



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 46/2023

Metsätuhojen kokonaisvaltainen arviointi

METKOKA-hankkeen loppuraportti

**Jarkko Hantula, Anssi Ahtikoski, Juha Honkaniemi, Otso Huitu,
Mikko Härkönen, Juha Kaitera, Matti Koivula, Kari T. Korhonen,
Andreas Lindén, Jussi Lintunen, Jaana Luoranen, Juho Matala,
Markus Melin, Ari Nikula, Mikko Peltoniemi, Tuula Piri, Tapio
Räsänen, Juha-Antti Sorsa, Markus Strandström,
Jussi Uusivuori ja Tiina Ylioja**

Metsätuhojen kokonaisvaltainen arviointi

METKOKA-hankkeen loppuraportti

**Jarkko Hantula, Anssi Ahtikoski, Juha Honkaniemi, Otso Huitu, Mikko
Härkönen, Juha Kaitera, Matti Koivula, Kari T. Korhonen, Andreas Lindén, Jussi
Lintunen, Jaana Luoranen, Juho Matala, Markus Melin, Ari Nikula, Mikko
Peltoniemi, Tuula Piri, Tapio Räsänen, Juha-Antti Sorsa, Markus Strandström,
Jussi Uusivuori ja Tiina Ylioja**



Maa- ja metsätalous-
ministeriö



Viittausohje:

Hantula, J., Ahtikoski, A., Honkaniemi, J., Huitu, O., Härkönen, M., Kaitera, J., Koivula, M., Korhonen, K.T., Lindén, A., Lintunen, J., Luoranen, J., Matala, J., Melin, M., Nikula, A., Peltoniemi, M., Piri, T., Räsänen, T., Sorsa, J.-A., Strandström, M., Uusivuori, J. & Ylioja, T. 2023. Metsätuhojen kokonaisvaltainen arviointi : METKOKA-hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 46/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 140 s.

Jarkko Hantula ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-1016-0636>



ISBN 978-952-380-687-0 (Painettu)

ISBN 978-952-380-688-7 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-688-7>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Jarkko Hantula, Anssi Ahtikoski, Juha Honkaniemi, Otso Huitu, Mikko Härkönen, Juha Kaitera, Matti Koivula, Kari T. Korhonen, Andreas Lindén, Jussi Lintunen, Jaana Luoranen, Juho Matala, Markus Melin, Ari Nikula, Mikko Peltoniemi, Tuula Piri, Tapio Räsänen, Juha-Antti Sorsa, Markus Strandström, Jussi Uusivuori ja Tiina Ylioja

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2023

Julkaisuvuosi: 2023

Kannen kuva: Jarkko Hantula

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.omapumu.com/fi>

Tiivistelmä

Jarkko Hantula¹, Anssi Ahtikoski², Juha Honkaniemi², Otso Huitu³, Mikko Härkönen⁴, Juha Kai-tera¹, Matti Koivula², Kari T. Korhonen⁴, Andreas Lindén², Jussi Lintunen², Jaana Luoranen⁵, Juho Matala⁴, Markus Melin⁴, Ari Nikula⁶, Mikko Peltoniemi², Tuula Piri², Tapio Räsänen⁷, Juha-Antti Sorsa⁷, Markus Strandström⁷, Jussi Uusivuori², Tiina Ylioja²

¹ Luonnonvarakeskus, Helsinki

² Luonnonvarakeskus, Oulu

³ Luonnonvarakeskus, Tampere

⁴ Luonnonvarakeskus, Joensuu

⁵ Luonnonvarakeskus, Suonenjoki

⁶ Luonnonvarakeskus, Rovaniemi

⁷ Metsäteho Oy, Vantaa

Metsätuhojen kokonaisvaltaiset kustannukset eli METKOKA-hankkeen aikana arvioitiin Suomen metsien tärkeimpien tuhonaiheuttajien aiheuttamat taloudelliset tappiot hyödyntäen saatavilla olevia tietoja metsistä ja tuhoista, sekä Luonnonvarakeskuksessa kehitettyä Motti-metsikkösimulaattoria, jonka avulla ennustettiin puuston kehitystä eri tilanteissa metsikkötasolla, josta ne skaalattiin edelleen laajemmille alueille. Tutkimuksen aikana kuitenkin ilmeni, että lähes kaikkien tarkasteltujen tuhonaiheuttajien (juurikäävät, tervasroso, kirjanpainaaja, tukkimiehentäi, mäntypistiäiset, ytimennävertäjät, myyrät, hirvieläimet sekä tuuli- ja lumituhot) osalta tiedot olivat enemmän tai vähemmän puutteellisia.

Tässä tarkastelussa taloudellisesti merkittävimmiksi suomalaisten metsien tuhonaiheuttajiksi osoittautuivat kuusenjuurikäpä, hirvieläimet, tuuli ja kirjanpainaaja, mutta myös lähes kaikkien muiden tarkasteltujen tuhonaiheuttajien aiheuttamat tappiot olivat merkittäviä. Kaikkien metsätuhojen keskimääräiseksi kokonaiskustannukseksi saatiin noin 100 miljoonaa euroa vuodessa eli viisi prosenttia kantorahatuloista, mutta arviossa on huomattavaa vuosien välistä vaihtelua. Sitä on pidettävä suuruusluokaltaan oikeansuuntaisena, mutta laskennan lähtötietojen puutteellisuuden takia kuitenkin selkeänä aliarviona metsätuhojen aiheuttamista todellisista kokonaiskustannuksista metsänomistajille. Siksi nyt ilmenneet tiedonpuutteet olisi hyvä täydentää uudella tutkimustiedolla sekä tuhotietojen entistä systemaattisemmalla keräämisellä. Lisäksi kansataloudellisen päätöksenteon kannalta tulisi analyysiin sisällyttää tuhojen aiheuttamat metsäsektorin arvonlisäys- ja työllisyysvaikutukset sekä kerrannaisvaikutukset muilla toimialoilla.

METKOKA hankkeen aikana päivitettiin myös vuodelta 2014 olevaa Maa- ja metsätalousministeriön varautumissuunnitelmaa metsätuhoihin. Työssä hyödynnetään METKOKA-hankkeen tuloksia ja varautumissuunnitelma julkaistaan erillisenä Maa- ja metsätalousministeriön julkaisusarjassa.

Asiasanat: metsätuhot, tuhohyönteiset, metsäaudit, abioottiset tuhot, metsätalous, kustannukset

Abstract

Jarkko Hantula¹, Anssi Ahtikoski², Juha Honkaniemi², Otso Huitu³, Mikko Härkönen⁴, Juha Kaitera¹, Matti Koivula², Kari T. Korhonen⁴, Andreas Lindén², Jussi Lintunen², Jaana Luoranen⁵, Juho Matala⁴, Markus Melin⁴, Ari Nikula⁶, Mikko Peltoniemi², Tuula Piri², Tapio Räsänen⁷, Juha-Antti Sorsa⁷, Markus Strandström⁷, Jussi Uusivuori², Tiina Ylioja²

¹ Natural Resources Institute Finland (Luke), Helsinki

² Natural Resources Institute Finland (Luke), Oulu

³ Natural Resources Institute Finland (Luke), Tampere

⁴ Natural Resources Institute Finland (Luke), Joensuu

⁵ Natural Resources Institute Finland (Luke), Suonenjoki

⁶ Natural Resources Institute Finland (Luke), Rovaniemi

⁷ Metsäteho Oy, Vantaa

The economic losses caused by Finland's most important forest pathogens, pests and abiotic causes were estimated in the Comprehensive Costs of Forest Damage (METKOKA) project using available information on forests and damages, as well as the Motti stand simulator developed by the Natural Resources Institute Finland (Luke), which predicted the development of the forest in different situations at the stand level, and then by scaling the results up to larger areas. However, during the study, it was found that the data on almost all of the examined pests (root rot fungi, *Heterobasidion annosum*, spruce bark beetle, pine weevil, sawfly, bark beetles, voles, cervids, and wind and snow damage) were more or less incomplete.

In this analysis, the economically most significant causes of damage in Finnish forests were found to be the *Heterobasidion* root rot of spruce trees, cervids, wind, and the spruce bark beetle. However, losses caused also by almost all of the other damage agents were significant. The average total cost of all forest damages was estimated to be approximately 100 million euros per year, which is about five percent of the Gross stumpage earnings, but there is significant variation between years. This estimate may be considered as roughly accurate, but due to the lack of complete initial data, it is likely an underestimate of the true total cost of forest damage to forest owners. Therefore, it would be beneficial to supplement the current knowledge gaps with new research data and a more systematic collection of damage information. Additionally, the economic analysis should be expanded to include broader welfare effects (e.g., income, employment, value added) by applying partial or general equilibrium modeling to make informed decisions about national economy."

During the METKOKA project, the 2014 preparedness plan for forest damage at the Ministry of Agriculture and Forestry was also updated. The work utilized the results of the METKOKA project, and the preparedness plan will be published separately in the Ministry of Agriculture and Forestry's publication series.

Asiasanat: forest damages, pests, pathogens, abiotic causes of damage, forest economy, economic costs

Sisällys

1. Johdanto	7
1.1. Hankkeen tavoitteet	7
1.2. Taloudellisten vaikutusten laskemisen periaatteet.....	7
2. Metsätaudit	9
2.1. Kuusenjuurikäpää	9
2.1.1. Kuusenjuurikäpää tuhonaiheuttajana	9
2.1.2. Kuusenjuurikäävän aiheuttamat suorat kustannukset	10
2.1.3. Kuusenjuurikäävän aiheuttamat epäsuorat kustannukset.....	11
2.2. Männynjuurikäpää.....	13
2.2.1. Männynjuurikäpää tuhonaiheuttajana	13
2.2.2. Männynjuurikäävän aiheuttamat taloudelliset tappiot.....	14
2.3. Tervasroso	16
2.3.1. Tervasroso metsätuhojen aiheuttajana	16
2.3.2. Tervasrosotuhojen aiheuttamat kustannukset	16
3. Hyönteiset.....	19
3.1. Katsaus vuosien 2010–2023 tuhohyönteiskirjallisuuteen.....	19
3.2. Kirjanpainaja	22
3.2.1. Kirjanpainaja puustotuhojen aiheuttajana	22
3.2.2. Kirjanpainajan torjunta on ennaltaehkäisyä	24
3.2.3. Aineistolähteet kirjanpainajatuhojen ja kirjanpainajan esiintymisestä Suomessa.....	26
3.2.4. Kirjanpainajatuhojen esiintyminen valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) mukaan	27
3.2.5. Kirjanpainajatuhojen esiintyminen Metsäkeskuksen hyönteistuhohakkuilmoitusten perusteella	30
3.2.6. Kirjanpainajan taloudellisten vaikutusten arviointi	34
3.3. Ytimennävertäjät.....	38
3.3.1. Ytimennävertäjät tuhonaiheuttajina	38
3.4. Tukkimiehentäi	42
3.4.1. Tukkimiehentäi taimikkotuhojen aiheuttajana	42
3.4.2. Tukkimiehentäin aiheuttamat kustannukset	46
3.5. Mäntypistiäiset.....	49
3.5.1. Mäntypistiäiset tuhonaiheuttajina.....	49
3.5.2. Mäntypistiäisen aiheuttamat taloudelliset menetykset	52

4. Nisäkkäät	53
4.1. Myyrät	53
4.1.1. Myyrät tuhonaiheuttajina	53
4.1.2. Myyrien metsätaloudelle aiheuttamat kustannukset.....	55
4.2. Hirvieläimet.....	60
4.2.1. Hirvieläinten aiheuttamat metsätuhot.....	60
4.2.2. Hirvieläinten aiheuttamat metsätalouden talousvaikutukset.....	61
5. Abioottiset tuhot	67
5.1. Abioottiset taimituhot uudistusaloilla	67
5.2. Tuulituhot	68
5.2.1. Tuuli metsätuhojen aiheuttajana	68
5.2.2. Tuulen aiheuttamat taloudelliset menetykset	70
5.3. Lumituhot	72
5.3.1. Lumituhojen aiheuttamat taloudelliset menetykset	73
6. Johtopäätökset.....	76
Viitteet.....	79
Liite	93

1. Johdanto

1.1. Hankkeen tavoitteet

Maa- ja metsätalousministeriö päätti vuonna 2021 toteuttaa Luonnonvarakeskuksen ja Metsäteho Oy:n kanssa yhteisrahoitteisena hankkeena tärkeimpien metsätuhojen taloudellisen vaikutuksen arvioinnin. Hankkeen tarkoituksena oli kerätä olemassa oleva tieto tarkasteltavien tuhonaiheuttajien aiheuttamien tuhojen arvosta ja merkityksestä suomalaiselle metsätaloudelle.

Tutkimus tehtiin arvioimalla erikseen tärkeimpien metsätautien, tuhohyönteisten, myyrien, hirvieläinten sekä abioottisten tuhonaiheuttajien aiheuttamat tuhot sekä päivittää ministeriön valmiussuunnitelma metsätuhojen varalta. Tämän raportin rakenne noudattaa tätä rakennetta.

1.2. Taloudellisten vaikutusten laskemisen periaatteet

Metsikkötason taloustarkasteluissa sovellettiin Luonnonvarakeskuksessa kehitettyä Motti-metsikkösimulaattoria (Salminen ym. 2005, Hynynen ym. 2015, Haikarainen ym. 2021), jonka avulla ennustettiin puuston kehitystä eri tilanteissa, jotta voitiin arvioida tuhonaiheuttajien taloudellisia vaikutuksia yksittäisen metsäkuvion tasolla. Nämä metsikkötason tulokset puolestaan skaalattiin aluetasolle – joko maankunnan tasolle tai suuralueelle (Etelä-, Väli- ja Pohjois-Suomi), riippuen käytettävissä olevasta tuhoaineistosta.

Motti-metsikkösimulaattorilla voidaan tarkastella metsänhoidon tai hoitamattomuuden, puulajivalinnan, kasvatusketjujen tai yksittäisten metsänhoidon toimenpiteiden vaikutuksia puuston kehitykseen, hakkuukertymiin, metsänkasvatuksen kannattavuuteen ja puustoon sitoutuneen hiilen määrään (Salminen ym. 2005, Ahtikoski ym. 2012, Hynynen ym. 2015). Motissa on simulointiydin, joka sisältää kahdenlaisia malleja: metsikkötason ja puutason malleja, jotka molemmat puolestaan pohjautuvat empiirisiin aineistoihin (esim. Hynynen ym. 2002, 2014, 2015). Luontainen uudistuminen ja taimien alkukehitys pohjautuvat metsikkötason malleihin, kun taas yli 7 m pituisten puiden kasvuennuste tuotetaan Motissa puutason malleilla (Hynynen ym. 2002, 2014).

Puutason malleissa metsikön puusto esitetään ns. kuvauspuina, joilla on pituus, läpimitta, runkoluku sekä latvussuhde. Metsikön puuston kehitys perustuu kuvauspuille kasvumalleilla tuotettuihin ennusteisiin, joihin lisäksi vaikuttavat metsien käsittely ja kasvuolosuhteet (maantieteellinen sijainti ja kasvupaikka). Toistaiseksi Motti-metsikkösimulaattoria on Suomessa käytetty varsin laajasti sekä yksittäisten metsien tarkasteluissa (esim. Hynynen ym. 2005, Ahtikoski ym. 2012, Haapanen ym. 2016, Juutinen ym. 2018) että maisematason tarkasteluissa (Ahtikoski ym. 2011, Mönkkönen ym. 2014, Huuskonen ym. 2020, Haikarainen ym. 2021).

Metsikkötason talouslaskelmissa käytettiin kustannusten ja kantohintojen osalta viimeisintä 10 vuoden aikasarjaa. Kymmenen vuoden pituisen aikasarjan voidaan katsoa kattavan talouden nousu- ja laskusuhdanteita, mikä puolestaan tasoittaa aikasarjan yksikköarvoja pitkän aikavälin laskelmissa (esim. Ahtikoski ym. 2012). Koska talouslaskelmat aloitettiin tukkimiehen-täin osalta jo vuonna 2021, päädyttiin kaikille tuhoaiheuttajille käyttämään identtistä

aikasarjaa, joka siis vuonna 2021 kattoi kalenterivuodet 2011–2020. Aikasarjojen nimelliset hinnat (kantohinnat) ja kustannukset (metsänhoidon kustannukset) muutettiin reaalisiksi deflatoimalla ne elinkustannusindeksillä (Tilastokeskus 2022) niin, että vertailuindeksinä käytettiin vuoden 2020 indeksiarvoa, joka oli 1974.

Seuraavissa luvuissa käydään tuhonaiheuttajittain läpi niiden aiheuttamat taloudelliset kustannukset vuositason siten, että kunkin tuhonaiheuttajan kohdalla kuvataan sovellettu laskeutamenetelmä (ml. toteutetut Motti-simuloinnit) ja päätulokset.

Taulukko 1. Talouslaskelmissa käytetyt reaaliset kantohinnat ja metsänhoidon kustannukset.

Hakkuutapa	MäT (MäK), €/m ³	KuT (KuK), €/m ³	KoT (KoK), €/m ³
Ensiharvennus	41,48 (12,75)	43,0 (12,59)	34,39 (12,42)
Harvennus	50,21 (16,05)	50,92 (16,59)	38,80 (15,40)
päätehakkuu	59,18 (18,98)	60,30 (20,42)	45,80 (18,44)
Metsänhoidon kustannukset, €/ha			
Uudistusalan raivaus		188,6	
Äestys		219,7	
Laikkumätästys		397,6	
Kylvö		257,0	
Istutus		700,3	
Taimikon varhaishoito		378,0	
Taimikonhoito		450,7	
Nuoren metsän kunnostus		443,5	
Metsälannoitus		381,8	
Kunnostusojitus		205,0	

2. Metsätaudit

2.1. Kuusenjuurikäpä

2.1.1. Kuusenjuurikäpä tuhonaiheuttajana

Suomessa esiintyy kaksi juurikäpälajia. Niistä yleisempi on kuusenjuurikäpä (*Heterobasidion parviporum*), jota esiintyy lähinnä kuusella, mutta myös lehtikuusella. Männynjuurikäpä on moni-isäntäinen ja voi esiintyä männyn lisäksi myös muilla havupuilla ja useimmilla lehtipuilla (Woodward ym. 1998).

Juurikäpä tartunta saa yleensä alkunsa sulan maan aikana tehtyjen hakkuiden yhteydessä tuoreelle kantopinnalle laskeutuneista itiöistä, jotka pariuduttuaan kasvattavat kannon sisälle tunkeutuvan rihmaston. Kannon juurista kuusenjuurikäävän rihmasto leviää pystykuusten juuristoon ja edelleen ylös kuusen runkoon. Rihmasto lahottaa edetessään puuainesta aiheuttaen tyvilahoa, jota aiemmin kutsuttiin maannousemaksi. Tämän seurauksena sieni pilaa kuusen arvokkaan tyvitukin tyypillisesti noin neljän metrin korkeuteen, mutta laho voi nousta jopa 12 metriin. Samalla juurikäpä leviää tartunnan saaneen puun juuristosta ympäröiviin saman tai seuraavan puusukupolven kuusiin muodostaen tautipesäkkeen.

Juurikäpä etenee pääosin kuolleessa sydänpuussa, minkä takia lahovikainen kuusi näyttää pitkään hyväkuntoiselta. Tilanne muuttuu vasta sitten, kun laho on edennyt sydänpuusta elävään mantopuuhun, mikä näkyy neulasiston harsuuntumisena, rungon pihkavuotoina ja pituuskasvun tyrehtymisenä. Lahojuuriset puut myös kaatuvat helposti kovalla tuulella. Käytännössä juurikäpä tuhot paljastuvat yleensä vasta hakkuun yhteydessä.

Kuusenjuurikäävän aiheuttama kuusen tyvilaho on ylivoimaisesti vahingollisin metsätauti Suomen metsissä. Sen taloudellisesta merkityksestä oli ennen METKOKA-hanketta olemassa 1990-luvulta peräisin oleva julkaisematon laskelma, joka tiedettiin puutteelliseksi, koska se perustui pelkästään lahon takia tapahtuneisiin puutavaralajin alenemiin. Sen mukaan niistä aiheutui metsänomistajille nykyrahaksi (2022) muutettuna noin 34 miljoonan euron tappiot.

Kuusenjuurikäpä aiheuttaa taloudellisia tappioita seuraavilla tavoilla: sienien aiheuttaman runkolahon takia alentunut puutavaran arvon eli puutavaraluokan aleneminen, sienien aiheuttama puun kasvun hidastuminen sekä juurikäpäisellä kasvupaikalla kuusen vaihtaminen vähemmän tuottavaksi puulajiksi.

Puutavaraluokan aleneminen laskettiin TyviTuho-hankkeessa kehitetyn mallin mukaisesti. Siinä kuusten lahoisuus määritettiin tavallisuudesta poikenneen katkontadatan perusteella. Menetelmä on kuvattu tarkemmin alla olevan talouslaskelman yhteydessä.

Juurikäpä tartunnan negatiivinen vaikutus puun kasvuun näkyy vasta, kun tartunnasta on kulunut yli 10 vuotta. Esimerkiksi Oliva ym. (2010) mittasivat, että tilavuuskasvu väheni 13 vuoden ajanjaksolla juurikäpälahon takia 14,7 %. Bendz-Hellgren ja Stenlid (1997) puolestaan mittasivat puun kasvun vähentyneen 20 vuoden ajanjaksolla 10 %, mutta jakson viimeisen viiden vuoden aikana peräti 23 %. Bendz-Hellgrenin ja Stenlidin (1995) mukaan kuusen vuotuinen kasvu oli Ruotsissa n. 48 milj. m³, ja lahoprocentti keskimäärin 14,5 %. Tämän jälkeen he oletivat, että läpimittakasvu vähenee lahon vuoksi 9 %. Tällöin kasvutappiota kertyisi 620 000 m³, jonka arvo terveenä puutavarana olisi ollut 155 miljoonaa kruunua. Tämä lisäisi kirjoittajien

mukaan kuusen lahoisuudesta aiheutuvia kustannuksia 56 %. Näitä tietoja ei pystytty hyödyntämään tässä hankkeessa tehdyssä kustannuslaskelmassa, koska mallinukseen ei ollut käytettävissä luotettavaa tietoa juurikäpätartuntojen iästä.

Juurikäävän torjumiseksi sulan maan aikaisissa hakkuissa tehdään kantokäsittely. Myös siitä aiheutuu kustannuksia (Korhonen 2015, Kärhä ym. 2018), jotka voidaan eritellä lakisääteisen kantokäsittelyn suoriin kuluihin sekä epäsuoriin eli lähinnä koneenkuljettajien työaikaa lisäävien tehtävien aiheuttamiin kustannuksiin. Myös lahon huomiointi katkonnassa ja puutavaran käsittelyssä lisäävät korjuun ajanmenekkiä logistiikan eri vaiheissa (hakkuu, metsäkuljetus, autokuljetus) ja vaikuttavat sitä kautta korjuun ja myös puutavaran kuljetuksen tuottavuuteen. Nämä kustannukset kohdentuvat ensisijaisesti koneyritykselle, mutta heijastuvat pienellä viiveellä mitä todennäköisemmin myös kantohintoihin. Tästä mekanismista on toistaiseksi varsin vähän tietoa, joten kantokäsittelyn kustannuksia tai kohonneita korjuu- ja kuljetuskustannuksia ei ole huomioitu tässä laskelmassa.

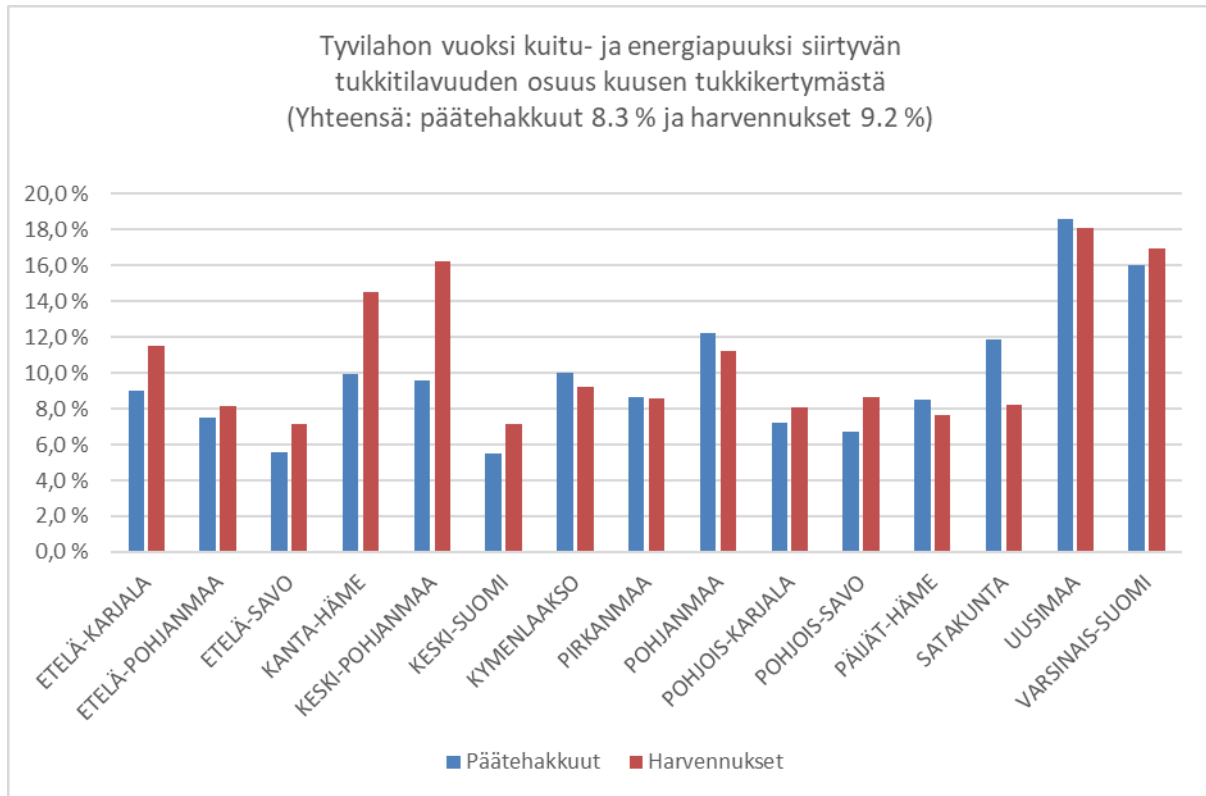
2.1.2. Kuusenjuurikäävän aiheuttamat suorat kustannukset

Kuusenjuurikäävän aiheuttamat arvioitavissa olleet suorat ja epäsuorat taloudelliset kustannukset arvioitiin METKOKA-hankkeessa erikseen. Kuusenjuurikäävän aiheuttama puutavaran arvon alenema määritettiin seuraavasti. Laskenta toteutettiin maakunnittain ja hakkuutavoittein siten, että Metsätehon hakkuukonetietovaraston aineistosta (hakkuukoneen hpr-tiedostot) poimittiin otos, joka sisälsi kaikkiaan 40 378 korjuulohkoa, joissa korjuu oli toteutettu 02/2017–11/2021 välisenä aikana (kokonaishakkuumäärä noin 18 miljoonaa m³, josta kuusta noin 9 miljoonaa m³). Laskentamenetelmässä tukkikokoiset kuusirungot määriteltiin joko lahovikaisiksi tai ei-lahovikaisiksi tyveltä katkottujen pölkkyjen puutavaralajin ja mitattujen dimensioiden perusteella.

Laskentamenetelmä tunnisti rungon lahorungoksi, jos siitä on katkaistu tyveltä vähintään 2 m pituinen kuitupuu- tai energiapuupölkky tai vastaavan pituinen rekisteröimätön kappale, ns. lumppi. Tukkikokoisuus puolestaan määritettiin kolmella eri tavalla: 1) tukin minimipituus (430 cm) ja minimiläpimitta (16 cm) määrittävät tukkirungon, 2) kohdan 1) lisäksi rungon $d_{1.3}$ on vähintään 19 cm ja 3) runko on todellisuudessa ollut tukkirunko (tyven yläpuolisesta osasta on katkottu vähintään yksi tukkipölkky).

Kaiken kaikkiaan laskentamenetelmässä n. 13,5 miljoonalle kuusitukkirungolle laskettiin: a) kokonaistilavuus, b) käyttöosan tilavuus, c) todellinen tukkitilavuus, d) teoreettinen maksimitukkitilavuus, e) korjattu tukkitilavuuden käytännön maksimi ja f) tyvilahon aiheuttaman tukkitilavuuden muutos, e-c. Korjuulohkojen kokonaislahotilavuutta (f) muutettiin siten, että tukkikokoisuuden määrittäminen menetelmän 3 mukaiseen lahotilavuuden arvoon lisättiin x % määrittämissä menetelmän 2 mukaisesta lahotilavuudesta rinnankorkeusläpimittaluokasta (DBH) 19 cm alkaen seuraavasti: DBH 19 cm: 30 %, DBH 20 cm: 64 %, DBH 21 cm: 81 % ja DBH >22 cm: 90 %. Oletuksena lahotilavuuden korjauksessa oli se, että x % rungoista oli mitoitetaan sellaisia, joista olisi voinut katkoa 430 cm minimitukin vielä tyvestä 2 m yläpuoleltakin, mutta tyvilahosuus jatkui. Hakkuukonedatasta (hpr) runkokäyräytälöillä muodostettuja runkoprofiileja käytettiin DBH-luokissa 19–>22 cm ja edelleen laskettiin niiden runkojen osuus, joilla tukin minimiläpimitta (<16 cm) 6,3 m etäisyydellä kannosta.

Edellä kuvatulla laskentamenetelmällä saatiin määritettyä tyvilahon vuoksi kuitu- ja energiapuuksi siirtyvän tukkitilavuuden osuus kuusen tukkikertymästä maakunnittain (Kuva 1).



Kuva 1. Kuusentyvilahon vuoksi kuitu- ja energiapuuksi siirtyvän tukkitilavuuden osuus kuusen tukkikertymästä, maakunnittain harvennuksissa ja päätehakkuissa, %.

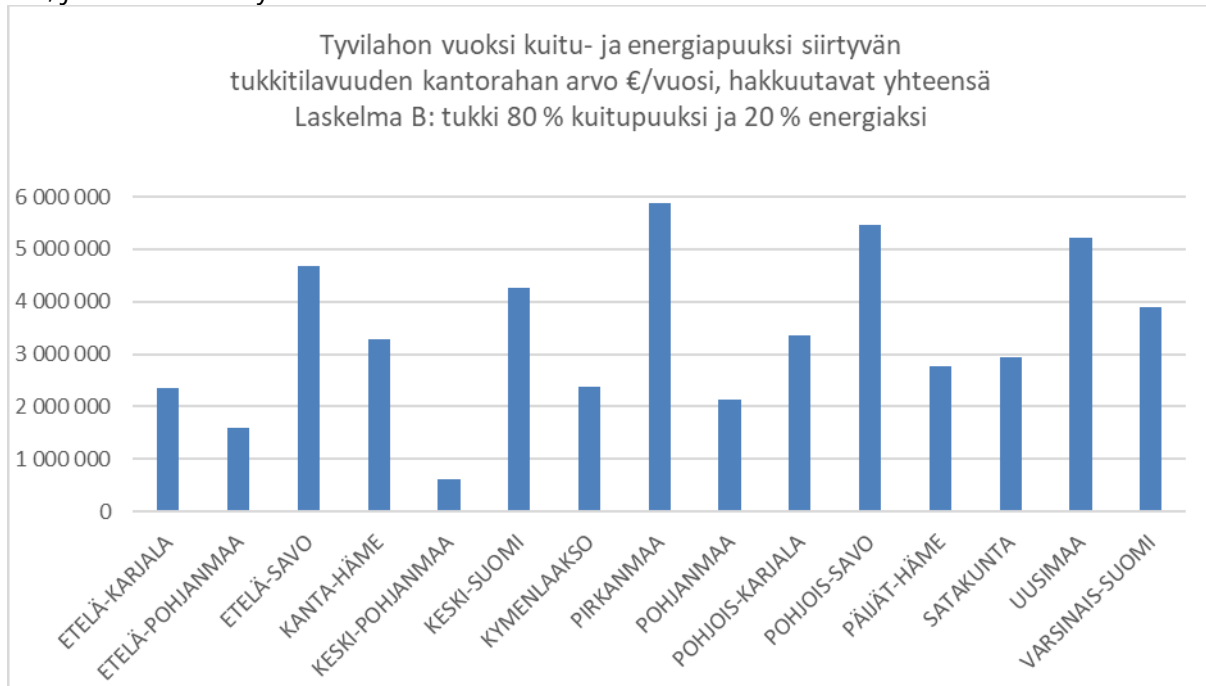
Kuvan 1 mukaiset suhteelliset osuudet koko Suomen osalta tarkoittavat absoluuttisesti vuositasolla päätehakkuissa 1 048 000 ja harvennuksissa 110 000 kuutiometrin tukkipuusiirtymää kuitu- ja energiapuuksi. Taloudellisesti tämä tarkoittaa maakunnittain Kuvan 2 mukaisia vuotuisia kustannuksia, jotka koko Suomen tasolla ovat noin 51 miljoonaa euroa. Talouslaskelmassa sovellettiin vuosien 2019–2021 hakkuutavoittaisten kantohintojen keskiarvoja.

2.1.3. Kuusenjuurikäävän aiheuttamat epäsuorat kustannukset

Arvon aleneman lisäksi kuusenjuurikääpä aiheuttaa epäsuoria kustannuksia, jotka syntyvät puulajin vaihdosta: infektoituneilla alueilla ei suositella kuusen viljelyä vaan viljeltävä puulaji joudutaan vaihtamaan rauduskoivuksi. Tästä puulajin vaihdosta aiheutuu metsikkötasolla tuonmenetyksiä metsänomistajalle, jotka määritettiin Motti-metsikkösimulaattorilla.

Kuusenjuurikäävän epäsuorien kustannusten laskenta toteutettiin tässä raportissa seuraavasti. Ensiksi arvottiin simuloitavien kohteiden (paikkakunnat) sijainti siten, että muodostettiin kaksi suuraluetta: metsäkeskukset 1–5 ja metsäkeskukset 6–10. Näillä kahdella suuralueella esiintyy suurin osa kuusenjuurikääpätuhoista Metsätehon Tyvilahoaineiston mukaan. Arvotut (<https://www.randomizer.org>) paikkakunnat olivat metsäkeskusten 1–5 suuralueella: Paimio, Kaskinen, Asikkala, Hamina ja Luumäki. Vastaavasti metsäkeskusten 6–10 suuralueella arvotut paikkakunnat olivat: Lestijärvi, Saarijärvi, Iisalmi, Juankoski ja Nurmes. Seuraavaksi ko. paikkakunnille simuloitiin Motti-metsikkösimulaattorilla sekä tuoreelle että lehtomaiselle kan- kaalle istutuskuusikon ja rauduskoivikon puuston kehityssennusteet siten, että ne perustuivat hyvän metsänhoidon suositusten mukaiseen metsänkäsittelyyn. Paikkakuntakohtaisista

tuloksista muodostettiin suuralueittaiset puulajin vaihdon aiheuttamien kustannusten keskiarvot, jotka on esitetty Taulukossa 2.



Kuva 2. Kuusentyvilahon suorat vuotuiset kustannukset, kun laskelmassa oletetaan tyvilahon tukkipuusiirtymästä 80 % menevän kuitupuuksi ja 20 % energiapuuksi, €.

Taulukko 2. Suuralueittaiset kustannukset puulajin vaihdosta, €/ha.

Suuralue	Kasvupaikka	2 %	3 %	4 %
MK 1-5	Lehtomainen kangas	4 238	2 026	1 017
	Tuore kangas	1 631	623	184
MK 6-10	Lehtomainen kangas	3 115	1 332	567
	Tuore kangas	1 097	359	77

Metsätehon Tyvituhoaineiston mukaan erottui kolme maakuntaa, joissa kuusentyvilahoa esiintyy eniten: Uusimaa, Varsinais-Suomi ja Pohjanmaa. Näissä maakunnissa vähintään 10 % kaikista laholuokista kuuluu laho-osuusluokkaan, jossa lahonmäärä on vähintään 20 % tukki-kertymästä. Tällaista osuutta ja lahovikaisten runkojen määrää voidaan pitää riittävänä, jotta puulajin vaihtoa voidaan suositella.

Seuraavaksi Suomen metsätilastot-verkkojulkaisusta (esim. Suomen_metsatilas-tot_2021_verkko.pdf) poimittiin viimeisen kolmen vuoden tilastot Uudenmaan, Varsinais-Suomen ja Pohjanmaan kuusivaltaisten metsien pinta-aloista, ja edelleen sovellettiin avohakkuun (Suomen metsätilastot, taulukko 3.2) pinta-aloja jotta saatiin selville laskennalliset kuusen avohakkuualat. Näille puolestaan edelleen sovellettiin Metsätehon Tyvilahoaineiston laho-osuusluokkien jakaumia, jotta saatiin selville puulajin vaihdon laskennalliset pinta-alat (ha) ko. maakunnille. Lisäksi piti olettaa, mikä osuus edellä kuvatuista laskennallisista pinta-aloista on lehtomaisella ja mikä osa tuoreella kankaalla. Tässä päädyttiin seuraavaan: Uudellamaalla ja Varsinais-Suomessa 55 % lehtomaisella ja 45 % tuoreella kankaalla, kun taas Pohjanmaalla 33 % lehtomaisella ja 67 % tuoreella kankaalla.

Edellä esitetyn laskentakehikon mukaan saatiin lopulta puulajin vaihdon vuotuiset pinta-alat: Uudellamaalla 112 hehtaaria lehtomaisen kankaan (tuoreen kankaan 92 ha), Varsinais-Suomessa 55 hehtaaria lehtomaisen kankaan (45 ha) ja Pohjanmaalla 42 hehtaaria lehtomaisen kankaan (85 ha) metsiköitä. Kun näille pinta-aloille sovellettiin Taulukon 2 mukaisia hehtaari-kohtaisia tulonmenetyksiä siten, että Uudenmaan ja Varsinais-Suomen tulonmenetykset määritettiin suuralueen MK 1-5 ja Pohjanmaan MK 6-10 mukaan, saatiin vuositason kokonaiskustannukset, jotka aiheutuvat kolmen eniten kuusentyvilahoa omaavan maakunnan alueilla (Taulukko 3).

Taulukko 3. Kolmen eniten kuusentyvilahoa sisältävän maakunnan yhteenlaskettu vuotuinen kustannus, joka aiheutuu puulajin vaihdosta, miljoonaa euroa. Laskentakorkokanta 2 %, 3 % ja 4 %.

Alue	Vuotuinen pinta-ala, hehtaaria	Kustannus, 2 %	Kustannus, 3 %	Kustannus, 4 %
Uusimaa+Varsinais-Suomi+Pohjanmaa	430	1,15	0,51	0,23

Taulukon 3 tuloksia tulkittaessa on syytä muistaa, että taloustarkasteluun sisällytettiin ainoastaan kolme maakuntaa, joissa Metsätehon Tyvilahoaineiston mukaan oli vakavimmat juurikääpätuhot, joiden katsottiin edellyttävän puulajin vaihtoa.

