötila tunturimittarin ja ruskomäntypistiäisen munille) alapuolelle RCP8.5 skenaarion toteutuessa. Kuvassa esitetyt arvot ovat kuuden ilmastomallin antamien ennusteiden keskiarvoja eri ajanjaksoille ja eri alueille (ks. Taulukko 2.1 ja Kuva z).

Viitteet

Ammunét, T., Kaukoranta, T., Saikkonen, K., Repo T. & Klemola, T. 2012. Invading and resident defoliators in a changing climate: cold tolerance and predictions concerning extreme winter cold as a range-limiting factor. *Ecol. Entomol.* 37: 212–220.

Haukioja, E., Neuvonen, S., Hanhimäki, S. & Niemelä, P. 1988. The autumnal moth in Fennoscandia. Sivut 163-178 teoksessa: Dynamics of Forest Insect Populations: Patterns, Causes, and Management Strategies (Toim. A. A. Berryman). Plenum Press.

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. *J. Anim. Ecol.* 77:257–264.

Jepsen, J.U., Hagen, S.B., Hogda, K.A., Ims, R.A., Karlsen, S.R., Tommervik, H. & Yoccoz, N.G. 2009. Monitoring the spatio-temporal dynamics of geometrid moth outbreaks in birch forest using MODIS-NDVI data. *Remote Sens. Environ.* 113: 1939–1947.

Kallio, P. & Lehtonen, J. 1973. Birch forest damage caused by *Oporinia autumnata* (Bkh.) (Lep, Geometridae) in 1965–66 in Utsjoki, N Finland. *Rep. Kevo Subarctic Res. Stn* 10: 55–69.

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. & Virtanen, T. 2015. Abiotic factors, climatic variability and forest insect pests. Sivut 154-172 teoksessa: Björklund, C. and Niemelä, P. (toim.) *Climate Change and Insect Pests*, CAB International, UK.

Santonen, T. 2011. Mittarituhot pohjoisen Utsjoen alueella ja sen vaikutukset alueen kasvillisuuteen ja poronhoitoon. *Opinnäytetyö*, 35 s. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Seppälä, M. & Rastas, J. 1980. Vegetation map of northernmost Finland with special reference to subarctic forest limits and natural hazards. *Fennia* 158: 41–61.

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.

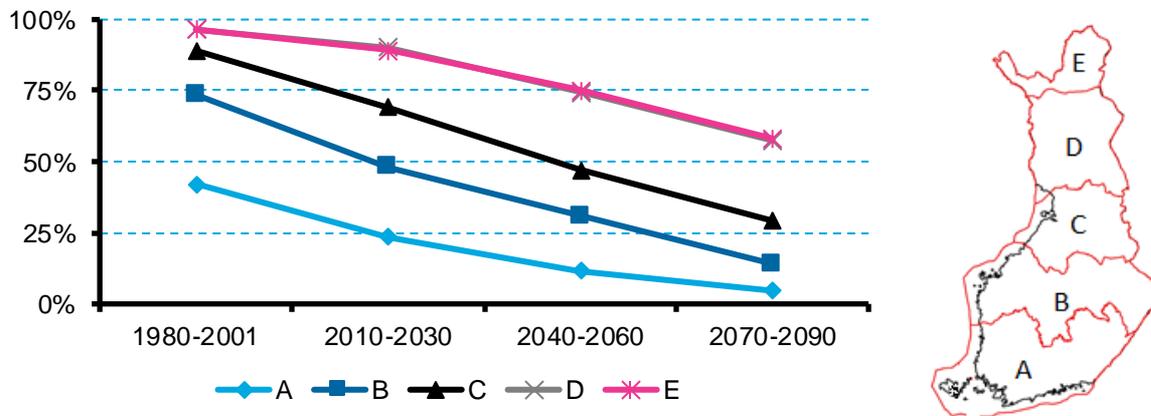
Virtanen, T. & Neuvonen, S. 1999. Performance of moth larvae on birch in relation to altitude, climate, host quality and parasitoids. *Oecologia* 120: 92-101.

LEHTINUNNA

Seppo Neuvonen

Lehtinunna on lehtipuita ravintonaan käyttävä laji, joka on aiheuttanut mittavia tuhoja erityisesti Pohjois-Amerikassa, minne se tuli vieraslajina noin 150 vuotta sitten (Weseloh 2003; McManus & Csóka 2007). Yhdysvalloissa lehtinunna on paha tuholainen erityisesti tammivaltaisissa metsissä ja puustoisilla asuinalueilla. Puiden kuolleisuuden lisäksi lajin karvaiset toukat voivat aiheuttaa allergisia reaktioita toukkien kanssa kosketuksiin joutuessa ihmisissä (Weseloh 2003). Lehtinunna on alkuperäinen laji Euroopassa ja Aasiassa, missä joukkoesiintymiä on noin 9–11 vuoden välein (McManus & Csóka 2007; Hlásny ym. 2016). Euroopassa lehtinunnan merkitys metsätuholaisena ei kuitenkaan ole yhtä suuri kuin Pohjois-Amerikassa. Ero selittyy sillä, että tammivaltaiset metsät ovat Euroopassa pienialaisempia ja alueellisesti hajanaisempia kuin USA:ssa (McManus & Csóka 2007).

Kesien lämpötilat ovat riittäviä lehtinunnan kehitykseen Lounais-Suomessa jo nykyilmastossa (Fält-Nardmann ym. 2017). Lehtinunna voi levitä ajoittain Suomeen etelämpää sopivien ilmavirtausten mukana (Neuvonen ym. 2018). Laji talvehtii muna-vaiheessa ja Suomessa esiintyneet pakkaset ovat historiallisesti olleet keskimäärin liian kylmiä munien elossa säilyvyyden kannalta. Kuvassa 7.2.2.1 on esitetty kuinka lehtinunnan talvehtivien munien kuolleisuuden kannalta kriittisen lämpötilan (-27 °C; Fält-Nardmann ym. 2018) alitusten lukumäärä (vuosia/30 vuotta) muuttuu RCP4.5 skenaarion tapauksessa. Arvion mukaan tämän vuosisadan lopulle mentäessä lounaisimman Suomen olosuhteet, joissa esim. lehtinunnan munat selviytyisivät useimmista talvista, ovat edenneet Oulun seudulle. Alueittaiset arviot lehtinunnan kannalta kriittisten talvilämpötilojen esiintymisestä RCP4.5 skenaarion toteutuessa on esitetty kuvassa 7.2.2.1. On kuitenkin syytä muistaa, että lehtipuiden runkojen tyviosissa olevat munat voivat osittain hyötyä lumipeitteen eristävästä vaikutuksesta ja näin välttyä kovimmilta pakkasilta.



Kuva 7.2.2.1. Niiden talvien todennäköisyys, jolloin vuorokauden alin lämpötila on laskenut vähintään kerran -27 °C (= lehtinunnan munien keskimääräinen kylmänkestävyys) alapuolelle RCP4.5 skenaarion toteutuessa. Todennäköisyydet on esitetty aluekohtaisina (aluejako oikealla) keskiarvoina eri ajanjaksoille (perustuu kuuden ilmastomallin antamiin ennusteisiin; ks. taulukko 2.1).

Lehtinunna on selvästi eteläisempi laji kuin havununna, ja sen leviämiseen vaikuttanevat myös kesälämpötilojen muutokset tulevaisuudessa (Vanhanen ym. 2007). Vaikka lehtinunna on erittäin moniruokainen, se on sekä Euroopassa että Pohjois-Amerikassa erityisesti tammivaltaisten metsien tuholainen, ja tammimetsien vähäalaisuus Suomessa saattaa hidastaa lajin leviämistä. Lehtinunnan esiintymistä on kuitenkin hyvä seurata eteläisimmän Suomen tammivaltaisilla virkistysalueilla, kuten Turun kansallisessa kaupunkipuistossa, johon kuuluu tammimetsistään tunnettu Ruissalo.