2.2. Männynjuurikääpä

2.2.1. Männynjuurikääpä tuhoniheuttajana

Männynjuurikääpä aiheuttaa kaiken kokoisissa ja kaiken ikäisissä männiköissä tyvitervastautia (Woodward ym. 1998). Se alkaa yksittäisen männyn tartunnasta, joka laajenee kuusenjuurikäävän tavoin ajan myötä useita puita käsittäväksi tautipesäkkeeksi. Tunnusomaista tällaisille pesäkkeille ovat eriasteisesti sairastuneet männyt: harsuuntuneet, kellertävät, ruskettuneet ja kuolleet puut.

Männynjuurikääpä lahottaa männyn juuristoa, mutta puu pystyy kuitenkin estämään runsaalla pihkoittumisella sienirihmaston leviämisen ylös runkoon. Siksi laho nousee männyn rungossa yleensä vain 30–40 senttimetrin korkeuteen. Siten männyllä juurikäävän aiheuttamat tulonmenetykset eivät johdu lahosta vaan puiden kasvun hidastumisesta ja ennenaikaisesta kuolemasta.

Juuriston saama tartunta heikentää männyn kasvua, koska ravinteiden ja veden saanti vaikeutuu ja puu joutuu käyttämään osan resursseistaan puolustusreaktion ylläpitämiseen. Tämä vaikutus puuntuotantoon voi pitkällä aikavälillä olla merkittävä. Wang ym. (2014) osoittivat, että 36-vuotiaassa männikössä, jossa 87,5 % puista oli sairastunut siten, että niiden juurista 10 % oli juurikäävän tartuttamia, puiden vuotuinen kasvu oli alentunut 10 % hehtaarilla. Kurkela ym. (1978) puolestaan osoittivat, että lähellä päätehakkuukäälle olleissa VT-tyyppin männiköissä sairaiden puiden kasvu oli vain noin 74 % terveiden puiden kasvusta.

Myös männynjuurikääpä aiheuttaa puutavaran laatuluokan alenemista, vaikka pihkoittuminen ja lahovika rajoittuvat männyn tyvelle ja runkopuu säilyy terveenä. Tämä johtuu siitä, että

kuolleiden puiden runkojen arvo alenee nopeasti seurannaistuhon, kuten siihen iskeytyvien hyönteisten ja sinistäjäsiementen, vuoksi.

Lisäksi on huomattava, että juurikäävän aiheuttamia tappioita lisää se, ettei sienien tartuttamalla kuivilla kankailla ole männyn lisäksi juuri taloudellisesti kannattavia puulajivaihtoehtoja. Siten männynjuurikäävän pahasti saastuttamat mäntykankaat jäävät yleensä pysyvästi vajaa-tuottoisiksi. Tässä mielessä männynjuurikäävän aiheuttamat tuhot männiköissä voivat yksittäiselle metsänomistajalle olla jopa kuusenjuurikäpää pahempi este harjoittaa taloudellisesti kannattavaa metsätaloutta.

Männynjuurikäpä aiheuttaa myös kuusella tyvilahoa, joka ei poikkea kuusenjuurikäävän aiheuttamasta. Metsiköissä, joissa on tai on ollut edellisessä puusukupolvessa runsaasti tyvitervastautia männynjuurikäpä voi olla jopa pääasiallinen kuusen tyvilahon aiheuttaja. Koska juurikäpäälajia ei käytännön metsätaloudessa määritetä, sisältyvät männynjuurikäävän kuuselle aiheuttamat tappiot tässä raportissa kuusenjuurikäävästä tehtyyn laskelmaan.

2.2.2. Männynjuurikäävän aiheuttamat taloudelliset tappiot

Männyllä juurikäpätuhon taloudellista vaikutusta arvioitiin metsikkötason laskelmilla, jotka skaalattiin suuralueille. Talouslaskennassa lähdettiin oletuksesta, että juurikäpä aiheuttaa metsikkötasolla puutavaralajisiirtymää – joko tukkipuusta kuitupuuhun tai tukkipuusta suoraan raakkiin.

Koska männynjuurikäävän osalta ei ole kattavia mittausaineistoja, jouduttiin tässä ensin arvioimaan asteikko, jonka mukaan juurikäpä aiheuttaa puutavaralajisiirtymää tukista kuituun tai raakkiin. Keskusteluiden perusteella päädyttiin seuraavaan. Sekä tukkipuusta kuitupuuhun että tukkipuusta raakkiin muodostettiin samasuhteinen asteikko: 20 %, 40 %, 60 % ja 80 %. Tämän asteikon katsottiin kuvaavan riittävän laajasti juurikäävän mahdollisesti aiheuttamaa tuhoa männiköissä.

Simuloinnit (Motti) toteutettiin siten, että ensin valittiin kolme metsäkeskusta, joille edelleen arvottiin (<https://www.randomizer.org>) kolme paikkakuntaa, joille lopulta tehtiin Motti-simuloinnit erikseen kuivan kankaan kylvömänniköille ja luontaisesti uudistetuille männiköille. Valitut metsäkeskukset olivat: Häme-Uusimaa (arvotut paikkakunnat: Karjalohja, Lohja ja Padasjoki), Keski-Suomi (Konnevesi, Saarijärvi ja Viitasaari) ja Pohjois-Pohjanmaa (Haapavesi, Oulunsalo ja Utajärvi). Metsäkeskusten valinnan taustalla oli se, että Pohjois-Pohjanmaan katsottiin edustavan pohjoisinta metsäkeskusta, jonne männyn juurikäpää voi merkittävän ongelmallisesti levitä ja Häme-Uusimaan puolestaan katsottiin edustavan eteläistä männyn juurikäävän esiintymisaluetta. Keski-Suomi valikoitui näiden väliin.

Taulukossa 4 on esitetty metsikkötason tulonmenetykset tukkipuusiirtymän eri olettamilla, 20 %–80 % niin, että lukuarvot edustavat jo kunkin metsäkeskuksen alueella kolmen paikkakunnan keskiarvoa. Esimerkiksi, Häme-Uusimaan metsäkeskuksen alueella (MK 3) metsänomistaja menettää tuloja 658,6 €/ha jos 40 % tukkikertymästä siirtyy kuitupuuksi, ja tulonmenetys on peräti 1 366,7 €/ha jos tukkikertymästä 40 % siirtyykin raakkiin, laskentakorkokannan ollessa 2 % (Taulukko 4).

Taulukko 4. Hehtaariohittaiset tulonmenetykset männyn juurikäpäninfektiossa, kun tukkipuu-siirtymä 20–80 % kuituun tai raakkiin, €/ha. Lukuarvot edustavat kunkin metsäkeskuksen alu-eella (MK3, 8 ja 12) kolmen arvotun paikkakunnan keskiarvoa.

MK	Laskenta-korko	20 % ^{a)}	40 %	60 %	80 %
3	2 %	329,3 [683,3] ^{b)}	658,6 [1366,7]	987,9 [2050,0]	1317,1 [2733,3]
		323,3 [669,0] ^{c)}	646,5 [1338,0]	969,8 [2006,9]	1293,0 [1675,9]
	3 %	143,1 [314,1]	286,2 [628,2]	429,3 [942,4]	572,3 [1256,5]
		141,9 [308,2]	283,7 [616,4]	425,6 [924,6]	567,4 [1232,7]
	4 %	68,2 [160,7]	136,4 [321,5]	204,6 [482,2]	272,8 [642,9]
		68,4 [157,9]	136,9 [315,7]	205,3 [473,6]	273,8 [631,4]
8	2 %	259,9 [548,5]	519,8 [1097,0]	779,8 [1645,4]	1039,7 [2193,9]
		223,4 [477,8]	446,8 [955,7]	670,1 [1433,5]	893,5 [1911,4]
	3 %	106,3 [239,1]	212,5 [478,3]	318,8 [717,4]	425,1 [956,5]
		89,1 [202,9]	178,3 [405,7]	267,4 [608,6]	356,5 [811,5]
	4 %	50,8 [12,5]	101,6 [244,9]	152,4 [367,4]	203,2 [489,9]
		42,2 [101,9]	84,3 [203,9]	126,5 [305,8]	168,6 [407,7]
12	2 %	214,1 [457,8]	428,2 [915,7]	642,2 [1373,5]	856,3 [1831,1]
		166,5 [368,0]	333,1 [735,9]	499,6 [1103,9]	666,2 [1471,8]
	3 %	84,0 [192,6]	168,1 [385,3]	252,1 [578,0]	336,2 [770,7]
		63,2 [149,2]	126,4 [298,5]	189,6 [447,7]	252,8 [596,9]
	4 %	35,9 [90,0]	71,9 [180,0]	107,8 [270,0]	143,7 [360,0]
		26,1 [67,0]	52,3 [134,0]	78,4 [200,9]	104,5 [267,9]

^{a)} tukkipuusiirtymä, % ^{b)} ensimmäinen lukuarvo, 329,3 tarkoittaa, että 20 % tukkipuusta siirtyy kuitupuuhun ja haka-suluissa oleva lukuarvo [683,3] tarkoittaa kun 20 % tukkipuusta siirtyy raakkiin, ^{c)} alempi rivi kuvaa luontaisen uudis-tamisen mukaan laskettua tulonmenetystä ja ylempi rivi kylvön mukaan, €/ha.

Koska seikkaperäisiä tilastoja männynjuurikäävän tuhopinta-aloista ei ole olemassa keskite-tysti, muodostetaan tässä eräänlainen herkkyysanalyysi, jonka avulla haarukoidaan männyn juurikäävän mahdollisia talousvaikutuksia karkealla tasolla. Edellä kuvatun kolmen metsäkes-kuksen mäntyvaltaisten (>95 %) puustojen yhteenlaskettu pinta-ala on noin 1,73 miljoonaa hehtaaria (Metsätilastollinen Vuosikirja 2021, taulukko 2.6). Vain pieni osa tuosta kokonais-pinta-alasta on kuitenkin kuivia kankaita – karkea arvio voisi olla noin kymmenesosa, eli 173 000 hehtaaria. Metsätehon Tyvilahoaineistossa keskimääräinen laho-osuusluokkien (la-hoa >20 % kuusen tukkikertymästä) suhteellinen osuus oli 4,7 %. Toisin sanoen, kuusella va-kavaa tyvilahoa esiintyi aineistossa noin viidellä prosentilla.

Männyn osalta on esitetty karkeitä arvioita, että vastaava lukema voisi olla kymmenesosa kuusen vastaavasta, eli 0,5 %. Näin ollen, saamme männyn tyvilahon esiintymiselle karkeasti noin 8 700 hehtaaria (0,5 % * 173 000 ha) vuodessa. Tämä pinta-ala jaetaan vielä kolmen metsäkeskuksen alueille niin, että oletamme männyn juurikäävän olevan Keski-Suomessa laaja-alaisin (50 %), sitten Häme-Uudellamaalla (40 %) ja Pohjois-Pohjanmaalla vasta le-viämässä (10 %). Taulukossa 5 on esitetty yllä kuvatuin oletuksin ja laskentakriteerein män-nynjuurikäävän aiheuttamat kustannukset, kun tukkisiirtymä on joko 20 % tai 80 % tukista kuituun tai tukista raakkiin.

Taulukko 5. Kolmen metsäkeskuksen alueille arvioitu männyn juurikäävän aiheuttamat kustannukset, kun tukkisiirtymäksi oletetaan joko 20 % tai 80 % tukista kuituun tai tukista raakkiin, miljoonaa euroa.

Laskentakorko	Tukkisiirtymä 20 %		Tukkisiirtymä 80 %	
	Kuitupuuhun	Raakkiin	Kuitupuuhun	Raakkiin
2 %	2,33	4,89	9,31	15,22
4 %	0,47	1,10	1,87	4,40

2.3. Tervasroso

2.3.1. Tervasroso metsätuhojen aiheuttajana

Tervasroso (*Cronartium pini*) on ruostesieni, joka aiheuttaa merkittävää tuhoa useilla mäntylajeilla Euroopassa ja Aasiassa (CABI 2019). Pohjois-Amerikassa tauti on karanteenilaji (Kim ym. 2022). Sieni on aiheuttanut merkittävää tuhoa nuorissa männiköissä Pohjois-Euroopassa 2000-luvulla (Kaitera 2000, Wulff ym. 2012). Tautia esiintyy koko maassa, jossa sen yleisyys on muutamia prosentteja (Ylikojola & Nevalainen 2006). Sienestä esiintyy kaksi eri muotoa, joista toinen leviää väli-isäntäkasvien välityksellä ja toinen suoraan männystä mäntyyn (Kaitera & Nuorteva 2008).

Sienen väli-isäntäkasvilajeja tunnetaan yli 50, joista tärkeimmät kuuluvat puoliloiskasvisukuihin. Niistä tärkeimmät ovat maitikat, kuusioidet, silmäruohot ja laukut (Kaitera ym. 2015). Etelä-Suomen rannikkoalueella ja Ahvenanmaalla myös käärmepistonyrtti on tärkeä laji (Kaitera ym. 2005). Tauti leviää myös puutarhakasvilajien kuten pionien välityksellä (Kaitera ym. 2017). Tervasroso alentaa saha- ja kuitupuun tilavuutta ja arvoa, mutta suurimmat tappiot syntyvät tukkipuiden arvonmenetyksistä (Kaitera ym. 1994). Tauti alentaa myös mäntytien sädekasvua (Martinsson & Nilsson 1987). Tervasrosan tukkipuun tilavuutta ja arvoa alentava vaikutus on raportoitu aiemmin case-tutkimuksessa Pohjois-Suomessa (Kaitera ym. 1994), mutta laajalaiset tutkimukset tervasrosan taloudellisista vaikutuksista ovat puuttuneet ennen tätä selvitystä. METKOKA-hankkeessa oli tarkoitus arvioida taudin aiheuttamia valtakunnallisia taloudellisia kokonaismenetyksiä metsämännyn pohjautuen valtakunnan metsien inventoinneissa (VMI) saatuihin tervasrosoarvioihin.

2.3.2. Tervasrosotuhojen aiheuttamat kustannukset

Tervasrosan aiheuttaman taloudellisen tappion laskenta pohjautui VMI10-13 aineistoihin ja niistä edelleen tehtyihin tarkasteluihin. Laskennoissa käytettyjä kuvioita oli kaikkiaan 1 917 kpl. Kuvioista 60 % oli uudistuskypsää metsää (kehitysluokka 6), 28 % varttunutta metsää (khl 5), 11 % nuorta kasvatusmetsää (khl 4) ja 1 % varttunutta taimikkoa (khl 3). Tuhosta 51 % oli lievää (luokka 0), 43 % tuho oli alentanut hyvää tyydyttävään (luokka 1) ja 7 % oli vakavaa tuhoa (luokka 2). Kuvioiden tuhokriteerit on esitetty VMI-ohjeissa (Valtakunnan metsien 13. inventointi (VMI13): Maastotyön ohjeet 2020).

Tervasrosan määrää tarkasteltiin tervasrosoisten kuvioiden %-osuuksina kaikista mäntykuvioista. Kuvioiden määrää tarkasteltiin kolmella suuralueella maakuntia yhdisteltyinä: E-Suomi, K-Suomi ja P-Suomi (pois lukien Lappi). Lisäksi Lappia tarkasteltiin alueena erikseen. Tervasrosokuvioiden osuus kaikista mäntykuvioista oli noin 1 % kaikissa VMI:ssä eri

maantieteellisillä alueilla pois lukien Lappi. Lapissa osuus kasvoi noin 2 %:sta 3 %:iin VMI10:stä VMI13:een. Vastaavat tervasroso-osuudet pohjanpinta-alasta olivat noin 1 % kaikissa VMI:ssä eri maantieteellisillä alueilla pois lukien Lappi. Siellä osuus kasvoi noin 2 %:sta VMI10:ssä noin 3,5 %:iin VMI12:ssa ja VMI13:ssa.

VMI:n puustoarvioinnissa on tervasrosoisista koepuista arvioitu puiden tukkiosuus. KPL-ohjelmiston avulla (Heinonen 1994) laskettiin malli tukkivähennykselle, jossa selittäjänä toimi rinnankorkeusläpimitta. Taudin aiheuttama tukkivähennys laskettiin mallin antamien ennusteiden erotuksena terveiden puiden tukkiosuus vähennettynä tervasrosopuiden tukkiosuudella. Tuholuokkaa ei huomioitu mallissa. Mallia sovellettiin kaikkiin VMI10-13:n tervasrosoisiin puihin olettaen, että tervasroson vaikutus puustoon on mallin mukainen ja kaikki tukkipuuosuus siirtyy kuitupuuksi. Tervasroson kirjaus pääsyynä puun tuholle katsottiin siten perusteeksi sille, että puun vauriot ja menetykset olivat tervasroson aiheuttamia.

Nettotappio laskettiin tukkipuulle kuvion kehitysluokan mukaisesti tukki- ja kuitupuulle ennalta sovitulla keskimääräisillä hinnoilla, jotka olivat tukkipuulle 55 €/m³ ja kuitupuulle 16 €/m³. Nettomenetys laskettiin kaikille männyille, joiden rinnankorkeusläpimitta oli >17,4 cm.

Valtakunnalliset tervasroson aiheuttamat kokonaismenetykset laskettiin seuraavasti: ensin laskettiin todennäköisyys sille, että puussa on tervasrosoa eri puuston kokoluokissa ja eri maantieteellisillä alueilla. Tätä todennäköisyysmallia sovellettiin kaikkiin VMI-puihin. Saatu todennäköisyys kerrottiin taudista johtuvalla nettomenetyksellä, josta päästiin nettomenetyksen odotusarvoon.

Kaikille puille ennustetun tukkivähennyksen tilavuuden odotusarvo suhteutettiin valtakunnallisesti kaikille puille laskettuun tilavuuden summaan. Tämä tehtiin, koska tarvittiin kaikille puille tilavuus, joka saatiin Random Forest -mallista. Malli perustuu koepuudataan, jolle on laskettu tilavuudet. Suhteellinen tervasroson aiheuttama tukkitilavuuden väheneminen laskettiin sovitulla hinnoilla. Suhdeluvulla kerrottiin edelleen Suomen mäntyjen VMI12:ssa laskettu kokonaistilavuus, joka oli 1 244 milj. m³ ja niiden vuotuiset hakkuut noin 35 milj. m³.

Tervasrosopuiden läpimitan kasvu aleni läpimitan kasvaessa sekä ravinneröyhillä (VT ja sitä karummat kasvupaikat) että ravinnerikkailla kasvupaikoilla (MT ja sitä rehevämät kasvupaikat). Läpimitan kasvun aleneminen oli vähäisintä terveissä puissa, sitä suurempi runkokorpuissa ja edelleen korkeampi oksavauriokuissa. Kasvun aleneminen on voimakkainta kuollut latva -luokan tervasrosokuissa. Kasvun menetysten laskenta katsottiin kuitenkin liian epämääräiseksi ja karkeaksi johtuen pituuskasvutietojen puuttumisesta ja taudin puussa esiintymisen keston epämääräisyydestä. Näistä syistä johtuen kasvutappioita ei arvioitu.

Tervasroson aiheuttamat menetykset olivat keskimäärin 2–3 €/puu. Etelä-Suomen maakunnissa menetys oli hieman korkeampi kuin Keski-Suomen, Pohjois-Suomen ja Lapin alueilla. Menetyksen odotusarvon jakauma €/ha oli korkein Lapissa, kun taas muilla alueilla odotusarvo oli samaa luokkaa. Päätehakkuuvaiheen kehitysluokan puissa odotusarvo oli alhaisempi Lapissa kuin muilla alueilla. Myös muissa kehitysluokissa ja taimikoissa odotusarvo oli alhaisin Lapissa.

Tervasroson aiheuttama arvonalenema puustopääomassa oli 126 milj. €, kun Suomen mäntyjen tilavuus on 1 244 milj. m³. Kun Suomen mäntymetsien vuotuiset hakkuut ovat noin

35 milj. m³, niin tervasroson aiheuttama hakkuutulojen vähennys (kuitupuusiirtymä) on näin ollen noin 3,5 milj. €/v.

Puutavaraluokan aleneman lisäksi tervasroso alentaa myös mäntyjen kasvua (Martinsson & Nilsson 1987), mutta tässä tutkimuksessa taudin vaikutusta kasvuun ei pystytty arvioimaan, koska kasvunmuutoksen vaikutusaikaa oli mahdotonta arvioida tarkasti aineistosta. Siten tässä laskettu kokonaisarvio tappioista on lievä aliarvio. Aineiston perusteella nuorissa männiköissä ei havaittu merkittävästi tervasrosoa, joten nuorissa männiköissä epidemioita aiheuttavan tervasroson taloudelliset vaikutukset olivat vähäiset. Suurimmat menetykset kohdistuivat varttuneisiin ja uudistuskypsiin metsiin. Alueellisesti suurimmat menetykset ilmenivät Lapissa.

3. Hyönteiset

3.1. Katsaus vuosien 2010–2023 tuhohyönteiskirjallisuuteen

Selkeyttääksemme tämänhetkistä kansainvälistä tutkimuskenttää koskien keskeisimpiä puus-
totuhohyönteisiämme haimme tässä raportissa käsiteltyjä hyönteislajeja koskevat vertaisarvi-
oidut tutkimusjulkaisut vuodesta 2010 alkaen käyttämällä Web of Science -hakukonetta.
Teimme haut keväällä 2022, täydensimme aineistoa 15.2.2023 ja käytimme hakukriteereinä eri
lajien tieteellisiä nimiä. Raportin pääsisältöä täydentävänä käsittelemme katsauksessa ha-
vununnan. Näin menetellen löysimme kirjanpainajasta 766, ytimennävertäjästä 128, tukkimie-
hentäistä 198, mäntypistiäisistä 48 ja havununnasta 42 vertaisarvioitua katsaus- tai tutki-
musartikkelia. Hyödyllisiä artikkeleita olisi luultavasti löytynyt jonkin verran lisää väljemmin
hakutermein taikka muita hakukoneita (esim. Scopus, Google Scholar) tai eri instituutioiden
tietokantoja käyttämällä. Web of Science kuitenkin etsii julkaisuja kaikista keskeisimmistä
metsäntutkimuksen julkaisusarjoista (kattavuus), tuottaa listoja vain vertaisarvioituista julkai-
suista (tiedon laatu) ja on suomalaisten metsätieteen ja ekologian tutkijoiden yleisimmin
käyttämä hakutietokanta (löydettävyyys), ja toisaalta käytettävissä ollut työaika oli rajallinen.
Uskomme silti näin tuottaneemme hyvän yleiskuvan viime vuosien tutkimuksesta.

Keräsimme kirjallisuutta viidestä näkökulmasta, jotka ovat tiedon soveltamiselle tärkeitä: tu-
holaislajin ja tuhokohteiden havaittavuus eri menetelmin, puulajierikoistuneisuus, maailmalla
jo käytössä olevat torjuntakeinot, ilmastonmuutoksen kannalta tärkeät seikat (mahdolliset le-
vittäytymis- ja runsastumisennusteet) ja tuholaislajin mukana kulkeutuvat muut lajit (tausta-
motiivina niiden kenties mahdollistama biologinen torjunta). Näillä rajauksilla tähän katsauk-
seen valikoitui 127 kirjanpainaja-, 61 ytimennävertäjä-, 79 tukkimiehentäi-, 75 mäntypistiäis-
ja 38 havununna-artikkelia.

Seuraavassa tiivistämme lyhyesti tuoreimman tutkimuksen sellaiset havainnot, joilla voi olla
merkitystä puustotuhoihin varautumiselle Suomessa. Tarkempi selostus on kirjallisuusluette-
lon jälkeen seuraavassa Liitteessä. On syytä korostaa, että tarkemmassa selostuksessa (Liite) ei
siinäkään pyritä aihepiirin kautta aikain julkaistun kirjallisuuden yhteenvetoon, vaan nimen-
omaan kertomaan, millaista tutkimusta ja varsinkin millaisia havaintoja ja soveltamismahdolli-
suuksia kaikkein uusin tutkimustieto tarjoaa.

Yleisiä seikkoja:

- Nykyhetken keskeisimmät tuhoniheuttajat näyttävät hyötyvän ilmaston lämpenemi-
sestä, mutta kaikki tuhoniheuttajat eivät siitä luultavasti hyödy.
- Useiden lajien kyky sopeutua muuttuviin olosuhteisiin ja isäntäpuihin on suuri. Pitkälle
erikoistuneet lajit sitä vastoin voivat kohdata vaikeuksia ilmaston tai maankäytön
muuttuessa.
- Levittäytymisen tai paikallisten tuhojen ennustamista vaikeuttavat esimerkiksi kannan-
tiheydestä johtuvat muutokset yksilöiden kilpailuasemassa ja lisääntymisessä, sekä le-
vittäytyjien kohtaamat aivan uudet abioottiset ja bioottiset tekijät.
- Biologisen ja kemiallisen torjunnan kehitystyössä on tärkeää tutkia mahdollisimman
laajasti vaikutukset muuhun eliöstöön sekä ympäristöön (maaperä, vesistöt, pohjavesi,
hengitysilma).

- Tutkimusta pitäisi suunnata (i) sääolojen, kasvupaikkavaihtelun ja seuralaislajien vuorovaikutuksiin tuholaislajien dynamiikan selittäjinä, (ii) tuholajien kannanvaihtelun eri vaiheille tyypilliseen seuralaislajistoon, ja (iii) monen lajin ilmeiseen valikoivuuteen suhteessa isäntäpuulajin tilajakaumaan.

Kirjanpainaaja:

- Kirjanpainajatutkimus on viime vuosina keskittynyt tuhokohteiden varhaiseen tunnistamiseen ja ennustemalleihin sekä toisaalta torjuntakeinoihin.
- Kirjanpainajan laaja-alaisten massaesiintymien juurisyy on yleensä tuulenkaato tai pitkään jatkuva kuivuus. Laji hyötyy myös lämpötilojen noususta.
- Kirjanpainajan välttäneet puut ovat usein ryvästyneet, mikä kertoo siitä, etteivät kirjanpainajat iskeydy puihin satunnaisesti.
- Kuivina kesinä kirjanpainaaja saattaa iskeytyä tavanomaista pienempiin puihin.
- Kirjanpainajariskiä näyttää vähentävän enemmän lehti- kuin mäntysekapuustoisuus.
- Kirjanpainajan asuttamat yksittäiset puut on mahdollista ulkoisten merkkien (ruskea puru ym.) asemesta tunnistaa infrapuna-aallonpituus- tai lämpökameralla noin 80 % tarkkuudella, tai koulutetun koiran avulla.
- Kaukokartoitus- ja laserkeilausmenetelmillä voidaan erottaa kirjanpainajan asuttamat metsiköt terveistä jopa 70–80 % tarkkuudella, jos kohteista on havaintoaineisto ennen tuhoa. Luotettavuutta voidaan parantaa puusto-, kasvupaikka- ja topografiatiedoilla.
- Vaikka kirjanpainajaa on todettu useilta puulajeilta, kuten männyltä, laji on vahvasti juuri kuusen laji. Satunnaishavainnot muilta puulajeilta saattavat kuitenkin "hutien" sijaan heijastaa isäntäpuulajijousta.
- Useimmat ilmastomallit ennakoivat kirjanpainajalle altistavien olosuhteiden, kuten kuusten kuivuusstressin, yleistyvän lähivuosisikymmeninä.
- Torjuntahakkuut tehoavat massaesiintymään parhaiten sen välittömässä läheisyydessä. Biologiselle torjunnalle (mm. muurahaiskuoriaiset) ja muulle monimuotoisuudelle niistä – kuten kuolleen puun muustakin poistamisesta – on haittaa.
- Syöttipuilla voidaan vähentää paikallista kirjanpainajakantaa; sitä vastoin karkote- ja houkutuskemikaalien teho on vähäisempi.
- Feromonipyynti on hyvä kirjanpainajakannan seurantakeino, mutta samalla se jossain määrin vähentää kirjanpainajan luontaisia vihollisia, kuten muurahaiskuoriaisia.
- Kirjanpainajalla on seuralaisinaan runsaasti muita selkärangattomia, sieniä, bakteereita, sukkulamatoja ja viruksia. Näiden merkitys kirjanpainajakannan säätelijänä tunnetaan huonosti. Osa kuitenkin auttaa kirjanpainajakannan kasvua, osa taas kykenee tappamaan merkittävän osan yksilöistä. Juurikäävällä ja kirjanpainajalla ei näytä olevan kovin vahvaa yhteysttä toisiinsa.
- Kirjanpainaaja tuottaa osaltaan monen uhanalaisen metsälajin tarvitsemaa lahoppuuta ja käynnistää paikallisesti metsän sukkessiota, ja äkillisesti muuttuvat valaistus-, tuuli- ja kosteusolot vaikuttavat myös mm. pohja- ja kenttäkerroskasvillisuuteen.
- Maahamme 1950-luvun tienoilla levittäytynyt kiiltokirjanpainaaja (*Ips amitinus*) sekä pikkukirjanpainaaja (*Ips duplicatus*) elävät sekä kuusella että männyllä, ja ovat tällä hetkellä taloudellisesti vähämerkityksisiä.

Ytimennävertäjät:

- Ytimennävertäjien aiheuttamat haitat ovat lähinnä kasvutappioita, joita on etenkin puutavaran varastopaikkojen lähituntumassa.
- Ytimennävertäjätuhokohteita on jossakin määrin mahdollista tunnistaa samoin kuvausmenetelmin kuin kirjanpainajatuhojakin.
- Ytimennävertäjät kykenevät asuttamaan useita mäntylajeja ja satunnaisesti myös kuusia. Pystynävertäjä on puutavaran mukana kulkeutunut mm. Pohjois-Amerikkaan, missä se on voimakkaasti leviävä vieraslaji.
- Ilmastonmuutos voi hyödyttää ytimennävertäjiä (yleistyvät tuulenkaadot, pitkäkestoiset kuivuusjaksot); iskeymät yleistyvät kohteilla noin vuoden viipeellä.
- Lehtipuusekoitus vähentää ytimennävertäjätuhoja.
- Tuhoja voidaan vähentää myös syöttipuvin ja feromonein. Myös jotkin kasvipohjaiset yhdisteet vähentävät ytimennävertäjien syöntiä käsitellyillä puilla.
- Ytimennävertäjillä on laaja seuralaislajijoukko, joista osa on niille hyödyllisiä, osa haitallisia.
- Ytimennävertäjät hyötyvät versosurmaepidemioista. Toisaalta Espanjassa pystynävertäjän iskeymät altistavat montereynmäntyjä etelänversosurmalle. Suomessa toistaiseksi tapaamaton, EU:n karanteenituhoojalistalla oleva pihkakoro asuttanee puita kaarna-kuoriaisten, kuten ytimennävertäjien, sisäänmeno- ja ulostuloreikien kautta.

Tukkimiehentäi:

- Tukkimiehentäitutkimus on viime vuosina keskittynyt voimakkaasti torjunta- ja taimien suojauskeinoihin.
- Tukkimiehentäille kelpaavat kuusen ja männyn taimet, mutta myös monen muun puusuvun taimet. Kelpaavuuteen vaikuttavat taimien ikä, kuivuus- tai muu stressitekijä, geneettinen alkuperä ja näiden vuorovaikutukset.
- Ilmaston lämpeneminen oletettavasti parantaa tukkimiehentäin talvehtimisen onnistumista, lisääntymistä ja yksilöiden kasvua. Yleistyvät kuivuusjaksot luultavasti heikentävät taimia ja altistavat niitä tukkimiehentäille.
- Kantojen ja hakkuutähteen korjuu sekä koneellinen maanmuokkaus vähentävät tukkimiehentäin taimiin kohdistamaa syöntiä.
- Taimikoiden lehtipuusekoitus sekä isompikokoiset istutustaimet vähentävät tukkimiehentäin taimisyöntiä.
- Erilaiset vaha-, hiekka- ja liimapinnoitteet suojaavat taimia tehokkaasti.
- Eräät kasvien tuottamat ja muut orgaaniset yhdisteet, kuten metyylijasmonaatti, vähentävät käsiteltyihin taimiin kohdistuvaa syöntiä.
- Eräiden sukkulamatojen liuokset voivat kantokäsittelynä vähentää tukkimiehentäitä jopa yli 90 %. Myös monien sienilajien torjuntatehoa on tutkittu viime vuosina paljon.

Mäntypistiäiset:

- Suomen 18 havupistiäislajista taloudellisesti merkittävimpiä ovat rusko- ja pilkkumäntypistiäinen.
- Kasvun heikkeneminen neulasten syönnin seurauksena voi olla huomattava; Ranskassa havaittiin pilkkumäntypistiäisen aiheuttama 27–92 % alenema paksuuskasvussa. Tähänastiset suomalaisarviot ovat olleet maltillisempia, esimerkiksi 4–40 %.

- Pilkku- ja ruskomäntypistiäinen hyötynee kuivista ja lämpimistä kesistä sekä lauvoista talvista.
- Maailmalla mäntypistiäisten torjunnassa on käytetty mm. asetamipridipohjaista Mospi-lania ja pyrethrumia. Ruskomäntypistiäisen torjunnassa voitaisiin käyttää lajista eristet-tävää monisärmiövirusta, jos se olisi edelleen hyväksytty EU:ssa tehoaineena.
- Eräistä mäntypistiäisten elimistöstä eristetyistä bakteereista on mahdollista kehittää biologisen torjunnan työkaluja.
- Laserkeilauksella voidaan päästä kohtalaiseen tarkkuuteen mäntypistiäistuhokohteiden ja yksittäisten tuhopuidenkin tunnistamisessa.

Havununna:

- Havununna on levittäytynyt maassamme viime vuosikymmeninä nopeasti pohjoisem-maksi.
- Havununnan ravintokasvikirjo sisältää mm. pääpuulajimme ja esimerkiksi mustikan.
- Puuston yksipuolisuus, yhden tai kahden puulajin voimakas dominointi ja puiden nuo-ruus altistavat havununnatuholle.
- Havununnatuhon etenemistä on mahdollista seurata satelliittikuva- ja muilla kaukokar-toitusmenetelmillä. Infrapuna- ja lämpöantureilla on mahdollista karkealla tasolla ha-vainnoida alkavaa defoliaatiota.
- Vuotuinen keskilämpötila vaikuttaa sademäärää enemmän tuhotodennäköisyyteen. Ilmaston lämpeneminen näyttää jo nyt hyödyttäneen havununnaa, mutta tuhot ovat Suomessa edelleen harvinaisia.
- Monet sien-, bakteeri- ja viruslajit näyttävät ainakin laboratoriokokeissa tappavan ha-vununnan toukkia; Venäjältä on myös viitteitä siitä, että havununnan massaesiintymän loppuvaiheessa eräät virukset yleistyvät merkittävästi.
- Havununnan (ja monen muun puita heikentävän tai tappavan lajin) massaesiintymät muuttavat esimerkiksi kohteen maaperän sienilajistoa ja voivat kasvattaa hiilidioksi-di-päästöjä.
- Havununnan ohella kannattaa huomioida myös lehtinunna, jolla on potentiaalia laaja-mittaistenkin puustokuolemien aiheuttamiseen. Sen ravintokasvikirjo on huomattavan laaja; maailmalta niitä tunnetaan yli 500. Lajia on tutkittu erityisen runsaasti Pohjois-Amerikassa, missä se on 1800-luvun tuontilaji ja aiheuttanut laajoja puuston joukko-kuolemia.

3.2. Kirjanpainaja

3.2.1. Kirjanpainaja puustotuhojen aiheuttajana

Kaarnakuoriaisista (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) kirjanpainaja (*Ips typographus* L.) on metsätaloudessa kuusille vakava tuhona aiheuttaja, koska puut, joihin kirjanpainajat ovat onnis-tuneesti iskeyntyneet, kuolevat (Christiansen & Bakke 1988). Kirjanpainajan levinneisyysalue kattaa koko kuusen levinneisyysalueen Suomessa, mutta laji on harvalukuisempi pohjoisessa kuin etelässä.

Kirjanpainajat parveilevat ensimmäisen kerran keväällä, kun päivälämpötilat saavuttavat +18 astetta (Annala 1969). Jo tätä ennen osa talvehtineista kuoriaisista on lähtenyt liikkeelle etsi-mään sopivaa lisääntymismateriaalia ennen pääparveilun alkua (Annala 1969). Löydettyään

sopivan isäntäpuun koiraat vapauttavat ilmaan houkutusainetta eli feromonია, jota aistiessaan yksilöt ohjautuvat iskeytymään samoihin puuyksilöihin ja siten murtamaan kuusen puolustautumista (Wermelinger 2004). Kun kirjanpainajan yksilöitä on vähän, ne käyttävät puolustukseltaan heikkoja puita hyväkseen, jolloin ne iskeytyvät vahingoittuneisiin, kuten tuulenkaatamiin, salaman iskemiin tai muutoin vioittuneisiin kuusiin. Myös riittävän ankarasta kuivuudesta ja valoshokista kärsivät kuuset ovat heikentyneitä ja houkuttelevampia kirjanpainajille kuin hyväkuntoiset puut (Wermelinger 2004). Laji iskeytyy myös tuoreeseen kuorelliseen kuusipuutavaraan, joka on varastoitu metsään tai tien varteen.

Aikuiset kirjanpainajat kaivautuvat kuusen kuoren alle lisääntymään. Koiraat houkuttelevat naaraita, yleensä yhdestä kolmeen koirasta kohti, parittelemaan ja kaivamaan emokäytävät kuoren alle nilaan. Naaraat munivat käytävien varrelle, ja munista kuoriutuvat toukat kaivamaan omat käytävänsä. Kirjanpainajan emo- ja toukkakäytävät katkovat puun nilayhteyden vaikeuttaen yhteyttämistuotteiden kuljetusta juuristoon (Netherer ym. 2021). Muiden kaarnakuoriaisten tavoin kirjanpainaja kuljettaa puuhun mukanaan sinistäjäsiemen, joka kasvaa mantopuussa häiriten puun vedenkuljetusta (Furniss ym. 1990, Hornvedt ym. 1983). Kuljettamien sienien avulla kirjanpainaja heikentää puiden puolustautumiseen liittyvien terpeenien ja fenoleiden haittavaikutuksia (Zhao ym. 2019).

Jos tuulenkaatoja tai kuivuuden kiusaamia kuusia on runsaasti, kirjanpainaja runsastuu ja alkaa aiheuttaa joukkoesiintymiä. Yksilömäärän kasvun ja feromoneihin perustuvan viestinnän avulla laji pystyy tuolloin valtaamaan eläviä, hyväkuntoisiakin puita. Ilmaston lämpenemisen ennustetaan lisäävän kirjanpainajan aiheuttamaa riskiä kuusille metsätaloudessa mm. kolmen mekanismin kautta. Lämpö lisää kirjanpainajan kehitysnopeutta munasta aikuiseksi ja samalla kirjanpainajan kehityksen mahdollistava kausi pitenee. Kirjanpainajakin ehtii tekemään enemmän kuin yhden sukupolven kesän aikana, sisarsukupolvi on jo nyt yleistynyt ja tulevaisuudessa myös toisen sukupolven aikuistuminen ennen talvea mahdollistuu osassa Suomea (Venäläinen ym. 2020). Ilmaston lämmitessä helteiset, vähäsateiset kesät aiheuttavat aiempaa enemmän ongelmia pintajuurisille kuusille. Lämmön myötä lisääntynyt haihdutus ja maaperän kuivuus saa kuusen sulkemaan ilmarakonsa, jolloin puun kyky sitoa hiiltä heikkenee ja samalla hiilipohjaisten puolustusyhdisteiden (terpeenit ja fenolit) tuotanto hiipuu (Netherer ym. 2021). Erityisesti puiden pihka koostuu näistä yhdisteistä toimien puolustuskeinona kuoren alle yrittäviä kaarnakuoriaisia vastaan, joten lämpö ja kuivuus lisäävät kirjanpainajalle alttiiden kuusien määrää. Lisäksi talvet leutonevat ja routa vähenee, jolloin huonosti ankkuroituneet pintajuuriset kuuset ovat herkkiä tuulituhoille (Kellomäki ym. 2010), minkä seurauksena kirjanpainajalle syntyy riittävästi lisääntymismateriaalia pitämään yksilömäärät korkeina.

Toistaiseksi kirjanpainajan aiheuttamat puustotuhot ovat olleet Suomessa maltillisia verrattuna Keski-Euroopassa ja naapurimaa Ruotsissa havaittuihin puustoon kohdistuviin tuhoihin. Keski-Euroopan mittavista tuulituhoista ja kuumuudesta sekä kuivuudesta seuranneet kirjanpainajatuhot ovat osoittaneet, että puuston kuolleisuus sekoittaa puumarkkinat ja johtaa pahimmillaan niiden tukkeentumiseen (Hlásny ym. 2021). Tuolloin metsänomistajat eivät saa tuhopuitaan kaupaksi, hakkuut viivästyvät ja tuho etenee lisäten ongelmia entisestään. Kirjanpainajan tappamien kuusien tilavuutta on Euroopassa rinnastettu osuuteen vuotuisesta hakkuukertymästä, mutta Suomessa tällainen vertailu ei ole vielä aiheellinen (Viiri ym. 2019).

3.2.2. Kirjanpainajan torjunta on ennaltaehkäisyä

Kirjanpainajan aiheuttamia puustotuhoja on torjuttava niitä ennaltaehkäisemällä pyrkien hillitsemään kannan paikallista kasvua. Näistä toimista koostuu kustannuksia metsäalan toimintaan puutavaran käyttäjille, puutavaran kuljettajille ja metsänomistajille.

Laki metsätuhojen torjunnasta (1087/2013) vaatii kuljettamaan kuorellisen kuusipuutavaran erillisellä valtioneuvoston asetuksella (1281/2021) säädetyillä alueilla laissa määrättyihin päivämääriin mennessä pois hakkuupaikalta tai välivarastosta. Kuljetusketjussa tulee jonkin verran kustannuksia, kun puutavarakuljetusten aikarajoista kiinnipitäminen edellyttää tarvittaessa lisäterminaalien järjestämistä, jotta puut saadaan pois metsästä.

Metsätuholain 4§:ssä listataan myös vaihtoehtoisia menetelmiä, jos puutavaran poiskuljetus ei onnistu määräaikoihin mennessä. Myös nämä toimenpiteet aiheuttavat kustannuksia puutavaran kuljetusketjulle, josta ne siirtyvät loppukäyttäjälle. Vaihtoehtoisia toimenpiteitä kuusipuutavaran korjaamiselle ovat esimerkiksi vain puutavarapinon pintaosan poiskuljetus määräkseen mennessä tai puutavarapinon peittäminen lehtipuukerroksella. Tässä yhteydessä mainitaan myös mahdollinen kasvinsuojeluaineen käyttö, josta siitäkin koituu kustannuksia. Kasvinsuojeluaineineen käyttö kohdistuu ainoastaan tilanteisiin, joissa tiedetään ennen kirjanpainajan parveilua, ettei kuorellista puutavaraa pystytä kuljettamaan pois metsästä tai välivarastosta ennen metsätuholain säätämiä ajankohtia ja ruiskutus tehdään ennen kirjanpainajan ensimmäistä parveilua. Tavoite on suojella ympäröivää puustoa, ei itse puutavaraa.

Metsätuholaki vaatii korjaamaan yli 10 m³/ha ylittyvän määrän vahingoittunutta kuusta, josta tuhonaiheuttajat voivat levitä, pois metsästä. Käytännössä tämä on tarkoittanut tuoreita tuulenkaatoja. Myös kirjanpainajan valtaamat vielä vihreälatvaiset pystypuut ovat poistettavia puita lain määritelmän mukaan. Yksittäisten tai pienten puuryhmien korjaaminen on kallista. Tällainen kirjanpainajan torjunta ennakkoon pyrkien pitämään lisääntymismateriaalin vähäisenä ja siten kannat alhaisena aiheuttaa myös kustannuksia metsänomistajalle. Toisaalta ripeällä toiminnalla voi onnistua välttämään esiintymän synnyn tai sen laajentumisen. Tuulituhon kaadettua runkoja metsänomistajan kannattaa korjata ne puutavaran pelastamiseksi mahdollisimman pian. Metsänomistaja voi onnistua myymään kaatuneet rungot ennen kuin hyönteiset ja niiden mukana tullut sinistymä pilaavat ne tai hän saa korvauksen omasta metsävakuumuksesta. Metsänomistaja voi jättää 10 m³/ha tuulenkaadoista metsään kehittymään lahopuiksi. Hänellä on kuitenkin lain velvoite toimia yli 10 m³ ylittävän osan suhteen.

Jos pystyttäisiin tunnistamaan pystypuut, joissa kirjanpainajat ovat kehittymässä, niiden ripeällä poistolla voitaisiin ehkäistä uuden sukupolven leviämistä ympäröiviin puihin (Kuva 3). Nämä puut pitäisi huomata, kaataa ja siirtää riittävän kauaksi kuusimetsistä (~500 m) ennen kuin niistä kuoriutuu metsään uusi sukupolvi. Vaihtoehtona on tällaisten puiden kuorinta siinä määrin, että nila kuivuu kirjanpainajien ollessa vielä toukkavaiheessa. Tällaiset pienimuotoiset toimenpiteet ovat työläitä ja kalliita toteuttaa ja onnistuvat käytännössä vain metsänomistajan omalla työpanoksella.

Metsänhoidollisena torjuntakeinona on huolehtia puuston hyvästä kunnosta, jolloin kuusien puolustautuminen kirjanpainajaa vastaan ei heikentyisi. Puhtaiden kuusikoiden osuutta maisemassa tulisi vähentää ja suosia lehtisekapuustoa sekä lehtipuumetsiä. Kuusia ei kannata kasvattaa liian kuivilla ja karuilla kasvupaikoilla. Kuusikon harvennukset oikein ajoitettuina pitävät huolta, että kuusen latvukset eivät pääse supistumaan liiaksi. Sen sijaan, jos kuusien latvukset ovat päässeet supistumaan tiheässä kasvusasennossa, harvennus voi altistaa

metsikköä kirjanpainajalle välittömästi toimenpiteen jälkeen. Kuusikon harvennuksen tuomaan riskiin vaikuttaa alueen kirjanpainajakannan suuruus. Harvennus muuttaa välittömästi olosuhteita kirjanpainajalle suotuisimmiksi, koska metsikön lämpötila kohoaa, ja valoisuus lisääntyy. Puut eivät ole vielä sopeutuneet uusiin olosuhteisiin. Harvennus lisää myös tuulenkaatoriskiä.



Kuva 3. Esitys kirjanpainajan elinkierrosta suhteessa puuston oireisiin ja ohjeelliseen kirjanpainajan valtaaman puuston poistoon, jolla lajin leviämistä pyritään ehkäisemään. Kuvitus: Luonnonvarakeskus/KMG Turku.

3.2.3. Aineistolähteet kirjanpainajatuhojen ja kirjanpainajan esiintymisestä Suomessa

Kirjanpainajatuhoista tai kirjanpainajan esiintymisestä on Suomessa saatavana tietoa kolmesta lähteestä: valtakunnan metsien inventoinnista (VMI), Suomen metsäkeskuksen vastaanottamista metsäkäyttöilmoituksista ja kirjanpainajan feromonipyydyksin tehtävästä kannan- ja parveilunseurannasta.

Valtakunnan metsien inventoinnissa (VMI) kirjataan koealojen kuvioilta puustotunnusten lisäksi havaitut puustoon kohdistuneet tuhot. Tästä aineistosta saadaan arvioitua tuhojen esiintymistä VMI:n koealaverkolla. VMI:n koealakuvioille määritetään tuhot puusto-ositteittain, eli kullekin puustojaksolle ja puulajille. Tuhoista merkittävin kirjataan koealakuvion päätuhoksi. Tuhoille kirjataan myös aiheuttaja, ilmiasu, alkamisajankohta ja aste. Näistä tuhon aste kuvaa tuhon vakavuutta, kaikki kuviolle kirjatut tuhot huomioiden, toisin sanoen tuhon vakavuutta ei arvioida kullekin tuholle erikseen silloin, kun tuhoja on useita. Tuhon asteiden luokitus on seuraava:

Lievä tuho ei ole muuttanut metsikön laatua tai kehitysluokkaa eikä lisännyt jo aiemmin vajaatuottoisen metsikön vajaatuottoisuutta.

Todettava tuho on alentanut metsikön laatua yhdellä luokalla tai lisännyt jo aiemmin vajaatuottoisen metsikön vajaatuottoisuutta. Tuho ei kuitenkaan ole muuttanut metsikön kehitysluokkaa, poikkeuksena ylemmän jakson tuhoutuminen jo taimikoksi kehittyneen alikasvoksen päältä.

Vakava tuho aiemmin kehityskelpoisessa metsikössä on merkinnyt metsikön laadun huononemista enemmän kuin yhdellä luokalla tai metsikön kehitysluokan muuttumista uudistusalaksi. Jo aiemmin vajaatuottoisessa metsikössä tuho on lisännyt vajaatuottoisuutta olennaisesti.

Täydellinen tuho merkitsee, että metsikkö on uudistettava heti.

Kaikista aiotuista hakkuutoimenpiteistä on annettava Metsäkeskukselle metsäkäyttöilmoitus. Metsäkäyttöilmoitukseen kirjataan syykoodi ”hyönteistuhon”, jos suunniteltu hakkuu on puustoon kohdistuneesta hyönteistuhosta johtuva. Osa ilmoittajista kirjaa ilmoituksen tarkemmalla koodilla ”kirjanpainaja”, jos kyse on nimenomaan kirjanpainajan aiheuttamasta puustotuhosta. Ilmoitukset jättää tavallisesti puunostaja tai leimikon suunnittelija. Ilmoitukset kertovat tuhosta metsikkötasolla. Tietoa siitä, kuinka paljon kirjanpainaja oli tappanut kuusia kyseisessä leimikossa, ei kirjata.

Luonnonvarakeskus yhdessä Suomen metsäkeskuksen kanssa sekä muutamien vapaaehtoisten tahojen (metsänhoitoyhdistykset ja oppilaitokset) järjestävät vuosittain kirjanpainajamäärien seuraamiseksi standardoidun feromonipyydyksiin perustuvan mittauksen, jolla pyritään ennakoimaan tuhoriskiä sekä saamaan käsityksen kirjanpainajan runsaudesta eri puolilla Etelä- ja Väli-Suomea. Aineistoa ei voi käyttää puuston kuolleisuuden mittarina, ainoastaan indikaattorina alueen tuhoriskille, tiukasti tulkittuna paahteisten avohakkuiden reunametsien osalta (Weslien 1992, Lindelöw & Schroeder 2001).

3.2.4. Kirjanpainajatuhojen esiintyminen valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) mukaan

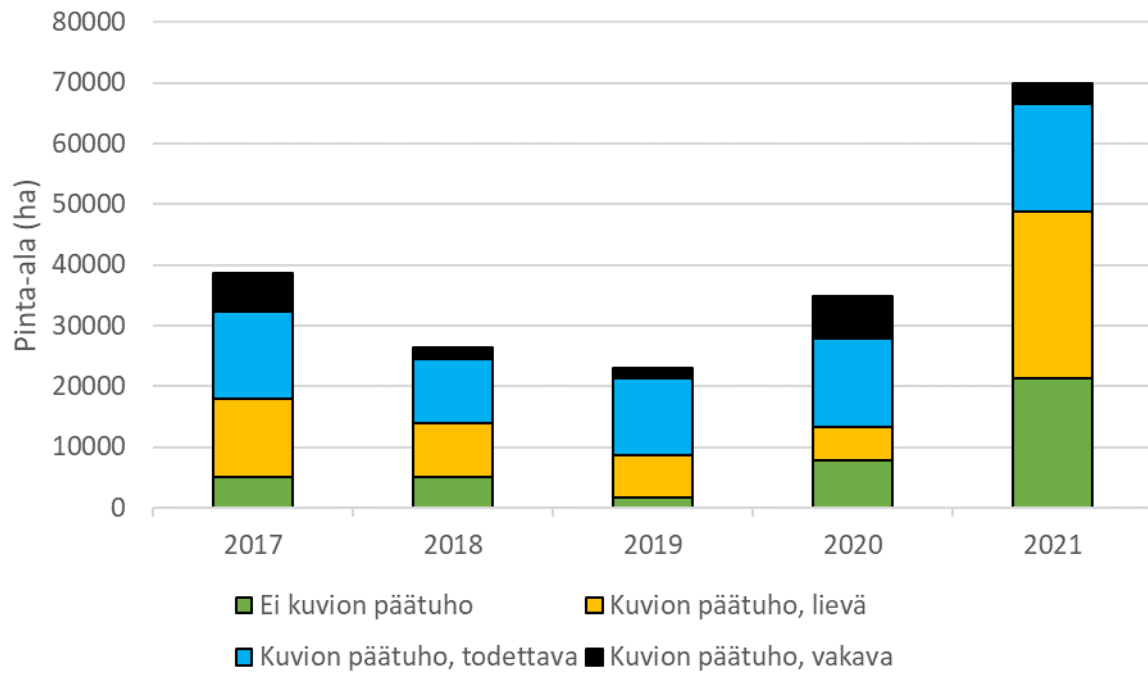
VMI 12 ja 13 tehtyjen havaintojen perusteella laskettiin kirjanpainajatuhojen kokonaispinta-alat niiden koealojen perusteella, joilla kirjanpainaja on havaittu joko kuvion päätuhona tai ei. Vuonna 2017 kirjanpainaja havaittiin puuston päätuhona 33 680 hehtaarilla, vuonna 2018 21 200 hehtaarilla, 2019 21 300 hehtaarilla, vuonna 2020 27 100 hehtaarilla ja vuonna 2021 48 500 hehtaarilla, mutta vakavat tuhot, jotka todennäköisesti johtaisivat metsikön uudistamiseen, olivat alhaisemmat, keskimäärin 4 000 ha/v (Taulukko 6, Kuva 4).

VMI ei mittaa kuviolta kirjanpainajaesiintymän laajuutta kuten esimerkiksi kirjanpainajapuiden lukumäärää tai osuutta. Tätä pyrittiin arvioimaan kuitenkin siten, että valittiin ne VMI12:n pysyvät koealat, joille oli kirjattu kirjanpainajatuho kuvion päätuhona ja valtapuuna oli kuusi sekä joilla oli lisäksi mitattu käyttökelpoisen kuolleen puun tilavuus puulajeittain (koealoja kertyi yhteensä 33). Tehtiin oletus, että kuvion kuolleet vielä käyttökelpoiset kuuset olisivat nimenomaan kirjanpainajan tappamia. Sitten laskettiin kuvion kuusien elävien puiden keskitilavuus ja kuvion kuolleiden kuusien keskitilavuus, joiden perusteella arviointiin kuinka monta prosenttia kuusien tilavuudesta oli mahdollisesti kirjanpainajan tappamaa. Elävien kuusien keskitilavuudeksi saatiin 175,2 m³ ja kuolleiden kuusien keskitilavuudeksi 36,9 m³, jolloin näillä kuvioilla kuusipuuston tilavuudesta oli kuollut 17 %.

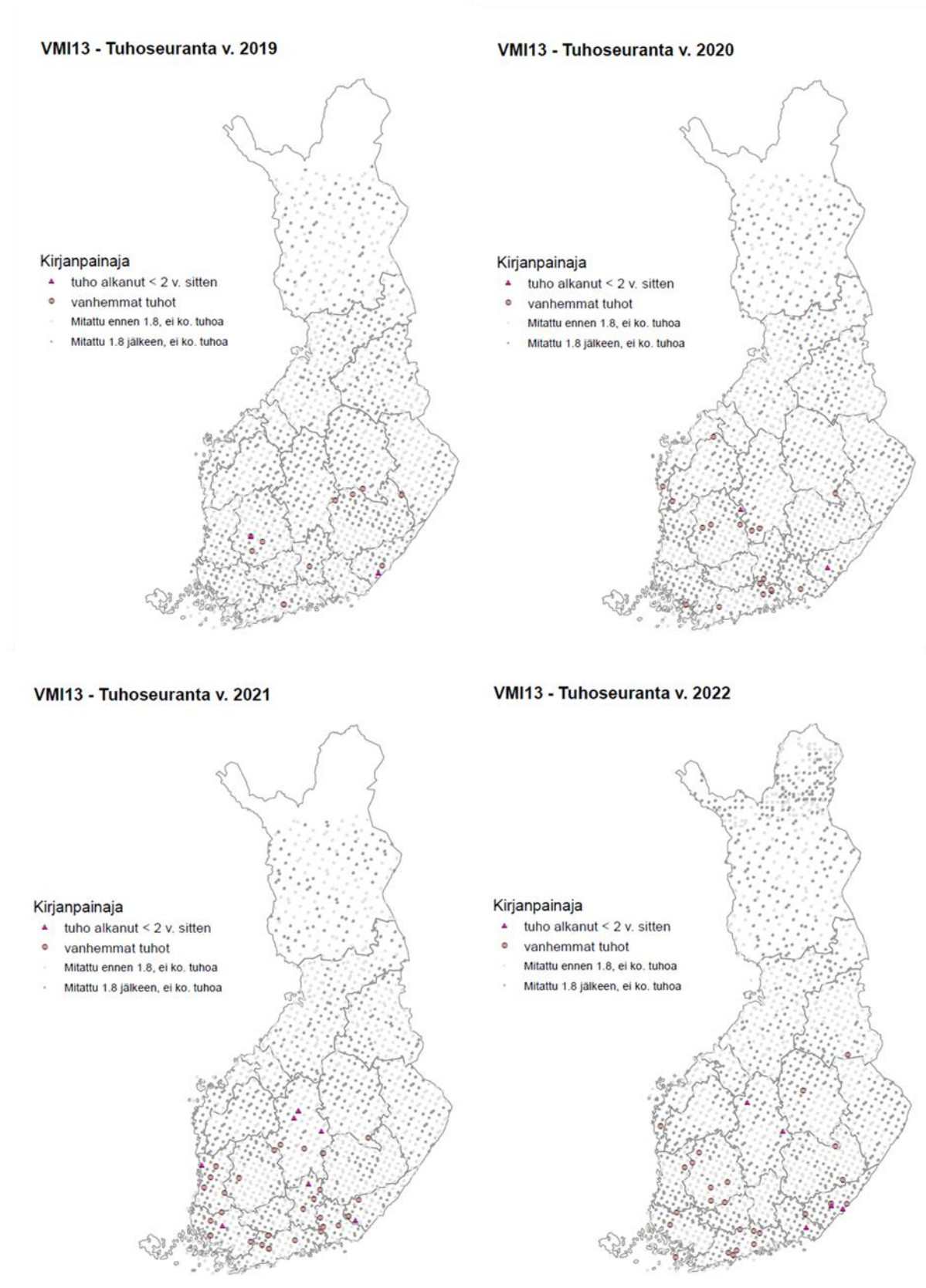
VMI:n vahvuus on sen luotettavuus tarkoin määritellyn otannan vuoksi. Kun kirjanpainajatuho saa alkunsa, se voi jatkua samana esiintymänä useamman vuoden. Tämän vuoksi VMI-koealan kuviolla kyseessä voi olla inventointivuonna alkanut puustotuho, tai edellisenä vuonna alkanut tuho, joka ei ole jatkunut, tai tätä vanhempi tuho, joka on joko päättynyt tai laajentunut. VMI:n tuloksia raportoidessa kirjanpainajatuhot luokitellaan alle kaksi vuotta sitten alkaneiksi tai tätä vanhemmiksi (Kuva 5). Otanta, joka on suunniteltu puuston tilavuuden inventointiin, sopii vain osittain erilaisten puustotuhon kuten kirjanpainajan havainnointiin. Mm. mittausajankohta tuo epävarmuutta tuhon ja sen laajuuden havaitsemiseen. Kunakin vuonna osa kuvioista inventoidaan alkukesällä, jolloin uusi alkava kirjanpainajaesiintymä arvioidaan lieväksi, vaikka se kesän myötä kasvaisi. On myös mahdollista, että koealan kuvion tuore avohakkuuala on ollut kirjanpainajaesiintymä, josta ei siten saada merkintää eikä mittauksia.

Taulukko 6. Kirjanpainajan aiheuttamat tuhopinta-alat vuosina 2017–2021 jaettuna sen mukaan, onko tuho ollut kuvion päätuho vai ei, ja jos on ollut, myös tuhon vakavuuden mukaan. Lähde: VMI (Ahvenanmaata ja Ylä-Lappia ei ole huomioitu).

Vuosi	Tuhoala (ha)			
	Ei kuvion päätuho	Kuvion päätuho		
		Lievä	Todettava	Vakava
2017	5 000	12 900	14 480	6 300
2018	5 100	8 800	10 700	1 700
2019	1 700	7 000	12 600	1 700
2020	7 700	5 600	14 600	6 900
2021	21 400	27 500	17 600	3 400



Kuva 4. Kirjanpainajan tuhopinta-alat vuosina 2017–2021 jaettuna sen mukaan, onko tuho ollut kuvion päätuho vai ei, ja jos on ollut, myös tuhon vakavuuden mukaan. Lähde: VMI (Ahvenanmaata ja Ylä-Lappia ei ole huomioitu).



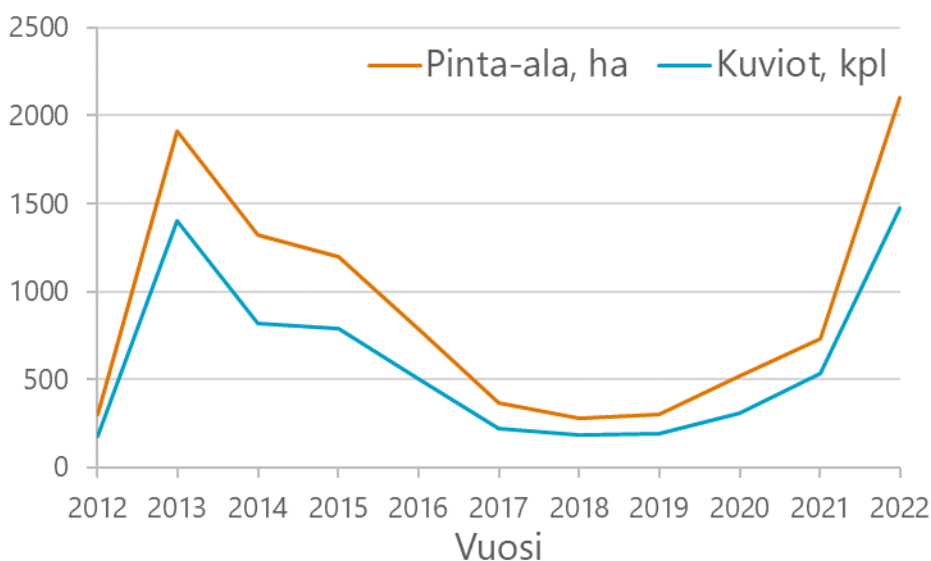
Kuva 5. VMI 13 -koealoilla havaittujen kirjanpainajan aiheuttamien puustotuhojen sijainnit kartoilla neljänä peräkkäisenä vuotena (2019–2022). Lähde: VMI.

3.2.5. Kirjanpainajatuhojen esiintyminen Metsäkeskuksen hyönteistuhohakkuuilmoitusten perusteella

Kirjanpainajatuhojen esiintyvyyttä tarkasteltiin Metsäkeskuksen vastaanottamien metsänkäyttöilmoitusten avulla ajalta 1.1.2012 – 31.12.2022. Mukaan otettiin ilmoitukset, joissa pääpuulajina mainittiin kuusi ja hakkuu oli kirjattu hyönteistuhohakkuuksi (syykoodi 1600 hyönteistuhon tai 1602 kirjanpainaja). Näistä valtaosa on kirjanpainajan aiheuttamia, mutta joukossa voi olla pieni osa muiden kaarnakuoriaisten, kuten kuusentähtikirjaajan (*Pityogenes chalcographus*) ja aitomonikirjaajan (*Polygraphus poligraphus*) aiheuttamia. Näistä ensimmäiseksi mainittu esiintyy tyypillisesti pienemmissä kuusissa kuin kirjanpainaja tai yhdessä kirjanpainajan kanssa, jolloin laji elää puun latvaosissa ohuen kuoren alueella.

Havainnot ladattiin Metsäkeskuksen latauspalvelusta tammikuussa 2023. Niitä oli yhteensä kaikkiaan 6672 kuviota. Vuoden 2012 alusta vuoden 2022 loppuun mennessä kirjanpainajan aiheuttamia metsänkäyttöilmoituksia oli tehty 9 813 hehtaarille (Kuva 6). Kullekin kuviolle oli ilmoitettu hakkuupinta-alan lisäksi kasvupaikkatyyppi, maalaji ja puuston kehitysluokka vain muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Lähes 70 prosentilla kuvioista oli lisäksi kirjattu myös arvio puuston iästä ja keskiläpimitasta.

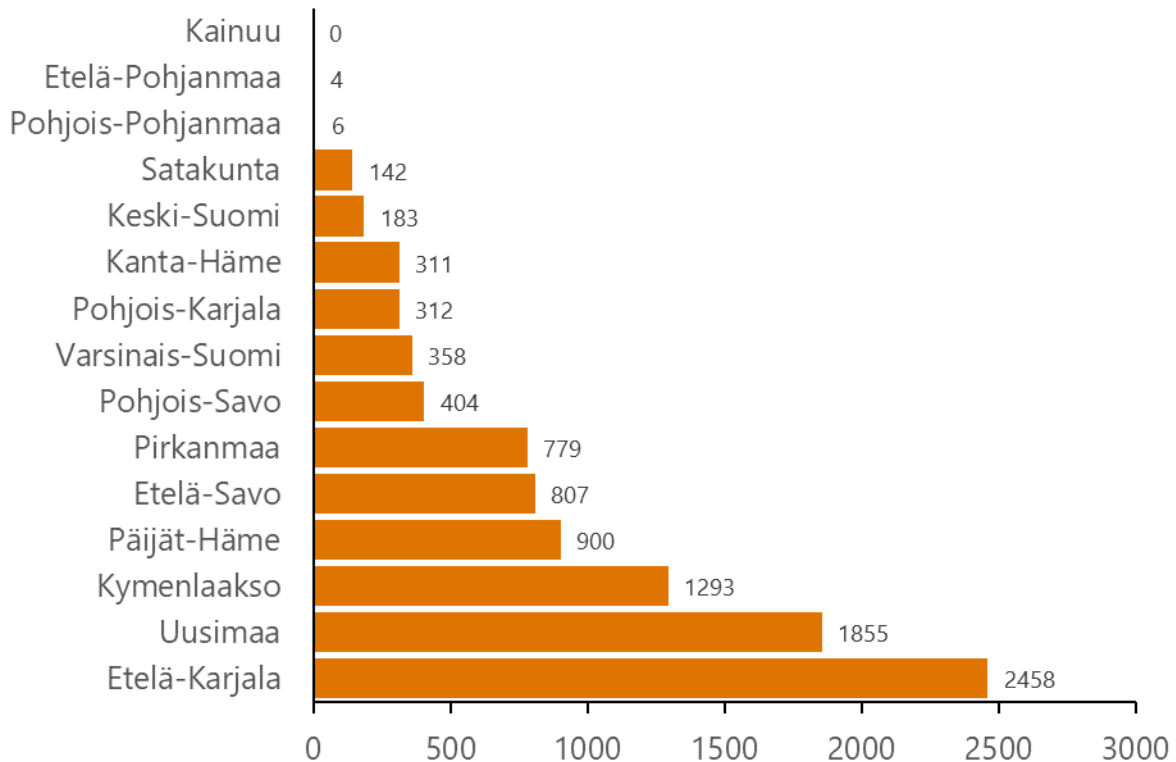
Metsänkäyttöilmoituksista ei käy ilmi, kuinka paljon hakkuualalla on kirjanpainajan vioittamia puita tai milloin tuho on alkanut suhteessa annettuun metsänkäyttöilmoitukseen. Toisin sanoen tuhon laajuutta ja siten vakavuutta metsikölle ei voida arvioida aineiston perusteella.



Kuva 6. Hyönteistuhon vuoksi jätetyt metsänkäyttöilmoitukset, kun pääpuulajina on ollut kuusi vuosina 2012–2022 hehtaareina ja kuviomäärinä. Lähde: Metsäkeskus.

Kirjanpainajan vaikutus lisääntyi Suomen metsissä vuodesta 2010 alkaen (Kuva 6), jolloin oli sekä poikkeuksellisen lämmintä ja ukkosmyrskyjä (mm. Asta ja Veera) (Viiri ym. 2011), minkä vuoksi kirjanpainajan aiheuttamat tuhot yleistyivät ja olivat huipussaan 2013 (Viiri ym. 2011). Tuhon esiintyvyys kääntyi tämän jälkeen laskuun aina vuoteen 2017 asti. Vuoden 2018 taitekohdan jälkeen kirjanpainajan takia tehtyjen hakkuiden määrä alkoi nousta, ja vuonna 2022 niiden määrä on yltänyt vuoden 2013 tasoon (Kuva 6).

Yli puolet (57 %) hyönteistuhohakkuista sijoittui kolmen maakunnan alueelle: Etelä-Karjalan (25 %), Uudenmaan (19 %), ja Kymenlaakson (13 %) alueelle (Kuva 7). Päijät-Hämeen (9 %), Etelä-Savon (8 %) ja Pirkanmaan maakunnissa (8 %) tuhohakkuista oli jokaisessa suunnilleen sama määrä (Kuva 7). Sen sijaan lounaassa, lännessä ja pohjoisen suuntaan siirryttäessä kirjanpainaajan tuhoja on ilmoitettu hakattavaksi selvästi vähemmän (Kuva 7).



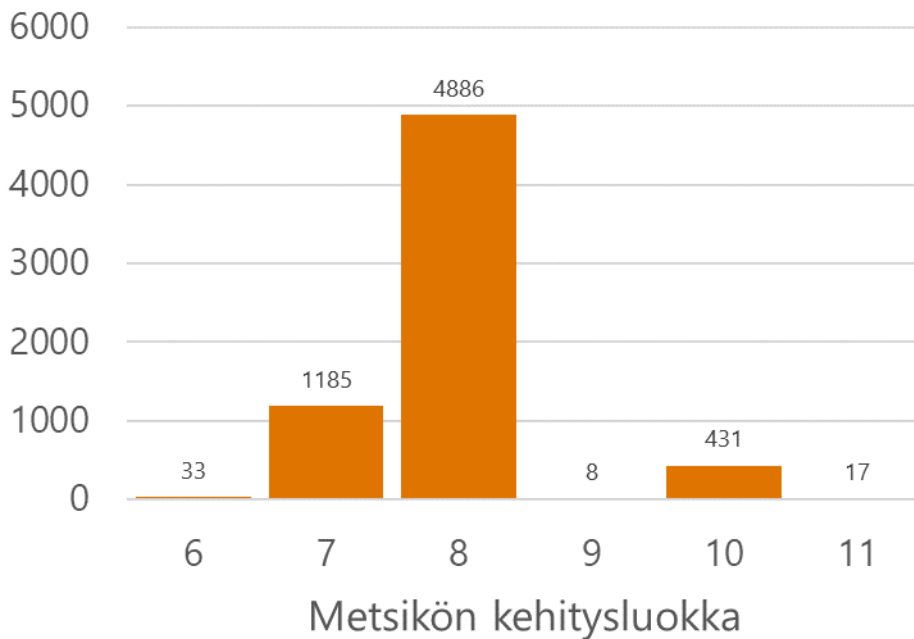
Kuva 7. Metsänkätöilmoitukset maakunnittain yhteensä vuosina 2012–2022 metsikkökuvioilta, joissa pääpuulaji oli kuusi ja ilmoitus on merkitty hyönteistuhokoodilla. Lähde: Metsäkeskus.

Tarkasteluajanjaksolla hyönteistuhon vuoksi ilmoitetuista hakkuukohteista vain 4 % (5 % pinta-alasta) oli turvemilla. Yli puolet (63 %) kivennäismaiden kohteista oli tuoreilla kankailla (5 868 ha) ja kolmannes (32 %) lehtomaisilla kankailla (3 126 ha), jotka ovat kuusen tavallisia kasvupaikkoja. Kuivahkoilla kankailla tai sitä karummilla kasvupaikoilla hakkuuilmoituksia oli 355 hehtaarilta ja lehdoista 45 hehtaarilta.

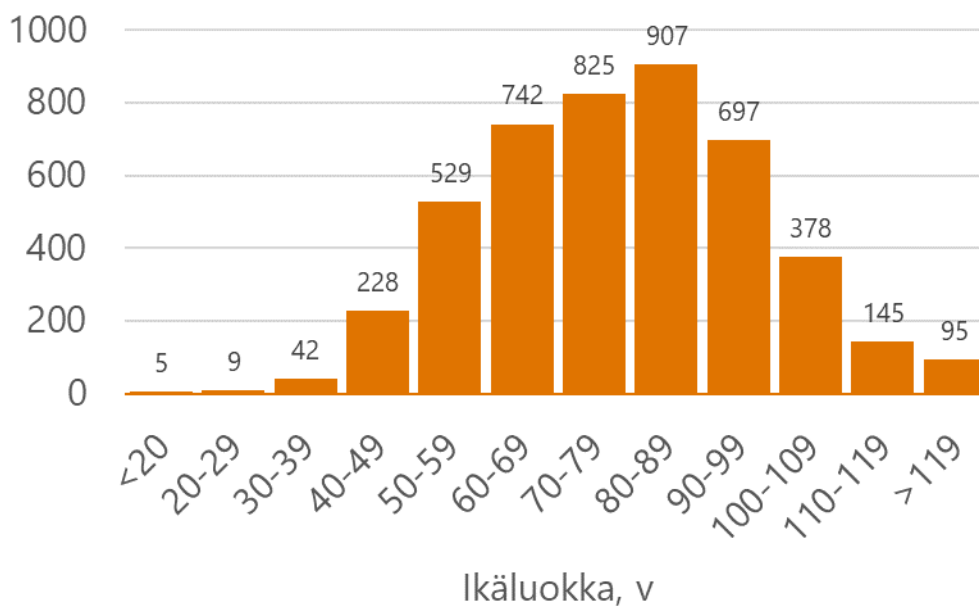
Kirjanpainaajan puustotuhot olivat johtaneet eniten hakkuupäätöksiin metsiköissä, jotka olivat jo metsätaloudellisesti uudistuskypsiä (Kuva 8). Kirjanpainaajat suosivat 70–100-vuotiaita kuusia (Wermelinger 2004) ja Metsäkeskuksen metsänkätöilmoitukset vahvistavat havainnon: hakkuukohteiden puusto oli sekä iäkästä ja läpimitaltaan järeää (Kuvat 9–10). Kirjanpainaaja on todennäköisesti antanut sysäyksen ryhtyä metsänuudistamiseen. Valtaosa ilmoituksista koski uudistushakkuista (97 %).

Kirjanpainaajan esiintyminen liittyy vuotuisiin lämpösummiin (Kuva 11) ja laji voi iskeytyä myös nuorempiin kuusiin, jos kanta on korkealla eikä lähialueelta löydy paksumpinilaista kuusta (Kuva 9). Ilmoituksissa on mukana jonkin verran pienempään puustoon ja nuorempiin

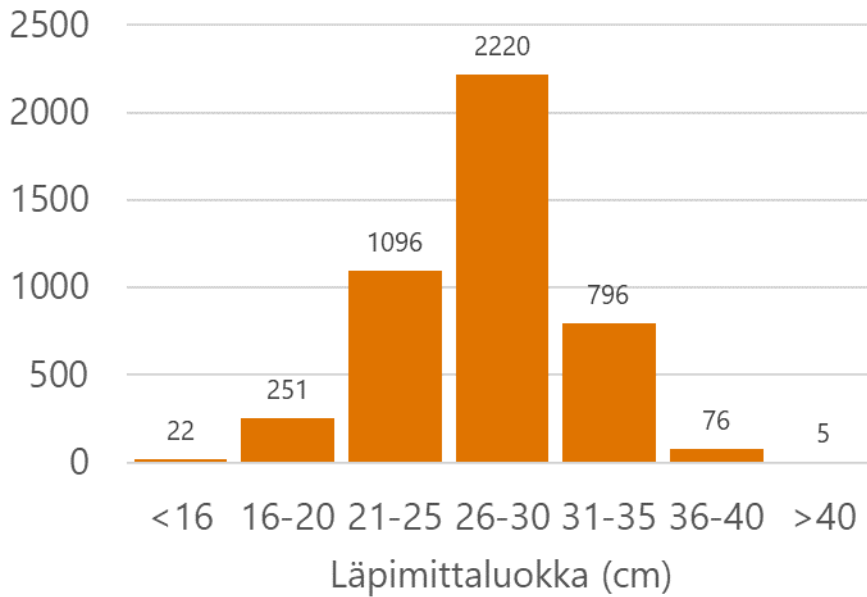
metsiköihin kohdistuneita hakkuita. On todennäköistä, että osassa näissä kohteissa kuusissa tuhonaiehtajana on ollut esimerkiksi kuusentähtikirjaaja.



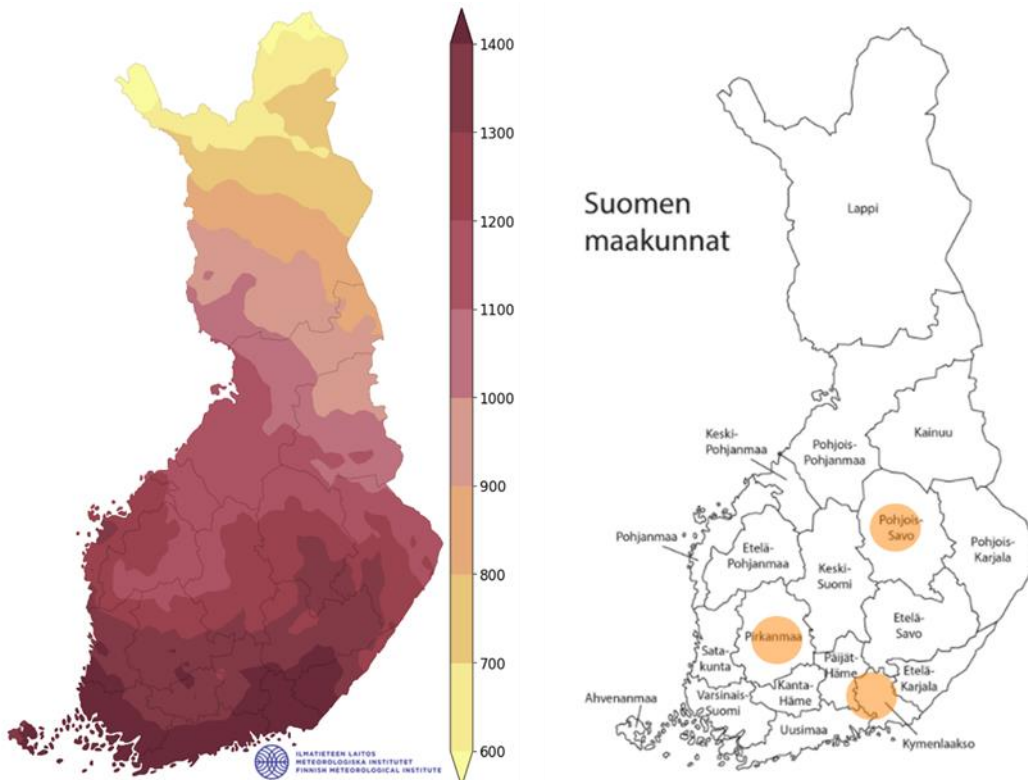
Kuva 8. Kirjanpajan vuoksi tehtyjen tuhohakkuuilmoitusten jakautuminen kehitysluokittain. Kehitysluokat ovat 6=nuori kasvatusmetsä, 7=varttunut kasvatusmetsä 8=uudistuskypsä metsä, 10=vajaatuottoinen metsä 11=eri-ikäisrakenteinen metsä. Lähde: Metsäkeskus.