Viitteet

- Fält-Nardmann, J.J.J., Klemola, T., Ruohomäki, K., Niemelä, P., Roth, M. & Saikkonen, K. 2017. Local adaptations and phenotypic plasticity may render gypsy moth and nun moth future pests in northern European boreal forests. *Can. J. For. Res.* 48(3) DOI10.1139/cjfr-2016-048
- Fält-Nardmann, J.J.J., Ruohomäki, K., Tikkanen, O.-P. & Neuvonen, S. 2018a. Cold hardiness of *Lymantria monacha* and *L. dispar* (Lepidoptera: Erebidae) eggs to extreme winter temperatures: implications for predicting climate change impacts. *Ecological Entomology* DOI: <https://doi.org/10.1111/een.12515>
- Hlásny, T., Trombik, J., Holusa, J., Lukášová, K., Grendár, M., Turcáni, M., Zúbrik, M., Tabakovic-Tosic, M., Hirka, A., Buksha, I., Modlinger, R., Kacprzyk, M. & Csóka, G. 2016. Multi-decade patterns of gypsy moth fluctuations in the Carpathian Mountains and options for outbreak forecasting. *J. Pest Science* 89: 413-425.
- McManus, M. & Csóka, G. 2007. History and impact of Gypsy moth in North America and comparison to recent outbreaks in Europe. *Acta Silv. Lign. Hung.* 3: 47-64.
- Neuvonen, S., Kullberg, J., Kämäräinen, M., Lehtonen, I., Nevalainen, S., Siljamo, P. & Venäläinen, A. 2018. Havununna ja lehtinunna – tulevaisuuden metsätuholaisiin on syytä varautua ennakolta. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus **/2018: xx-xx.*
- 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.
- Weseloh, R.M. 2003. People and the Gypsy moth: A story of human interactions with an invasive species. *American Entomologist* 49: 180-190.

LEHTIPUITA UHKAAVAT SIENITAUDIT

Seppo Nevalainen

Saarnensurma (*Hymenoscyphus fraxineus*) on tappanut laajasti saarnia Ahvenmaalla, ja myös etelärannikolla.

Puille haitallisia vieraslajeja voi levitä myös kansainvälisen kasvikaupan mukana. Mm. tammella äkkikuolemataudin aiheuttavaa *Phytophthora*-lajeja on löytyy Suomesta vuosittain esimerkiksi alppiruusulta.

Pahimmassa tapauksessa meille ilmestyy kokonaan uusia tuhonaiheuttajia, tai hybridipatogeenejä (vieraspatogeenien ja paikallisten sukulaislajien risteytyksiä), joiden isäntäkasvikirjo on laajempi ja tuhot vakavampia kuin aiemmilla lajeilla. Nämä ovat aiheuttaneet ongelmia lähinnä lehtipuilla (*Phytophthora xalni* ym. lajit lepällä) tai useat *Phytophthora* lajit pyökillä ja lehtipuutaimitarhoilla Keski-Euroopassa. Tämän tapaisten ongelmien voidaan olettaa myös meillä kohdistuvan lehtipuihin ja ennen kaikkea jaloihin lehtipuihin.

8. METSÄTUHOJEN MARKKINAREAKTIOT: SKENAARIOTARKASTELU

Jani Laturi, Jussi Lintunen, Jussi Uusivuori

8.1. Johdanto

Tässä jaksossa tarkastellaan metsätuhoja ympäristö- ja luonnonvarataloustieteen näkökulmasta. Erityisenä kiinnostuksen kohteena ovat metsäomistajien reaktiot metsätuhoriskin olemassaoloon. Tämän lisäksi jaksossa esitetään FinFEP-mallilla tehty mallitarkastelu. Tarkastelu keskittyy metsätuhojen puumarkkina- ja puustovaikutuksiin. Mallitarkastelu on kuitenkin nähtävä erityisesti eräänlaisena pilottitutkimuksena, jonka tavoitteena on kartoittaa tietotarpeita sekä tuoda esiin ilmiöön liittyviä näkökulmia.

8.2. Metsätuhot ja yhteiskunta

METSÄTUHOJEN LUOKITTELU

Jaksossa 3 (bioottiset) tuhot jaettiin äkillisiin ja kroonisiin. Äkilliset tuhot voivat pahimmillaan tappaa merkittävän määrän puita ja johtaa metsikön ennenaikaiseen uudistamiseen. Kroonisten tuhojen tapauksessa ei ole selkeästi tunnistettavia tuhojaksoja, vaan tuhon ylläpitävät enemmän tai vähemmän tasaista kasvun heikentymistä. Kroonisten tuhojen vaikutus metsänomistajan metsänkäsittelemiseen on erilainen kuin äkillisillä tuhoilla. Osa kroonisista tuhoista voidaan ajatella olevan sisäänrakennettuna metsän kasvukuvaukseen, eikä vaikuta tämän enempää metsänomistajan päätöksentekoon. Osa kroonisista tuhoista voi vaikuttaa puulajivalintaan (hirvituhoalueilla männyn vaihto kuuseen ja juurikäävän saastuttamilla alueilla kuusen vaihtaminen koivuun). Puulajin vaihto perustuu alentuneeseen maanarvon odotusarvoon, jos puulajia ei vaihdeta. Kroonisten tuhojen riskitasoa voidaan säädellä erilaisin toimin kuten hirvikannan säätelyllä ja kantokäsittelyillä kesähakkuissa. Kroonisten tuhojen kasvatappiot aiheuttavat hiilinielun heikentymistä, mutta eivät varsinaisesti hiilen vapautumista. Näistä syistä krooniset tuhot sivuutetaan tässä esitellyssä numeerisessa tarkastelussa.

Taloustieteellisen tarkastelun kannalta on lisäksi hyödyllistä jakaa äkilliset tuhot kahteen ryhmään: hetkellisiksi ja leviäviksi. Hetkelliset äkilliset tuhot iskevät yllättäen ja ovat ohi lyhyessä ajassa. Tällaisia ovat mm. tuuli- ja lumituhot. Leviävät äkilliset tuhot ovat pitkäkestoisempia ja niiden spatiotemporaalista etenemistä voidaan seurata ja mallintaa. Tällaisia ovat mm. useat hyönteistuhot (ks. Taulukko 3.2). Hetkelliset äkilliset tuhot, jotka aiheuttavat metsikössä merkittävää tuhoa (VMI-asteikolla vakava tai täydellinen) ovat yksittäisen metsänomistajan näkökulmasta hyvin harvinaisia. Voidaan arvioida, että tällaisen tuhon todennäköisyys on Suomessa nykytilanteessa niin alhainen, ettei se merkittävästi vaikuta esim. optimaalisen kiertoajan pituuteen. Tämä ei tarkoita sitä, ettei metsänomistajan kannattaisi esim. harvennusta tehdessään huomioida käsittelyn vaikutusta esim. tuulituhoriskiin. Tässä tarkastelussa oletetaan, että hetkellisiltä tuhoilta suojautumisen vuoksi tehdyt metsänkäsittelemismuutokset eivät vaikuta merkittävästi metsänkasvuun.

Leviävien äkillisten tuhojen luokka on taloustieteen kannalta erityisen mielenkiintoinen. Tämä johtuu siitä, että tuhoprosessin ajallinen ja spatiaalinen jatkuvuus mahdollistaa prosessin kehityksen seuraamisen ja kohonneisiin tuhotodennäköisyyksiin reagoimisen. Kuten hetkellisten äkillisten tuhojen tapauksessa yllä, myös leviävän äkillisen tuhon (ehdoton) todennäköisyys on alhainen. Jos tuho kuitenkin realisoituu jossain metsikössä, ympäröivien metsiköiden ehdollinen tuhoriski kasvaa tuhon leviämiskyvyn myötä merkittävästi. Jos leviävän tuhoepidemian käynnistyminen havaitaan ajoissa, voivat metsänomistajat sopeuttaa metsänhoitopäätöksiään uuteen, kohonneen riskin tilanteeseen.

METSÄNOMISTAJAN REAKTIOT

Tässä tarkastelussa keskitytään kolmeen metsänhoitopäätökseen: puulajin valintaan, harvennusten toteuttamiseen ja uudistushakkuun ajankohdan valintaan.

Puulajin valinta perustuu tyypillisesti kasvupaikan ominaisuuksiin. Valinta kohdistuu puulajiin, joka tuottaa metsänomistajalle suurimman hyödyn. Merkittävässä roolissa ovat istutusinvestoinnista saadut odotetut puunmyyntituotot, mutta myös muilla tekijöillä, esim. maisematekijöillä, voi olla vaikutuksensa. Metsätuhoriskit vaikuttavat odotettuun investointikustannuksiin ja puunmyyntituloihin perustuvaan maanarvoon. Tuhoriskit vaikuttavat eri tavalla eri puulajeihin (ks. Taulukko 3.2). Tämän vuoksi tieto tuhoriskeistä vaikuttaa puulajipäätökseen. Esimerkiksi korkean hirttuhoriskin alueella mäntyala kannattaa uudistaa kuuselle, jos kuusi tuottaa paremman odotetun maanarvon. Samoin juurikäävän saastuttama kuusiala kannattaa uudistaa männylle tai koivulle kasvupaikasta riippuen. Tällainen puulajivaihto estää myös juurikäävän leviämistä uusiin metsiköihin, mikä on yhteiskunnan kannalta edullista. Kaikki kolme edellä esitettyä tuholuokkaa (krooninen, hetkellinen äkillinen ja leviävä äkillinen) voivat vaikuttaa puulajivalintaan.