Kuva 9. Kuusen hyönteistuhon vuoksi tehtyjen hakkuuilmoitusten jakautuminen kuvion arvioitun iän mukaisesti vuosina 2012–2022. Ikäarvio on ilmoitettu 69 prosentille ilmoituksista. Lähde: Metsäkeskus.



Kuva 10. Kuusen hyönteistuhon vuoksi tehtyjen hakkuuilmoitusten jakautuminen kuvion keskiläpimitan mukaisesti vuosina 2012–2022. Keskiläpimita on ilmoitettu 66 prosentille ilmoituksista. Lähde: Metsäkeskus.



Kuva 11. Vasemmalla: Termisen kasvukauden keskimääräinen lämpösumma vertailukaudelle 1991–2020. Lähde: Ilmatieteen laitos, <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/terminen-kasvukausi>. Oikealla: kartta Suomen maakunnista, johon on merkitty MOTTI-simulointeihin valitut alueet.

3.2.6. Kirjanpainajan taloudellisten vaikutusten arviointi

Metsänomistajalle suora kirjanpainajasta johtuva kustannus on hakkuussa korjattujen runkojen arvon alentuma. Jos tukkimittainen kuusi päätyy kuitupuuksi, hinta laskee arviolta kolmannekseen tai vielä enemmän, jos puu päätyy energiapuuksi eli raakkiin. Metsänomistaja menettää kirjanpainajan vuoksi kuusitukista maksettavan hinnan, sillä sinistynyt puu ei ole haluttua sahatavaraa. Sinistynyt puu, josta nestevirtaus on loppunut, ei kelpaa myöskään mekaanisen massan valmistukseen. Jos kirjanpainajan aiheuttamaa puustotuhoa ei ole havaittu ajoissa metsänomistajan tukkipuumitoissa olevista kuuset ovat myytävissä enää energiapuuna. Vain aivan tuore kirjanpainajan valtaama puu voidaan käyttää selluna.

Kun uudistuskypsässä metsikössä havaitaan kirjanpainajatuho, metsänomistaja menettää ainoastaan sen osuuden päätehakkuutulosta, minkä kirjanpainaja on ehtinyt pilata ennen kuin tuho on havaittu. Kuten metsänkäyttöilmoituksista huomattiin, kirjanpainajatuho kohdistuu usein uudistuskypsiin metsiin, jolloin metsänomistaja tekee päätehakkuun. Mitä pidempään metsänomistaja aikailee päätöstään sitä suuremmaksi puuston arvon menetys voi kasvaa kirjanpainaesaesiintymän laajentuessa.

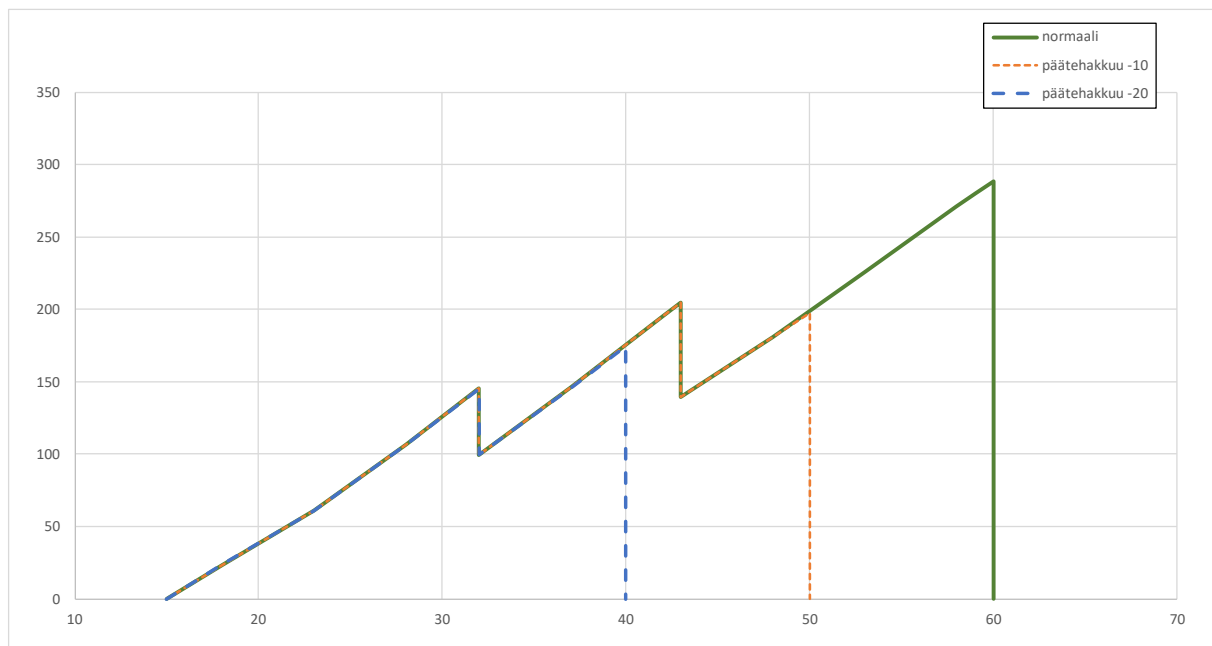
Tilanteessa, missä kirjanpainajatuho kohdistuu vielä kasvussa olevaan metsään ja metsänomistaja päätyy uudistamaan metsänsä etuajassa laajenevan kirjanpainaesaesiintymän vuoksi hän menettää kirjanpainajien pilaamien puiden arvon lisäksi metsän tulevan kasvun. Tämän vuoksi haluttiin arvioida metsänomistajan taloudellista menetystä tilanteessa, missä hän tekee ennenaikaisen uudistamispäätöksen alkaneen kirjanpainajatuhon perusteella. Tuossakaan tilanteessa hänen puustonsa osa ei enää täytä sahatukkien laatuvaatimuksia, ja hän joutuu myymään ne halvempaan kuitupuuna tai raakkina.

Kirjanpainajan aiheuttaman tuhon taloudellinen vaikutus metsikkötasolla arvioitiin siten, että päätehakkuu aikaistuisi joko 10 tai 20 vuotta ja aikaistetussa päätehakkuussa tukkipuusta siirtyisi 10 %–40 % kuituun tai raakkiin, riippuen tuhokohteen hakkuuajankohdasta suhteessa tuhon havaitsemisen ajankohtaan. Kun kirjanpainaesaesiintymän puut korjataan tuoreeltaan, niistä osa voi kelvata kuitupuuksi. Kirjanpainajan tuhojen vaikutuksesta puutavaralajijakaumiin ei kuitenkaan ole saatavilla avoimia kattavia tilastoja, vaan esiintymien puutavaralajitteet ovat vain puuta ostavien yritysten tiedossa.

Koska myöskään kirjanpainaesaesiintymien koosta ei ole kattavaa tilastoa, tuhoprocentit arvioitiin asiantuntija-arviona erilaisia kuvitteellisia tilanteita vastaaviksi. Näistä todennäköisin eli 10 % kuolleen puun määränä oli sellainen, että kirjanpainaesaesiintymä on todennäköisesti jo helposti havaittavissa ja saa metsänomistajan reagoimaan. VMI12 pysyvien koealojen, joilla on havaittu kirjanpainajatuho, käyttökelpoisen kuolleen puuston määrän arvion perusteella 17 % puustosta voi olla myös kirjanpainajan tappamaa esiintymässä (katso luku 3.2.4). Sen sijaan kaksi suurempaa lukemaa, 30 % ja 40 % puustosta kirjanpainajan tappamiksi ovat korkeat. Metsänomistajat reagoisivat ennen kuin puuston kuolleisuus nousee niin korkeaksi. Nämä kuolleisuusprosentit toimivat esimerkkinä sille, mikä metsänomistajan tappio voi olla, jos kirjanpainajan ennaltaehkäisyssä epäonnistutaan ja ympäristöolosuhteet ovat kirjanpainajalle suotuisat eikä metsikön tilaa seurata aktiivisesti, jolloin esiintymä pääsisi laajenemaan kuusikossa.

Teknisesti kirjanpainajan aiheuttamaa talousvaikutusta laskettiin niin, että aikaistetun päätehakkuun (joko 10 tai 20 vuotta) kantorahatulossa oli jo otettu huomioon tukkisiirtymä kuitu- tai hukkapuuhun. Tämän jälkeen simuloitiin Motti-metsikkösimulaattorilla paljaalta maalta

Hyvän metsähoidon suositusten (HMS) mukainen metsänkäsittely seuraavalle puusukupolvelle. Tuo käsittely toistettiin ikuisuuteen, jolloin saatiin paljaan maan arvo, joka lisättiin aikaistetun päätehakkuun kantorahatuloihin. Seuraavaksi määritettiin HMS:n mukainen puuston kehitys aikaistetuista päätehakkuun ajankohdista (10 tai 20 vuotta) olemassa olevan puuston kehitystä simuloiden. Puuston kehitys simuloitiin HMS:n mukaiseen päätehakkuun ajankohtaan, minkä jälkeen simuloitiin paljaalta maalta HMS:n mukainen, seuraavan puusukupolven kehitys. Myös tämä kehitys toistettiin ikuisuuteen, minkä jälkeen määritettiin tulevien puusukupolvien paljaan maan arvo, joka edelleen diskontattiin simuloinnin aloitushetkeen (10 tai 20 vuotta ennen nykypuusukupolven päätehakkuuta). Kuvassa 12 on havainnollistettu simulointien kulkua. Talouslaskennassa sovellettiin Taulukossa 1 esitettyjä metsänhoidon kustannuksia ja kantohintoja.



Kuva 12. Vaihtoehtoiset simuloinnit. Normaali kehitys on Hyvän metsänhoidon suositusten (HMS) mukainen. Tuoreen kankaan istutuskuusikko, Miehikkälä.

Seuraavaksi määritettiin ne suuralueet, joille edellä kuvattu talouslaskenta toteutettaisiin. Tässä hyödynnettiin mm. Metsäkeskuksen hyönteistuhohakkuuilmoituksista saatua tietoa ja kirjanpainajan feromonipyydyssurannan havaintoja. Samalla pyrittiin saamaan mahdollisimman kattava lämpösummagradienotti ottaen huomioon em. lähteiden havainnot. Näin päädyttiin kolmeen suuralueeseen, joilla kirjanpainajatuhon esiintynyt eri määrin: Kymenlaakso, Pirkanmaa ja Pohjois-Savo (Kuva 11).

Kullekin suuralueella valittiin yksi paikkakunta, jolle Motti-simuloinnit toteutettiin. Nämä paikkakunnat olivat: Miehikkälä, Sastamala ja Tuusniemi. Edelleen simuloinnit toteutettiin sekä lehtomaisen kankaan että tuoreen kankaan kuusikoissa, joilta valtaosa Metsäkeskuksen vastaanottamista hyönteistuhohakkuuilmoituksista oli peräisin (joskin tätä tarkastelua varttuneemmista metsistä). Kullekin paikkakunnalle aikaistetun päätehakkuun taloustulosta verrattiin tilanteeseen, jolloin ko. vuonna ei olisi ollut kirjanpainajatuhon ja metsikköä olisi voitu kasvattaa suositusten mukaisesti päätehakkuuseen, joka on kuvan 12 esimerkissä 60 vuotta.

Taulukossa 7 on tiivistetysti esitetty metsikkötason tulonmenetykset kolmella eri laskentakorkokannalla (2 %, 3 % ja 4 %) siten, että lukuarvot kuvaavat kolmen paikkakunnan (Miehikkälä, Sastamala ja Tuusniemi) keskiarvoa. Paikkakuntien sijainnit on esitetty kuvassa 11.

Taulukko 7. Kirjanpainajatuhosta aiheutuvat laskennalliset tulonmenetykset eri asteisissa tuhoissa, €/ha. Tuhoasteet ovat metsikkökohtaisia skenaarioita, joissa kuusista kuolee 10, 20, 30 tai 40 %. Lukuarvot ovat Miehikkälän (Kymenlaakso), Sastamalan (Pirkanmaa) ja Tuusniemen (Pohjois-Savo) tulosten keskiarvoja kahdella kasvupaikkatyypillä OMT ja MT olettaen, että päätehakkuu aikaistuu kirjanpainajan vuoksi 10 tai 20 vuotta

		Lehtomaisen kankaan kuusikko		Tuoreen kankaan kuusikko	
		20 vuotta	10 vuotta	20 vuotta	10 vuotta
Siirtymä tukista kuituun	10 %	5 970 ^{a)}	2 369	3 711	1 215
		4 458	1 681	2 925	642
		2 995	968	2 167	54
	20 %	6 501	3 085	3 956	1 753
		4 988	2 396	3 170	1 180
		3 525	1 684	2 412	592
	30 %	7 031	3 800	4 201	2 291
		5 519	3 112	3 415	1 718
		4 056	239	2 657	1 130
Siirtymä tukista raakkiin	10 %	7 562	4 516	4 446	2 830
		6 049	3 827	3 660	2 257
		4 586	3 115	2 903	1 668
	20 %	6 241	2 735	3 837	1 490
		4 729	2 046	3 050	917
		3 266	1 334	2 293	329
	30 %	7 043	3 816	1 207	2 304
		5 530	3 128	3 421	1 730
		4067	2 415	2 663	1 142
	40 %	7 845	4 897	4 577	3 117
		6 332	4 209	3 791	2 544
		4 869	3 497	3 033	1 956
	40 %	8 647	5 979	4 948	3 931
		6 688	5 482	4 161	3 357
		5 671	4 578	3 404	2 769

^{a)}ylin lukuarvo kuvaa tulonmenetystä 2 %, keskimäinen 3 % ja alimmainen 4 % laskentakorkokannalla

Vuosien 2017–2021 VMI12 ja 13 tehdyn tarkastelun mukaan vakavien kirjanpainajatuhojen pinta-ala oli keskimäärin 4 000 hehtaaria vuodessa (Taulukko 6). Tässä oletettiin, että tuo 4 000 hehtaarin vakavien kirjanpainajatuhojen alue kattaa edellä kuvatut maakunnat (Kymenlaakso, Pirkanmaa ja Pohjois-Savo), jotta metsikkötason talouslaskelmat voitiin skaalata suuralueetasolle. Lisäksi talouslaskelmassa oletettiin, että ainoastaan vakavien kirjanpainajatuhojen kohdalla Taulukossa 7 esitetyt talouslaskelmat (ts. päätehakkuun aikaistuminen) pätevät. [Vuotuisesti kirjanpainajatuhoja on kaiken kaikkiaan (lievät + todettavat + vakavat) vuosina

2017–2021 tilastoitujen tuhojen mukaan noin 30 300 hehtaaria. Tästä lukuarvosta siis reilu kymmenesosa on vakavia (4 000 ha) ja lieviä noin 12 400 hehtaaria.]

Kasvupaikkatyyppien oletettiin jakautuvan vakavilla tuhokohteilla siten, että puolet (2 000 ha) on lehtomaisilla ja puolet tuoreilla kankailla. Koska vakavien kirjanpainajatuhojen osalta ei tiedetä sitä, milloin tuhokohteella hakkuu suoritetaan suhteessa tuhon todentamisen ajankohtaan, laskelmissa tehtiin oletus aikaviiveestä.

Aikaviiveeseen liittyi oleellisesti se, miten tukkisiirtymän oletettiin realisoituvan (joko tukista kuituun tai tukista raakkiin). Puolella (50 %) vakavan kirjanpainajatuho kohteilla oletetaan, että tuhokohde on ns. tuore, jolloin tukkisiirtymä on kuituun ja vastaavasti puolella kirjanpainajatuhojen kohteilla hakkuu on myöhässä, ja täten vaurioitunut puusto kuivunutta, jolloin tukkisiirtymä on raakkiin (hukkapuuhun). Tässä raportissa päädyttiin lopulta esittämään päätulokset niin, että tuoreilla kohteilla 10 % tukista siirtyy kuituun ja myöhässä olevilla kohteilla 20 % tukista siirtyy raakkiin. Näihin lukuarvoihin päädyttiin sillä perusteella (vrt. Taulukko 7, jossa esitetty 10 %–40 % skaalalla tulokset), että 30 % ja 40 % puustokuolleisuus on nykypäivänä hyvin harvinaista talousmetsissä. Aikaviiveen vaikutus kustannuksiin testattiin herkkyysanalyysillä samoin kuin kasvupaikkatyyppien jakautuminen lehtomaisiin ja tuoreisiin kankaisiin.

Taulukossa 8 on esitetty kirjanpainajan aiheuttamien tuhojen kokonaiskustannukset (suuralueet yhteensä) ja herkkyysanalyysin tulokset tiivistetysti miljoonina euroina. Tuloksista nähdään päätehakkuun ajoittumisen ratkaiseva merkitys kustannuksiin. Esimerkiksi 4 % laskentakorkokannalla kirjanpainajatuho aiheuttama 10 vuoden päätehakkuun aikaistuminen (verrattuna Hyvän metsänhoidon suositusten mukaiseen päätehakkuun ajankohtaan) aikaansaa 4,6 miljoonan euron kustannuksen, kun taas päätehakkuun aikaistuminen 20 vuodella nostaa kustannuksia peräti 11,9 miljoonaan euroon (Taulukko 8). Kun tarkastellaan Metsäkeskuksen tuhohakkuuilmoituksia, havaitaan että nykyisinkin metsikkö voi päätyä hakkuuseen kirjanpainajan vuoksi 40- tai 50-vuotiaana (Kuva 9). Kuitenkin nykyisin valtaosa metsiköistä, jotka hakataan kirjanpainajan vuoksi ovat jo saavuttaneet uudistuskypsyyden (Kuvat 8–10).

Taulukko 8. Kirjanpainajatuhojen aiheuttamat kokonaiskustannukset, miljoonaa euroa (M€). Herkkyysanalyysin tulokset kuvaavat aikaviiveen (ts. tuoreet tuhokohteet vs. myöhässä olevat) ja kasvupaikkatyyppien vaikutukset kustannuksiin, M€. Päätulokset lihavoituna.

Päätehakkuun aikaistuminen	Laskentakorkokanta		
	2 %	3 %	4 %
10 vuotta	9,70	7,18	4,58
	15,26 ¹⁾	12,51	9,66
	4,86 ²⁾	2,57	0,21
20 vuotta	20,93	16,33	11,89
	28,17	22,12	16,27
	14,85	11,70	8,67

¹⁾herkkyysanalyysi, jossa oletetaan, että kaikki tuhokohteet (4 000 ha) hakataan myöhässä ja kasvupaikkana ainoastaan lehtomainen kangas (tämä laskelma kuvastaa ylärajaa), ²⁾herkkyysanalyysissä oletetaan, että kaikki tuhokohteet hakataan tuoreina ja kasvupaikkana ainoastaan tuoreen kankaan kuusikot (alaraja)

Kirjanpajan merkitys lämpenevässä ilmastossa tulevaisuudessa on todennäköisesti suurempi kuin tämänhetkiset puustotuhot Suomessa antavat ymmärtää. Myös laatimamme mo-
niin oletuksiin pohjautuva talouslaskelmamme katsoo osittain tulevaisuuteen. Se ei pohjautu kattavaan inventaarioon tähän mennessä Suomessa havaituista tuhoista, koska niistä on huomattavan vähän tarkkaa tietoa, etenkin suhteutettuna siihen, kuinka suuri uhkatekijä kuumat kuivat kesät kirjanpajatuhoihin tulevaisuudessa ovat. Talouslaskelmamme osoittaa, että kirjanpajan merkitys voi olla taloudellisesti suuri, mutta tappioista osa on valppaudella vältettävissä. Kirjanpajatuhojen seuranta eri menetelmin, jo olemassa olevien sekä osittain vielä kehittyvien kaukokartoitusperustaisten keinojen avulla, on tärkeää myös valtakunnallisen tilannekuvan luomiseksi. Yhtä lailla tässä raportissa esiteltyä tiedonkeruuta, metsänkäyttöilmoituksia ja valtakunnan metsien inventointia, voitaisiin vielä muovata kirjanpajatuhoista tarkempaa tietoa kerääväksi. Myös hakkuukoneiden tuottama tieto kirjanpajaeiintymien suuruusluokasta voisi olla karkeistettuna keino saada tietoa esiintymien laajuudesta.

3.3. Ytimennävertäjät

3.3.1. Ytimennävertäjät tuhoniheuttajina

Ytimennävertäjät (pysty- ja vaakanävertäjä, *Tomicus piniperda* ja *T. minor*) ovat Suomessa aina puurajalle asti yleisiä mäntyjen kaarnakuoriaisia. Ytimennävertäjät lisääntyvät mäntyjen kaarnan alla ja voivat näin olla osallisena jo heikentyneiden pystypuiden kuolemisessa (Annala ym. 1999, Cedervind ym. 2003). Lisäksi ne myös iskeytyvät mäntyjen latvuksiin, joissa ne ruokailevat kovertaen tuoreita kasvaimia ontoiksi (Kuva 13a ja 13d). Molemmat ytimennävertäjälajit kuljettavat lisäksi puihin mukanaan sinistäjäsiemeniä, jotka aiheuttavat puissa värivikaa.

Ytimennävertäjien parveilu alkaa aikaisin keväällä, lämpötilojen lähestyessä 12° C astetta. Kuten usean muunkin kaarnakuoriaisen kohdalla, lisääntyminen tapahtuu puun kaarnan alla, jonne naaras kaivaa toukkakäytävän onnistuneen parittelun jälkeen. Toukkakäytävän varrelle se munii munansa, joista taas kuoriutuu toukkia, mitkä syövät omat toukkakäytävänsä vastakaiseen suuntaan emokäytävään nähden (Kuva 13c). Parittelun jälkeen koiraat poistuvat emokäytävistä mäntyjen kasvaimiin ravintosityönteihin. Naaraatkin syövät kasvaimia, mutta ne jatkavat ravintosityöntiä emokäytävissä osin muninnan jälkeenkin. Myös nuoret yksilöt aloittavat kasvainsyönnin kuoriuduttuaan ja kaivauduttuaan ulos puun kuorten alta.

Lisääntymismateriaaliksi ytimennävertäjät kelpuuttavat kuolleiden (mutta ei lahonneiden) mäntyjen runkoja, heikentyneitä pystypuita sekä tuulen tai lumen kaatamia ja katkaisemia puita. Myös hakkuutähteet, kannot ja varastoitu kuorellinen mäntypuutavara ovat sopivaa lisääntymismateriaalia etenkin pystynävertäjälle. Pystynävertäjä käyttää lisääntymiseen rungon karkeakaarnaista osaa ja vaakanävertäjä puun ohutkaarnaista osaa. Joskus myös pystynävertäjä käyttää ohutkuorista puuta, ja toisaalta pystynävertäjän puuttuessa voi vaakanävertäjäkin hyödyntää tavallista paksumpikaarnaista puuta. (Ylioja ym. 2021, Melin ym. 2021).



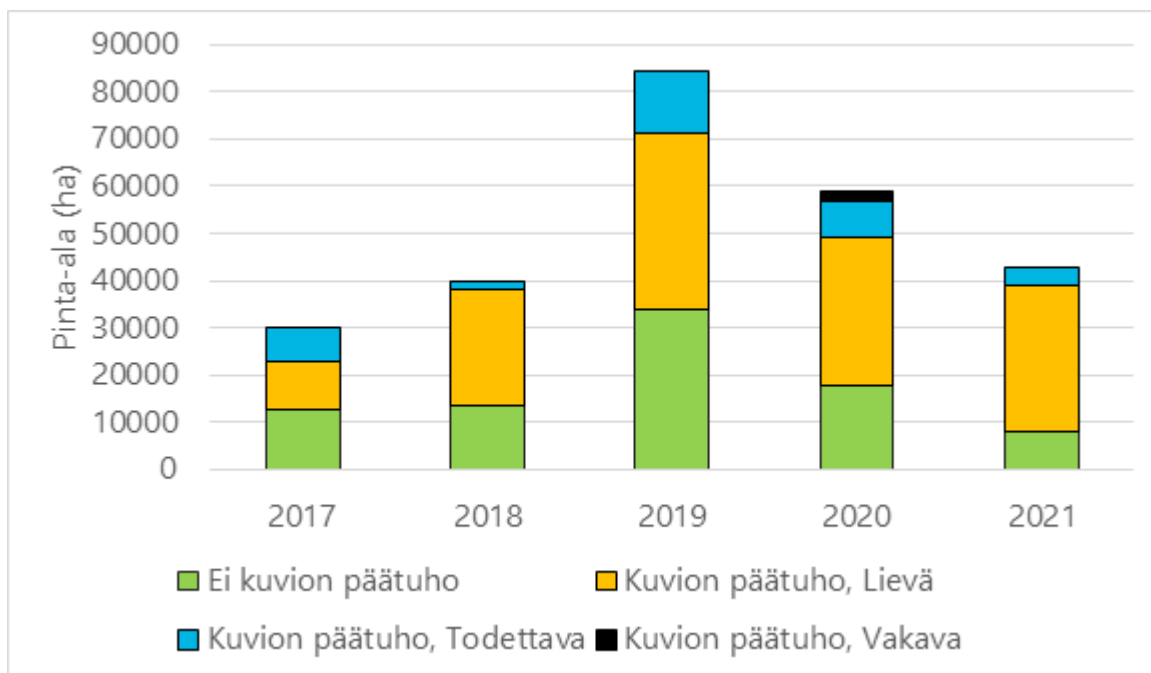
Kuva 13. Ytimennävertäjien ravintosyönnin aiheuttamat mäntyjen piikkimäiset latvat (a). Pysty- (b) ja vaakanävertäjien (c) emokäytäviä sekä maahan pudonneita kasvaimia (d). Kuvat: Antti Pouttu ja Markus Melin, Luke.

Ytimennävertäjän männyille aiheuttamat vaikutukset voi jakaa kolmeen osaan: 1) rungon nilaan kaiverretut syömäkäytävät, jotka heikentävät nestevirtauksia, 2) puuainekseen mukana tuotu sinistäjäsieni sekä 3) latvukseen kohdistuva kasvainsyönte. Laji ei kuitenkaan ole ns. primäärinen vaan sekundäärinen tuhoniheuttaja, eli se ei kykene aiheuttamaan laaja-alaista tuhoa terveelle puustolle. Ytimennävertäjätuhoja havaitaan yleisesti eniten puutavaravarastojen läheisissä metsissä (terminaalivarastot, tehdasalueet ym.), mutta toisaalta myös ison myrskyn jälkeen ytimennävertäjätuhot voivat olla näkyviä, mikäli alueelle on jäänyt paljon korjaamattomia tuulenkaatoja.

Ytimennävertäjätuhoja kirjataan ylös valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) yhteydessä. Tätä aineistoa käyttämällä saadaan kuva tuhojen laajuudesta (vuosittaiset tuhopinta-alat) sekä tuhon vaikutuksesta (ilmiasu). Vuosina 2017–2021 ytimennävertäjätuhoja on esiintynyt vuodesta riippuen noin 29 900–84 200 hehtaarin alalla, joista laatua-alentavia – eli todettavia tai vakavia – tuhoja on ollut noin 1 900–13 100 hehtaaria (Taulukko 9, Kuva 14).

Taulukko 9. Ytimennävertäjätuhojen tuhopinta-alat vuosina 2017–2021 jaettuna sen mukaan onko tuho ollut kuvion päätuho vai ei, ja jos on ollut, myös tuhon vakavuuden mukaan. Lähde: VMI (Ahvenanmaata ja Ylä-Lappia ei ole huomioitu).

Vuosi	Tuhoala (ha)			
	Ei kuvion päätuho	Kuvion päätuho		
		Lievä	Todettava	Vakava
2017	12 600	10 100	7 200	0
2018	13 300	24 800	1 900	0
2019	33 900	37 200	13 100	0
2020	17 700	31 400	7 700	2 200
2021	8 000	30 800	4 000	0



Kuva 14. Ytimennävertäjätuhojen tuhopinta-alat vuosina 2017–2021 jaettuna sen mukaan onko tuho ollut kuvion päätuho vai ei, ja jos on ollut, myös tuhon vakavuuden mukaan. Lähde: VMI (Ahvenanmaata ja Ylä-Lappia ei ole huomioitu).

Kun puhutaan ytimennävertäjien mahdollisista tuhoista, on syytä erottaa tarkastelussa luonnolliset myrskyjen kaltaiset abioottiset ilmiöt ihmisten toimista, kuten puun väliaikainen varastointi metsässä hakkuiden yhteydessä sekä pitkäaikainen varastointi terminaaleissa ja tehdasalueilla.

Myrskyjen jälkeensä jättämä puu on yleensä hyönteisten käytettävänä yhden, korkeintaan kaksi kesää: puut joko kuljetetaan pois tai ne kuolevat ja lahoavat siihen pisteeseen, etteivät

ne enää ytimennävertäjälle kelpaa. Näin ollen myrskyt – vaikkakin aiheuttavat paikallisen kasvupiikin hyönteispopulaatioissa – eivät ajan myötä edesauta hyönteiskannan kasvamista suureksi, sillä yhtenä vuonna hyödynnettyä lisääntymisresurssia ei ole saatavilla enää seuraavana. Tähän lopputulokseen päätyivät Annila ja Petäistö (1978) seurattuaan hyönteistuhoja suuren talvimyrskyn (joulukuu 1975) jälkeen: vaikka ytimennävertäjät käyttivätkin kaatuneita puita runsaasti lisääntymiseen, hyökkäysten onnistumisprosentti oli vain 37 %, jonka lisäksi kuori-aisten voimakkaasti infektoimia kaatuneita puita oli vain 4 % tutkituista puista. Komonen ym. (2009) tutkivat ytimennävertäjien mahdollisesti aiheuttamia seurannaistuhoja suuren trombin jälkeen Pohjois-Karjalassa ja totesivat seurannaistuhojen (pudonneet kasvaimet) olleen lyhytaikaisia, sillä hyönteiset eivät voineet hyödyntää myrskyn kaatamia puita kuin yhtenä kesänä. Näin ollen jäävälle puustollekaan ei arvioitu koituneen varsinaisia kasvu tai laatu-tappioita.

Metsien harvennuksissa ja puuston väliaikaisessa tienvarsi- tai metsävarastoinnissa on samanlainen dynamiikka: metsään jäänyt puupino ei ole käytettävissä kuin yhden kesän ajan, joten näiden pinojen ei voida olettaa edesauttavan ytimennävertäjäkantojen pitkäaikaista kasvua. Annila ja Heikkilä (1991) tutkivat ytimennävertäjätuhoja männikön harvennusten yhteydessä ja päätyivät samaan lopputulokseen: seurannaistuhot olivat luonteeltaan lieviä eikä niiden voinut olettaa merkittävästi vaikuttaneen jäävän puuston kasvuun tai laatuun. Tuoreemmassa tutkimuksessa Melin ym. (2021) selvittivät ytimennävertäjän kasvaintuhoja metsässä varastoitujen puutavarapinojen ympärillä. 25 tilavuudeltaan vaihtelevaa ($34\text{--}369\text{ m}^3$), talvella hakattua puupinoa jätettiin metsään koko ytimennävertäjän lisääntymiskauden ajaksi, aina lokakuulle asti. Tästä saatiin selville paitsi se, missä määrin hyönteiset käyttivät pinoja lisääntymiseen, niin myös se, aiheuttiko tämä seurannaistuhoja ympärysmetsiin.

Melinin ym. (2021) tulosten perusteella puutavarapinoissa lisääntyivät lähinnä pystynävertäjät, mutta niidenkään kohdalla seurannaistuhot (kasvainten syönte) eivät olleet merkittäviä. Pienten, tilavuudeltaan alle 50 m^3 puupinojen kohdalla vaikutus ympäröivään metsään kasvaneina hyönteistuhoina oli käytännössä olematon. $100\text{--}300\text{ m}^3$ kokoisten pinojen kohdalla tuhovaiikutus havaittiin (pudonneina kasvaimina), mutta sitä ei voida olemassa olevan tutkimustiedon valossa pitää merkittävänä perustuen pudonneiden kasvainten vähäiseen määrään, eikä myöskään siksi koska pino ei olisi hyönteisten käytössä seuraavana kesänä. On myös huomioitavaa, että Melin ym. (2021) tutkimuksessa puutavarapinot jätettiin tietoisesti metsään koko kasvukaudeksi, kun taas normaalioloissa metsätuholaki edellyttää, että tilavuudeltaan yli 50 m^3 kokoiset pinot kuljetetaan pois ennen kuin niissä kehittyvät ytimennävertäjät kuoriutuvat ja aloittava kasvainsyönnin. Näin ollen, vaikka nykyiset päivämäärät puutavaran poiskuljetuksen takarajalle eivät olekaan joka vuosi toimivia, voidaan ytimennävertäjien seurannaistuhojen vaikutuksen olevan käytännössä metsätalouden kannalta merkityksetön sekä tavanomaisessa puutavaran metsävarastoinnissa että tavanomaisten myrskyjen jälkeen.

Ympärivuotiset puutavaravarastot kuten tehdasalueet ja terminaalit sen sijaan ovat alueita, joissa ytimennävertäjän vaikutus on voimakasta. Ytimennävertäjätuotannoksi puutavarapinoissa on arvioitu keskimäärin hieman alle 2000 ytimennävertäjää kuutiometriä kohti (Juutinen 1978, Långström 1984), kun taas puutavaravarastoista lähialueiden mäntyjen latvaan leviävät ytimennävertäjät syövät keskimäärin 0,31–2,15 versoa nävertäjää kohti (Annila ja Heikkilä 1991). Näihin suhteutettuna on selvää, että tuhansien kuutiometrien ympärivuotiset puutavaravarastot ovat merkittävä ytimennävertäjien kantaa paikallisesti kasvattava tekijä – etenkin koska pinoja on alueella ympärivuoden, vuodesta toiseen.

Pysyvien varastojen lähialueilta (<300 m) on mitattu kymmenen vuoden jaksolta yli 50 % kasvutappioita (läpimitan kasvu) verrattuna kontrollialueeseen (Borkowski 2001, Puola). Ruotsissa mäntyjen kolmen vuoden tilavuuskasvujen havaittiin olevan 70, 40, 20 ja 10 % kontrollialueilta pienempää etäisyyksillä 20, 40, 80 ja 500 metriä terminaalivarastosta (Långström & Hellqvist 1991). Kuitenkin itse tuhovaikutuksen (kasvutappio johtuen pudonneista kasvaimista) on useissa tutkimuksissa havaittu olleen merkittävä aina jopa 1000 metriin asti (Legowski 1987, Hagensen 1978, Långström & Hellqvist 1991). Lisäksi pysyvien varastojen osalta on huomiotavaa, että kasvutappiot jatkuvat niin kauan, kunnes mänty on pystynyt kasvattamaan vastaavan määrän uusia versoja – suurten, ympärivuotisten varastojen kohdalla näin ei välttämättä pääse koskaan kunnolla tapahtumaan.

Kaiken kaikkiaan ytimennävertäjän vaikutus metsissä on olemassa olevan tiedon valossa pääosin merkityksetön (pois lukien alueet, joissa puutavaraa varastoidaan pysyvämmiin). Tutkimusten perusteella myrskyjen tai puutavaran väliaikaisen metsävarastoinnin ei suurilta osin voida olettaa aiheuttavan merkittäviä kasvu- tai laatutappioita jäävälle puustolle. Tätä tukee myös VML-aineisto, jossa vakavia ytimennävertäjätuhoja on vuosina 2017–2021 ollut vain 2 200 hehtaarin alueella.

Puutavaran pidempiaikaisilta varastointipaikoilta ei ole tehty kattavaa kotimaista tutkimusta, mutta ulkomaisten tutkimusten osalta niiden tiedetään vähentävän ympäröivän metsän kasvua jopa yli 50 %, ja vaikutus voi ulottua jopa 1 000 metrin päähän varastointipaikasta. Jos tätä vaikutusta haluttaisiin arvottaa tarkemmin, tulisi selvittää seuraavat asiat:

- Pidempiaikaisten, metsätuholaista vapaiden, terminaalien lukumäärä ja niissä varastoitavan puutavaran laatu ja määrä
- Näiden terminaalien ympärysmetsien rakenne.
- Suorittaa mittaukset näissä ympärysmetsissä, joilla voitaisiin todeta tuhovaikutuksen suurusluokka sekä kasvutappio suhteessa etäisyyteen puutavaravarastosta sekä verrattuna vastaavanlaisen terveeseen metsikköön.

3.4. Tukkimiehentäi

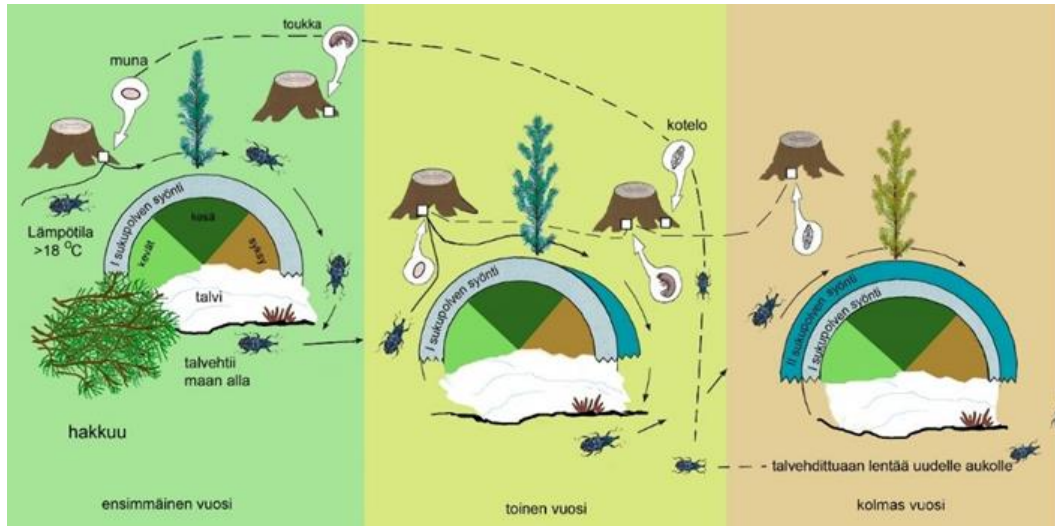
3.4.1. Tukkimiehentäi taimikkotuhojen aiheuttajana

Tukkimiehentäi (*Hylobius abietis*) on puiden puutunutta kuorta ja nilaa syövä kovakuoriainen, joka on vastaistutettujen havupuuntaimikoiden pahin tuhoniheuttaja Euroopassa (Lalik ym. 2021). Tukkimiehentäitä esiintyy metsänuudistusaloilla koko Suomessa (Långström 1982). Pohjoisimmassa Suomessa tukkimiehentäin aiheuttamat tuhot ovat olleet vähäisempiä kuin Etelä-Suomessa, joskin Lapissakin tuhoja on havaittu (Rautio ym. 2014). Tuoreimpien tutkimustulosten perusteella tuhojen todennäköisyydessä ei ole eroja Oulujärven eteläpuolisessa Suomessa (Luoranen ym. 2023).

Vuosittaisissa metsätuho- ja metsävarastointiraporteissa Valtakunnan metsien inventointitietoihin perustuvat tukkimiehentäin aiheuttamien tuhojen pinta-alat ovat vaihdelleet vuosina 2017–2021 2 300 ja 12 600 ha välillä, ollen keskimäärin 6 800 ha (Nevalainen ym. 2018, Nuorteva 2019, Nuorteva & Kytö 2022a, 2022b, Melin & Terhonen 2022).

Keväällä lämpötilan noustua lähelle 20 °C aikuiset tukkimiehentäit lentävät uudistusaloille (Solbreck & Gyldbreg 1979). Niille ne suuntaavat tuoreista hakkuutähteistä ja kannoista

lähtevän tuoksun houkuttelemana (Nordlander 1987). Parittelu aikaan keväällä tukkimiehentäit voivat lentää jopa 80 kilometriä uudistusosalta toiselle, mutta yleisemmin ne lentävät lähetyillä olevilta vanhemmilta aloilta tuoreille (Solbreck 1980). Uudistusosalle päästyään aikuiset menettävät lentokykynsä ja etenevät sen jälkeen kävelen (Nordenhem 1989, Örländer ym. 2000). Parittelun jälkeen naaraat munivat tuoreiden kantojen lähetyville (Nordlander ym. 1997). Munista kuoriutuvat toukat syövät kantojen juurista nilaa ja koteloituvat noin vuoden kuluttua (Nordenhem 1989). Koteloitumisvaihe on lyhyt ja uudet kuoriutuneet aikuiset lentävät taas uudelle lisääntymispaikalle (Kuva 15).



Kuva 15. Tukkimiehentäin elinkierto. Kuva kirjasta Luoranen ja Kiljunen (2006).

Suomen oloissa havupuun taimiin kohdistuva syönte on suurimmillaan hakkuuta seuraavana kasvukautena (Luoranen ym. 2017, 2022a), mutta se jatkuu 2–3 vuotta hakkuun jälkeen (Långström 1982, Örländer & Nilsson 1999). Tukkimiehentäit syövät ja lisääntyvät tehokkaimmin 20–25 °C lämpötiloissa (Christiansen & Bakke 1968). Ilmaston lämmitessä tällaiset lämpötilat yleistyvät ja kasvukaudet pitenevät sekä kevästä että syksystä (Ruosteenoja ym. 2020). Onkin ennustettu, että boreaalisilla alueilla tukkimiehentäin tuhot tulevat runsastumaan ja niitä havaitaan entistä pohjoisempana (Nordlander ym. 2017, Venäläinen ym. 2020). Jo pienikin lämpösummaero kasvukauden lämpösummassa voi vaikuttaa tukkimiehentäin syöntein suppealakin maantieteellisellä alueella (Luoranen ym. 2022b).

Perättäisinä vuosina samalla alueella toistuvat hakkuut lisäävät tukkimiehentäin kantoja, kun uusille aikuisille löytyy läheltä aina uusia lisääntymispaikkoja. Aikuisille kelpaavat kaikki sopivan kokoiset puuvartist kasvit, myös isojen puiden oksat ja juuret (Fedderwitz ym. 2018). Puulajeista myös lehtipuita syödään, mutta tukkimiehentäit suosivat havupuita (Toivonen ja Viiri 2006). Ruotsalaistutkimuksen mukaan männyn ja lehtikuusen taimet kestävä syönteä kuusen taimia paremmin (Wallertz ym. 2014). Aikuiset voivat syödä myös uudistusaloilla tai niiden reunalla kasvavien havupuiden uusimpia vuosikasvaimia ja juuria (Fedderwitz ym. 2018). Tämä selittää, miksi syöntivioitusten määrä lisääntyy etäisyyden uudistusalan reunaan kasvaessa (Nordlander ym. 2003a), ja miksi suojuksuuston alla taimiin kohdistuva syönte on vähäisempää (Nordlander ym. 2003b).

Taimien kelpaavuuden kannalta oleellista on taimien läpimitta, sillä tukkimiehentäit syövät 2–20 mm paksuisia oksia, runkoja ja juuria (Örländer ym. 2000). Aivan ohuita taimia tukkimiehentäit eivät syö johtuen ohuiden taimien isompia taimia poikkeavasta puolustuskemiasta

(Pettersson ym. 2008). Toisaalta taimien läpimitan kasvaessa, todennäköisyys kuolla syötiin pienenee (Thorsén ym. 2001, Luoranen ym. 2017).

Pelkällä kivennäismaapinnalla tukkimiehentäi ei mielellään pysähdy taimen kohdalle syömään (Björklund ym. 2003). Heti kun taimen välittömässä läheisyydessä on tukkimiehentäille sopivaa suojaa pedoilta ja auringolta, kuten kariketta, orgaanista ainesta tai pintakasvillisuutta, syöntitodennäköisyys lisääntyy (Pettersson ym. 2005, Björklund ym. 2003). Kivennäismaapinnan syönniltä suojaava vaikutus selittää sen, miksi maanmuokkaus vähentää taimiin kohdistuvaa syöntiä ja miksi muokkaamattomalla pinnalla, tai humus/karikepintaissa muokkausjäljissä syönti lisääntyy (mm. Petersson ym. 2005, Björklund ym. 2003, Luoranen ym. 2022b). Toisaalta kivennäismaapintakaan ei auta, jos taimen päälle kaartuu esimerkiksi ympäröivää pintakasvillisuutta, jonka on myös todettu lisäävän syöntiä (Pettersson ym. 2006).

Tukkimiehentäin tuhoja on niin kivennäis- kuin turvepohjaisilla uudistusaloilla (Luoranen & Viiri 2012). Ojitetuilla ohutturpeisilla turvemaiden tukkimiehentäin aiheuttamia tuhoja on ollut hieman enemmän kuin kivennäismailla (Luoranen & Viiri 2012), mutta joissakin tutkimuksissa on havaittu hyvinkin suurta syöntiä paksuturpeisilla turvemaiden (Pearson ym. 2011, Hytönen ym. 2020). Ohutturpeisilla kohteilla muokattu turvepinta antaa jonkin verran suojaa, joskaan ei yhtä tehokkaasti kuin kivennäismaapinta (Luoranen & Viiri 2012).

Tukkimiehentäin tuhojen vähentämisessä tärkeimmät keinot ovat taimien käsittely ennen istutusta sekä maanmuokkaus. Suomessa kaikki Oulujärven eteläpuolisen Suomen taimet käsitellään pääosin kemiallisesti. Vuonna 2022 hyväksytyjä tehoaineita ovat asetamipridi ja lambda-syhalotriini (Tukes). Ruotsissa ja Norjassa on kehitetty taimien ympärille laitettavia suojia (mm. Petersson ym. 2004) sekä erilaisia vaha- ja liima-hiekkapinnoitteita (mm. Nordlander ym. 2009). Muita suojaustapoja käytetään jonkin verran myös Suomessa, mutta tilastotietoa erilaisten suojaustapojen käytöstä ei ole. Ruotsissa muut kuin kemialliset menetelmät ovat jo valta-asemassa (Skogsstyrelsen 2021) sikäläisten FSC-sertifointikriteerien takia (Giurca & von Stedingk 2014).

Maanmuokkauksessa oleellista on sen laatu (Luoranen ym. 2017, Wallertz ym. 2018). Muutaman senttimetrin paksuisella ja vähintään 10 cm taimen ympärillä olevalla kivennäismaakeroksella voidaan vähentää tuhoja (Nordlander ym. 2011). Mitä kauempana lähimmästä humusreunasta taimi on, sitä pienempi syöntiriski (Saksa 2011, Luoranen ym. 2017). Istutettaessa taimet muokkaamattomaan maahan taimien kuolleisuus on erittäin suurta (Luoranen ym. 2017, 2022b). Kivennäismaapinnan merkitys on oleellinen kaikissa muokkausmenetelmissä, mutta parhaan suojan syöntiä vastaan antaa mätästys ja heikoimman äestys (Saksa 2011). Mättään teho perustuu paitsi kivennäismaapintaan myös sen ympäristöään korkeampaa asemaan (Nordlander ym. 2005).

Tuoreilla uudistusaloilla riski tukkimiehentäin syönnille on suurin (Nordlander ym. 2017, Luoranen ym. 2017). Istutuksen viivästyttäminen 1–2 vuoden päähän hakkuusta vähentää syöntiä, mutta lisää pintakasvillisuuden kilpailua lisäten muita tuhoriskejä ja heikentäen taimien maastomenestymistä (Nilsson & Örlander 1995, Luoranen & Viiri 2021). Samalla pintakasvillisuuden torjunnan tarve kasvaa nostaen uudistamiskustannuksia.

Nykyiset paakkutaimet istutetaan 1–2-vuotiaina, jolloin ne ovat läpimitaltaan altteimpia tukkimiehentäin syönnille. Tarkkaa turvallista läpimittarajaa on vaikea määrittää, koska se riippuu käytetystä muokkausmenetelmästä ja tukkimiehentäiden syöntipaineesta uudistusallalla (Luoranen ym. 2017). Yli 2 mm paksuisilla kemiallisesti käsitellyillä ja 3 mm paksummilla

suojaamattomilla kivennäismaapintaisiin mättäisiin istutetuilla kuusen taimilla syöntiriski on jo varsin matala (Luoranen ym. 2017). Muokkaamattomalle maalle istutettaessa vasta yli 8 mm paksuiset taimet selviytyvät yli 80 % todennäköisyydellä syönnistä (Thorsén ym. 2001). Istutamalla kookkaampia taimia tuhoja voitaisiin vähentää. Tämä kuitenkin merkitsisi taimien kasvattamista isommissa paakuissa useamman kasvukauden ajan taimitarhalla. Tämä lisäisi taimien hintaa ja istutuskustannuksia, eikä siten ole varteenotettava vaihtoehto. Karummilla männyn kasvupaikoilla pienten, alle tukkimiehentäille kelpaavuusrajan olevien männyn taimien istuttaminen muokattuun maahan voi sen sijaan olla turvallista (Lindström ym. 2005).

VMI-aineistoista saadaan jonkinlainen kuva tukkimiehentäin aiheuttamista tuhoista nuorissa taimikoissa. Tuhot voidaan havaita luotettavasti vain ensimmäisenä ja toisena kesänä tuhon jälkeen, myöhempinä vuosina tuhot näkyvät vain tuntemattoman syyn aiheuttamana taimikon harvuutena (Korhonen ym. 2011). Tässä selvityksessä tuhojen määrän arvioimiseksi käytettiin Suomessa ja muissa Pohjoismaissa vastaavilla maantieteellisillä ja ilmastollisilla alueilla tehtyjen tutkimusten tuloksia. Selvitystä varten haettiin Web of Science tietokannasta vuosina 2000–2021 tehdyt tutkimukset. Vuosirajaus varmistaa, että sekä metsänuudistamismenettelmät että ilmastolliset olot voidaan yleistää paremmin nykyisiin käytäntöihin. Hakusanoina käytettiin pine weevil ja conifer seedlings. Tuloksena oli 110 artikkelia. Etelä-Ruotsissa ja Norjassa tehdyt tutkimukset hylättiin erilaisen ilmastovyöhykkeen (pidempi kasvukausi, suurempi tukkimiehentäin syöntipaine) takia. Otsikon ja tiivistelmän perusteella näistä valittiin pohjoismaisia tutkimuksia pois lukien puolustuskemiaan liittyvät tutkimukset. Jäljelle jäi 31 tutkimusta. Lisäksi tiedossa olleet tutkimusraportit ja kirjoitusvaiheessa olleet käsikirjoitukset Suomesta lisättiin aineistoon. Nämä tutkimukset käytiin läpi ja niistä etsittiin seuraavat tiedot: tutkimuksen sijaintipaikka, luonne (järjestetty koe/inventointi), tutkimukseen sisältyneiden uudistusalojen lukumäärä, puulaji, kasvupaikka, istutusvuosi, maanmuokkausmenetelmä, mahdollinen muu käsittely (esimerkiksi kulotus), taimien ikä, taimien suojauskäsittely (kemiallinen, mekaaninen, hiekkapeitto, ei käsittelyä), tuhojen määritysajankohta (kasvukausien lukumäärä istutuksesta) sekä kuolleiden ja/tai vaurioituneiden taimien osuus. Osassa tutkimuksista vaurio/kuolleisuusluvut oli ilmoitettu vain kuvissa, joten ne määritettiin silmävaraisesti niistä. Jos yhdessä tutkimuksessa oli useita puulajeja ja käsittelyitä, kukin niistä käsiteltiin omana rivinä aineistossa.

Tuhojen mittarina käytettiin tukkimiehentäin syöntiin kuolleiden tai vakavasti vioittuneiden taimien osuutta, jolloin osa tutkimuksista jäi laskennan ulkopuolelle, koska niissä oli ilmoitettu vain tukkimiehentäin vaurioittamien taimien osuudet. Lisäksi laskennan ulkopuolelle jätettiin Suomen ja Ruotsin Lapissa tehdyt tutkimukset niiden vähäisyyden takia ja laskennoissa keskitytään Oulujärven eteläpuoliseen osaan maata. Koska kulotus ei ole yleinen uudistamismenetelmä Suomessa, myös kulotusalat jätettiin laskennasta pois, vaikka sen tiedetään lisäävän tukkimiehentäin tuhoja (von Hofsten & Weslien 2005, Pitkänen ym. 2008). Männyllä on tehty hyvin vähän tukkimiehentäitutkimusta Pohjoismaissa, joten puulajit yhdistettiin olettaen niiden tuhoriskin olevan sama, sillä tutkimuksissa on saatu ristiriitaisia tietoja kuusen ja männyn tuhoeroista. Långström (1982) on todennut männyn olevan tuhoalttiimpi kuin kuusen, mutta Etelä-Ruotsissa mänty on kärsinyt vertailututkimuksessa kuusta vähemmän syöntivioituksista (Wallertz ym. 2014). Samoin päädyttiin yhdistämään äestys ja erilaiset mätästysmenetelmät yhdeksi luokaksi Muokkaus, vaikka maanmuokkausmenetelmän tiedetään vaikuttavan tukkimiehentäin tuhoihin niin, että äestyksessä syöntiriski on suurin ja mätäillä pienin (Saksa 2011, Sikström ym. 2020). Valitulla maantieteellisellä alueella ja etenkin Suomesta on saatavilla vain vähän tutkimuksia äestyksestä. Ruotsissa äestys on yleinen menetelmä ja siitä on

tutkimustuloksia, mutta siellä taimia istutetaan sekä vakoon että palteeseen, kun Suomessa taimet istutetaan äesvakoon.

Kustannuslaskennan pohjaksi kootuista tiedoista laskettiin keskimääräiset kuolleisuusluvut muokkaamattomalle maalle ja mättäisiin, sekä taimien suojauskäsittelyn osalta käsittelemättömille ja kemiallisesti käsitellyille taimille (Taulukko 10). Muut suojausmenetelmät jätettiin tämän tarkastelun ulkopuolelle.

Taulukko 10. Keskimääräiset tukkimiehentäin aiheuttamat kuolleisuudet Oulujärven eteläpuoliossa Suomessa ja Keski-Ruotsissa vuosina 2000–2022 tehdyissä tutkimuksissa. Kuolleisuudet on eroteltu muokkaamattomalle maalle ja muokatulle maalle (sisältää kaikki muokkausmenetelmät) sekä niiden sisällä kemiallisesti käsitellyille ja käsittelemättömille taimille. SD on keskihajonta.

Maanmuokaus	Taimikäsitely	Tutkimusten lukumäärä	Keskimääräinen kuolleisuus, %	SD	Alhaisin	Korkein
Ei muokkausta	ei käsittelyä	4	59,5	20,8	40	78
	kemiallinen	6	24,1	9,1	15	39
Muokattu	ei käsittelyä	6	22,7	15,9	9	52
	kemiallinen	20	3,7	2,9	0	10

3.4.2. Tukkimiehentäin aiheuttamat kustannukset

Tukkimiehentäin aiheuttama tuho taimikossa huomataan yleensä viimeistään toisena vuotena istutuksesta. Tuho aiheuttaa täydennysviljelytarpeen, joka tässä raportissa ajoitetaan kolme vuotta alkuperäisen viljelyn jälkeen. Lisäksi täydennysviljelytiheyttä vaihdellaan siten, että talouslaskennassa sovelletaan 500 ja 1 000 taimen tiheyksiä hehtaarilla.

Täydennysviljelykustannusten lisäksi tukkimiehentäituho aiheuttaa kustannuksia, jotka johtuvat puuston kehityksen viivästyisestä. Puuston kehityksen viivästyisestä aiheutuvat kustannukset laskettiin simuloimalla Motti-metsikkösimulaattorilla tuoreen kankaan kuusikoiden ja kuivahkon kankaan männiköiden kehitystä, kun metsänkäsittely pohjautuu HMS:iin. Teknisesti HMS:n mukaisen metsänkäsittelyn taloustulos, paljaan maan arvo, laskettiin kolmella eri laskentakorkokannalla (2 %, 3 % ja 4 %), ja puuston kehityksen viivästyisestä aiheutuvat kustannukset määritettiin yksinkertaisesti paljaan maan arvon erotuksena: alkuperäisen viljelyajankohdan mukainen paljaan maan arvo - 3 vuotta myöhästyneen viljelyajankohdan mukainen paljaan maan arvo. Talouslaskentaa varten valittiin kolme paikkakuntaa: Kotka, Jyväskylä ja Kajaani. HMS:n mukaiset simuloinnit toteutettiin lisäksi sekä muokkaamattomalle että muokatulle maapohjalle. Taulukossa 11 on esitetty paikkakunnittaiset metsikön perustamisen viivästyisestä (+3 vuotta) aiheutuvat kustannukset eri laskentakorkokannoilla.

Edellä kuvatun puuston kehityksen viivästyksen kustannusten lisäksi tukkimiehentäituho aiheuttaa täydennysviljelykustannuksia. Nämä kustannukset laskettiin seuraavasti: taimien hinta oli 0,36 €/taimi (taimi+työ), maanmuokkauksen 397,6 €/ha (Taulukko 1). Kaikissa tapauksissa (katso seuraava kappale) ei maanmuokkausta toteutettu täydennysviljelyn yhteydessä.

Täydennysviljelyn kustannukset (tässä esitetty ilman diskonttausta, talouslaskelmissa diskontattu kolmen vuoden mukaan) olivat 500 taimen viljelytiheydellä 180–577,6 €/ha ja 1 000 taimen viljelytiheydellä 360–757,6 €/ha riippuen siitä, tehtiinkö maanmuokkausta vai ei.

Taulukko 11. Metsikön perustamisen viivästymisestä aiheutuvat kustannukset eri paikkakunnilla, €/ha.

Puulaji	Paikkakunta	maanmuokkaus	Kustannus, €/ha
Kuusi	Kotka	Kyllä	466,3 ^{a)} 196,7 37,5
		Ei	476,9 233,1 76,3
	Jyväskylä	Kyllä	355,0 113,1 0 ^{b)}
		Ei	367,3 149,4 22,5
	Kajaani	Kyllä	248,2 56,6 0
		Ei	350,2 182,6 89,0
mänty	Kotka	Kyllä	311,2 100,6 0
		Ei	352,2 145,1 24,0
	Jyväskylä	Kyllä	242,7 58,5 0
		Ei	282,0 101,0 0
	Kajaani	Kyllä	171,0 15,0 0
		Ei	214,0 60,1 0

^{a)} ylin lukuarvo (466,3) on kustannus 2 %, keskimäinen (196,7) 3 % ja alimmainen (37,5) 4 % laskentakorkokannalla määritetty, ^{b)} alkuperäinen, negatiivinen kustannus on muutettu 0:ksi. Tulkinta on seuraava: jos toiminta (tässä metsätalous) on lähtökohtaisesti valitulla tuottovaateella (laskentakorkokanta) tappiollista, on perusteltua viivyttää toiminnan aloittamista ja täten pienentää tappiota. Siis: kolmen vuoden viivästäminen aikaansaa sen, että 4 % laskentakorkokannalla alkuperäinen tappiollinen paljaan maan arvo pienenee, jolloin näiden erotus on negatiivinen. Olisi ristiriitaista käyttää negatiivisia kustannuksia, joten kustannus merkitty 0:ksi.

Jotta metsikkötason kustannukset voitiin skaalata laajemmalle alueelle, piti talouslaskelmissa hyödyntää sekä aikaisempaa tutkimustietoa tukkimiehentäituhosta että metsätilastoja. Metsätilastoista (Suomen_metsätilastot_2021_verkko.pdf; Taulukko 3.11) saatiin selville kuusen ja männyn taimien kappalemäärät, jotta voitiin määrittää niiden suhteelliset pinta-alaosuudet, kun alkuperäisinä istutustiheyksinä sovellettiin 2000 tainta männyllä ja 1 800 tainta kuusella hehtaaria kohden. Edelleen VMI13:n metsätuho raportista saatiin nykytilanne tukkimiehentäituhon osalta: 2 495 hehtaaria tukkimiehentäituhon vuodessa, kun männyn taimet käsitellään kemiallisesti ja maa muokataan. Tutkimustuloksista (esim. Luoranen ym. 2017, 2021, 2022b) puolestaan saatiin keskimääräiset tuhoprosentit, joita sovellettiin muodostettaessa vaihtoehtoisia skenaarioita nykytilanteen rinnalle. Taulukossa 12 on kuvattu talouslaskennan skenaariot ja niiden mukaiset tukkimiehentäituhopinta-alat, jotka siis edellyttävät täydennysviljelyä sekä aiheuttavat puuston kehityksen viivästyemisestä johtuen kustannuksia.

Lopullista talouslaskentaa varten Taulukossa 11 esitetyistä paikkakunta-kohtaisista tuloksista määritettiin keskiarvo, jota edelleen sovellettiin skaalattaessa metsikkötason tuloksia Taulukon 12 skenaarioiden mukaisesti. Taulukossa 13 on esitetty kolmella laskentakorkokannalla (2 %, 3 % ja 4 %) tukkimiehentäituhon vuotuiset kustannukset kahdella eri täydennysviljelytiheydellä.

Taulukko 12. Tukkimiehentäituhon skenaariot. Täydennysviljelyn yhteydessä toteutettava maanmuokkaus suoritettiin ainoastaan skenaarioissa 3 ja 4.

Skenaario	Vuotuinen tukkimiehentäin aiheuttama tuhopinta-ala, hehtaaria
Nykytilanne: muokkaus+kemiallinen käsittely ^{a)}	661 (mänty) / 1 834 (kuusi) [2 495] ^{b)}
Pelkkä muokkaus ilman kemiall. käsittelyä	4 068 (mänty) / 11 283 (kuusi) [15 351]
Kemiallinen käsittely ilman maanmuokkausta	4 319 (mänty) / 11 980 (kuusi) [16 299]
Ei muokkausta eikä kemiall. käsittelyä	10 678 (mänty) / 29 618 (kuusi) [40 296]

a) taimien kemiallinen käsittely taimitarhalla, b) hakasuluissa männyn ja kuusen yhteenlaskettu vuotuinen pinta-ala, hehtaaria

Taulukko 13. Tukkimiehentäituhon kustannukset eri skenaarioissa, miljoonaa euroa.

Skenaario	Täydennysviljelyn taimimäärä	2 %	3 %	4 %
Nykytilanne: muokkaus+kemiallinen käsittely	500	1,24	0,67	0,39
	1 000	1,66	1,08	0,78
Pelkkä muokkaus ilman kemiallista käsittelyä	500	7,61	4,14	2,60
	1 000	10,21	6,67	5,05
Kemiallinen käsittely ilman maanmuokkausta	500	14,20	10,78	8,75
	1 000	16,85	13,35	11,25
Ei muokkausta eikä kemiallista käsittelyä	500	36,74	27,87	22,63
	1 000	43,58	34,51	29,08

Taulukosta 13 nähdään, että tukkimiehentäin aiheuttamat kustannukset vaihtelevat merkittävästi eri skenaarioiden välillä. Esimerkiksi Nykytilanteessa 4 % laskentakorkokannalla vuotuiset kustannukset ovat noin 0,78 M€, kun ne skenaariossa 4 (ei muokkausta eikä kemiallista käsittelyä) nousevat peräti 29,08 M€ tasolle.

3.5. Mäntypistiäiset

3.5.1. Mäntypistiäiset tuhonaiheuttajina

Mäntypistiäiset ovat endeemisiä hyönteisiä Suomen metsissä. Metsissä havaitut pistiäistuhot ovat useimmiten ruskomäntypistiäisen aiheuttamia. Ruskomäntypistiäinen tappaa harvoin mäntyjä, mutta heikentää niiden kasvua. Suomessa havaitaan harvakseltaan myös pilkkumäntypistiäisen aiheuttamia tuhoja. Vuosituhannen vaihteessa keskisessä ja eteläisessä Suomessa esiintyi laaja pilkkumäntypistiäisepidemia, mutta muita vakavia epidemioita ei ole esiintynyt. Pilkkumäntypistiäisen aiheuttamat tuhot ovat huomattavasti vakavampia kuin ruskomäntypistiäisen aiheuttamat. Suurempien kasvutappioiden lisäksi se voi johtaa puuston kuolemiin. Molempien havupistiäislajien aiheuttamat tappiot liittyvät siis kasvun heikentymiseen sekä lisääntyneeseen puuston kuolemiseen. Kasvutappiot ja niiden vakavuus voidaan liittää vähentyneeseen neulasbiomassaan. Ruskomäntypistiäinen käyttää ravinnokseen vain uusinta neulasvuosikertaa, kun taas pilkkumäntypistiäisen ravinnoksi kelpaavat kaiken ikäiset neulas.

Mäntypistiäisen aiheuttamia kasvutappioita taloudellisia tappioita on aikaisemmin arvioitu Lyytikäinen-Saarenmaan ja Tompon (2002) artikkelissa. Tutkimus keskittyi Harjavallan alueella vallinneeseen pilkkumäntypistiäisepidemiaan ja arvioi kasvutappioita lustojen perusteella (Taulukko 14). Tämä tehtiin jakamalla puut karkeasti tuholuokkiin neulasbiomassamenetyksen perusteella seuraavasti: Lievä (10 %), kohtuullinen (50 %), vakava (90 %). Ruskomäntypistiäisen osalta kasvutappiota arvioitiin kyseisessä työssä seuraavan kirjallisuuden perusteella: Juutinen (1967), Tiihonen (1970), Kulman (1971), Ericsson ym. (1980), Austarå ym. (1987), Viitasari ja Varama (1987) ja Britton (1988).

Tässä työssä käytettiin tietolähteinä kasvutappioiden arvioinnissa VMI10-13 mittauksia, ja koepuita, joista oli arvioitu tuhot. VMI:ssä ei arvioida puiden neulaskatoa, eikä sitä voida yksiselitteisesti arvioida tuhon asteen perusteella jälkikäteen. ICP-seurannoissa on arvioitu tuhon vakavuutta ja puuston harsuuntumisastetta terveiden ja mäntypistiäistuhosta kärsivien puiden osalta (Taulukko 15), joten sitä tietoa voidaan käyttää, kun liitetään VMI:nkin mittaama tuhon vakavuus ja neulaskato toisiinsa. Tuhojen vakavuusluokittelut eivät vastaa täydellisesti toisiaan VMI:ssä ja ICP:ssä, joten VMI-arvio tuhon vakavuudesta luokiteltiin karkeasti lieviin (VMI-tuhoaste 0-3, vastaa ICP-luokkaa 1) ja vakaviin (VMI-tuhoaste 4-5, vastaa ICP-luokkaa 2).

Taulukko 14. Mäntypistiäisten aiheuttamat kasvutappiot eri neulaskatoasteilla (katso Lyytikäinen-Saarenmaa ja Tomppo 2002).

Kasvutappio (% dbh-kasvusta)	10 (<25 %)	50	90 (>75 %)
Ruskomäntypistiäinen	9	21	32
Pilkkumäntypistiäinen, 1. vuosi	37	86	94
Pilkkumäntypistiäinen, 6 vuotta	26	55	71
Kuolleisuus metsän puista (%) epidemian jälkeen			
Ruskomäntypistiäinen	2	4	6
Pilkkumäntypistiäinen	10	30	60

Taulukko 15. Keskimääräinen harsuuntuneisuusprosentti ja neulaskadon laajuus ICP-aineistossa päätuhon mukaan. Eri mäntypistiäisten luvut olivat samaa luokkaa, joten vain keskiarvo on laskettu. ICP-luokat: 1 – elinvoimaa tai kasvua lievästi vähentävä, 2 – elinvoimaa tai kasvua voimakkaasti vähentävä.

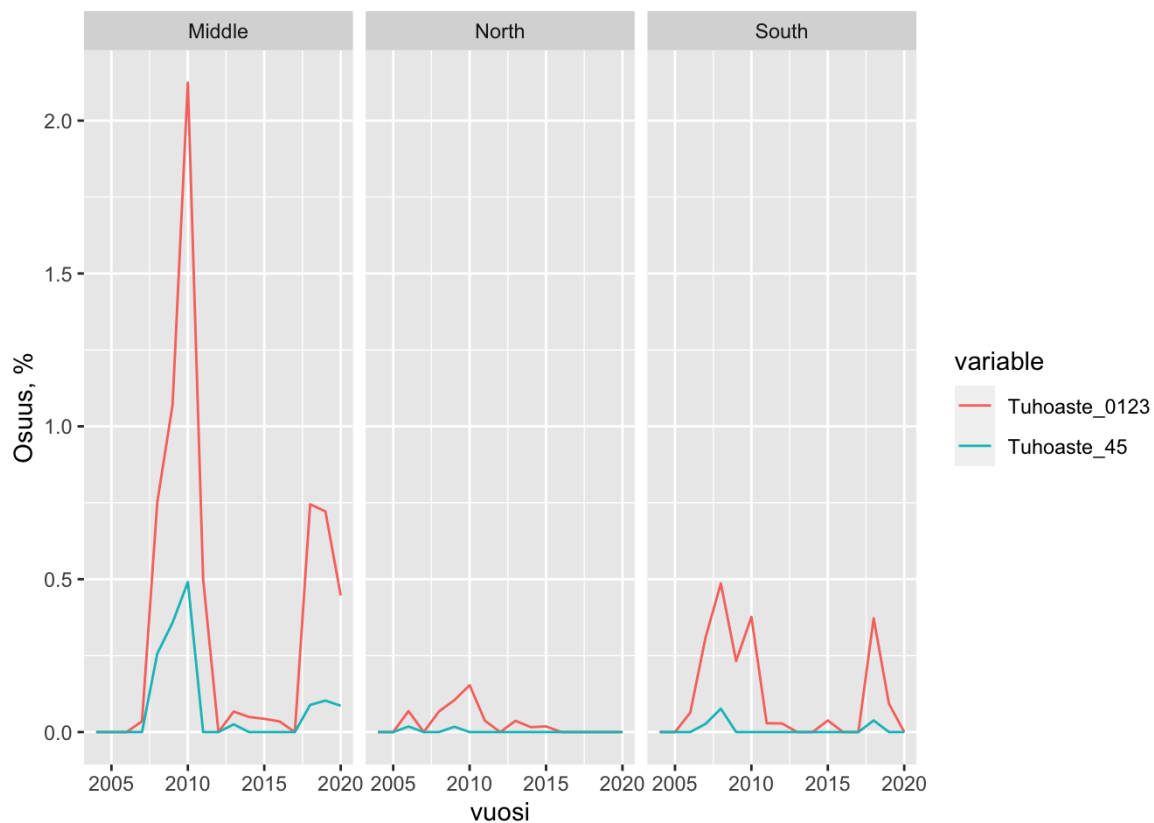
ICP-tuhoaste	N	Harsuuntumisaste (%)	Maastossa arvioitu mäntypistiäisten aiheuttama harsuuntuminen (%)
-1 (ei tuhoa)	28255	11,6	NA
1 (lievä)	589	15,4	10,0
2 (vakava)	63	49,8	42,5

Läpimittakasvun suhteellinen muutos vastaa melko tarkkaan tilavuuskasvun muutosta Laasasenahon läpimittakasvumallin (Tapion taskukirja/Laasasenaho 1982) mukaan, joten läpimitan kasvun muutosta mäntypistiäistuhon seurauksena käytettiin suoraan arvioimaan tilavuuskasvun muutosta.

Taulukko 16. Männyin kasvu (milj. m³/a, vuotuinen keskikasvu m³/ha) ja kokonaistilavuus (m³) metsä- ja kitumaalla suuralueittain, VMI11-13 keskiarvo. Lähde: Metsätilastot, Luke.

Suuralue	Milj. m ³ /a	Vuotuinen keskikasvu (m ³ /ha)	Tilavuus (milj. m ³)
Eteläinen	9,69	6,8	249,3
Keskinen	20,01	6,3	456,3
Pohjoinen	18,61	3,2	517,3

VMI-tietojen perusteella vain 3,8 % havupistiäistuhosta on pilkkumäntypistiäisen aiheuttamaa. VMI-aineiston perusteella mäntypistiäisistä kärsivät puut olivat keskikokoisia, ja läpimitakeskiarvon ero oli suurimmallaan Etelä-Suomessa, missä mäntypistiäisistä kärsivät puut olivat läpimitaltaan 18,9 cm ja terveet puut 20,0 cm.



Kuva 16. Mäntypistiäisten vaurioittamien koepuiden osuus lievien ja vakavampien tuhojen tapauksessa VMI10-13 perusteella. Kuolleita puita ei havaittu.

Yhtenä vuonna sattuneista uusista tuhoista seuraava kasvutappio (joka realisoituu seuraavan kuuden vuoden kuluessa) laskettiin VMI:n raportointien männyn alueittaisten kokonaistilavuuskasvujen (Taulukko 16), koepuista laskettujen yhden vuoden tuhotodennäköisyyksien (Taulukko 17) sekä Lyytikäinen-Saarenmaan ja Tompon (2002) arvioimien kasvutappioiden perusteella. Tässä yhteydessä oletettiin, että VMI:n raportoimat vakavuusluokat 1–3 vastaavat Lyytikäinen-Saarenmaan ja Tompon (2002) arvioimia lievintä defoliaatioastetta, ja suuremmat tuhoasteet Lyytikäinen-Saarenmaan ja Tompon (2002) keskimääräistä defoliaatioastetta. Defoliaatioasteen ja VMI-luokituksen rinnastukselle voidaan perustella ICP-mittauksissa havaitun defoliaatioasteen perusteella, vaikka VMI:n ja ICP:n käyttämä tuhoasteluokitus poikkesikin toisistaan. Kaikkein vakavimmat tapaukset olivat harvinaisia, ja kuolleita puita ei havaittu VMI-aineistossa (mahdollisesti siksi, että niitä oli poistettu).

Taulukko 17. Eri tuholuokkien osuudet VMI-datassa koepuiden perusteella (%) (VMI10-13. Huom. mäntypistiäistuho on merkitty aina syntyneen inventointikauden tai edellisen vuoden aikana, joten vuosittain syntyy siis noin puolet taulukon tuhoista.

Suuralue	Määrä	Ei tuhoa	Tuhoaste 0–3	Tuhoaste 4–5	Kuolleet
Eteläinen	23130	0	0,248	0,0163	0
Keskinen	25474	0	0,861	0,183	0
Pohjoinen	31325	0	0,061	0,004	0

Näin laskemalla arvioitiin, että keskimäärin yhdessä vuodessa tapahtuvien uusien mäntypistiäistuhojen aiheuttama kasvutappio, joka toteutuu yhden tuhon seurauksena seuraavana kuutena vuotena, on koko Suomessa 72 700 m³, josta Eteläisessä Suomessa toteutuu 6 730, Keski-Suomessa 62 800 ja Pohjoisessa Suomessa 1 060 m³.

Aineiston perusteella havaittiin, että mäntypistiäistuhot ovat vaihtelevia, ja ne voivat epidemioiden käynnistyessä aiheuttaa merkittäviä paikallisia ja alueellisia tappioita.

3.5.2. Mäntypistiäisen aiheuttamat taloudelliset menetykset

Mäntypistiäisten (rusko- ja pilkkumäntypistiäinen) aiheuttamien tuhojen taloudellinen vaikutus perustui VMI10-13 aineistoihin, joista laskettiin keskimääräinen puiden mäntypistiäistuhon kolmella suuralueella (Eteläinen, Keskinen ja Pohjoinen Suomi). Vakavuusluokkien mukaiset osuudet mäntymetsissä kerrottiin suuralueiden mäntymetsien tilavuudella (oletus: puiden tuho-osuus vastaa tilavuusosuutta) ja edelleen arvioitiin tuhosta kärsivän tilavuuden kasvutappio ICP-harsuuntumislukittelun ja Lyytikäinen-Saarenmaa & Tomppo-artikkelissa (2002) esitetyn harsuuntumisen ja kasvutappion suhdetta kuvaavan taulukon avulla (Taulukko 14). Kasvutappiot arvioitiin ICP:n harsuuntumislukittelun (neulaskato) avulla liittäen ICP:ssä ja VMI:ssä mitattu tuhon vakavuus toisiinsa. Tehdystä oletuksesta seuraa epävarmuutta, jonka kuitenkin voidaan katsoa olevan maltillinen.

Edellä kuvatun laskentamenetelmän lisäksi talouslaskelmassa arvioitiin suuralueittain keskimääräinen tukki- ja kuitupuun osuus puuston kasvussa. Koska mäntypistiäistuhoa-aineistossa ei ole alkukehitysvaiheen metsiä, määritettiin tässä tukki- ja kuitupuun osuudet ensiharvennusten jälkeisestä kehityksestä päätehakkuuseen. Kullekin suuralueelle arvottiin yksi paikkakunta, jolle simuloitiin HMS:n mukainen metsänkäsittely Motti-metsikkösimulaattorilla, ja edelleen ko. käsittelystä laskettiin tukki- ja kuitupuuosuudet ensiharvennuksesta päätehakkuuseen. Arvotut paikkakunnat olivat Heinola (tuoreen kankaan istutusmännikkö), Viitasaari (kuivahkon kankaan kylvömannikkö) ja Vaala (kuivahkon kankaan kylvömannikkö). Tukki- ja kuitupuuosuudet kerrottiin tukki- ja kuitupuun kantohinnoilla (Taulukko 1) jotta saatiin keskimääräinen kuutiometrin arvo. Tämä arvo ja mäntypistiäisen aiheuttama kasvutappio suuralueittain sekä mäntypistiäistuhojen aiheuttama taloudellinen menetys on esitetty Taulukossa 18.

Taulukko 18. Mäntypistiäisen aiheuttama vuotuinen kasvutappio (m³) lievissä ja vakavissa tuhoissa ja keskimääräinen kuutiometrin arvo (€/m³) sekä mäntypistiäistuhojen aiheuttama taloudellinen menetys suuralueittain (€). Taloudellinen menetys yhteensä 2,78 miljoonaa euroa.