Tuhoriskit voivat vaikuttaa myös harvennusten ajoitukseen, toteutustapaan ja intensiteettiin. Harvennuksessa voidaan poistaa heikentyneet ja kuolleet puut. Samalla metsään jäävät puut saavat lisää elintilaa, mikä mahdollistaa puiden hyvän kasvun ja terveyden. Harvennukset siis suojaavat metsikköä monilta metsätuhoilta. Toisaalta harvennuksiin liittyy riskejä. Ensinnäkin jäljelle jäävät puut voivat vaurioitua hakkuiden yhteydessä. Tämä altistaa mm. sienitaudeille. Lisäksi jäljelle jääneet puut voivat olla alttiimpia tuulituhoille, koska ne eivät ole sopeutuneet uusiin vallitseviin tuuliolosuhteisiin (Suvanto ym. 2016). Harvennukset alentavat jäljelle jäävää puustopääomaa, mikä alentaa tulevien riskien taloudellisia vaikutuksia. Siten harvennukset suojaavat riskiltä. Kasvanut tuhoriski lisänneekin yläharvennuksen kannattavuutta, sillä yläharvennuksessa varmojen puunmyyntitulojen ja riskialttiin jäljelle jäävän puuston arvon suhde on edullisin. Harvennusten vaikutukset tuhoriskeihin voivat vaikuttaa tähän perustulokseen. Niiden osalta on erityisen tärkeää, että metsänomistajat ymmärtävät harvennuksen vaikutuksen tuhoriskeihin.

Tuhoriskit voivat vaikuttaa myös uudistushakkuun ajankohtaan. Optimaalisen kiertoajan valinta metsätuhoriskin vallitessa onkin metsäekonomian klassinen tutkimuskysymys (Reed 1984, Amacher et al. 2009). Yksinkertaistaen voidaan sanoa, että kasvanut tuhoriski vaikuttaa kiertoajan valintaan samoin kuin kasvanut tuottovaatimus. Siten tuhoriskin olemassaolo lyhentää kiertoaikoja. Suomen nykyisissä olosuhteissa täydellisen metsätuhoon riski on niin alhainen, että riskin vaikutus hakkuuikään on vähäinen. Sen sijaan leviävän äkillisen tuhoon osuminen oman metsikön lähelle voi nostaa tuhoriskiä niin merkittävästi ympäröivissä metsiköissä, että hakkuuikään alentaminen voi olla perusteltua. Tällaiset tuhoon ympärillä tehdyt hakkuut vähentävät realisoituneiden tuhojen määrää sekä voi hidastaa tuhoon leviämistä. Metsänomistajan havaitsema kohonnut riskitaso johtaa siis torjuntahakkuiden tapaisiin tuhoon leviämistä rajoittaviin toimiin. Toisaalta jos metsänomistaja uskoo tuhoriskin olevan korkeampi kuin mitä se todellisuudessa on, voi metsänomistajien reaktio olla ylimitoitettu. Metsänomistajien päätöksenteon kannalta objektiivinen informaatio todellisista riskitasoista on erityisen tärkeää.

Metsänomistajien toimet pyrkivät siis sopeutumaan tuhoriskiin. Sopeutuminen johtaa valintoihin, jotka alentavat tuhoriskiä. Metsänomistajien toimet voivat siis heikentää ilmastonmuutoksen aiheuttamaa tuhojen yleistymistä. Esimerkiksi siirtyminen metsien jatkuvapeitteiseen kasvatukseen voi olla kannattavaa tiettyjen metsätuhoriskien alentamiseksi (Pukkala ym. 2016).

YHTEISKUNNAN ROOLI

Metsätuhot ovat monelta osin metsätalouden piirre, joka on metsänomistajan yksityinen ongelma. Metsänomistajat reagoivat tuhoriskeihin parhaan kykynsä mukaan. Osaan metsätuhoja liittyy kuitenkin piirteitä, joiden myötä metsänomistajan toimilla ja toimien tekemättä jättämisellä on vaikutusta ympäröiviin metsiin. Tällaiset metsänhoitotoimien kohdistuvat siis ympäröivien metsien omistajien tuhoriskitasoihin ja siten metsätalouden taloudelliseen tuotokseen. Koska ulkoisvaikutukset jäävät yleensä ainakin täysimääräisesti huomioimatta, on julkisen vallan syytä kannustaa toimiin, joilla positiivisia ulkoisvaikutuksia lisätään ja negatiivisia vähennetään.

Suomessa yhteiskunnan rooli on suurelta osin koottu lakiin metsätuhojen torjunnasta. Laki keskittyy leviävien äkillisten kaarnakuoriaisepidemioiden torjuntaan ja kroonisen juurikäpäongelman rajoittamiseen. Toimilla pyritään estämään tuhojen leviäminen metsästä toiseen. Laajojen tuhojen torjuntaa varten laki sallii myös viranomaisille voimakkaita toimia tuhoniheuttajien leviämisen estämiseksi.

Toisenlaisia julkisen vallan toimia, joilla on suoria ja epäsuoria vaikutuksia metsätuhoalttiuteen ovat hirvikannan säätely ja metsänhoitosuosituksset. Metsänhoitosuosituksset ovat esimerkki julkisen vallan informaation tuottajan roolista. Tutkimuslaitosten (erityisesti Luken) ja metsäviranomaisten ja -neuvojatahojen tuottama informaatio metsätuhoriskeistä ja metsänhoitotoimien vaikutuksista näihin riskeihin on välttämätöntä, jotta metsänomistajat voisivat tehdä perusteltuja metsänhoitopäätöksiä.

8.3. Mallitarkastelu

TARKASTELUN RAJAUS

Esiteltävä mallitarkastelu kohdistuu leviävään äkilliseen tuhoon eteläisessä Suomessa. Parhaiten tarkasteltu tilanne vastaa kirjanpainajien aiheuttamaa epidemiaa, joka on seurausta pitkäkestoisesta kuivuudesta ja tuhon käynnistävästä tuulituhosta, jonka jälkiä ei saada korjattua metsistä riittävän ajoissa. Tuho kohdistuu kuusimetsiin painottuen vanhempiin ikäluokkiin.

Kirjanpainajien tapaus on mielenkiintoinen useastakin syystä: Metsien ikärakenne vaikuttaa tuhoalttiuteen. Jos ilmastopolitiikka ohjaa hiilensidontaan Suomen metsissä, vanhojen ikäluokkien osuus kasvaa. Vanhojen metsien erityinen alttius kirjanpainajatuhoille lisää tuhoriskiä. Myös lämpenevä ilmasto kasvattaa kirjanpainajaepidemian riskiä (Jakso X). Vaikka kaarnakuoriaistuhon todennäköisyys yksittäisellä metsiköllä on yleisesti ottaen melko alhainen, kirjanpainajatuhoon realisoituessa jossain Etelä-Suomen kuusimetsässä on melko todennäköistä. Jos olosuhteet ovat kaarnakuoriaisille otolliset (kuivuuden heikentämät puut ja tuulituhon tuottama tuore kuollut puu), voi tuhotilanne kehittyä epidemiaksi. Tämä nostaa kaarnakuoriaistuhon todennäköisyyttä tuhokohteen ympärillä olevissa metsissä. Jos tilanne havaitaan ajoissa, metsänomistajat voivat reagoida kasvaneeseen tuhoriskiin. Mallitarkastelussa oletetaan, että tuhotilanne havaitaan nopeasti ja että metsänomistajat reagoivat tilanteeseen uudistushakkaamalla metsiköt joiden riskitaso on kohonnut erityisen paljon.