Suuralue	Vuotuinen kasvutappio, m ³		Arvo, €/m ³	Taloudellinen menetys, €
	Lievä	Vakava		
Eteläinen	5 845	885	39,29 (68 %) ^{a)}	264 457
Keskinen	41 940	20 867	38,26 (65 %)	2 402 995
Pohjoinen	2 755	441	35,86 (58 %)	114 599

^{a)}suluissa tukkipuuprosentti, % (tukki- ja kuitupuun kantohinnat, katso Taulukko 1)

Mäntypistiäisen kohdalla on ensiarvoisen tärkeää tiedostaa, että epidemiavuonna voivat kasvutappiot jopa kymmenkertaistua Taulukossa 18 esitetyistä keskimääräisistä lukuarvoista. Tällöin myös taloudellinen menetys suurenee merkittäväksi, monikertaiseksi.

4. Nisäkkäät

4.1. Myyrät

4.1.1. Myyrät tuhonaiheuttajina

Myyrät ja muut jyrsijät aiheuttavat merkittäviä taloudellisia vahinkoja metsätaloudessa eri puolilla maailmaa (Gill 1992a,b, Baxter & Hansson 2001, Huitu ym. 2009).

Suomessa esiintyy 11 myyrälajia, joista pahimmat tuhot aiheuttavat yleisimmät lajit: peltomyyrä *Microtus agrestis* ja metsämyyrä *Myodes glareolus* (Hansson 1986, Hansson & Larsson 1980). Peltomyyrää tavataan kautta Suomen ja metsämyyrää aina havumetsän pohjoisrajalle asti.

Pelto- ja metsämyyrien kannat vaihtelevat valtaosassa Suomea kolmen–neljän vuoden säännöllisissä jaksoissa eli sykleissä (Korpela ym. 2013). Pohjavuoden alhaisten tiheyksien ja huippuvuoden korkeiden tiheyksien ero saattaa olla monisatakertainen. Nykyisin ollaan yleisesti sitä mieltä, että myyrien kannanvaihteluiden syklisyys johtuu saalistuksen, tautien sekä talviringon loppumisen yhteisvaikutuksesta (Krebs 2013, Andreassen ym. 2021). Kannanvaihtelut ovat usein samanaikaisia eli synkronisia laajoillakin maantieteellisillä alueilla, kattaen jopa 500–600 km:n etäisyyksiä (Henttonen & Wallgren 2001, Sundell ym. 2004).

Kannanvaihtelujen voimakkuus, säännöllisyys ja alueellisen synkronian aste ovat kuitenkin jatkuvassa muutoksessa. Voimakkaiden kannanvaihteluiden ajanjaksot kestävät yleensä 10–15 vuotta ja tänä aikana myös maantieteellinen synkronia on laajaa (joskus jopa puolet Suomesta samassa syklin vaiheessa) (Korpela ym. 2013). Säännölliset syklit voivat kuitenkin hiipua hyvin vaikeiksi jopa vuosikymmeniksi tai jopa muuttua kokonaan vain vuodenaikojen välisiksi vaihteluiksi (Henttonen & Wallgren 2001, Cornulier ym. 2013). Vaikeiden kannanvaihteluiden aikoina myös maantieteellinen synkronia on huomattavasti suppeampaa.

Tuhojen esiintyminen

Myyrätuhojen esiintyminen korreloi positiivisesti, muttei erityisen vahvasti, myyrien kannan suuruuden kanssa (Hansson 1986, Huitu ym. 2009, Sullivan & Sullivan 2010). Pahimmat tuhot tapahtuvat monivuotisen kannanvaihtelun huippuvaiheen talvena, jolloin myyräkannan suuruutta rajoittaa talvella tarjolla olevan hyvälaatuisen ravinnon määrä. Huippuvuoden talvena esimerkiksi peltomyyrät kuluttavat suosituimmat ravintokohteensa, heinät, loppuun ennen ravinnoltaan huonompilaatuisten taimien syöntiin siirtymistä (Bucyanayandi ym. 1992).

Myyrätuhoja voi esiintyä missä tahansa päin Suomea, missä esiintyy myyrille suotuisaa elinympäristöä, toisin sanoen kaikkialla missä harjoitetaan metsätaloutta. Peltomyyrät suosivat kosteahkoja heinittyneitä elinympäristöjä, kuten niittyjä, pakettipeltoja ja tuoreiden kannaiden heinittyneitä hakkuaukkoja (Hansson 1977) ja metsämyyrät puolestaan varttuneita ja peitteisiä metsiä (Hansson 1982).

Myyrätuhojen esiintymisen voimakas vaihtelu sekä ajassa että alueellisesti maisematason sisällä (Henttonen ym. 1995) ja eri maantieteellisten alueiden välillä (Hansson 1986) vaikeuttaa merkittävästi tuhojen ennustamista ja ennaltaehkäisemistä. Vaikeutta lisää entisestään se, että valtaosassa tutkimuksia on kerätty empiiristä aineistoa vain joko myyrien runsausvaihteluista

(katsaukset: Hansson & Henttonen 1985, Krebs 2013) tai tuhojen määristä (Myllymäki 1977, Hansson ja Larsson 1980, Teivainen 1981), harvoin molemmista samanaikaisesti (Kaneko ym. 1998, Huitu ym. 2009, Imholt ym. 2017). Myyrien paikallinen runsaus syksyllä on kuitenkin nykytiedon valossa paras yksittäinen selittävä muuttuja myyrätuhojen ennustamiseksi (Huitu ym. 2009).

Tuhojen ilmeneminen

Myyrät tyypillisesti vahingoittavat ja tappavat nuoria taimia jyrsimällä niiden rungon, kasvainten tai juurten kuorta tai syömällä silmuja (Gill 1992a,b). Myyrätuhot tapahtuvat pääasiassa talvella hangen alla (Huitu ym. 2013). Pellonmetsityskohteilla peltomyyrät syövät vasta istutettuja koivuntaimia hanakasti jo keskikesällä (Henttonen ym. 1995).

Yleisesti ottaen myyrät suosivat lehtipuita havupuiden sijasta (Hjälten ym. 2004), mutta eri lajien välillä esiintyy merkittäviä eroja ravinnonvalinnassa eri puulajien suhteen ja myös tavassa, millä ne aiheuttavat vahinkoja.

Peltomyyrät käyttävät ravintonaan kaikkia metsätaloudessa käytettäviä puulajeja. Ne tyypillisesti järsivät nuorten taimien kuorta maanrajassa, mutta syönti voi ulottua hangen pinnan korkeudelle asti. Pienimmät taimet peltomyyrä usein katkoo kokonaan tyveltä ja pilkkoo pieniksi pätkiksi.

Metsämyyrät aiheuttavat Suomen olosuhteissa eniten vahinkoa havupuun taimille. Pienillä kuusen- ja männyntaimilla vahingot muistuttavat paljolti peltomyyrän aiheuttamia. Usein metsämyyrä kuitenkin aloittaa kuoren kaluamisen taimen yläosista ja etenee tyveä kohti. Metsämyyrä on hyvä kiipeämään. Lajille ominaista onkin havupuiden kärkisilmujen ja latvakasvainten kuoren syönti, jota voi esiintyä isommissa puissa jopa 5–6 m korkeudessa.

Metsänhoidollisilla käytännöillä on suuri merkitys eri taimikoiden myyrätuhoriskin määryttämisessä: myyrät suosivat eri puulajien taimia eri lailla; pienet taimet maistuvat paremmin kuin isot taimet; tarhalla runsaasti lannoitetut taimet maistuvat luonnontaimia ja lannoittamattomia paremmin; syystaimet ovat herkempiä kuin kevättaimet. Samoin esimerkiksi eteläistä siemenalkuperää oleva taimi voi pohjoisempaan siirrettynä altistua myyrätuhoille. Monilla taimikonhoitomenetelmillä kuten maanmuokkauksella, hakkuutähteiden poistolla ja aluskasvillisuuden torjunnalla on heinäravinnon ja/tai suojan määrää vähentävä vaikutus. Taimien menestyksen kannalta hyödylliset taimikon varhaisheidolliset toimenpiteet vähentävät siis myös myyrätuhoriskiä. (Huitu ym. 2013).

Merkittävä kuoren syöminen johtaa yleensä taimen kuolemaan, mikä edellyttää taimikoissa taimien osittaista tai täydellistä uudelleen istuttamista (Huitu ym. 2009). Taimet ovat alttiita myyrävahingolle jopa 4–5 vuotta istuttamisen jälkeen. Tänä aikana uudistusalan aluskasvillisuus on yleensä jo niin rehevää, että uudelleenistutus edellyttää myös maanmuokkausta. Myyrien syönti voi aiheuttaa laatuviikoja myös isompiin puihin ja altistaa ne sekundäärisille patogeeni-infektioille (Roll-Hansen & Roll-Hansen 1980, Henttonen ym. 1994). Näiden laatuviikojen taloudellista suuruutta ei ole arvioitu.

4.1.2. Myyrien metsätaloudelle aiheuttamat kustannukset

Suomessa ei kerätä systemaattista tilastotietoa myyrien aiheuttamista taimituhoista, joten valmiita tunnuslukuja myyrävahinkojen taloudellisesta arvosta ei ole saatavilla. Luonnonvarakeskus (sitä ennen Metsätutkimuslaitos) on kuitenkin seurannut viranomais- ja asiantuntijatehtävänä myyräkantojen suuruutta Suomessa pysyvillä seurantakohteilla yli 20 paikkakunnalla jo vuosikymmenten ajan (Korpela ym. 2013). Tässä tutkimuksessa näitä pitkäaikaisseurannan tuloksia käytettiin indeksinä myyrätuhoille, huomioiden aiemmin havaittu positiivinen yhteys myyrämäärien ja myyrätuhojen välillä (Huitu ym. 2009).

Tässä tutkimuksessa myyräkantojen pitkäaikaisseurannan tuloksia käytettiin paikallisten myyrätuhojen approksimaationa, perustuen myyrien syksyisen runsauden ja arvioidun metsätuhoon väliseen positiiviseen yhteyteen (Huitu ym. 2009). Huitu ym. (2009) keräsivät talven 2005/06 laajojen myyrätuhojen jälkeen 90:stä Suomen metsänhoitoyhdistyksestä taimituhointointi-aineistoa, johon tämänkin tutkimuksen analyysi perustuu. Arvioimme lineaarisen interpoloinnin avulla kullekin metsänhoitoyhdistykselle myyrien syksyiset runsaudet (myyrien runsausindeksit logit-asteikolla: $[\text{logit}(x) = -\ln((1/x) - 1)]$) vuosille 1990–2020. Sovitimme lineaarisen sekamallin, jossa:

- vastemuuttujana oli metsänhoitoyhdistysten talvelle 2005–06 arvioiman tuhoalan luonnollinen logaritmi,
- selittävänä muuttujana myyrien interpoloitu runsausindeksi (logit) syksyllä 2005,
- ns. offset-muuttujana tarkasteltavan alueen nuorten taimikoiden (kehitysluokka 2; pinta-ala < 1,3 m) pinta-alan luonnollinen logaritmi, ja
- satunnaisvaikutuksena metsäkeskusalue

Offset-muuttujan ansiosta vastemuuttujana on käytännössä nuorten taimikoiden tuhotun pinta-alan osuus (logaritmisella skaalalla).

Perustuen talven 2005/06 arvioituun myyrien runsauden ja metsätuhojen suhteeseen, lasimme kaikille vuosille ja metsänhoitoyhdistyksille arvioidun metsätuho-pinta-alojen osuuden nuorista taimikoista. Tuloksen ajallisen ja alueellisen vaihtelun tarkastelemiseksi sovitimme toisen lineaarisen sekamallin, jossa:

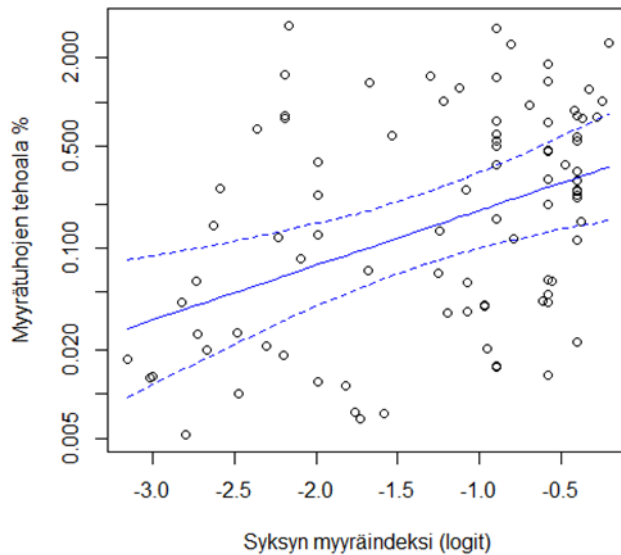
- vastemuuttujana on ikäluokan 2 tuhotun pinta-alan osuuden luonnollinen logaritmi,
- ensimmäisenä selitettävänä muuttujana on vuosi (ajallinen trendi),
- toisena selittävänä muuttujana on metsäkeskusalue faktorimuuttujana (alueelliset erot),
- ensimmäisenä satunnaisvaikutuksina on vuosi faktorimuuttujana (eli koko maan vuosittainen vaihtelu, joka ei selittynyt ajallisella trendillä), sekä
- toisena satunnaisvaikutuksena on vuoden ja metsäkeskusalueen interaktio faktorimuuttujana (alueelliset vuotuiset vaihtelut).

Myyrätuhoon aiheuttama taloudellinen tappio koostuu siitä, että myyrätuho aiheuttaa metsikön perustamisen uudelleen, ts. uudelleenviljelyn (nämä kustannukset diskontataan alkupe-
räisen metsikön perustamisajankohtaan). Uuden metsikön perustaminen saa lisäksi aikaan kustannuksia aiheuttavan aikaviiveen, mikä johtuu siitä, että harvennukset ja päätehakkuu siirtyvät aikajanalla eteenpäin verrattuna metsikön alkuperäiseen perustamisajankohtaan.

Jokaiselle metsäkeskukselle arvottiin (<https://www.randomizer.org>) yksi esimerkkipaikkakunta, jolle simuloitiin Motti-metsikkösimulaattorilla sekä tuoreen kankaan kuusikon että männikön HMS:n mukainen metsänkäsittely. Tässä oletettiin, että metsäkeskuksen alueella arvotun paikkakunnan mukaan simuloitu puuston kehitys tuoreen kankaan kuusikoissa ja männiköissä vastaa keskimääräistä ko. pääpuulajien ja kasvupaikkojen kasvun tasoa koko metsäkeskuksen alueella. Tuoreisiin kankaisiin päädyttiin, koska myyrätuhoja esiintyy pääosin tuoreilla ja rehevillä kankailla (Huitu ym. 2013). Myyrätuhon oletettiin ajoittuvan niin, että uudelleenviljely tapahtuu kaksi vuotta alkuperäisen perustamisajankohdan jälkeen (taimikot ovat alttiimmillaan myyrätuhoille 0–4 vuotta istuttamisesta; Huitu ym. 2013). Seuraavaksi HMS:n mukainen paljaan maan arvo (päättymättömänä summana; Chang 2014) diskontattiin kahden vuoden päästä, jolloin saatiin selville aikaviiveen aiheuttama kustannus. Myös metsikön uudelleenperustamisen kustannukset diskontattiin kahden vuoden päästä metsikön alkuperäiseen perustamisajankohtaan.

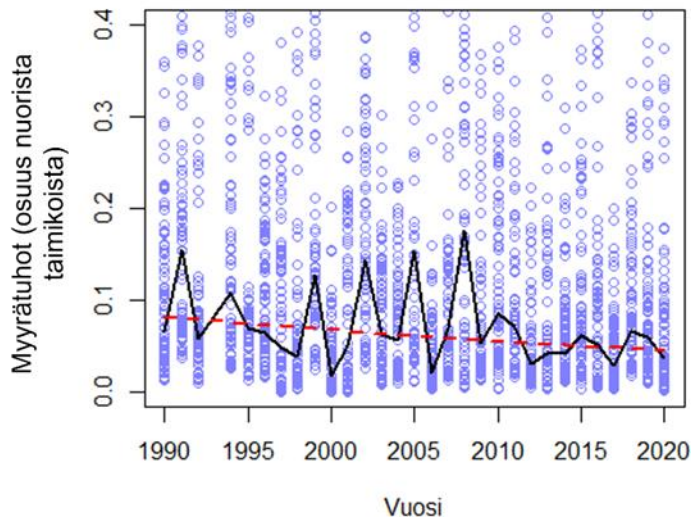
Koko maan tasoinen arvio myyrätuhojen kustannuksista saatiin kertomalla paikkakuntakohtaiset hehtaarikustannukset ennustemallin antamilla metsäkeskuskohtaisilla tuhopinta-aloilla ja summaamalla nämä yli metsäkeskusten.

Myyrien aiheuttamat taimikkotuhot talvella riippuivat positiivisesti edeltävän syksyn myyrämääristä [$\ln(\text{tuhot}) = -5.45 + 0.863 \text{ myyrämäärä}$ (keskivirhe 0.268)] (Kuva 17). Myyräaineiston ekstrapoloituun ennusteeseen perustuen myyrät tuhoavat valtakunnallisesti keskimäärin noin 0,1 % nuorista taimikoista vuosittain (Kuva 18). Paikallisesti myyrätuhot voivat olla huippuvuosina merkittävästi mittavampia, jopa yli 2 % nuorista taimikoista (Kuva 17).



Kuva 17. Syksyn myyrärunsauden ja seuraavana talvella todettujen myyrätuhojen osuuden yhteys (± 95 % luottamusväli) metsänhoitoyhdistyksittäin talvella 2005/06 ($n=90$). Myyrätuhot ilmaistu osuutena kunkin metsänhoitoyhdistyksen nuorten taimikoiden (kehitysluokka 2) pinta-alasta. Syksyn myyräindeksi on logit-muunnos perinteisestä myyrien runsausindeksistä (jonka arvot ovat: $0 < x < 1$).

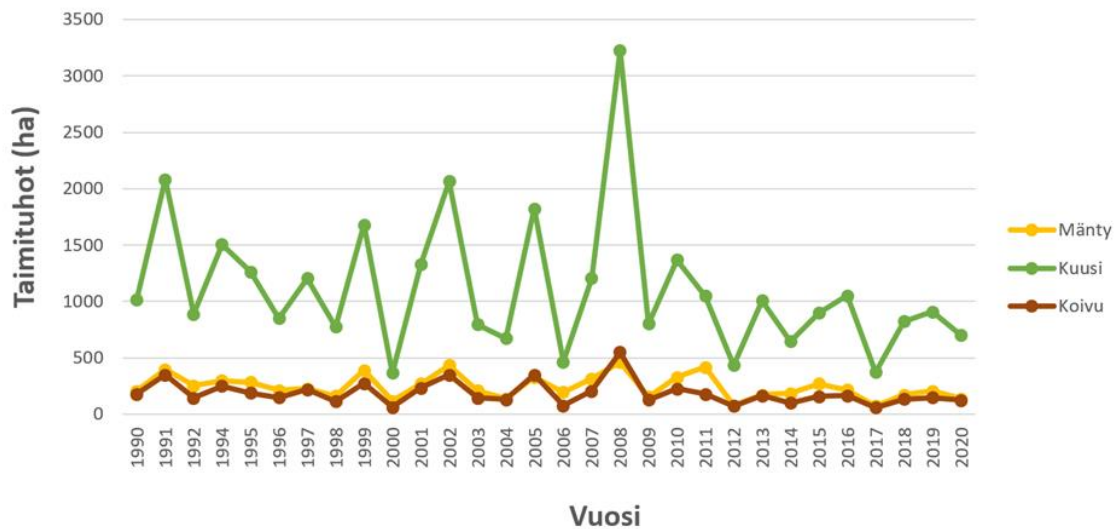
Viimeisen 12 vuoden aikana ei myyrien laaja-alaisia syyshuippuja ole esiintynyt valtakunnallisesti yhtä selvästi kuin tätä ennen. Viimeisimmän 10 vuoden aikana myyrätuhot ovat olleet keskimäärin noin 0,05 % nuorten taimikoiden määrästä ja vuosien välinen vaihtelu ei eroa merkittävästi tästä keskiarvosta (Kuva 18). Aiempien huippujen tuhot ovat olleet noin kaksinkertaisia tähän keskiarvoon verrattuna.



Kuva 18. Myyrien syysrunsauden perusteella ennustettu metsätuho nuorten taimikoiden (kehitysluokka 2) pinta-alan prosentuaalisena osuutena. Siniset ympyrät ovat metsänhoitoyhdistys- ja vuosikohtaiset ennusteet, musta yhtenäinen viiva kuvastaa valtakunnallisen keskiarvon vuosien välistä vaihtelua ja punainen katkoviiva on muutosta kuvaava eksponentiaalinen trendi. Pystyakseli on typistetty 0,4 % kohdalla, jotta aineiston valtaosan vaihtelut, keskiarvon vaihtelut ja pitkäaikainen trendi erottuisivat paremmin. Yksittäisillä metsänhoitoyhdistyksillä on joinain vuosina huomattavasti suurempiakin arvoja.

Ennustemallin mukaan myyrät aiheuttivat vuosina 1990–2020 keskimäärin 1 545 hehtaarin tuhot nuorissa taimikoissa (kehitysluokka 2) vuosittain. Myyrien kannanvaihteluista johtuva vuotuinen vaihtelu tuhomäärissä oli huomattavaa, ollen alimmillaan 510 ha ja ylimmillään 4 244 ha (Kuva 19). Yli kaikkien vuosien noin 71 % kaikista myyrätuhoista kohdistui kuuseen, 16 % mäntyyn ja 12 % koivuun (Kuva 19). Muiden lehtipuiden osuus oli <0,1 %.

Metsikkötason kustannukset myyrätuhoista paikkakunnittain vaihtelivat laskentakorkokannasta (2 %, 3 % ja 4 %) ja puulajista riippuen välillä 1562–1999 € / hehtaari (Taulukko 19). Myyrien kuusi- ja mäntytaimikoissa aiheuttamien taloudellisten tuhojen vuotuinen arvo ajanjaksolla 1990–2020 oli alhaisimman korkokannan mukaan laskettuna keskimäärin 2,56 milj. € ja korkeimman korkokannan mukaan laskettuna keskimäärin 2,13 milj. € (Taulukko 20). Vähätuhoisimpana vuonna myyrätuhojen arvo oli korkokannasta riippuen 0,70–0,85 milj. €. Pahimpana myyrätuhotalvena (talvi 2008/09) myyrätuhojen taloudellinen arvo oli laskelmien mukaan, korkokannasta riippuen, 5,80–6,97 milj. €.



Kuva 19. Myyrien aiheuttamat vuosittaiset ennustetut metsätuhot puulajeittain, perustuen metsäkeskuskohtaisiin ennusteisiin tuhopinta-alasta (sama tieto, joka näkyy Kuvassa 18), tuhojen jakautumiseen puulajikohtaisesti talvena 2005/06 (Huitu ym. 2009), sekä eri puulajien taimikoiden esiintymiseen eri puolella maata (VMI 10 ja 12 keskiarvo).

Myyrät aiheuttavat mittavat tuhot taimikoissa vuosittain, mutta erityisesti niinä vuosina, jolloin kannat ovat poikkeuksellisen suuret. Tuhoissa on myyrien kannanvaihteluista johtuen merkittävää vuosien ja alueiden välistä vaihtelua. Valtaosa tuhoista kohdistuu istutettuihin kuusiin, vähemmissä määrin männyn ja koivun taimiin.

Tässä tutkimuksessa havaittiin selvä yhteys myyrien syksyisen määrän ja syksyä seuraavan talven aikana tapahtuneisiin myyrätuhoihin. Nyt raportoidut tulokset perustuvat talven 2005/06 aikana tapahtuneiden myyrätuhojen inventointiaineistoihin, joita kerättiin metsänhoitoyhdistyksissä tuhotalven jälkeen (Huitu ym. 2009). On huomionarvoista, että tulokset pohjautuvat aineiston keruun ajankohdan inventointitilanteeseen ja edustavat siten pienintä tunnettua myyrätuhomäärää. Valtaosa metsänhoitoyhdistyksistä ei ollut kyselyyn vastaamiseen mennessä ehtinyt inventoimaan kaikkia toimialueellaan sijainneita nuoria taimikoita.

Toiminnanjohtajat arvioivat todellisia tuhohehtaareja oleva 1,74 kertaa enemmän kuin mitä kyselyyn mennessä oli ehditty inventoimaan (Huitu ym. 2009). Mikäli arvio pitää paikkansa, Taulukon 19 luvut ovat karkea aliarvio todellisista myyrien aiheuttamista kokonaistappioista.

Myyrätuhojen taloudellista arviota simuloitaessa esimerkkipuulajeina käytettiin vain kuusta ja mäntyä. Myyrätuhot kohdistuvat kuitenkin yli 10 % osuudella myös koivuun, joten Taulukon 19 luvut ovat saman verran aliarvioita. Simuloinnissa oletettiin lisäksi, että kunkin metsäkeskuksen alueelta arvotun paikkakunnan mukaan simuloitu puuston kehitys tuoreen kankaan kuusikoissa ja männiköissä vastaa keskimääräistä ko. pääpuulajien ja kasvupaikkojen kasvun tasoa koko metsäkeskuksen alueella. Näin ei todellisuudessa ole, vaan vaihtelua esiintyy tässä esitettyjen tulosten osalta. Oletuksemme kuitenkin on, että tämä ei ole merkittävä virhelähde, vaan tulokset skaalautuvat luotettavasti koko maan tasolle.

Tutkimuksen aineisto perustuu täydellisesti tuhottujen taimikoiden määriin. Myyrät, erityisesti metsämyyrät, voivat myös vioittaa taimia ei-kuolettavasti. Tämä voi kuitenkin johtaa kasvutappioihin ja/tai laatuviikoihin. Tämän kaltaisten vahinkojen taloudellista suuruutta ei ole tutkimuksessa arvioitu.

Taulukko 19. Myyrätuhojen taloudellinen kustannus (€/ha) (diskontatut perustamiskustannukset + aikaviiveen aiheuttama kustannus) metsikkötasolla tuoreen kankaan kuusikoissa ja mänikoissa paikkakunnittain sekä ennustemallin mukaiset vuotuiset myyrätuhopinta-alat (ha). Uudelleenviljelyn oletetaan tapahtuvan kahden vuoden kuluttua alkuperäisestä viljelystä molemmilla puulajeilla.

Paikkakunta (metsäkeskus)	puulaji	Kustannus (€ / ha) korko- kanta 2 %/ 3 %/ 4 %	Myyrätuhopinta- ala (ha)
Laihia (E-Pohjanmaa)	mänty	1 913,9/ 1 721,6/ 1 576,0	4,9
	kuusi	1 930,3/ 1 778,1/ 1 587,4	7,8
Porvoo (E-Rannikko)	mänty	1 990,9/ 1 806,0/ 1 647,2	2,8
	kuusi	1 978,7/ 1 792,6/ 1 633,5	14,2
Rantasalmi (E-Savo)	mänty	1 980,0/ 1 782,0/ 1 617,1	46,4
	kuusi	1 961,3/ 1 778,1/ 1 622,2	347,3
Kärkölä (Häme-Uusimaa)	mänty	1 957,1/ 1 761,9/ 1 600,0	7,2
	kuusi	1 958,4/ 1 775,3/ 1 619,2	91
Imatra (Kaakkois-Suomi)	mänty	1 978,8 /1792,7/ 1 633,1	9,4
	kuusi	1 972,7 /1786,5/ 1 627,8	55,2
Kajaani (Kainuu)	mänty	1 900,1 /1 728,9/ 1 595,3	14,2
	kuusi	1 870,6 /1 696,2/ 1 583,8	15,3
Petäjävesi (K-Suomi)	mänty	1 917,1 /1 746,6/ 1 606,6	8,9
	kuusi	1 891,8/ 1 712,7/ 1 583,8	56,7
Tornio (Lappi)	mänty	1 876,2/ 1 708,3/ 1 595,3	49,2
	kuusi	1 830,8/ 1 657,9/ 1 561,9	33,2
Taivassalo (Lounais-Suomi)	mänty	1 998,7/ 1 801,5/ 1 636,9	9,6
	kuusi	1 989,6/ 1800,7/ 1 639,5	29,9
Akaa (Pirkanmaa)	mänty	1 953,0/ 1 756,9/ 1 595,4	12,2
	kuusi	1 959,6/ 1 775,0/ 1 618,1	80,8
Outokumpu (P-Karjala)	mänty	1 939,9/ 1 766,2/ 1 616,9	16,4
	kuusi	1 897,4/ 1 720,6/ 1 583,8	64,2
Utajärvi (P-Pohjanmaa)	mänty	1 885,1/ 1 716,2/ 1 595,3	25,5
	kuusi	1 840,7/ 1 665,4/ 1 561,9	44,7
Vesanto (P-Savo)	mänty	1 936,3/ 1 763,7/ 1 615,2	18,6
	kuusi	1 899,2/ 1 721,9/ 1 583,8	250,9
Kristiinankaupunki (Pohjanmaa)	mänty	1 945,1/ 1 751,6/ 1 592,0	2,7
	kuusi	1 947,1/ 1 765,3/ 1 945,1	7,4

Tutkimuksemme perustuu pääasiassa Luken valtakunnallisten myyräseurantojen ajallisesti ja alueellisesti kattaviin aineistoihin ja niiden käyttämiseen tuhojen indeksinä. Olemme kysyneet osoittamaan, että myyrämäärien ja myyrien aiheuttamien tuhojen välillä on selvä yhteys valtakunnan mittakaavassa (Kuva 17, Huitu ym. 2009). On kuitenkin selvää, että myyrätuhoihin vaikuttavat paikallisesti monet muutkin tekijät, esimerkiksi sääolosuhteet tai metsänhoitokäytännöt (Huitu ym. 2013). Myyrätuhojen tehokas ennustaminen ja ennaltaehkäisy edellyttäisi sitä, että myyrämäärien lisäksi seurattaisiin vuotuisesti myös myyrien aiheuttamien tuhojen määrää riittävän hienopiirteisellä mittakaavalla.

Taulukko 20. Myyrien aiheuttamien kuusi- ja mäntytaimituhojen keskimääräinen vuotuinen määrä hehtaareina vuosina 1990–2020, kyseisen ajanjakson minimi- ja maksimituhovuosien tuhopinta-alat ja näistä arvioidut vuotuiset taloudelliset menetykset koko Suomessa kolmelle eri korkokannalle laskettuna, miljoonaa euroa.

tunnus-luku	pinta-ala (ha)	korkokanta		
		2 %	3 %	4 %
keskiarvo	1355	2,56	2,32	2,13
minimi	448	0,85	0,77	0,70
maksimi	3687	6,97	6,31	5,80

4.2. Hirvieläimet

4.2.1. Hirvieläinten aiheuttamat metsätuhot

Hirvet aiheuttavat vahinkoja talousmetsissä syömällä puuntaimien latva- ja oksakasvaimia ja lehvästöä, kaluamalla puiden kuorta ravinnokseen ja taittamalla isompien taimien runkoja latvakasvaimiin yltääkseen. Pienempien hirvieläinten osalta vakavimmat vahingot eli metsätuhot kohdistuvat tyypillisesti pieniin taimiin taimikon varhaisvaiheessa. Tuhojen seurauksena puiden kasvu vähenee, puita kuolee ja metsiköiden puulajisuhteet muuttuvat. Puiden teknisen vioittumisen seurauksena niistä jatkossa saatava puutavara on heikkolaatuista tai käyttö sahatavarana estyy. (Matala ym. 2021.)

Hirvieläintuhot ovat pitkään olleet Valtakunnan Metsien Inventoinnissa (VMI) merkittävin taimikkovaiheen tuhonaiheuttaja. Esimerkiksi inventointivuonna 2020 metsikön laatua alentaneita hirvieläintuhoja havaittiin 536 000 hehtaarin alalla. VMI:ssä valtaosa eli noin 75 % tuhoalasta on mäntyvaltaisissa metsissä, mutta lehtipuuvaltaisissa puustoissa on kuitenkin suhteellisesti enemmän tuhoja niiden pinta-alaan nähden. Varttuneiden taimikoiden ja sitä isompien puustojen osalta aiheuttajana on todennäköisesti hirvi, mutta pienten taimikoiden osalta myös muut hirvieläimet, kuten valkohäntäpeura ja metsäkauris, ovat mahdollisia tuhonaiheuttajia. (Matala ym. 2021.)

Hirvieläinten metsätalousvaikutusten taloudellisesta merkityksestä ei tällä hetkellä ole käytävissä kattavaa analyysiä. Pyyntiluvanvaraisten hirvieläinten (muut kuin metsäkauris) aiheuttamia vahinkoja on korvattu yksityisille metsänomistajille esimerkiksi vuosina 2013–2019 yhteensä noin 17 010 hehtaarin alalta. Valtaosa korvatuista tuhoista on hirven aiheuttamia, mutta korvausjärjestelmän kautta korvataan myös valkohäntäpeuran metsävahinkoja. Vuotuinen korvausala on vaihdellut vajaan 1 300 hehtaarin ja noin 4 300 hehtaarin välillä. (Matala ym. 2021.)

Korvattujen vahinkojen arvo oli koko jaksolla n. 6,1 miljoonaa euroa ja se vaihteli vuosittain runsaan 400 000 euron ja 1,95 miljoonan euron välillä. VMI:ssä arvioitujen tuhojen euromääräistä arvoa ei ole toistaiseksi tarkemmin tutkimuksin arvioitu, mutta karkeaksi arvioksi hirvieläintuhojen vuotuisista suorista metsätaloustalouksista on ehdotettu noin 50 miljoonaa euroa, kun on suhteutettu korvattujen hirvivahinkojen ja VMI:n hirvieläintuhojen määrää toisiinsa. Tässä arviossa ei ole ollut mukana piilevien vikojen merkitystä sahatavaran arvolla tulevaisuudessa, eikä vaihtoehtokustannuksia hirvituhojen välttämiseksi kasvupaikalle huonosti sopivan puulajin istuttamisesta aiheutuvista kasvutappioista tai seuraustuhoriskeistä. (Matala ym. 2021.)

Tässä raportissa arvioidaan VMI:n aineistoon perustuen hirvieläinten aiheuttamien tuhojen taloudellista merkitystä sellaisille tuhometsiköille, joiden taloudellisten vaikutusten arviointiin on olemassa riittävästi kriteereitä. Käytännössä tarkasteluun tulevat siten mäntyvaltaisten taimikoiden tuhot. Niissä tapahtuu valtaosa tuhoista (esim. Nevalainen ym. 2016), ja toisaalta mäntytaimikoiden jatkokehityksestä hirvituhon jälkeen tutkimusten perusteella kohtuullisen hyvä kuva, miten taimivaiheen vioitukset heikentävät puiden laatua ja tukkisaantoa (Heikkilä & Löyttyniemi 1992, Matala ym. 2020), mikä mahdollistaa taloudellisen merkityksen arviointia.

4.2.2. Hirvieläinten aiheuttamat metsätalouden talousvaikutukset

Tämän raportin esittämä arvio hirvieläintuhojen talousvaikutuksista perustuu VMI12-aineiston analyysiin vuosilta 2014–2018. Tuhonaiheuttajaa ei ole aineistossa eroteltu lajilleen, mutta suurimmassa osassa Suomea valtaosan VMI:ssä arvioiduista tuhoista aiheuttaa hirvi, joskin valkohäntä- ja metsäkauriiden rooli varhaisvaiheen taimikoiden tuhoissa Etelä-Suomessa voi olla kasvussa (Matala ym. 2021).

VMI12:n mukaan metsikön laatua alentaneiden hirvieläintuhojen pinta-ala oli kaikkiaan noin 555 000 hehtaaria. Näistä taimikkovaiheen tuhoja oli yhteensä n. 322 000 hehtaaria, jotka ja-
kautuivat puulajivaltaisuuksittain seuraavasti: 1. mäntyvaltaisten taimikoiden tuhot 273 000 ha; 2. lehtipuuvalltaisten taimikoiden tuhot 27 000 ha; ja kuusivaltaisten taimikoiden tuhot 22 000 ha. Koska tässä raportissa käsitellään jatkossa vain mäntyvaltaisten taimikoiden tuhoja, ne edustavat siis pinta-alaltaan noin 49 % kaikista VMI:ssä havaituista metsikön laatua alenta-
neista hirvieläintuhoista. Analyysin ulkopuolelle jäävistä tuhoista merkittävimpiä ovat mänty-
valtaisten nuorten kasvatusmetsien tuhot, joita oli VMI12:n noin 170 000 ha alalla.

Hirvieläinten tuhojen aiheuttamien kustannusten laskenta perustui metsikkötason simuloin-
teihin ja VMI:stä poimittuun hirvituhon aineistoon (VMI12). Ensiksi metsikkötason simuloin-
nit toteutettiin Motilla siten, että hirvituhon oletettiin aiheuttavan metsikössä puutavaralaji-
siirtymän tukista kuituun. Tämän tukkivähennyksen suuruus puolestaan vaihteli kehitysluo-
kissa 2 (pienet taimikot) ja 3 (varttuneet taimikot) tuholuokittain alla olevassa taulukossa esi-
tetyjen prosenttiosuuksien mukaisesti (Taulukko 21). Tukkivähennykset perustuivat VMI:n tu-
holuokkien arviointiohjeiden kriteereihin siten, että niissä esitetyt tuhojen aiheuttamat runko-
lukujen vähennykset muunnettiin asiantuntija-arvioina tukkivähennyksiksi.

Taulukko 21. Hirvituhon aiheuttama tukkivähennys tuholuokittain kehitysluokissa 2 ja 3.

Kehitysluokka	Tuholuokka	Tukkivähennys-%
2	1	10–50
2	2	40–60
2	3	60–90
3	1	10–50
3	2	40–60
3	3	a)

a) kehitysluokassa 3 tuholuokan 3 mukaan taimikko katsottiin tuhoutuneeksi niin kokonaisvaltaisesti, että metsikkö perustetaan uudestaan viljelemällä. Uudelleenviljelyn ajankohta määräytyi VMI:n poiminnasta (Etelä-Suomi 16 vuotta, Keski-Suomi 14 vuotta ja Pohjois-Suomi 19 vuotta)

VMI-poiminta paljasti männyn olevan hirvituhojen ensisijainen puulaji: todettavista (tuholuokka 1), vakavista (2) ja täystuhoista (3) männyn osuus oli vastaavasti 85 %, 85 % ja 89 % kaikista puulajeista. Näin ollen tässä raportissa keskityttiin ainoastaan hirvituhoihin mäntytaimikoissa (kehitysluokat 2 ja 3). Koska VMI:ssä inventoidut hirvituhot sisältävät eri ajankohtina syntyneet vauriot, jouduttiin tässä vielä arvioimaan, kuinka paljon keskimäärin tapahtuu ns. tuoretta syöntiä vuosittain. Tuoreen syönnin osuudeksi kaikesta syönnistä saatiin 19,5 %. Luokiarvo pohjautui VMI12:n tuloksiin.

Tukkivähennysten (Taulukko 21) mukaiset taloudelliset tappiot määritettiin erikseen tuoreen ja kuivahkon kankaan mäntytaimikoille ja talouslaskennassa sovellettiin Taulukossa 1 esitettyjä kantohintoja ja metsänhoidon kustannuksia. Simulointeja varten Suomi jaettiin lisäksi kolmeen suuralueeseen (Etelä-, Keski- ja Pohjois-Suomi) ja kullekin suuralueelle valittiin erikseen kaksi paikkakuntaa, joille Motti-simuloinnit lopulta toteutettiin. Nämä paikkakunnat olivat: Etelä-Suomessa Puumala ja Loimaa, Keski-Suomessa Nurmes ja Kokkola sekä Pohjois-Suomessa Rovaniemi ja Taivalkoski.