SKENAARIOT

Mallilaskelman lähtökohtana on tuhoskenaario, jossa Etelä-Suomen (Uusimaa, Varsinais-Suomi, Kanta-Häme, Päijät-Häme, Kymenlaakso, Etelä-Karjala – ns. tuhomaakunnat) kuusimetsiin iskee voimakas kirjanpainajaepidemia vuonna 2035. Epidemian ajatellaan käynnistyvän kuivan kesän ja voimakkaan myrskyn yhteisvaikutuksesta, kun myrskytuhot yhdessä kuivuuden heikentämien puiden kanssa tarjoavat kuoriaisille otolliset lisääntymisolot. Hyönteispopulaation oletetaan olevan niin suuri, että myös terveiden, melko nuorten kuusien (ikä > 45 vuotta) metsikötkin ovat alttiita tuhoriskille. Tuhon laaja-alaisuutta rajoittaa Etelä-Suomen vanhojen kuusimetsiköiden hajanaisuus, kun huomioidaan kuusien ikärakenne, Etelä-Suomen maakuntien pienet kuviokoot, sekä koivu- ja mäntymetsiköt, jotka eivät tarjoa kirjanpainajalle lisääntymis- tai leviämisedellytyksiä. Tuhoskenaariota verrataan tilanteeseen, jossa tuhoa ei esiinny.

Tuhoskenaariota tarkastellaan kahdessa politiikkaskenaariossa, joista toisessa metsien hiilensidontaa ei tueta ilmastopoliittisin toimin ja toisessa tuetaan. Poliitiikkaskenaarioita kutsutaan nimellä ”Ei hiiliohjausta” ja ”Hiilikorvaus”. Hiilikorvaus perustuu hiilidioksidipäästön hintaan 15 euroa/tCO₂. Hiilikorvaus-skenaario on mielenkiintoinen, koska metsänomistajille maksettu hiilikorvaus lisää vanhojen metsien osuutta pinta-alasta, mikä kasvattaa metsien alttiutta kirjanpainajatuhoille.

Puuntuotannon metsämaan ala maakunnissa, joihin tuho kohdistuu, on n. 2.3 milj. ha, joista n. 0.9 milj. hehtaarilla kuusi on metsän pääpuulaji. Tuhoalueet kattavat n. 14 % koko Suomen puuntuotannon metsämaasta ja noin 22 % kuusimetsien pinta-aloista. Vuonna 2030 puuston kokonaistilavuudesta 15 % ja kuusimetsien tilavuudesta 25 % sijaitsee tuhomaakunnissa.

MALLI

Mallitarkastelu tehtiin FinFEP-mallia käyttäen. FinFEP on metsä- ja energiasektoria kuvaava osittaistasapainomalli, joka sisältää puuta käyttävän teollisuuden kuvauksen lisäksi kuvauksen Suomen puuntuotannonmetsämaan metsäresursseista ja metsänomistajien hakkuupäätöksiin perustuvan puuntarjontakuvauksen (Lintunen ym. 2015). Hiilikorvaustarkastelu on implementoitu malliin jo aiemmin ja se on kuvattu artikkelissa (Pohjola ym. 2018). Kirjanpainajatuho implementoitiin FinFEP-malliin seuraavasti: Tuho tapahtuu viisivuotisperiodilla 2035–2039. Tuhot ja metsänomistajien hakkuureaktiot kohdistettiin Etelä-Suomen maakuntiin eksogeenisesti. Metsänomistajien hakkuureaktio kohonneeseen tuhotodennäköisyyteen kattaa lähes 50 % tuhoihin liittyvistä hakkuista. Metsiköt, joihin tuho oli iskenyt, hakattiin tuohavainnon jälkeen, jotta tuho ei etene metsikössä täydelliseksi. Tuhokohteilla 50 % kuitu- ja tukkipuusta alennettiin energiapuu-luokkaan. Kohonneen tuhoriskin vuoksi hakatut metsät eivät kärsineet puutavaralajin alenemia.

8.4. Tulokset

HAKKUUVAIKUTUKSET

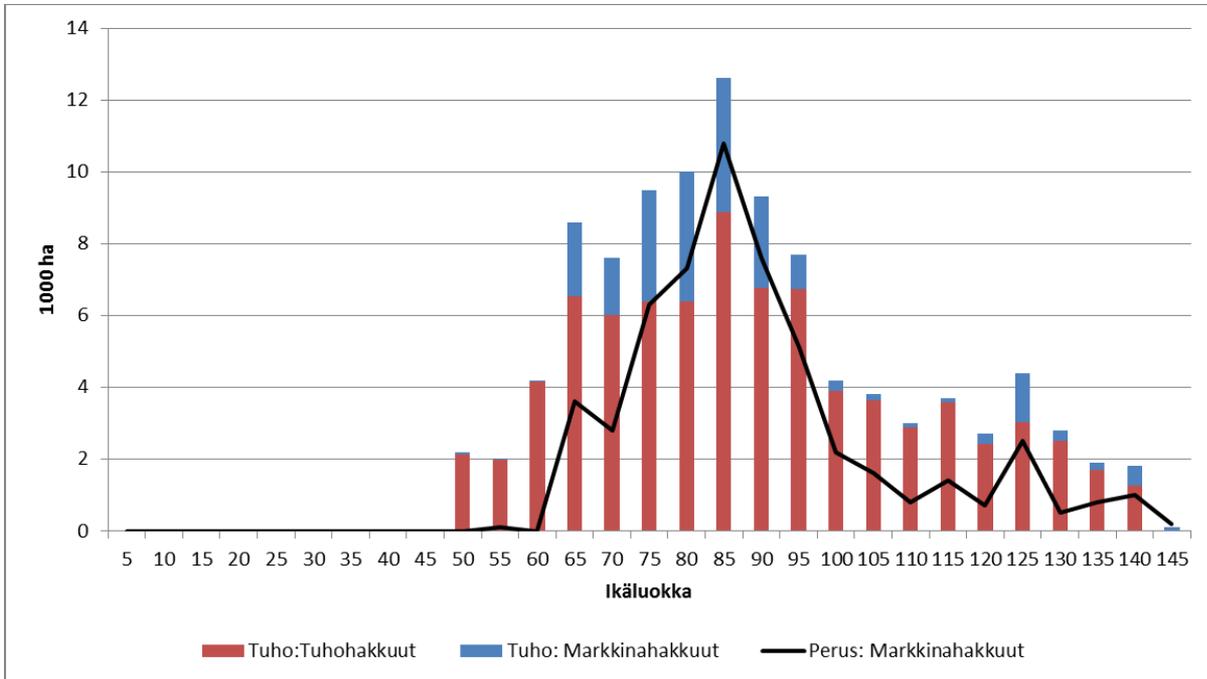
Tuhohakkuut toteutetaan päätehakkaina ja metsä uudistetaan samaan tapaan kuin tehtäisiin päätehakkuun jälkeen. Tuhohakkuut kohdistuvat metsiin, joissa vakava tuho etenee tai joihin kohdistuu kohonnut tuhon todennäköisyys. Erotuksena Tuhohakkuista normaaliin metsätalouteen kuuluvia pääte- ja harvennushakkuuta kutsutaan tässä **markkinahakkuiksi**. Hakkuuta tarkastellaan 5-vuotiskausittain. Koska tuhojen laajuus ei todellisuudessa jakautuisi tasan tarkasteltavalle ajanjaksolle, markkinavaikutukset olisivat todellisuudessa suuremmat ja lyhytkestoisemmat. Todelliset vuotuiset vaikutukset olisivat kuitenkin tämän tarkastelun suuntaiset. Vuosina 2012–2016 Metsäkeskukselle ilmoitettiin hyönteishakkuukuvioita yhteensä 7361 ha (Metsäkeskus 2018). Näihin viiden vuoden ilmoitusaloihin verrattuna tämän tarkastelun tuhohakkuiden pinta-alat ovat n. 11–15-kertaiset ja kohdistuen vain Etelä-Suomen maakuntiin. Laskelmassa tarkastelu tuho on siis laajuudeltaan huomattavan suuri.

Tuhohakkuut lisäävät puuntarjontaa kuutioissa mitattuna, koska tuhojen seurauksena hakkuupinta-ala on normaalia tilannetta suurempi. Eri puutavaralajien kohdalla tarjontavaikutukset ovat erilaisia. Tuhot kasvattavat etenkin energiapuun tarjontaa, koska osa tuhoalueen tukki- ja kuitupuusta kelpaa enää alempiarvoiseen energiakäyttöön. Tästä johtuen hyönteistuho lisää energiapuun tarjontaa. Kuitupuun tarjontaa tasapainottaa erityisesti ennen aikaisten hakkuiden myötä lisääntyvä tarjonta. Kaiken kaikkiaan tuhojen vaikutus kuitu- ja tukkipuun tarjontaan riippuu tuhojen luonteesta, metsänomistajien tavoitteista ja metsien ikärakenteesta. Tarjontakysymyksiin vastataksemme alla on esitetty skenaariopohjainen tarkastelu, joka kuvaa kuvitteellista yhden tuhonaiheuttajan, kirjanpainajan, hetkellistä suurтуhoa Etelä-suomessa 2030 luvun loppupuolella. Skenaariossa tarkastellaan yksittäistä metsätuhoa, joka voisi olla mahdollinen, mutta se ei siis ole ennuste kirjanpainajatuhojen kehityksestä. Tuhoskenaarion tuloksissa painotetaan tuhon markkinavaikutuksia ja niiden avulla voidaan arvioida metsäsektorin sopeutumiskykyä tämänkaltaisiin tuhoihin.

Ei hiilijhausta -skenaario

Tuhohakkuiden pinta-ala on 81000 hehtaaria skenaariossa, jossa metsien hiilensidonnalle ei ole asetettu tukea. Tämä päätehakkuiden pinta-ala vastaa 9 prosenttia tuhomaakuntien kuusimetsistä puuntuotannonmetsämaalla. Kuten kuvasta 8.1 nähdään tuhot kohdistuvat pääosin ikäluokkiin, joissa myös ilman metsätuhoa (eli perusurassa) tehdään hakkuuta. Tuhohakkuiden pinta-ala ylittää kuitenkin selkeästi perusuran päätehakkuualan 55 000 ha. Perusuraan verrattuna kuusipuutavaran kaikkien puutavaralajien (tukki, kuitu ja energia) hinnat laskevat tuhomaakunnissa. Siitä huolimatta tuhomaakunnissa toteutetaan myös markkinahakkuuta 21 000 hehtaarilla ja siten hakkuiden yhteispinta-ala on 102 000 ha. Tulokset kuvaavat 5-vuotiskauden hakkuuta, joten mikäli tuhot ajoittuvat lyhyemmälle aikavälille tuhohakkuiden osuus vuotuisista päätehakkuista on suurempi.

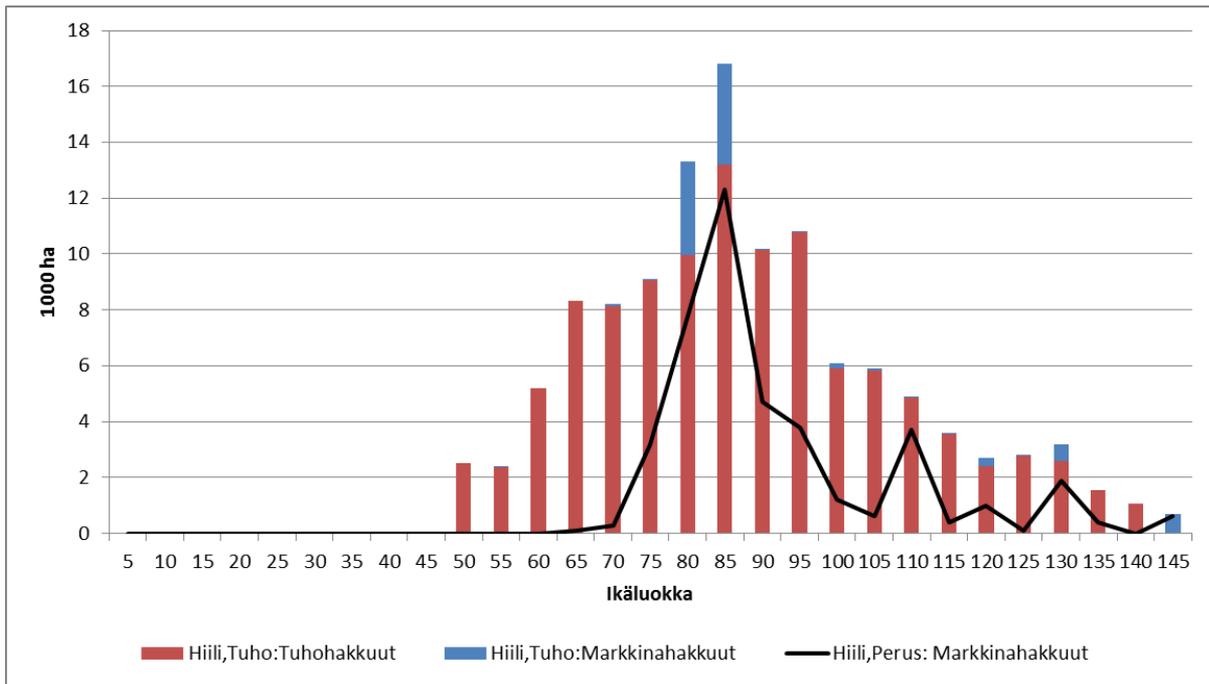
Tuhohakkuiden pinta-ala on suurempi kuin perusuran markkinahakkuiden pinta-ala ikäluokissa 55–79 vuotta sekä ikäluokissa yli 95 vuotta. Sen sijaan tuhohakkuiden pinta-ala jää pienemmäksi kuin perusurassa ikäluokissa 80–94 vuotta. Kuitenkin näissäkin ikäluokissa, jossa on suurimmat päätehakkuut perusurassa, kokonaishakkuiden (tuhon- ja markkinahakkuut yhdessä) pinta-ala ylittää perusuran markkinahakkuut.



Kuva 8.1. Päätehakkuiden pinta-ala Etelä-Suomen maakuntien kuusimetsissä ikäluokittain vuosina 2035–2039 tuhoskenaariossa (pylväät) sekä perusurassa (musta viiva).

Hiilikorvaus-skenaario

Hiilikorvaus kannustaa metsänomistajia metsänhoitoon, jossa käytetään pidempiä kiertoaikoja ja kasvatetaan metsiä tiheämpinä kuin ilman hiilikorvausta (Pohjola, ym. 2018). Hiilikorvaus-skenaariossa oletetaan että tuhohetkellä vuonna 2035 hiilikorvaus on ollut käytössä puuntuotannon metsämaalla 25 vuotta koko Suomessa. Hiilikorvauksesta johtuen puuston tilavuus sekä tuhomaakunnissa että koko Suomessa on Ei hiiliojhaus -skenaariota suurempi. Metsät ovat siis kesimäärin vanhempia ja runsaspuustoisempia ennen tuhohetkeä vuonna 2035 kuin ilman hiilikorvausta. Vanhemmat metsät ovat alltiimpia tuhoille joten tuhoala on laajempi. Tuhohakkuiden pinta-ala on 110 000 hehtaaria ja kattaa 12 % kuusimetsien pinta-alasta tuhomaakunnissa. Tuhomaakunnissa puun hinta laskee, mutta kuitenkin ikäluokkien 80–89 osalta tuhojen ulkopuolelle jää 7000 hehtaaria metsiä joiden päätehakkuu on metsänomistajien tavoitteiden mukaista alentuneella hinnallakin. Markkinahakkuiden ala supistuu kaiken kaikkiaan n. 9000 hehtaariin hiilikorvaus-skenaarion perusurasta 42 000 ha (ks. Kuva 8.2). Päätehakkuiden pinta-ala on yhteensä 119 000 ha tuhoskenaariossa ja mikä on n. 180 % suurempi pinta-ala kuin tuhottoman perusuran tapauksessa hiilikorvauksen vallitessa.



Kuva 8.2. Päätehakkuiden pinta-ala Etelä-Suomen maakuntien kuusimetsissä ikäluokittain vuosina 2035–2039 tuhoskenaariossa (pylväät) sekä perusurassa (musta viiva), tilanteessa jossa metsien hiilensidonnalle on asetettu korvaus joka perustuu hiilidioksidipäästön hintaan 15 €/tCO₂.

PUUSTOVAIKUTUKSET

Metsätuhoilla on moninaisia suoria ja epäsuoria vaikutuksia metsien ikärakenteen ja puuston tilavuuden kehitykseen. Metsätuhojen osuessa ikäluokkiin, jotka ovat puuntuotannon päätehakkuihin nuorempia, metsien kasvu ja puuston määrä jää alhaisemmaksi näissä metsissä. Vastaavasti mikäli metsätuho osuu metsään, joka on puuntuotannon ulkopuolella pysyvästi tai väliaikaisesti niin metsätuho aiheuttama metsän nuorentuminen voi lisätä tulevaa metsänkasvua, vaikka puuston tilavuus tuhoakkuiden seurauksena välittömästi pieneneekin. Metsätuhojen johdosta mm. metsätuhojen torjuntaa käsittelevän lain nojalla voidaan joutua korjaamaan puustoa pois metsistä, jotka muuten olisivat puunkorjuun ulkopuolella.