Kehitysluokassa 2 tukkivähennyksen aiheuttamat taloudelliset tappiot metsikkötasolla (€/ha) esitetään paikkakunnittain Taulukossa 21 ja kehitysluokassa 3 tuholuokkien 1 ja 2 mukaiset hirvituhon aiheuttamat kustannukset metsikkötasolla on esitetty Taulukossa 22.

Taulukko 22. Kehitysluokassa 2 tuholuokittaisten tukkivähennysten vaihteluvälien mukaiset kustannukset, € ha⁻¹.

Paikkakunta	Kasvupaikka	Tuholuokka 1	Tuholuokka 2	Tuholuokka 3
Puumala	Tuore kangas	439,5–2 197,3 ^{a)} 215,4–1 077,0 ^{b)} 117,0–585,0	1 757,9–2 636,8 ^{c)} 861,6–1 292,4 468,0–701,9	2 636,8–3 955,2 ^{d)} 1 292,4–1 938,7 701,9–1 052,9
	Kuivahko kangas	307,8–1 539,2 135,2–405,6 65,2–327,0	1 231,3–1 847,0 540,8–811,2 261,6–394,2	1 847,0–2 770,5 811,2–1 216,8 394,2–588,6
Loimaa	Tuore kangas	437,0–2 184,9 199,2–996,1 100,4–502,2	1 748,0–2 621,9 796,9–1 195,3 401,7–602,6	2 621,9–3 932,9 1 195,3–1 792,9 602,6–903,9
	Kuivahko kangas	282,7–1 413,6 119,9–599,7 56,0–279,9	1 130,9–1 696,3 479,7–719,6 223,9–335,8	1 696,3–2 544,4 719,6–1 079,4 335,8–503,8
Nurmes	Tuore kangas	314,4–1 572,2 146,4–732,2 75,3–376,5	1 257,7–1 886,6 585,8–878,7 301,2–451,8	1 886,6–2 829,9 878,7–1 318,0 451,8–677,6
	Kuivahko kangas	194,3–971,6 82,7–413,5 38,6–193,0	777,3–1 165,9 330,8–496,3 154,4–231,5	1 165,9–1 748,9 496,3–744,4 231,5–347,3
Kokkola	Tuore kangas	336,0–1 680,0 159,2–796,1 83,4–417,2	1 344,0–2 016,1 636,9–955,4 333,7–500,6	2 016,1–3 024,1 955,4–1 433,1 500,6–750,9
	Kuivahko kangas	210,9–1 054,6 91,3–456,6 43,4–217,0	843,7–1 265,5 365,3–547,9 173,6–260,4	1 265,5–1 898,3 547,9–821,9 260,4–390,6
Rovaniemi	Tuore kangas	210,4–1 052,1 97,9–489,6 50,2–251,1	841,7–1 262,5 391,7–587,5 200,9–301,3	1 262,5–1 893,8 587,5–881,3 301,3–452,0
	Kuivahko kangas	142,5–712,5 58,9–2 94,7 26,7–133,3	570,0–855,0 235,8–353,7 106,6–159,9	855,0–1 282,5 353,7–530,5 159,9–239,9
Taivalkoski	Tuore kangas	177,8–889,1 79,9–399,7 39,5–197,5	711,3–1 066,9 319,8–479,7 158,0–237,0	1 066,9–1 600,3 479,7–719,5 237,0–355,6
	Kuivahko kangas	114,1–570,5 44,5–222,3 18,9–94,3	456,4–684,6 177,8–266,8 75,4–113,1	684,6–1 026,9 266,8–400,1 113,1–169,7

^{a)}vaihteluväli on tuholuokassa 1 10–50 % tukkivähennys (siirtymä tukkipuusta kuitupuuhun), ^{b)} keskimäinen rivi kuvaa tulonmenetystä 3 % laskentakorkokannan mukaan, ylin rivi 2 % ja alin rivi 4 % mukaan, ^{c)} vaihteluväli tuholuokassa 2 on 40–60 % tukkivähennys ^{d)} vaihteluväli tuholuokassa 3 on 60–90 % tukkivähennys.

Taulukko 23. Kehitysluokassa 3 hirvituhon aiheuttama metsikkötason kustannus tuholuokissa 1 ja 2, € ha⁻¹

Paikkakunta	Kasvupaikka	2 % ^{a)}	3 %	4 %
Puumala	Tuore kangas	2 516,7–4 156,2 ^{b)} 3 677,8–4 463,2	720,5–1 736,2 1 442,8–1 930,9	229,0–866,2 683,4–990,3
	Kuivahko kangas	1 720,8–2 893,5 2 527,5–3 091,4	450,2–1 148,9 934,8–1 268,5	136,8–558,2 429,9–629,8
Loimaa	Tuore kangas	2 295,1–3 865,9 3 413,5–4 169,0	593,4–1 534,9 1 266,3–1 720,5	171,6–744,6 582,0–858,9
	Kuivahko kangas	1 453,2–2 567,1 2 253,4–2 792,8	356,9–994,1 814,8–1 123,4	104,5–474,6 370,1–549,0
Nurmes	Tuore kangas	1 572,2–2 638,5 2 476,8–3 022,3	359,1–996,3 892,7–1 229,9	71,7–455,9 393,0–603,2
	Kuivahko kangas	902,9–1 666,3 1 519,1–1 915,5	187,9–610,2 530,3–753,1	38,7–274,7 232,1–358,8
Kokkola	Tuore kangas	1 774,8–2 907,6 2 741,3–3 320,5	431,4–1 121,7 1 011,1–1 375,3	97,5–521,8 451,9–682,7
	Kuivahko kangas	1 028,5–1 834,4 1 672,0–2 086,2	226,5–680,7 590,4–827,4	50,9–309,7 260,0–397,2
Rovaniemi	Tuore kangas	1 136,1–1 965,6 1 625,4–2 025,7	248,5–762,8 565,8–798,4	36,9–358,2 238,3–374,6
	Kuivahko kangas	743,8–1 321,4 1 075,7–1 347,4	158,2–482,7 352,1–495,8	34,1–218,0 144,3–221,1
Taivalkoski	Tuore kangas	801,2–1 534,7 1 249,6–1 594,6	137,7–575,6 416,2–612,1	0,9–264,5 171,3–283,6
	Kuivahko kangas	519,8–1 016,3 776,0–1 001,7	93,6–360,6 239,2–348,8	103,1–599,7 93,6–147,5

^{a)}laskentakorkokanta, ^{b)}ylempi rivi vastaa tuholuokan 1 kustannusten vaihteluväliä (tukkivähennys 10–50 %) ja alempi rivi vastaa tuholuokan 2 vaihteluväliä (tukkivähennys 40–60 %).

Kehitysluokassa 3 täydellisen tuhon (tuholuokka 3) kohdalla talouslaskenta toteutettiin seuraavasti. Ensinnäkin täydellisessä tuhossa metsikkö joudutaan perustamaan uudestaan (maanmuokaus, viljely, varhaisperkaus ja taimikonhoito – varhaisperkausta ei simuloitu Rovaniemellä eikä Taivalkoskella), mistä aiheutuu kustannuksia. Nämä kustannukset ajoittuvat alkuperäisen metsikön perustamisajankohtaan nähden myöhemmin, joten ne diskontataan alkuperäisen metsikön perustamisen ajankohtaan.

Näiden kustannusten lisäksi kustannuksia muodostui aikaviiveestä, joka puolestaan johtuu siitä, että alkuperäisen metsikön perustamisen ajankohdasta kuluu aikaa ennen kuin uusi metsikkö perustetaan. Tämä aikaviive aiheuttaa kustannuksia, koska alkuperäiseen metsikön perustamisen ajankohtaan nähden uudessa metsikössä kaikki tapahtumat ajoittuvat kronologisella aikajanalla myöhemmin. Esimerkiksi, jos alkuperäisen metsikön ensiharvennus oli 38 vuoden iällä, tapahtuu vastaava ensiharvennus aikaviivettä vastaavalla vuosimäärällä myöhemmin. Aikaviiveet saatiin VMI-poiminnasta suuralueittain ja ne on jo esitetty Taulukon 21 yhteydessä. Uuden metsikön perustamiskustannukset (ml. varhaisperkaus ja taimikonhoito) diskontattiin alkuperäisen metsikön perustamishetkeen aikaviiveen mukaisella vuosimäärällä,

jolloin saatiin uuden metsikön perustamiskustannukset nykyarvossa. Vastaavasti, aikaviiveestä johtuvat kustannukset laskettiin teknisesti niin, että alkuperäisen metsikön paljaan maan arvoa verrattiin aikaviiveen mukaisesti diskontattuun paljaan maan arvoon, erotuksen kuvattessa aikaviiveen aiheuttamaa kustannusta. Sekä diskontatut metsikön perustamiskustannukset että aikaviiveen aiheuttamat kustannukset on esitetty Taulukossa 24.

Taulukko 24. Kehitysluokassa 3 täydellisen tuhon (tuholuokka 3) mukaiset diskontatut metsikön perustamiskustannukset ja aikaviiveen aiheuttamat kustannukset yhteensä, € ha-1. [Diskontattujen metsikön perustamiskustannusten osuus (%) kokonaiskustannuksista vaihteli välillä 41 %-90 %, riippuen laskentakorosta, kasvupaikasta ja sijainnista].

Paikkakunta	Kasvupaikka	2 % ^{a)}	3 %	4 %
Puumala	Tuore kangas	2 952,2	1 939,1	1 175,4
	Kuivahko kangas	2 034,4	1 235,1	685,9
Loimaa	Tuore kangas	2 915,3	1 824,0	1 039,3
	Kuivahko kangas	1 924,7	1 140,7	612,1
Nurmes	Tuore kangas	2 316,4	1 513,7	907,5
	Kuivahko kangas	1 485,0	913,3	509,2
Kokkola	Tuore kangas	2 414,1	1 596,4	974,5
	Kuivahko kangas	1 555,0	965,8	547,4
Rovaniemi	Tuore kangas	1 797,1	1 039,1	486,0
	Kuivahko kangas	1 186,1	637,9	276,6
Taivalkoski	Tuore kangas	1 568,5	862,7	354,1
	Kuivahko kangas	1 006,6	508,4	189,1

^{a)}laskentakorkokanta

Aiemmin tässä luvussa kuvatun hirvituhojen VMI-poiminnan mukaisesti määritettiin suuralueittain, kasvupaikoittain ja tuholuokittain arviot vuotuisista tuoreen syönnin hirvituhopinta-aloista pienissä ja varttuneissa mäntytaimikoissa. Nämä pinta-alat on esitetty Taulukossa 25. Kuten nähdään, vaihtelivat tuhopinta-alat varsin paljon suuralueittain ja tuholuokittain. Esimerkiksi, Pohjois-Suomessa varttuneissa mäntytaimikoissa (kehitysluokka 3) tuholuokassa 1 tuoretta syöntiä noin 12 000 hehtaarilla (8 386+3 627) vuosittain, kun taas Etelä-Suomessa pienissä mäntytaimikoissa tuholuokassa 2 tuore syönti hieman yli 300 hehtaarilla (Taulukko 25).

Taulukosta 26 nähdään, että kehitysluokkien 2 ja 3 mäntytaimikoissa tuoreesta syönnistä aiheutuvat vuotuiset hirvituhojen suorat kustannukset vaihtelevat suuralueittain melkoisesti. Esimerkiksi Etelä-Suomen alueen tuhojen euromääräinen arvo edustaa lähes puolta koko maan tuhojen arvosta, vaikka niiden pinta-ala on vain 35 % koko maan tuhojen pinta-alasta (Taulukko 25). Tämä selittyy metsien paremmalla tuottavuudella ilman tuhoja, jolloin niissä tapahtuvan tuhon taloudellinen merkitys muodostuu suuremmaksi. Aiemmissa analyyseissä, joissa on tarkasteltu tuhojen pinta-aloja (Matala ym. 2021), on huomio kiinnittynyt usein Pohjois-Suomen suuriin tuhopinta-aloihin. Tuhojen merkityksen tarkastelu euroissa tuo siten uutta näkökulmaa siihen, missä tuhoilla on suurin merkitys taloudellisessa mielessä.

Analyysistä jäi arvotuskriteerien puuttumisen vuoksi pois noin 51 % VMI:ssä arvioitujen hirvieläintuhojen alasta. Koska muiden kuin tässä arvioitujen mäntyvaltaisten taimikoiden

tuhojen euromääräiseen arviointiin ei ollut kriteereitä, ne jäivät kokonaan puuttumaan tästä arviosta. Ei voida myöskään sanoa, että nyt arvioitava 49 % tuhopinta-ala olisi välttämättä euromääräisestikin puolet hirvieläintuhoista, vaan tässä esitetty on minimiarvio hirvieläinten aiheuttamista kustannuksista vain mäntyvaltaisissa taimikoissa.

Taulukko 25. Tuoreen syönnin vuotuiset pinta-alat suuralueittain, tuholuokittain, kasvupakoittain ja kehitysluokittain, ha. Kaikki suuralueet ja tuholuokat yhteensä 53 200 ha/vuosi.

Suuralue	Tuholuokka 1	Tuholuokka 2	Tuholuokka 3
Etelä-Suomi	1 151 (1 482) ^{a)} 5 850 (7 762) ^{b)}	137 (195) 1 073 (605)	0 (0) 59 (59)
Väli-Suomi	722 (1 112) 6 670 (5 285)	176 (273) 936 (917)	0 (78) 234 (0)
Pohjois-Suomi	1 677 (2 477) 8 386 (3 627)	156 (0) 1 229 (410)	0 (0) 468 (0)

^{a)}lukuarvo, 1 151 esittää tuoreen kankaan ja suluissa oleva lukuarvo (1 482) kuivahkojen kankaiden pinta-alan pienissä mäntytaimikoissa (kehitysluokka 2), ha, ^{b)} lukuarvo esittää tuoreen kankaan ja suluissa oleva lukuarvo kuivahkojen kankaiden pinta-alan (ha) varttuneissa mäntytaimikoissa (kehitysluokka 3).

Taulukko 26. Tuoreen syönnin mukaiset vuotuiset hirvituhojen aiheuttamat suorat kustannukset suuralueittain, miljoonaa euroa.

Suuralue	2 % ^{a)}	3 %	4 %
Etelä-Suomi	34,09–59,66 ^{b)}	10,13–24,57	3,64–12,12
Väli-Suomi	21,73–36,46	5,95–14,18	1,87–6,67
Pohjois-Suomi	14,11–25,81	4,58–10,10	1,06–5,47

^{a)}laskentakorkokanta, ^{b)}lukuarvot kuvaavat vaihteluvälin, joka johtuu Taulukoissa 22–24 esitetyistä hehtaariohjeiden taloustulosten vaihtelusta, joka puolestaan perustuu Taulukon 21 oletuksiin

5. Abioottiset tuhot

5.1. Abioottiset taimituhot uudistusaloilla

Taimikoissa esiintyy erilaisten abioottisten tuhojen aiheuttamia tuhoja satunnaisesti, eikä niiden yleisyydestä ja siten kustannusvaikutuksista ole tarkkaa tietoa, eikä tarkempia laskelmia pystytäkään tässä raportissa antamaan. Tuhojen esiintymiseen vaikuttaa kulloisetkin sääolot. Ilmastoennusteiden mukaan taimien alkukehityksen kannalta ongelmalliset säät tullevat tulevaisuudessa yleistymään. Erilaisten tuhojen esiintymisestä on saatu jo viitteitä viimeisten viiden vuoden aikana.

Kasvukauden aikaiset hallat voivat vaurioittaa uusia vuosikasvaimia. Vastaistutetuilla taimilla myös syyshallat voivat vaurioittaa taimien latvoja. Nämä tuhot voivat aiheuttaa kasvatappioita, mutta harvoin tappavat taimia.

Ilmastomuutoksen myötä lumeton tai ohutluminen kausi talvella pitenee (Venäläinen ym. 2020). Ilman suojaavaa lumipeitettä pienet taimet altistuvat aiempaa enemmän vaihteleville lämpötiloille ja taimien karaistuneisuus voi purkautua (Riikonen ym. käsikirjoitus, Luoranen ym. käsikirjoitus). Taimilla on jonkin verran kykyä uudelleen karaistua, mutta niiden pakkaskestävyys ei palaa alkuperäiselle tasolle (Riikonen ym. käsikirjoitus, Luoranen ym. käsikirjoitus). Lämpötilan nopeasti laskiessa taimet voivat vaurioitua. Verrattaessa kuusen ja männyn taimien reaktioita talvisäiden vaiheluihin männyn taimien karaistumien purkautuu helpommin ja nopeammin kuin kuusen (Luoranen ym. käsikirjoitus). Kevättalven aurinkoiset, tuuliset ja lämpötiloiltaan vaihtelevat säät maan ollessa vielä jäässä, voivat myös kuivattaa taimia (ahavilmiö). Näiden talviaikaisten vaihtelevien sääolojen aiheuttamia tuhoja on jo havaittu viime vuosina Etelä- ja Keski-Suomessa. Maalis-huhtikuun 2020 ahava aiheutti tuhoja 54 %:lla inventoiduista kuusen taimista Väli-Suomen alueella (Luoranen ym. 2022a). Lisäksi alkutalven leutous, sitä seurannut nopea sään kylmeneminen tammikuun alussa 2017 puolestaan aiheutti tuhoja syysistutetuilla taimilla, etenkin männyn taimet kärsivät tuhoista pahoin (Luoranen ym. 2018).

Toistuvasti sulava ja jäätyvä maa voi aiheuttaa myös roustetuhoja taimikoissa katkomalla taimien juuria ja nostamalla taimia ylös maasta. Erityisen alttiita ovat juurtumattomat tai huonosti juurtuneet taimet. Roustetuhon yleisyyttä ei ole tutkittu, vaikka yksittäisiä havaintoja muiden tutkimusten yhteydessä on havaittu etenkin hienojakoisilla mailla (Luoranen ym. 2011, Heiskanen ym. 2013).

Ilmastomuutoksen myötä kevään ja kesän kuivuudet lisääntyvät (Ruosteenoja ym. 2018). Nämä aiheuttavat haasteita etenkin vastaistutetuille taimille. Kesä 2022 oli erityisen kuuma ja kuiva ja antoi mahdollisuuden selvittää tuhojen yleisyyttä Etelä- ja Keski-Suomessa. Tulosten perusteella tuhot olivat varsin yleisiä, sillä vain neljällä kohteella satunnaisesti valitusta 65 inventoidusta kuusen istutuskohdesta tuhoja ei havaittu istutusvuoden syksyllä (Luoranen ym. 2023). Yhteensä 6 % kuusen taimista oli jo kuollut ja 26 %:lla oli tuhoja. Seuraavien vuosien aikana tuhot todennäköisesti saattavat pahentua. Keskimäärin samansuuruinen kuolleisuus on yleensä kolmivuotiaissa taimikoissa.

Kaikkien edellä kuvattujen abioottisten tuhojen seurauksena taimien kasvu alenee ja ne voivat aiheuttaa taimiin monilataisuutta, vaikka taimet eivät tuhoon kuolisikaan. Tämä voi viivästyttää taimikoiden siirtymistä hiilen lähteestä nieluksi ja aiheuttaa laatutappioita puustolle.

Kuusen taimilla tehtyjen tutkimusten perusteella merkittävässä roolissa abioottisten tuhojen torjunnassa on laadukas työ uudistamisen kaikissa vaiheissa. Hyvällä maamuokkauksella ja istutustyöllä, oikeilla kohde- ja taimivalinnoilla riskejä voidaan pienentää, mutta kokonaan abioottisia tuhoja tuskin koskaan voidaan välttää. Muiden kuin kuusen osalta tutkimustietoa abioottisista tuhoista uudistusaloilta ei juuri ole olemassa. Äärevämpiä ilmasto-olojen yleistyessä abioottiset tuhot tulee huomioida uudistamisessa entistä paremmin parantamalla ohjeistuksia ja kehittämällä taimituotantoa ja uudistamista niin, että istutetut taimet kestävät stressaavia oloja entistä paremmin.

5.2. Tuulituhot

5.2.1. Tuuli metsätuhojen aiheuttajana

Tuulituhot ovat merkittävä häiriö metsissä, jolla on taloudellisia, yhteiskunnallisia ja ekologisia seurauksia (Mitchell ym. 2013). Myrskyjen aiheuttamat puustovahingot Euroopan metsissä ovat yleistyneet viimeisen vuosisadan aikana (Gregow ym. 2017, Schelhaas ym. 2003) ja trendin odotetaan jatkuvan (Ikonen ym. 2017, Seidl ym. 2017). Pohjoisissa olosuhteissa roudatto-ajan pidentyminen ja lumen kertyminen latvuksiin voivat lisätä tuulituhoja, vaikka myrskyt eivät yleistyisikään.

Edellisessä kappaleessa mainittujen tekijöiden lisäksi metsien tuulituhoriskeihin vaikuttavat metsien ominaisuudet, metsänhoito sekä abioottinen ympäristö, kuten paikalliset tuuli- ja maaperäolosuhteet (Mitchell, 2013). Esimerkiksi tuulen aiheuttamien vahinkojen todennäköisyyden on osoitettu kasvavan puiden korkeuden kasvaessa ja tietyt lajit, kuten kuusi, ovat erityisen herkkiä tuulelle (Peltola ym. 1999, Dobbartin 2002, Valinger & Fridman 2011). Metsänhoito vaikuttaa tuulenkaatoherkkyyteen, sillä suojaisissa olosuhteissa kasvaneet puut, jotka ovat myöhemmin altistuneet tuulelle naapurimetsikön harvennusten tai avohakkuiden vuoksi, ovat erityisen herkkiä tuulenkaadoille (Lohmander & Helles, 1987, Peltola ym. 1999, Suvanto ym. 2016). Alueet, jotka ovat alttiita voimakkaalle tuulenpuuskillle (Schindler ym. 2016) tai joilla juurtumisolosuhteet ovat heikot maaperän ominaisuuksien vuoksi (Nicoll ym. 2006), ovat alttiimpia tuulituhonille.

Tässä työssä tarkasteltiin myrskytuhojen taloudellista merkitystä Suomessa kahtena viime vuosikymmenenä. Suomessa kerätään kolmenlaista tietoa myrskyjen aiheuttamista tappioista metsätaloudelle. (1) Metsänkäyttöilmoitusten avulla kerätään tietoa metsätuhoista, jotka ovat johtaneet hakkuisiin. Tiedon ilmoittaminen on pakollista. (2) VMI kerää tietoa metsissä sattuneista tuhoista, ml. tuulen aiheuttamista tuhoista puu- ja kuviotasolla. (3) Metsävakuutuksen ottaneet metsänomistajat voivat hakea korvausta vakuutusyhtiöiltä tuhojen sattuessa. Metsävakuutuksen ottaminen on vapaaehtoista, eikä tieto ole kattavaa.

METKOKA-hankkeessa käytettiin metsänkäyttöilmoituksissa raportoitua tietoa yksityismetsien tuulituhonista. Metsänkäyttöilmoitusten avulla kerätyn tiedon katsottiin olevan kattavaa ja luotettavaa tuulituhon osalta vuodesta 2010 alkaen, joten analyysi keskittyi vuosiin 2010–2022. Analyysiä varten tilattiin Metsäkeskukselta datakooste, johon kerättiin tieto ilmoitusten lukumäärä, puuston tilavuus ennen hakkuuta, sekä kokonaispinta-ala tuhon tyypin, maakunnan, pääpuulajin, kasvupaikan, korjuutavan, ilmoituksen saapumisvuoden, sekä puuston kehitysluokan mukaan laskettuna. Myrskyihin liittyvät metsänkäyttöilmoitukset tunnistettiin hakkuutyypin perusteella, tarkemman tuhokoodin, ja vapaasanakenttien sisältämien suomen- tai

ruotsinkielisten avainsanojen perusteella. Tilavuusarvioiden laskeminen oli mahdollista vain niille hakkuualueen polygoneille, jotka olivat yksityismailla, sillä Metsäkeskus kirjaa metsävaratietoja vain yksityismaista. Muille alueille tilavuus yleistettiin pinta-alan perusteella. Muut puuttuvat tiedot yksittäisistä luokista yleistettiin koneoppisalgoritmin avulla.

Metsäkeskuksen tuottamien tietojen perusteella jaksolla 2010–2022 keskimääräinen vuotuinen pinta-ala, johon kohdistui tuulituhoihin liittyviä metsänhoitotoimenpiteitä, oli 14 960 ha ja niiden sisältämän puuston määrä oli 2,2 milj. m³ (Taulukko 27). Harvennukset olivat huomattavasti yleisempiä kuin avohakkuut. Vuotuinen vaihtelu pinta-aloissa on huomattavaa (Kuva 20).

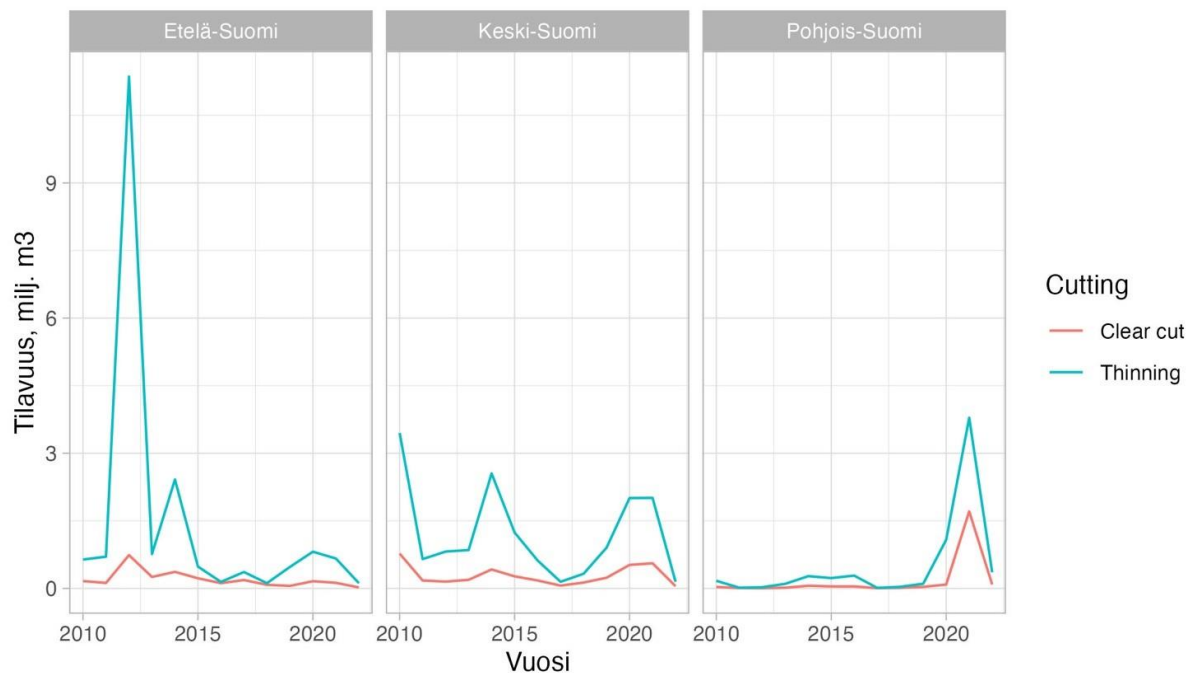
On huomattava, että vaikka metsänkäyttöilmoituksessa hakkuun syyksi ilmoitetaankin tuulituhon, koko hakattu puusto on harvoin vaurioitunut. On oletettavaa, että useimmissa tapauksissa vauriot ovat kuitenkin olleet sen verran merkittäviä, että hakkuu (avohakkuu tai harvennus) on päätetty tehdä. Harvennuksen voimakkuutta ei voitu arvioida tietojen perusteella, mutta avohakkuu on kohdistunut luonnollisestikin alueen sisältämään puustoon. Hakkuupäätöksen muita syitä ei pystytty erittelemään ja onkin mahdollista, että hakkuupäätös riippuu vaurioiden määrän lisäksi esimerkiksi metsikön kehitysluokasta.

Metsäkeskuksesta saadun tiedon perusteella ilmoitettuun tuulituhoon liittyy noin 20 % puuston myyntihinnan alenema, joka sisältää myös tavallista hakkuuta kalliimman puuston korjuukannuksen. Harvennuksissa poistuvan puuston osuudeksi arvioitiin taloudellisissa laskelmissa 33 % puustopääomasta.

Taulukko 27. Vuotuinen metsänkäyttöilmoituksissa ilmoitettu leimikoiden tilavuus ennen hakkuuta, niiden vuotuinen pinta-ala, sekä keskimääräinen ilmoitettu hakkuualueen koko. Tiedot laskettu metsänkäyttöilmoituksista vuosilta 2010–5/2022, joissa hakkuun syyksi oli ilmoitettu tuulituhon.

Hakkuutapa	Tilavuus, milj. m ³	Pinta-ala, ha	Keskimääräinen hakkuualue, ha
Avohakkuu	0,38	3 460	0,92
Harvennus	1,84	11 500	1,59

Tu



Kuva 20. Metsänkäyttöilmoituksissa ilmoitettujen hakkuualojen puuston tilavuus ennen puuston korjuuta. Huom. hakuiden yhteydessä on useimmissa tapauksissa poistettu myös vaurioitumattomia puita, ja harvennuksissa ei ole poistettu kaikkea puustoa. E-Suomi: Ahvenanmaa, Uusimaa, Varsinais-Suomi, Satakunta, Kanta-Häme, Pirkanmaa, Päijät-Häme, Kymenlaakso, E-Karjala. K-Suomi: E-Savo, P-Savo, P-Karjala, K-Suomi, E-Pohjanmaa, Pohjanmaa; P-Suomi: P-Pohjanmaa, Kainuu, Lappi.

5.2.2. Tuulen aiheuttamat taloudelliset menetykset

Tuulituhojen osalta aineisto pohjautui Suomen metsäkeskuksen metsänomistajien tekemiin metsänkäyttöilmoituksiin vuosilta 2010–2022. Aineisto luokiteltiin tuhotyyppin, maakunnan, pääpuulajin, kasvupaikan, hakkuutavan ja kehitysluokan mukaan siten, että aineistosta saatiin selville edellä kuvatuille luokittelumuuttujille puuston kokonaistilavuus ennen hakkuuta, jonka oli kirjattu johtuvan tuulituhosta. Kaiken kaikkiaan aineistossa oli 92505 metsänkäyttöilmoitusta. Aineisto jaettiin edelleen harvennushakkuisiin ja päätehakkuihin olettaen, että puuston kokonaistilavuus on 200 m³/ha tai alle harvennushakkuissa ja yli 200 m³/ha päätehakkuihin. Taulukossa 28 esitetään vuosien 2010–2022 metsänkäyttöilmoituksista poimitut tuohakkuiden hakkuukertymät siten, että harvennushakkuissa oletetaan harvennusvoimakkuudeksi 33 % puustopääomasta (alkuperäisessä aineistossa ilmoitettu ainoastaan puuston kokonaistilavuus ennen harvennusta, päätehakkuihin puolestaan oletetaan, että tuulituhometsikkö avohakataan).

Taulukko 28. Yhteenlasketut tuulituhojen hakkuukertymät hakkuutavoittain ja pääpuulajeittain vuosina 2010–2022 Suomessa, m³. (Huom. vuotuiset hakkuumäärät saadaan jakamalla taulukon hakkuukertymät vuosien lukumäärällä, 18)

Pääpuulaji	Harvennustapa	Hakkuukertymä, m ³
Mänty	Harvennus	10 414 420
	Päätehakkuu	4 656 763
Kuusi	Harvennus	7 090 219
	Päätehakkuu	7 081 281
Koivut ja muut lehtipuut	Harvennus	1 889 415
	Päätehakkuu	241 537

Tuulituhojen taloudellisten kustannusten arvioimiseksi tarvittiin Taulukon 28 lukuarvojen lisäksi tieto siitä, miten hakkuissa (harvennukset, päätehakkuu) harvennuskertymä jakaantuu puutavaralajeittain. Tämä tieto saatiin metsätilastoista (esim. Metsätilastollinen Vuosikirja 2021, Taulukko 5.4), ja tässä raportissa käytettiin viimeisten viiden vuoden tilastoituja lukuarvoja. Seuraavaksi oletettiin, että tuulituhohakkuissa metsänomistajalle maksettava kantohinta on joko 20 tai 30 %-yksikköä alhaisempi kuin normaalileimikoissa. Normaalileimikkojen kantohinnat saatiin Taulukosta 1.

Ennen kuin tulokset esitetään, on syytä nostaa esille se, että tässä raportissa esitetään ainoastaan arvio suorista kustannuksista, eikä talouslaskelmassa oteta huomioon hakkuiden aikaisumisesta mahdollisesti aiheutuvia tulonmenetyksiä tai kustannuksia. Tähän ei ollut mahdollisuuksia, koska talousanalyysi olisi edellyttänyt myrskytuholeimikoista puustotunnustietoja, jotta puuston kehitys olisi voitu ennustaa (simuloida) niin normaaliolosuhteissa (ei myrskytuhoa) kuin myrskytuhon tapahduttua. Lukelle toimitetussa aineistossa ei kuitenkaan ollut myrskytuhokohteiden puustotunnuksia (kuten keskipituus, keskiläpimitta ja pohjapinta-ala), joten simulointeja ei voitu toteuttaa.

Taulukossa 29 on siten esitetty vuotuinen kustannus, joka aiheutuu, kun tuulituholeimikoiden hakkuukertymä (Ks. Taulukko 28) on kerrottu puutavaralajeittain alentuneilla yksikkökantohinnoilla (joko 20 tai 30 %-yksikköä).

Taulukko 29. Alentuneista yksikkökantohinnoista (20 % tai 30 %) johtuvat tuulituholeimikkojen hakkuutulojen vuotuiset menetykset Suomessa, miljoonaa euroa.

	20 %-yksikköä alentuneet kantohinnat	30 %-yksikköä alentuneet kantohinnat
Hakkuutulojen menetykset ^{a)}	8,78	13,16

^{a)}hakkuutulojen menetykset tarkoittavat kustannuksia, jotka vuosittain aiheutuvat tuulituhokohteiden hakkuissa, verrattuna tilanteeseen, jolloin ei olisi lainkaan tuulituhoja.

5.3. Lumituhot

Latvukseen kertyvän lumen aiheuttamat vauriot puustolle ovat merkittävä ongelma boreaalisissa metsissä. Suorien taloudellisten menetyksien lisäksi lumivaurio myös lisää kaarnakuoriaistuhoja ja lahottavien sienten infektoita, ja kaatuneet ja katkeavat puut voivat myös aiheuttaa vikoja avojohtoverkon toiminnassa. Lumi- ja tuulivauriot liittyvät usein toisiinsa mikä vaikeuttaa ilmiöiden tunnistamista (Valinger & Friedman 1999). Tuuli saattaa irrottaa lumen puun latvuksista, mutta toisaalta voimakkaat tuulet raskaan jäätyneen lumikuorman kanssa voivat aiheuttaa lisävaurioita latvustoon ja runkoon.

Lumivaurioiden kannalta merkittävä tekijä on latvuksiin tarttuvan lumen määrä ja laatu (Lehtonen ym. 2014). Lumen kertyminen ja sen aiheuttamien vaurioiden määrä riippuu useista tekijöistä. Useat lähteet lumituhot metsikön korkeaan sijaintiin (ks. esim. Nykänen ym. 1997, Norokorpi & Kärkkäinen 1985, Jalkanen & Kononpka 1998, Suvanto ym. 2021).

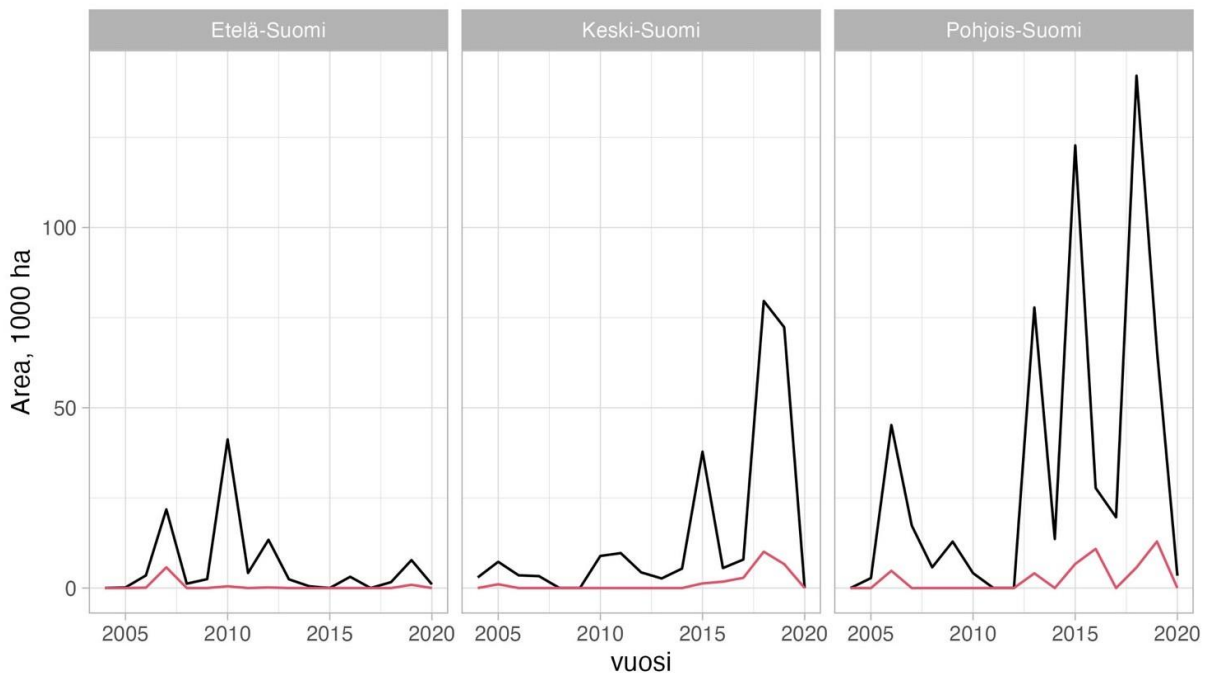
Puulajeista mänty on alttein lumituhonille (Suvanto ym. 2021). Lisäksi rungon ja latvuksen muoto (esim. Nykänen ym. 1997) on havaittu merkittäväksi tekijöiksi. Näihin tekijöihin vaikuttavat puulajin lisäksi harvennukset ja puuston kasvatustiheys, joten myös kasvatustieteen ja metsänkäsittelyn voidaan arvioida ainakin epäsuorasti vaikuttavan lumituhon ilmenemiseen.

Lumituhon taloudellisen merkityksen arvioimista varten käytettiin vuosien 2004–2020 VMI-tietoja (VMI10–VMI12) ja laskettiin keskimääräinen lumituhossa vaurioituneiden metsien määrä. VMI luokittelee lumituhot viisiportaisella asteikolla. Tässä työssä huomioitiin ainoastaan ne metsiköt (keskipistekuviot metsämaalla), joissa lumituhon on johtanut vähintään yhden kehitysluokan laskuun (todettava tuho tai suurempi), ja ne, joissa tuho on aiheuttanut vielä suuremman vaurion (vakava tai täydellinen). VMI:n havainnoita huomioitiin ainoastaan ne lumituhot, jotka olivat kirjattu kuvion päätuhoiksi, sekä ne, jotka olivat tapahtuneet joko kuluva inventointikautena tai edellisen vuoden aikana.