Tässä tarkastelussa oletetaan että metsätuho on metsänomistajan kannalta negatiivinen tapahtuma. Tarkastelussa käytetyssä FinFEP-mallissa metsänomistajat maksimoivat, joko pelkästään puunmyynnistä saatavaa diskontattua voittoa tai sen lisäksi henkilökohtaisia aineettomia hyötyjä kasvavasta puustosta, erityisesti vanhoista isopuisista metsistä. Yleisesti ottaen metsätuho alentaa metsänomistajien rahallista tuloa, koska tuhon vuoksi metsät hakataan ennen suunniteltua hakkuuajankohtaa, tuho heikentää puutavaran laatua ja tuho aiheuttama puuntarjonnan kasvu laskee puun hintaa. Tarkasteltava tuho johtaa metsän uudistamiseen, joten metsästä saatava hyöty laskee niillä metsänomistajilla jotka saavat aineettomia hyötyjä vanhoista metsistä. On myös mahdollista että metsänomistajan rahallinen tulo kasvaa, jos kohteen omistuksen tavoitteena on ollut ennen kaikkea muiden hyötyjen kuin puunmyyntitulojen nauttiminen. Tällaisessa tapauksessa metsätuho haitallinen vaikutus kohdistuu metsästä saatavien muiden hyötyjen vähenemiseen.

Tarkasteltaessa laajan tuho vaikutuksia metsäsektorille ja sen kykyä sopeutua, tuho markkinavaikutukset ovat ratkaisevat. Metsäteollisuuteen kuuluu sekä hyvin pääomavaltaisia suuria laitoksia kuten sellu- ja paperi-integraatteja sekä pieniä joustavasti toimivia sahoja. Isojen laitosten kuten sellutehtaiden kyky sopeuttaa tuotantoaan hetkelliseen, muutaman vuoden mittaiseen, puuntarjonnan kasvuun on hyvin rajallinen. Samoin energiantuotannon puunkäyttö riippuu olemassa olevasta kapasiteetista ja laitekannasta. Merkittävä puunkäytön kasvu vaatisi investointeja. Toisaalta pienten sahojen tuotanto voisi paremmin sopeutua raakapuun tarjonnan väliaikaiseen kasvuun, mutta tässä tarkasteltavassa kirjanpainajatuhoissa

tuhohakkuista saatavan puutavaran laatu heikkenee ja vain puolet tukkipuusta on kelvollista raaka-ainetta sahoille. Siten tukkipuun tarjonta ei merkittävästi lisääny, vaikka hakkuualat metsätuhon vuoksi kasvavatkin.

Ei hiilijhausta -skenaario

Tarkasteltava kirjanpainajatuho kohdistuu Etelä-Suomen kuusimetsiin ja etenkin vanhemmat metsät ovat alttiita tuhoille ja vanhemmat ikäluokat kärsivät tuhosta suhteellisesti eniten. Ei hiilijhausta -skenaariossa tuhohakkuut kohdistuvat ikäluokkiin, jotka eivät tyypillisesti ole kirjanpainajatuhoille kaikkein altteimpia ikäluokkia, koska ikäluokkarakenne on painottunut nuorempiin metsiin (ks. Kuva 8.1). Nämä tuhohakkuiden nuorehkot ikäluokat olisivat olleet vielä hyvässä kasvuiässä. Pääosin tästä johtuen tuhoalueen kuusimetsien kasvu heikkenee n. 25-vuodeksi hyönteistuhon johdosta.

Tuhoskenaariossa, jossa tuhohakkuiden pinta-ala 80 000 ha, koko Suomen metsäteollisuuden tuotannon muutos jää hyvin pieneksi metsätuhojaksolla 2035–2039. Tarkastellulla metsätuholla on kuitenkin merkittäviä alueellisia vaikutuksia raakapuumarkkinoihin ja hakkuiden kohdentumiseen eri puulajien välillä. Nämä vaikutukset näkyvät kasvavan puuston määrässä tuhon jälkeisenä aikana (Taulukko 8.1). Kuusen tilavuus tuhomaakunnissa laskee tuhohakkuiden johdosta 14,3 milj. kuutiota vuonna 2040. Tuhon aiheuttama kuusimetsien hitaampi kasvu ylläpitää eroa perusuran tilavuuteen vaikka markkinahakkuut jäävät tuhon jälkeisinä vuosikymmeninä perusuraa pienemmiksi.

Taulukko 8.1. Tarkastellun tuhon vaikutus puuston tilavuuteen 5–20 vuotta tuhon jälkeen Ei hiilijhausta - skenaariossa. Luvut ovat muutoksia tuhottomaan perusuraan nähden.

Alue	Puulaji	Vuosi			
		2040	2045	2050	2055
		milj. m ³			
Tuhomaakunnat	Kuusi	-14.3	-15.3	-14.8	-14.9
Muu Suomi	Kuusi	6.7	6.3	5.1	4.2
Tuhomaakunnat	Mänty ja koivu	0.2	0.5	0.4	0.4
Muu Suomi	Mänty ja koivu	5.2	5.3	5.8	6.2
Tuhomaakunnat	Yhteensä	-14.0	-14.8	-14.4	-14.6
Muu Suomi	Yhteensä	11.8	11.5	10.9	10.5
Suomi	Yhteensä	-2.2	-3.3	-3.5	-4.1

Tuhomaakunnissa etenkin kuitu- ja energiapuun hinta laskee tarjonnan kasvaessa. Hinnan laskiessa tuhoalueiden puuta ohjautuu teollisuuden käyttöön aikaisempaa enemmän, mikä näkyy hakkuiden vähenemisenä muun Suomen kuusimetsissä ja siten puuston tilavuuden korkeampana tasona tuhon jälkeen (4–6 milj. m³). Kuusipuun tarjonnan lisääntyminen ja hinnan lasku vaikuttavat vähentävästi myös mänty- ja koivumetsien hakkuisiin. Mänty- ja koivumetsien yhteenlaskettu tilavuus kasvaa tuhoalueella hieman, mutta muun Suomen osalta näiden metsien hakkuiden väheneminen nostaa puuston tilavuutta tuhon jälkeen yli 5 miljoonaa kuutiota perusuraan nähden. Markkinoiden sopeutumisen johdosta tuhomaakuntien kuusimetsien tilavuuden 14–15 miljoonan kuution vähentyminen supistuu noin 2–4 miljoonan kuution kokonaisvähentymiseksi tuhon jälkeisellä 20 vuoden ajanjaksolla (Taulukko 8.1).

Hiilikorvaus-skenaariossa kirjanpainajatuhon vaikutukset ovat samansuuntaisia kuin Ei hiilijhausta - skenaariossa. Kuitenkin hiilikorvauksen käytöstä johtuen koko Suomen metsät ovat kesimäärin vanhempia ja runsaspuustoisempia kuin Ei hiilijhausta -skenaariossa. Tämä altistaa kuusimetsät herkemmin tuhoille ja niiden leviämislle. Lisäksi tarkastellun hyönteistuhon aiheuttama kuutiomääräinen vaikutus on suurempi runsaspuustoisissa metsiköissä. Hiilikorvaus-skenaariossa tarkasteltu tuho pienentää tuhoalueen kuusikoiden tilavuutta 24,4 miljoonan m³ tuhon jälkeen (Taulukko 8.2). Kuusimetsien vuotuinen kasvu pienenee tuhomaakunnissa heti tuhon jälkeen 480 000 m³ vuodessa, mikä lisää puuston tilavuuden eroa Hiilikorvaus-skenaarion perusuraan verrattuna lähivuosikymmeninä.

Taulukko 8.2. Tarkastellun tuhon vaikutus puuston tilavuuteen 5–20 vuotta tuhon jälkeen hiilikorvaus skenaariossa. Luvut ovat muutoksia tuhottomaan perusuraan nähden.

Alue	Puulaji	Vuosi			
		2040	2045	2050	2055
		milj. m ³			
Tuhomaakunnat	Kuusi	-24.4	-26.1	-24.5	-24.2
Muu Suomi	Kuusi	11.9	12.6	10.5	8.8
Tuhomaakunnat	Mänty ja koivu	0.8	0.8	1.3	1.2
Muu Suomi	Mänty ja koivu	7.0	8.4	9.5	12.2
Tuhomaakunnat	Yhteensä	-23.6	-25.3	-23.2	-23.0
Muu Suomi	Yhteensä	18.9	21.0	20.0	21.0
Suomi	Yhteensä	-4.7	-4.3	-3.1	-2.0

Hiilikorvauksen ollessa käytössä tuhoskenaarion tuohakkuiden pinta-ala on 110 000 ha. Kuten Ei hiilijhausta -skenaariossa, myös hiilikorvauksen vallitessa Suomen metsäteollisuuden kokonaistuotannon muutos jää vähäiseksi tuhonjaksolla 2035–2039. Tämä johtuu investointien toteutumisen hitaudesta sekä siitä että investointien pitkän aikavälin kannattavuus ei kohene tuhon seurauksena. Kannattavuuden muuttumattomuus selittyy sillä, että tuhon aiheuttama puuntarjonnan lisäys ja hinnan lasku ovat lyhytkestoisia ilmiöitä verrattuna metsäteollisuusyritysten investointihorisonttiin. Hiilikorvauksen vallitessa, tuhon alueelliset vaikutukset raakapuumarkkinoihin ja hakkuiden kohdentumiseen eri puulajien välillä ovat samansuuntaiset kuin edellä esitettyssä Ei hiilijhausta -skenaariossa. Hiilikorvauksen johdosta tuhon hakkuuvaikutukset ovat kuitenkin kokoluokaltaan merkittävämpiä ja siten hintamuutokset suurempia.

Ei hiilijhausta -skenaarion tavoin markkinasopeutumisen johdosta hakkuut tuhoalueen ulkopuolella (muu Suomi) kuusikoissa jäävät pienemmiksi kuin perusurassa. Hiilikorvauksen ollessa käytössä muun Suomen kuusikoiden puuston tilavuuden kasvu on suuruudeltaan 49 % tuhomaakuntien kuusikoiden tilavuuden pienenemisestä vuonna 2040 (Taulukko x2). Samoin kuin Ei hiilijhausta -skenaariossa mänty- ja koivumetsiköiden tilavuus kasvaa näiden metsien hakkuiden vähentyessä. Etenkin muun Suomen mänty- ja koivumetsien puuston tilavuus kasvaa tuhon jälkeisinä vuosina ja vuonna 2055 näiden metsien tilavuuden kasvu vastaa yli puolta kuusimetsien tilavuuden pienenemisestä tuhomaakunnissa. Koko Suomen osalta metsäsektori näyttäisi sopeutuvan hyvin tämän kaltaiseen tuhoon vaikka hiilikorvaus olisikin käytössä. On kuitenkin huomioitava, että tässä tarkastelussa hiilikorvaus on ollut käytössä vain 25 vuotta ja sopeutuminen hiilikorvaukseen on vasta alkuvaiheessa (ks. Pohjola ym. 2018).

8.5. Johtopäätökset

PÄÄTELMÄT

Metsätuhoriskien olemassaolo voi vaikuttaa metsänomistajien käyttäytymiseen. Vaikutukset ovat sitä todennäköisempiä, mitä suurempi metsätuhon riski on ja kuinka suuri odotettu tuho on. Vaikutukset kohdistuvat mm. puulajin valintaan, harvennuksien toteutukseen ja kiertoajan pituuteen. Käyttäytymismuutokset ovat sopeutumista tuhoriskiin ja pyrkivät vähentämään tuhon riskiä ja sen aiheuttamia haittoja. Metsänomistajilla voi siis olla vaikutusta siihen, kuinka tuhoriskit Suomessa kehittyvät ilmaston muuttuessa

Metsänomistajien lisäksi myös julkisella vallalla on keinoja vähentää tuhoriskejä. Eräs tärkeä keino on metsätuhoihin liittyvän tutkimustiedon lisääminen ja sen jalkauttaminen käytännön toimijoiden keskuuteen. Toinen merkittävä keino on metsätuhojen riskejä alentava lainsäädäntö, jota on aktiivisesti päivitettävä metsätalouden toimintaympäristön muuttuessa.

Tässä projektissa FinFEP-mallilla tehdyn numeerisen tarkastelun perusteella näyttäisi siltä, että Suomen metsäsektori on suhteellisen sopeutumiskykyinen, vaikka metsiin kohdistuisi laaja-alainen tuhoepidemia. Vaikka puuntarjonta niissä maakunnissa, johon tuhot kohdistuvat, lisääntyy merkittävästi, vähenevät hakkuut ympäröivissä maakunnissa. Siten metsätuhon alueellisesti aiheuttama puuston tilavuuden lasku kompensoituu koko maan tasolla osittain ympäröivien maakuntien korkeamman puuston tilavuuden kautta. Tämä markkinoiden sopeuttamisvaikutus tulee ottaa huomioon myös, kun halutaan arvioida metsätuhojen taloudellisia menetyksiä.

Mallitarkastelun avulla selvitettiin myös sitä, kuinka tilanne muuttuu, jos ilmastopolitiikka tukisi metsien hiilivaraston kasvattamista hiilensidonnasta palkitsevalla korvausjärjestelmällä. Koska hiilikorvaus lisää vanhojen ikäluokkien määrää, ovat metsät tuhon sattuessa keskimäärin vanhempia. Koska vanhat ikäluokat ovat erityisen alttiita tarkastellulle hyönteistuholle, ovat metsätuhon vaikutukset suuremmat kuin tilanteessa, jossa hiilikorvausjärjestelmää ei ole käytössä. Myös hiilikorvauksen vallitessa ympäröivien maakuntien puuntarjonnan sopeutuminen kompensoi puuntarjonnan muutoksia sekä puuston tilavuuden muutoksia. Vaikka metsätuhot heikentävät metsien käyttöä hiilensidonnassa, eivät ne mallitarkastelun perusteella tee metsähiilen sidontatoimista hyödyttömiä.

Tulokset viittaavat myös siihen, että hakkuukypsän puuston suuri määrä toimii eräänlaisena puskurina metsätuhojen markkinavaikutusten suhteen. Hakkuiden määrät tuhoskenaarion ja perusskenaarion välillä eivät poikkea toisistaan kovin paljoa. Tehty mallitarkastelu perustuu lukuisiin oletuksiin ja on siksi nähtävä eräänlaisena pilottitutkimuksena. Metsätuhojen vaikutus muuttuvassa ilmastossa esim. Suomen puumarkkinoihin ja metsien hiilivarastoihin on laaja kysymys, johon vastaaminen vaatisi monitieteisen ja laaja-alaisen tutkimushankkeen.

TIETOTARPEET

Tarvitaan paljon lisätutkimusta, jotta metsätuhoriskien ja näiden riskien muutosten – esim. ilmastonmuutoksen vuoksi – vaikutukset puumarkkinoihin, puuston tilavuuteen ja metsien hiilivarastojen kehitykseen voitaisiin arvioida täsmällisesti. Jotta tällainen arviointi olisi mielekäs, tulee sen huomioida metsänomistajien reaktiot tuhoriskeihin. Metsänomistajien reaktioiden mallintaminen vaatii tietoa tuhojen todennäköisyyksistä ja metsänhoitotoimien vaikutuksista näihin riskeihin. Nämä ovat samoja tietoja, joita myös metsänomistajat tarvitsevat tehdäkseen järkeviä metsänkäsittelyvalintoja.

Ensinnäkin tarvitaan tietoa siitä, kuinka metsätuhon aiheuttamien tuhojen todennäköisyys riippuu puulajista, metsikön tilasta (mm. ikä), kasvupaikasta ja alueellisesta sijainnista. Lisäksi muuttuvassa ilmastossa on tärkeää ymmärtää, kuinka nämä todennäköisyydet kehittyvät ilmaston muuttuessa. Tarvitaan tietoa myös siitä, kuinka metsänhoitotoimet vaikuttavat tuhoriskiin. Metsänhoitotoimien vaikutukset tullevat pääosin metsän tilan muutosten kautta, mutta niillä voi olla myös suoria vaikutuksia. Näin on helpoin ymmärtää

esimerkiksi tuulituhoalttius juuri harvennuksen jälkeen. Leviävien äkillisten tapauksessa pitäisi paremmin ymmärtää tuhon spatiotemporaalisen leviämisen mekanismeja sekä metsän eri metsänhoitotoimenpiteiden (mm. erityyppiset harvennukset ja päätehakkuut) että metsien spatiaalisen rakenteen (kuvioiden koko, pääpuulajit, sekapuusto, ikärakenne, metsäautotiet, vesistöt ja muut puuttomat alueet kuten pellot) vaikutukset näihin leviämismekanismiin.

On luonnollisesti järkevintä aloittaa tiedonkeruu niistä metsätuhojen aiheuttajista, jotka ovat yleisimpiä ja tuhoiltaan merkittävimpiä. Ensi askelia näiden asioiden selvittämiseen ja mallintamiseen on otettu tässä raportissa.

Viitteet

Amacher, G., Ollikainen, M. & E. Koskela (2009). *Economics of Forest Resources*. MIT Press.