Kullekin inventointivuodelle laskettiin maakunnassa näin havaittujen lumituhon osuus kaikista koealoista ja jaettiin luku kahdella, ja yhdistettiin se maakunnan metsämaan pinta-ala-tietoon (VMI12), jolloin saatiin pinta-ala-arvio lumituhon vaurioittamille metsikkökuvioille. Näin saadut kokonaispinta-alat yhdistettiin suuralueittain ja laskettiin vuotuiset pinta-alat (Kuva 21) sekä jakson keskimääräiset pinta-alat, joihin kohdistuu lumituhon (Taulukko 30).

Taulukko 30. Lumituhon keskimääräinen osuus ja pinta-ala jakson 2004–2020 aikana, joissa on ollut vähintään todettava tai vakava VMI-tietojen perusteella.

Vakavuus	Osuus metsiköistä, %	Kokonaispinta-ala, 1000 ha
> = todettava (1-3)	0,27	54
> = vakava (2-3)	0,022	4,5



Kuva 21. Vähintään metsikön yhden kehitysluokan laskuun johtaneiden lumituhojen kokonaispinta-ala eri inventointivuosina. Musta viiva (luokat 1–3), punainen viiva (luokat 2–3). Luokat: (1) Todettava tuho on alentanut metsikön laatua yhdellä luokalla tai lisännyt jo aiemmin vajaatuottoisen metsikön vajaatuottoisuutta (musta viiva). Tuho ei kuitenkaan ole muuttanut metsikön kehitysluokkaa, poikkeuksena ylemmän jakson tuhoutuminen jo taimikoksi kehittyneen alikasvoksen päältä. (2) Vakava tuho, aiemmin kehityskelpoisessa metsikössä on merkinnyt metsikön laadun huononemista enemmän kuin yhdellä luokalla tai metsikön kehitysluokan muuttumista uudistusluokaksi. Jo aiemmin vajaatuottoisessa metsikössä tuho on lisännyt vajaatuottoisuutta olennaisesti. (3) Täydellinen tuho merkitsee, että metsikkö on uudistettava heti.

5.3.1. Lumituhojen aiheuttamat taloudelliset menetykset

Lumituhojen aiheuttamien kustannusten laskenta pohjautui ensisijaisesti edellä kuvattuun VMI10-13 aineistoon, josta edelleen määritettiin vuotuiset lumituhalueet Etelä-, Keski- ja Pohjois-Suomeen. Poiminnassa otettiin mukaan ainoastaan kuluvan ja edellisen vuoden aikana raportoidut lumituhot kunkin VMI-kierroksen osalta. Talouslaskentaan sisällytettiin kuitenkin ainoastaan vakavien lumituhojen vuotuiset pinta-alat: Etelä-Suomessa 544 hehtaaria, Keski-Suomessa 1 331 hehtaaria ja Pohjois-Suomessa 2 100 hehtaaria. Kaiken kaikkiaan lumituhoja Etelä-Keski- ja Pohjois-Suomessa oli VMI10-13 mukaan vuosittain 5 925, 12 848 ja 29 764 hehtaarilla. Keskimäärin hieman alle kymmenesosa oli siis vakavia lumituhoja.

Seuraavaksi määritettiin laskentatapa, joka mahdollisimman hyvin kuvaisi lumituhon vaikutusta puuston kehitykseen. Talouslaskentaan otettiin mukaan vain lumituhot, joissa puuston laatuluokka (hyvä-tydyttävä-välttävä) on huonontunut enemmän kuin yhdellä laatuluokalla. Tämän laatuluokan huononemisen puolestaan katsottiin aiheuttavan metsikössä keskimäärin 20 tai 30 vuoden viivästymän puuston kehityksessä ensiharvennuksen jälkeen. VMI-aineistosta tehty poiminta tuki riittävässä määrin edellä kuvattua laskentamenettelyä viivästymisen alkamisen ajoittumisen (ensiharvennus) suhteen.

Metsikkötason taloustarkastelut toteutettiin Motilla siten, että ensiharvennuksesta lähtien puuston kehitystä viivästytettiin 20 tai 30 vuodella. Kullekin suuralueelle arvottiin kolme paikkakuntaa, joille simuloinnit toteutettiin.

Seuraavaksi määritettiin pääpuulaji-kasvupaikkayhdistelmät suuralueittain - nämä perustuivat VMI-aineistoon ja oletuksiin pääpuulajista kasvupaikoittain. Yhdistelmät olivat: Etelä-Suomessa lehtomaisen kankaan istutuskuusikko (kasvupaikka, kp 2), tuoreen kankaan istutuskuusikko ja tuoreen kankaan istutusmännikkö (kp 3), Keski-Suomessa tuoreen kankaan istutuskuusikko, tuoreen kankaan istutusmännikkö ja kuivahkon kankaan kylvömännikkö (kp 4) ja Pohjois-Suomessa tuoreen kankaan istutuskuusikko, kuivahkon kankaan kylvömännikkö ja kuivan kankaan kylvömännikkö (kp 5). Arvotut (<https://www.randomizer.org>) paikkakunnat puolestaan olivat Etelä-Suomessa Kokemäki, Loimaa ja Riihimäki, Keski-Suomessa Karttula, Toivakka ja Jämsä sekä Pohjois-Suomessa Puolanka, Haapavesi ja Utajärvi. Näille yhdeksälle paikkakunnalle ja kolmelle pääpuulaji-kasvupaikkakombinaatiolle simuloitiin nykypuuskupolvessa Motilla normaali puuston kehitys HMS:n mukaan samoin kuin viivästyneet puuston kehitykset (+20 v ja +30 v), ja edelleen määritettiin puuston kehityssennusteiden mukaiset nettotulojen nykyarvot nykypuuskupolvessa ja seuraavien puuskupolvien paljaan maan arvo, joka perusti HMS:n mukaiseen metsänkäsittelyyn.

Lopuksi laskettiin lumituhon aiheuttamasta puuston kasvun viivästyisestä johtuva taloudellinen tappio (taloustulosten erotus). Taulukossa 30 on esitetty kunkin suuralueen pääpuulaji-kasvupaikkakombinaatioiden ja paikkakuntien yhdistetyt keskiarvot. Tässä raportissa oletettiin lumituhojen jakaantuvan tasaisesti pääpuulaji-kasvupaikkakombinaatioille, jotka oli erikseen määritetty suuralueille. Oletusta tukee VMI-aineiston lumituhoa-aineiston kasvupaikkatyyppien jakaantuminen suuralueittain: Etelä-Suomessa kasvupaikat 2 ja 3 kattoivat noin 71 %, Keski-Suomessa kasvupaikat 3 ja 4 noin 65 % ja Pohjois-Suomessa kasvupaikat 3, 4 ja 5 noin 88 % lumituhojen kasvupaikoista.

Taulukko 31. Lumituhon aiheuttaman puuston kehityksen viivästyksen kustannukset metsikkötasolla Etelä-, Keski- ja Pohjois-Suomessa, €/ha. Lukuarvot kuvaavat kolmen paikkakunnan ja kolmen pääpuulaji-kasvupaikkakombinaation keskiarvoja.

Suuralue	20 vuoden viivästyminen	30 vuodenviivästyminen
Etelä-Suomi	3 436 ^{a)}	4 501
	2 024	2 598
	1 282	1 608
Keski-Suomi	2 150	2 843
	1 167	1 509
	671	846
Pohjois-Suomi	819	1 099
	454	592
	258	326

^{a)}ylin lukuarvo kuvaa kustannusta 2 %, keskimäinen 3 % ja alimmainen 4 %: laskentakorkokannalla

Taulukon 31 hehtaarikohtaiset kustannukset kerrottiin lopuksi suuralueittaisilla vuotuisilla lumituhopinta-aloilla, jolloin saatiin arvio lumituhojen kokonaiskustannuksista. Nämä esitetään Taulukossa 32. On kuitenkin syytä korostaa, että kyseessä on varsin karkea arvio. Esimerkiksi, on lähes mahdotonta – ilman tarkempaa uutta tietoa – arvioida, toteutuuko jokaisella lumituhokohteella tässä simuloitu 20 tai 30 vuoden puuston kehityksen viivästyminen.

Taulukko 32. Lumituhojen aiheuttamat vuotuiset kustannukset Suomessa kolmella laskentakorkokannalla (2 %, 3 % ja 4 %), miljoonaa euroa.

Viivästyminen	2 %	3 %	4 %
20 vuotta	6,5	3,6	2,1
30 vuotta	8,5	4,6	2,7

6. Johtopäätökset

Tämän tutkimuksen päätulokset on esitetty yhteenvetotaulukossa (Taulukko 33), jossa on listattu eri tuhonaiheuttajien aiheuttaman kustannukset metsätaloudelle 4 % laskentakorkokannan mukaan. Tämä on tietoinen valinta. Metsätaloudesta keskimäärin saatava tuotto on historiallisesti ollut noin 3 % luokkaa (Kuuluvainen & Valsta 2009), mutta Suomessa metsistään taloudellista tuottoa tavoittelevien voidaan katsoa odottavan vähintään 4 % vuotuista tuottoa, mikä käy ilmi esimerkiksi viimeaikaisesta kehityksestä (esim. Teikari 2019, kuviot 8–9). Laskentakorkokannan (4 %) valintaa tukee myös se, että viimeisen 10 vuoden (2012–2021) tilastoitu laskennallinen puuntuotannon reaalinen sijoitustuotto koko maan tasolla on keskimäärin ollut yli 4 % (Luke, Tilastot 2023a).

Taulukko 33. Yhteenvetotaulukko vuotuista kustannuksista. Kunkin tuhonaiheuttajan kustannus vuositasona sekä tuhoaiheuttajien yhteenlaskettu vuotuinen kustannus, miljoonaa euroa. Lukuarvot esitetty 4 % laskentakoron mukaan, ellei toisin mainita.

Tuhoaiheuttaja	Kustannus, miljoonaa euroa
Kuusenjuurikäätä, suorat kustannukset	51,0 ^{a)}
Kuusenjuurikäätä, epäsuorat kustannukset	0,23
Männynjuurikäätä	0,47–4,40 ^{b)}
Tervasroso	3,50 ^{a)}
Kirjanpainaaja	4,58–11,89
Tukkimiehentäi	0,78–29,08 ^{c)}
Mäntypistiäiset	2,78 ^{a)}
Myyrät	0,70–5,80 ^{d)}
Hirvieläimet, pääasiassa hirvi	6,57–24,26 ^{e)}
Tuulituhot	8,78–13,16 ^{a),f)}
Lumituhot	2,13–2,69 ^{g)}
YHTEENSÄ	81,52–148,79

^{a)}laskentakorkokannalla ei merkitystä, koska ko.kustannus laskettu juoksevana, vuodesta toiseen toistuvana keskimäärin, ^{b)}vaihteluväli sisältää oletuksia tukkisiirtymästä, katso Taulukko 4, ^{c)} vaihteluväli sisältää kaikkien neljän skenaarion tulokset, Ks. Taulukko 13, ^{d)}myyrätuhoissa pinta-alat pohjautuvat ennustemaliin, jossa edustettuina vv. 1990–2020 ja joka tuottaa keskimääräisen vuotuisen tuhopinta-alan – tässä on esitetty minimi- ja maksimihovuosien vastaava kustannus, ^{e)}hirvillä vaihteluväli perustuu oletukseen, jossa tukkivähennys vaihtelee tuho- ja kehitysluokittain (Taulukko 25); analyysissä oli mukana vain mäntyvaltaisten taimikoiden tuhot eli 49 % VML:ssä havaittujen hirvieläintuhojen pinta-alasta, ^{f)}vaihteluväli sisältää sekä 20 että 30 %-yksikön kantohintojen aleneman ja ^{g)}vaihteluväli sisältää 20 ja 30 vuoden puuston kehityksen viivästymisen.

Taulukosta 33 nähdään, että karkealla tasolla tässä raportissa tarkastelujen tuhonaiheuttajien yhteenlaskettu vuotuinen kustannus on 100 miljoonan euron molemmin puolin, riippuen tehdyistä oletuksista. Kun tätä lukuarvoa suhteutetaan vuotuisiin kantorahatuloihin (joiden viimeisen 10 vuoden keskiarvo ollut 1,84 miljardia euroa/vuosi; Luke, Tilastot 2023b) nähdään, että metsätuhojen kantorahatuloja heikentävä vaikutus on karkeasti noin 5 % luokkaa. Tässä yhteydessä on kuitenkin korostettava, että ilmastonmuutoksen edetessä metsätuhot tulevat mitä todennäköisimmin kasvamaan (esim. de Groot ym. 2022) ja kuten monien tuhonaiheuttajien kohdalla on edellä todettu, ovat tämän raportin tulokset aliarvio metsätuhojen todellisista kustannuksista.

Vaikka kaikille tuhonaiheuttajille on tässä raportissa saatu laskettua hintalappu (kustannus), ei tämä tarkoita, että eri tuhonaiheuttajat olisivat suoraan verrattavissa keskenään kustannusten osalta. Tämä johtuu siitä, että talouslaskennassa käytetyt aineistot ja laskentaperusteet poikkesivat merkittävästi eri tuhonaiheuttajien välillä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että myös taloustuloksiin liittyvä epävarmuus vaihteli tuhonaiheuttajien kesken. Näin ollen pelkät talouslukuarvot eivät anna harhatonta kuvaa kokonaisuudesta.

Yhteenvetotaulukossa (Taulukko 33) esitettyjä lukuarvoja tarkastellessa on syytä huomioida myös talouslaskennan toteutuksen yksityiskohdat eri tuhonaiheuttajien osalta. Samalla on huomattava, että joidenkin taudinaiheuttajien (ytimennävertäjät, abioottiset taimituhot ja tuholaslaji havununna) kohdalla ei suoritettu lainkaan talouslaskelmia – tähän päädyttiin yksinkertaisesti siksi, ettei biologista aineistoa ole riittävästi edes alustavien talouslaskelmien tekemiseen. Esimerkiksi ytimennävertäjien tiedetään kyllä aiheuttavan puiden kasvutappioita isojen puuvarastojen ja sahojen läheisyydessä, mutta ainakaan julkista aineistoa ei ole tarpeeksi varsinaisia talousanalyysia varten.

Silloinkin kun aineistoja on käytettävissä, sisältyy talouslaskelmiin runsaasti haasteita, jotka on syytä tiedostaa tulkittaessa tässä raportissa esitettyjä eri tuhonaiheuttajien aikaansaamia suoria kustannuksia. Ensinnäkin laskelmissa tehtiin runsaasti oletuksia, jotka johtuivat pääsääntöisesti joko teknisistä rajoitteista (esim. hirvituhoissa ainoastaan tarkasteltiin varhaisvaiheen ja varttuneita mäntytaimikoita) tai yksinkertaisesti tiedon puutteesta (esim. tuulituhoissa tuho-kohteiden puustotunnuksia tai kirjanpainajatuhojen todellisesta koosta metsiköissä ei ollut kattavasti saatavilla). Lisäksi metsikkötason tuloksia skaalattiin aluetasolle eri tavalla eri tuhonaiheuttajien kohdalla.

Vaikka raportissa tehdyt oletukset eivät ole rinnasteisia eri tuhonaiheuttajien välillä, saattaa lukijalla kuitenkin olla halu verrata tuhonaiheuttajia keskenään. Tässä kohden on korostettava, että tällainen vertailu kuitenkin vääristää todellista tilannetta, koska oletusten taso (laajuus ja vakavuus) eri taudinaiheuttajilla vaihtelee paljon. Näin ollen yhteenvetotaulukossa (Taulukko 33) esitettyihin kokonaiskustannusten suora vertailu eri tuhonaiheuttajien välillä ei ole suositeltavaa.

Kuten edeltä ilmenee, ovat tuhonaiheuttajittain esitetyt vuotuiset kokonaiskustannukset (miljoonaa euroa) keskimäärin aliarviota todellisista kustannuksista. Tämä perustuu yksinkertaisesti siihen, että juuri minkään tuhonaiheuttajan kohdalla ei tässä raportissa saatu sisällytettyä kaikkia elementtejä (kustannustekijöitä) laskelmiin mukaan. Siten voidaan todeta, että vaikka tässä raportissa esitetyt kustannusarvot ovat suuruusluokaltaan oikean suuntaisia, osoitti METKOKA-hankkeessa tehty tutkimustyö, että metsätuhojen aiheuttamisen kustannusten harhaton arviointi edellyttäisi merkittävästi nykyistä enemmän mitattua tietoa sekä uutta mallinusta, jotta kaikki todelliset kustannukset saataisiin määritettyä tarkasti. Tämä puolestaan edellyttäisi moninkertaisesti suurempaa resurssointia kuin mitä tähän raporttiin oli mahdollista allokoida.

Lisäksi tuhonaiheuttajien välillä on eroja siinä, miten tuho ilmenee ja miten siitä raportoidaan. Toisin sanoen osa tuhoista on kertaluonteisia ja intensiivisiä (lumituho ja tuulituho), toisaalta tuhonaiheuttaja voi aiheuttaa puustossa kasvutappiota, joka vähitellen nakertaa tuotosta ja tuottoa – tästä esimerkkinä juurikäpä. Onkin haasteellista alistaa näinkin erilaiset ilmiöt samaan laskentakehikkoon, jossa arvioidaan kustannuksia vuositasolla.

Lopuksi on huomattava, että tässä raportissa esitetyt arviot eri tuhonaiheuttajien kustannuksista perustuvat suoriin kustannuksiin, jotka primaarisesti kohdentuvat metsänomistajille. Toisin sanoen ne pienentävät kantorahatulosten potentiaalia. Jotta voisimme arvioida tuhojen hyvinvointivaikutuksia kansantalouden tasolla, pitäisi taloustarkasteluita laajentaa siten että laskentaan sisällytettäisiin tuhojen aiheuttamat metsäsektorin arvonlisäys- ja työllisyysvaikutukset sekä kerrannaisvaikutukset muilla toimialoilla (esim. Kniivilä ym. 2022). Tämä kuitenkin edellyttäisi tässä raportissa toteutettua suoraviivaista talouslaskentaa merkittävästi laajempaa ja seikkaperäisempää taloudellista laskentakehikkoa (esim. Honkatukia ym. 2008: osittaistaspainomalli), joka teknisesti voitaisiin toteuttaa esimerkiksi skenaariotarkasteluna.

Kiitokset

Kiitämme Maa- ja metsätalousministeriötä ”Metsätuhojen kokonaisvaltaiset kustannukset” hankkeen rahoituksesta. Kiitos myös Metsäkeskukselle tutkimusaineistosta ja muusta käytännön tuesta. Lisäksi on syytä kiitollisuuteen niistä monista vinkeistä ja neuvoista, joita epävirallinen ohjausryhmämme antoi meille työn aikana. Lopuksi haluamme ilmaista tässä tyytyväisyytemme myös Luken julkaisutoimitukselle loppuraportin kirjoittamisen aikana saamamme tuesta.

Viitteet

- Ahtikoski, A., Salminen, H., Hökkä, H., Kojola, S. & Penttilä, T. 2012. Optimising stand management on peatlands: the case of northern Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 42: 247–259.
- Andreassen, H.P., Sundell, J., Ecke, F., Halle, S., Haapakoski, M., Henttonen, H., Huitu, O., Jacob, J., Johnsen, K., Koskela, E., Luque Larena, J.J., Lecomte, N., Leirs, H., Mariën, J., Neby, M., Rätti, O., Sievert, T., Singleton, G.R., van Cann, J., van Denbroecke, B. & Ylönen, H. 2021. Population cycles and outbreaks of small rodents – ten essential questions we still need to solve. *Oecologia* 195: 601–622.
- Ahtikoski, A., Tuulentie, S., Hallikainen, V., Nivala, V., Vatanen, E., Tyrväinen, L. & Salminen, H. 2011. Potential trade-offs between nature-based tourism and forestry, a case study in Northern Finland. *Forests* 2: 894–912
- Annala, E. 1969. Influence of temperature upon the development and voltinism of *Ips typographus* L. (Coleoptera, Scolytidae). *Annales Zoologici Fennici* 6: 161–208.
- Annala, E. & Heikkilä, R. 1991. Breeding efficiency in *Tomicus piniperda* and shoot damage after late autumn thinning of young *Pinus sylvestris* stands. *Scandinavian Journal of Forest Research* 6: 197–207.
- 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: 660.
- Annala, E. & Petäistö, R.L. 1978. Insect attack on windthrown trees after the December 1975 storm in western Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 94: 1–24.
- Austarå, Ø., Orlund, A., Svendsrud, A.R. & Veidahl, A. 1987. Growth loss and economic consequences following two years defoliation of *Pinus sylvestris* by the pine sawfly *Neodiprion sertifer* in West-Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2: 111–119.
- Baxter, R. & Hansson, L. 2001. Bark consumption by small rodents in the northern and southern hemispheres. *Mammal Review* 31: 47–59.
- Bendz-Hellgren, M. & Stenlid, J. 1995. Long-term reduction in the diameter growth of butt rot affected Norway spruce, *Picea abies*. *Forest Ecology and Management* 74: 239–243.
- Bendz-Hellgren, M. & Stenlid, J. 1997. Decreased volume growth of *Picea abies* in response to *Heterobasidion annosum* infection. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 1519–1524.
- Björklund, N., Nordlander, G. & Bylund, H. 2003. Host-plant acceptance on mineral soil and humus by the pine weevil *Hylobius abietis* (L.). *Agricultural and Forest Entomology* 5: 61–66.
- Borkowski, A. 2001. Threats to pine stands by the pine shoot beetles *Tomicus piniperda* (L.) and *Tomicus minor* (Hart.) (Col., Scolytidae) around a sawmill in southern Poland. *Journal of Applied Entomology* 125: 489–492.

- Britton, R. J. 1988. Physiological effects of natural and artificial defoliation on the growth of young crops of lodgepole pine. *Forestry* 61: 165–175.
- Bucyanayandi, J.-D., Bergeron, J.-M., Soucie, J., Thomas, D. & Jean, Y. 1992. Differences in nutritional quality between herbaceous plants and bark of conifers as winter food for the vole *Microtus pennsylvanicus*. *Journal of Applied Ecology* 29: 371–377.
- CABI 2019. Invasive species compendium. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/16148>. Viitattu 22.3.2023.
- 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* 53: 253–261.
- Chang, S.J. 2014. Forest valuation under the generalized Faustmann formula. *Canadian Journal of Forest Research* 44: 56–63.
- Christiansen, E. & Bakke, A. 1968. Temperature preference in adults of *Hylobius abietis* L. (Coleoptera: Curculionidae) during feeding and oviposition. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* 62: 83–89.
- Christiansen, E. & Bakke, A. 1988. The Spruce Bark Beetle of Eurasia. In Berryman, A.A. (ed.), *Dynamics of Forest Insect Populations; Patterns, Causes, Implications*. Plenum Press, New York. s. 479–503.
- Cornulier, T., Yoccoz, N.G., Bretagnolle, V., Brommer, J.E., Butet, A., Ecke, F., Elston, D.A., Framstad, E., Henttonen, H., Hörnfeldt, B., Huitu, O., Imholt, C., Ims, R.A., Jacob, J., Jędrzejewska, B., Millon, A., Petty, S.J., Pietiäinen, H., Tkadlec, E., Zub, K. & Lambin, X. 2013. Europe-wide dampening of population cycles in keystone herbivores. *Science* 340: 63–66.
- de Groot, M., Silvio Schueler, S., Sallmannshofer, M., Virgillito, C., Kovacs, G., Cech, T., Božič, G., Damjanić, R., Ogris, N., Hoch, G., Kavčič, A., Koltay, A., Lanšćak, M., Vujnović, Z., Lukić, I., Nagy, L., Novak Agbaba, S., Orlović, S., Poljaković-Pajnik, L., Stojnić, S., Westergren, M., Zlatković, M., Steinkellner, M., Szamosvari, E., Katharina Lapin, K. 2022. Forest management, site characteristics and climate change affect multiple biotic threats in riparian forests. *Forest Ecology and Management* 508: 120041.
- Dobbertin, M., 2002. Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar. *Forest Snow and Landscape Research* 77: 187–205.
- Ericsson, A., Hellkvist, J., Hillerdal-Hagströmer, K., Larsson, S., Mattson-Djos, E. & Tenow, O. 1980. Consumption and pine growth: Hypotheses on effects on growth processes by needle-eating insects. *Ecological Bulletins* 32: 537–545.
- Fedderwitz, F., Björklund, N., Ninkovic, V. & Nordlander, G. 2018. Does the pine weevil (*Hylobius abietis*) prefer conifer seedlings over other main food sources? *Silva Fennica* 52: 9946.
- Furniss, M.M., Solheim, H., & Christiansen, E. 1990. Transmission of blue-stain fungi by *Ips typographus* (Coleoptera: Scolytidae) in Norway spruce. *Annals of the Entomological Society of America*, 83: 712–716.

- Gill, R.M.A. 1992a. A review of damage by mammals in north temperature forests. 2. Small mammals. *Forestry* 65: 281–308.
- Gill, R.M.A. 1992b. A review of damage by mammals in north temperature forests. 3. Impact on trees and forests. *Forestry* 65: 363–388.
- Giurca, A. & von Stedingk, H. 2014. FSC Pesticides Policy in Sweden. <https://www.se.fsc.org/sites/default/files/2022-01/FSC%20Pesticides%20Policy%20in%20Sweden-Report%202014%20-%20webb.pdf>. Viitattu 22.3.2023.
- 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: 46397.
- Gregow, H., Peltola, H., Laapas, M., Saku, S. & Venäläinen, A., 2011. Combined occurrence of wind, snow loading and soil frost with implications for risks to forestry in Finland under the current and changing climatic conditions. *Silva Fennica* 45: 30.
- Haapanen, M., Hynynen, J., Ruotsalainen, S., Siipilehto, J. & Kilpeläinen, M.L. 2016. Realised and projected gains in growth, quality and simulated yield of genetically improved Scots pine in southern Finland. *European Journal of Forest Research* 135: 997–1009.
- Haikarainen, S., Huuskonen, S., Ahtikoski, A., Lehtonen, M., Salminen, H., Siipilehto, J., Korhonen, K.T., Hynynen, J. & Routa, J. 2021. Does Juvenile Stand Management Matter? Regional Scenarios of the Long-Term Effects on Wood Production. *Forests* 12: 1.
- Hansson, L. 1977. Spatial dynamics of field voles *Microtus agrestis* in heterogeneous landscapes. *Oikos* 29: 539–544.
- Hansson, L. 1982. Experiments on habitat selection in voles: implications for the inverse distribution of two common European species. *Oecologia* 52: 246–252.
- Hansson, L. 1986. Bark consumption of voles in relation to snow cover, population density and grazing impact. *Holarctic Ecology* 9: 312–316.
- Hansson, L., & Henttonen, H. 1985. Gradients in density variations of small rodents: the importance of latitude and snow cover. *Oecologia* 67: 394–402.
- Hansson, L. & Larsson, T.-B. 1980. Small rodent damage in Swedish forestry during 1971–1979. *Swedish Wildlife Research* 1: 1–64.
- Heikkilä, R. & Löyttyniemi, K. 1992. Growth response of young Scots pines to artificial shoot breaking simulating moose damage. *Silva Fennica* 26: 19–26.
- Heinonen, J. 1994. Koealojen puu- ja puustotunnusten laskentaohjelma KPL: käyttöohje. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 504. 80 s. ISBN 951-40-1369-7.
- Heiskanen, J., Saksa, T. & Luoranen, J. 2013. Soil preparation method affects outplanting success of Norway spruce container seedlings on till soils susceptible to frost heave. *Silva Fennica* vol. 47: 893.

- Henttonen, H., Lilja, A. & Niemimaa, J., 1994. Myyrien ja hyönteisten aiheuttamat sieninfektiot koivun taimien uhkana. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 496: 125–129.
- Henttonen, H., Niemimaa, J. & Kaikusalo, A., 1995. Myyrät ja pellonmetsitys. Teoksessa: Hytönen, J. & Polet, K. (toim.). Peltojen metsitysmenetelmät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 581: 97–117.
- Henttonen, H. & Wallgren, H. 2001. Small rodent dynamics and communities in the birch forest zone of northern Fennoscandia. In: Wielgolaski, F.E. (eds.). Nordic Mountain Birch Forest Ecosystems UNESCO Man and Biosphere Series, UNESCO, Paris and Parthenon Publishing Group, New York and London, Man and the Biosphere Series 27: 261–278.
- Hjältén, J., Danell, K. & Ericson, L. 2004. Hare and vole browsing preferences during winter. Acta Theriologica 49: 53–62.
- Hlásny, T., König, L., Krokene, P., Lindner, M., Montagné-Huck, C., Müller, J., Qin, H., Raffa, K.F., Schelhaas, M.-J., Svoboda, M., Viiri, H. & Seidl, R. 2021. Bark Beetle Outbreaks in Europe: State of Knowledge and Ways Forward for Management. Current Forestry Reports 7:138–165.
- Honkatukia, J., Kallio, M., Hänninen, R. & Pohjola, J. 2008. Venäjän puutullien vaikutukset Suomen metsäsektoriin ja kansantalouteen. Metsätieteen Aikakauskirja 3: 6388.
- Horntvedt, R., Christiansen, E., Solheim, H. & Wang, S. 1983. Artificial inoculation with *Ips typographus*-associated blue stain fungi can kill healthy Norway spruce trees. Meddelser fra Skogforsk 38: 1–20.
- Huitu, O., Kiljunen, N., Korpimäki, E., Koskela, E., Mappes, T., Pietiäinen, H., Pöysä, H. & Henttonen, H. 2009. Density-dependent vole damage in silviculture and associated economic losses at a nationwide scale. Forest Ecology and Management 258: 1219–1224.
- Huitu, O., Rousi, M. & Henttonen, H. 2013. Integration of vole management to boreal silvicultural practices. Pest Management Science 69: 355–361.
- Huuskonen, S., Haikarainen, S., Sauvala-Seppälä, T., Salminen, H., Lehtonen, M., Siipilehto, J., Ahtikoski, A., Korhonen, K.T. & Hynynen, J. 2020. Benefits of juvenile stand management in Finland – impacts on wood production based on scenario analysis. Forestry 93: 458–470.
- Hynynen, J., Ahtikoski, A., Siitonen, J., Sievänen, R. & Liski, J. 2005. Applying the MOTTI simulator to analyse the effect of alternative management schedules on timber and non-timber production. Forest Ecology and Management 207: 5–18.
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA System. Metsäntutkimuslaitoksen Tiedonantoja - The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 835. 116 s. ISBN 951-40-1815-X.
- Hynynen, J., Salminen, H., Ahtikoski, A., Huuskonen, S., Ojansuu, R., Siipilehto, J., Lehtonen, M. & Eerikäinen, K. 2015. Long-term impacts of forest management on biomass supply

- and forest resource development: a scenario analysis for Finland. *European Journal of Forest Research* 134: 415–431.
- Hynynen, J., Salminen, H., Huuskonen, S., Ahtikoski, A., Ojansuu, R., Siipilehto, J., Lehtonen, M., Rummukainen, A., Kojola, S. & Eerikäinen, K. 2014. Scenario analysis for the biomass supply potential and the future development of Finnish forest resources. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 302. 106 s. ISBN 978-951-40-2487-0.
- Hytönen, J., Hökkä, H. & Saarinen, M. 2020. The effect of planting, seeding and soil preparation on the regeneration success of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on drained peatlands – 10-year results. *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 72: 91–106.
- Ikonen, V.-P., Kilpeläinen, A., Zubizarreta-Gerendiain, A., Strandman, H., Asikainen, A., Venäläinen, A., Kaurola, J., Kangas, J. & Peltola, H., 2017. Regional risks of wind damage in boreal forests under changing management and climate projections. *Canadian Journal of Forest Research* 47: 1632–1645.
- Imholt, C., Reil, D., Plašil, P., Rödiger, K., & Jacob, J. 2017. Long-term population patterns of rodents and associated damage in German forestry. *Pest Management Science* 73: 332–340.
- Jalkanen, R. & Konocpka, B. 1998. Snow-packing as a potential harmful factor on *Picea abies*, *Pinus sylvestris* and *Betula pubescens* at high altitude in northern Finland. *European Journal of Forest Pathology* 28: 373–382.
- Juutinen, P. 1967. Zur Bionomie und zur Vorkommen der Roten Kiefernbuschhornblattwespe (*Neodiprion sertifer* Geoffr.) in Finnland in den Jahren 1959–65. Seloste: Ruskean mäntypistiäisen (*Neodiprion sertifer* Geoffr.) bionomiasta ja esiintymisestä Suomessa vuosina 1959–65. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 63: 1–129.
- Juutinen, P. 1978. Pulpwood stacks as breeding sites for pine shoot beetle (*Tomicus piniperda* L.) in Northern Finland. *Folia Forestalia* 335.
- Juutinen A., Ahtikoski A., Lehtonen M., Mäkipää R. & Ollikainen M. 2018. The impact of a short-term carbon payment scheme on forest management. *Forest Policy and Economics* 90: 115–127.
- Kaitera, J. 2000. Analysis of *Cronartium flaccidum* lesion development on pole-stage Scots pines. *Silva Fennica* 34: 21–27.
- Kaitera, J. & Nuorteva, H. 2008. Inoculations of eight *Pinus* species with *Cronartium* and *Peridermium* stem rusts. *Forest Ecology and Management* 255: 973–981.
- Kaitera, J., Aalto, T. & Jalkanen, R. 1994. Effect of resin-top disease caused by *Peridermium pini* on the volume and value of *Pinus sylvestris* saw timber and pulp wood. *Scandinavian Journal of Forest Research* 9: 376–381.
- Kaitera, J., Hiltunen, R. & Hantula, J. 2015. *Cronartium* rust sporulation on hemiparasitic plants. *Plant Pathology* 64: 738–747.

- Kaitera, J., Hiltunen, R., Kauppila, T. & Hantula, J. 2017. Five plant families support natural sporulation of *Cronartium ribicola* and *C. flaccidum* in Finland. *European Journal of Plant Pathology* 149: 367–383.
- Kaitera, J., Nuorteva, H. & Hantula, J. 2005. Distribution and frequency of *Cronartium flaccidum* on *Melampyrum* spp. in Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 229–234.
- Kaneko, Y., Nakata, K., Saitoh, T., Stenseth, N.C. & Bjørnstad, O.N., 1998. The biology of the vole *Clethrionomys rufocanus*: a review. *Researches on Population Ecology* 40: 21–37.
- Kellomäki, S., Maajärvi, M., Strandman, H., Kilpeläinen, A. & Peltola, H. 2010. Model computations on the climate change effects on snow cover, soil moisture and soil frost in the boreal conditions over Finland. *Silva Fennica* 44: 213–233.
- Kim, M.-S., Hantula, J., Kaitera, J., Zambino, P.J., Woodward, S., Richardson, B.A., Stewart, J.E., Spaine, P., Shaw, D.C., Takeuchi, Y. & Klopfenstein, N.B. 2021. Recovery plan for Scots pine blister rust caused by *Cronartium pini*. *Plant Health Progress* 23: 105–130.
- Kniivilä, M., Hirvelä, H., Lintunen, J., Mutanen, A., Vatanen, E., Viitanen, J. & Kurttila, M. 2022. Metsien tiukan lisäsuojelun hakkuumahdollisuus-, arvonlisäys- ja työllisyysvaikutusten arviointi Skenaariotarkastelu EU:n biodiversiteettistrategiasta Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 64/2022. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 37 s.
- Komonen, A. & Kouki, J. 2008. Do restoration fellings in protected forests increase the risk of bark beetle damages in adjacent forests? A case study from Fennoscandian boreal forest. *Forest Ecology and Management* 255: 3736–3743.
- Komonen A., Laatikainen A., Similä M. & Martikainen P. 2009. Ytimennävertäjien kasvainsyönte trombin kaataman suojelumännikön ympäristössä Höytiäisen saarella Pohjois-Karjalassa. *Metsätieteen aikakauskirja* 2009: 5761.
- Korhonen, J. 2015. Kantokäsittelyn kustannusten muodostuminen. Opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, Tampere. 48 s.
- Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Miina, J., Saksa, T. & Viiri, H. 2011. Metsänuudistamisen tila Suomessa VMI10:n aineistojen perusteella. *Metsätieteen aikakauskirja* 2010: 6943.
- Korpela, K., Delgado, M., Henttonen, H., Korpimäki, E., Koskela, E., Ovaskainen, O., Pietiäinen, H., Sundell, J., Yoccoz, N.G. & Huitu, O. 2013. Nonlinear effects of climate on boreal rodent dynamics: mild winters do not negate high-amplitude cycles. *Global Change Biology* 19: 697–710.
- Krebs, C.J. 2013. *Population Fluctuations in Rodents*. University of Chicago Press.
- Kulman, H.M. 1971. Effects of insect defoliation on growth and mortality of trees. *Annual Review of Entomology* 16: 289–324.
- Kurkela, T., Nikkanen, O. & Kukkonen, H. 1978. Tyvitervaksen (maannousemasienen) aiheuttamat kasvutappiot männikössä. *Metsä ja puu* 10: 33–35.
- Kuuluvainen, J. & Valsta, L. 2009. *Metsäekonomian perusteet*. Gaudeamus. 332 s.

- Kärhä, K., Koivusalo, V., Palander, T & Ronkanen, M. 2018. Treatment of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* stumps with urea and *Phlebiopsis gigantea* for control of *Heterobasidion*. *For-ests* 9: 139.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt*. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- Lalík, M., Galko, J., Kunca, A., Nikolov, C., Rell, S., Zúbrik, M., Dubec, M., Vakula, J., Gubka, A., Leontovyč, R., Longauerová, V., Konôpka, B. & Holuša, J. 2021. Ecology, management and damage by the large pine weevil (*Hylobius abietis*) (Coleoptera: Curculionidae) in coniferous forests within Europe. *Central European Forestry Journal* 67: 91–107.
- Legowski, D. 1987. Observations on the fall of twigs in forest district Niedzwiady in the years 1977–1983. *Sylvan* 9: 39–46.
- Lehtonen, I., Ruosteenoja, K., Venäläinen, A. & Gregow, H. 2014: The projected 21st century forest-fire risk in Finland under different greenhouse gas scenarios. *Boreal Environment Research* 19: 127–139.
- Lehtonen I., Hoppula P., Pirinen P. & Gregow H. 2014. Modelling crown snow loads in Finland: a comparison of two methods. *Silva Fennica* 48: 1120.
- Lindelöw, Å. & Schroeder, M. 2001. Spruce bark beetle, *Ips typographus* L., in Sweden: monitoring and risk assessment. *Journal of Forest Science* 47: 40–42.
- Lindström, A., Hellqvist, C. & Stattin, E. 2005. Mini seedlings—A new forest regeneration system. In: Colombo, J.S (ed.). *In The Thin Green Line: A Symposium on the State-of-the-art in Reforestation, Proceedings; Forest Research Information Paper 160*. Ontario Forest Research Institute: Sault Ste Marie, ON, Canada. p. 59–61.
- Lohmander, P., Helles, F. & 1987. Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2: 227–238.
- Långstrom, B. & Hellqvist, C. 1991. Shoot damage and growth losses following three years of *Tomicus*-attacks in