Lintunen, J., Laturi, J., & Uusivuori, J. (2015). Finnish Forest and Energy Policy Model (FinFEP): A Model Description. *Natural resources and bioeconomy studies 59/2015*. Natural Resources Institute Finland, Helsinki.

Metsäkeskus. 2018. Kirjanpainajakannan seuranta. <https://www.metsakeskus.fi/kirjanpainajakannan-seuranta> . Viitattu 1.6.2018.

Pohjola, J., Laturi, J., Lintunen, J., & Uusivuori, J. (2018). Immediate and long-run impacts of a forest carbon policy—A market-level assessment with heterogeneous forest owners. *Journal of Forest Economics*, 32, 94-105.

Pukkala, T., Laiho, O., & Lähde, E. (2016). Continuous cover management reduces wind damage. *Forest Ecology and Management*, 372, 120-127.

Reed, W. J. (1984). The effects of the risk of fire on the optimal rotation of a forest. *Journal of environmental economics and management*, 11(2), 180-190.

Suvanto, S., Henttonen, H. M., Nöjd, P., & Mäkinen, H. (2016). Forest susceptibility to storm damage is affected by similar factors regardless of storm type: Comparison of thunder storms and autumn extra-tropical cyclones in Finland. *Forest Ecology and Management*, 381, 17-28.

9. KUINKA SUURI RISKI MASSIIVISTEN METSÄTUHOJEN ESIINTYMISELLE ON SUOMESSA?

Massiivisia metsätuhoja ei ole vielä esiintynyt Suomen talousmetsissä. Tämän kirjallisuus-katsauksen perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että tulevina vuosikymmeninä metsätuhojen riskit kasvavat trendinomaisesti sekä biotistien että abiotistien tuhojen osalta. Keskeinen muutosajuri on lämpenevä ilmasto.

Teoriassa yhden puulajin samanikäiset metsät ovat alttiimpia laaja- alaisille tauti- ja tuholaisepidemioille kuin sekametsät, ja pystyvät huonommin toipumaan esimerkiksi kuivuudesta tai tuholaisien aiheuttamista häiriöistä (Isbell ym. 2015). Monet havainnot osoittavatkin, että esimerkiksi joidenkin lehti- tai juuristopatogeenien epidemiat ovat vähemmän yleisiä ja lievempiä sekametsissä (Jactel ym. 2005, Pautasso ym. 2005, Björkman ym. 2011). Suurin osa tutkimuksista koskee kuitenkin lauhkeita ja trooppisia metsiä. Korichevan ym. (2006) mukaan empiiriset todisteet, jotka tukevat sekametsän pienempää tuhoalttiutta meidän olosuhteissa, ovat useimmiten olosuhteista riippuvaisia ja osittain kiistanalaisia, vaikka mm. puulajien monimuotoisuuden hyödyllisiä vaikutuksia voidaan havaita joissakin tapauksissa. Funktionaalinen diversiteetti- käsite (Schmidt 1978) on tässä yhteydessä erittäin sopiva. Se kattaa laajasti mekanismit, joilla metsäekosysteemit voivat vastustaa tauteja ja tuholaisia, sisältäen myös maaperä- ja mikroilmastotekijät.

Suomen olosuhteissa ei ole kuitenkaan saatu täysin yhtenäisiä tuloksia sekametsän kasvatuksen vaikutuksesta tuhoriskeihin. Yleensä sekametsiköiden kasvatusta voi vähentää tuhoriskiä, mutta menetelmä ei monissa tapauksissa voi suoraan suositella tuhojen torjuntakeinoksi.

Esimerkiksi juurikääpäsiementen vegetatiivista leviämistä puusta toiseen juuriyhteyksien välityksellä voidaan teoriassa hallita eri puulajien sekoitusta käyttämällä (esim. Lindén & Vollbrecht 2002, Piri ym. 1990, Thor ym. 2005). Erot mm. puhtaiden kuusiköiden tai kuusi-koivusekametsiköiden tautisuuden välillä ovat kuitenkin olleet pieniä (Piri & Korhonen 2001). Männiköissä puulaji sekoituksen pitäisi olla yli 50 %, jotta se tehokkaasti vähentäisi männynjuurikäävän esiintymistä. Tuhojen ehkäisemiseksi infektoituneissa männiköissä olisi ihanteellista kasvattaa välillä puhdas lehtipuusukupolvi (Piri ym. 1990).

Ruskomäntypistiäisen suurimittaiset epidemiat sattuvat homogeenisissa mäntymetsissä. Esimerkiksi mänty-koivusekametsien loisten ja petojen suurempi määrä voi olla yhteydessä sekametsien suurempaan vastustuskykyyn (Kaitaniemi ym. 2007). Ranskassa on havaittu pilkkumäntypistiäistuhojen kestäneen kauemmin ja olleen vakavampia puhtaissa männiköissä kuin sekametsissä (Geri 1988). De Somviele ym. (2004) eivät kuitenkaan löytäneet yksikäsitteistä todistetta sille, että puulajikoostumuksella olisi merkittävää vaikutusta tuhojen määrään pilkkumäntypistiäistuhoissa Suomessa.

Viitteet

Björkman, C., Bylund, H., Klapwijk, M.J., Kollberg, I., Schroeder, M. 2011. Insect Pests in Future Forests: More Severe Problems? *Forests* 2: 474–485.

De Somviele, B., Lytikäinen-Saarenmaa, P., Niemelä, P. 2004. Sawfly (Hym., Diprionidae) outbreaks on Scots pine: effect of stand structure, site quality and relative tree position on defoliation intensity. *Forest Ecology and Management* 194: 305–317.

Geri, C. 1988. The pine sawfly in central France. Teoksessa: Berryman A. (toim.). *Dynamics of forest insect populations: patterns, causes and implications*. Plenum Press, New York. p. 377–405. ISBN: 978-1-4899-0789-9

Isbell, F., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Bezemer, T.M., Bonin, C., Bruehlheide, H., de Luca, E., Ebeling, A., Griffin, J.N., Guo, Q., Hautier, Y., Hector, A., Jentsch, A., Kreyling, J., Lanta, V., Manning, P., Meyer, S.T., Mori, A.S., Naeem, S., Niklaus, P.A., Polley, H.W., Reich, P.B., Roscher, C., Seabloom, E.W., Smith, M.D., Thakur, M.P., Tilman, D., Tracy, B.F., van, d.P., van Ruijven, J., Weigelt, A., Weisser, W.W., Wilsey, B., Eisenhauer, N. 2015. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature* 526: 574.

Jactel, H., Brockerhoff, E., Duelli, P. 2005. A test of the Biodiversity–Stability theory: Meta-analysis of tree species diversity effects on insect pest infestations, and re-examination of responsible factors. Teoksessa: Scherer-Lorenzen, M., Körner, C., Schulze, E.D. (toim.). Forest diversity and function temperate and boreal systems. Springer, s. 235–262.

Kaitaniemi, P., Riihimäki, J., Koricheva, J., Vehviläinen, H. 2007. Experimental Evidence for Associational Resistance against the European Pine Sawfly in Mixed Tree Stands. *Silva Fennica* 41: 259–168.

Koricheva, J., Vehviläinen, H., Riihimäki, J., Ruohomäki, K., Kaitaniemi, P., Ranta, H. 2006. Diversification of tree stands as a means to manage pests and diseases in boreal forests: myth or reality? *Canadian Journal of Forest Research* 36: 324–336.

Lindén, M., Vollbrecht, G. 2002. Sensitivity of *Picea abies* to butt rot in pure stands and in mixed stands with *Pinus sylvestris* in southern Sweden. *Silva Fennica* 36: 767–778.

Pautasso, M., Holdenrieder, O., Stenlid, J. 2005. Susceptibility to fungal pathogens of forests differing in tree diversity. Teoksessa: Scherer-Lorenzen, M., Körner, C., Schulze, E.D. (toim.). Forest diversity and function: temperate and boreal systems. *Ecological Studies*, Vol. 176, Springer, s. 263–289.

Piri, T., Korhonen, K. 2001. Infection of advance regeneration of Norway spruce by *Heterobasidion parviporum*. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 937–942.

Piri, T., Korhonen, K., Sairanen, A. 1990. Occurrence of *Heterobasidion annosum* in pure and mixed spruce stands in Southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 5: 113–125.

Schmidt, R.A. 1978. Diseases in forest ecosystems. The importance of functional diversity. Teoksessa: Horsfall, J.G., Cowling, E.B., (toim.). Plant disease. An advanced treatise, Vol II. How disease develops in populations. Academic Press, New York, s. 287–315.

Thor et al. 2005. Root rot in Sweden

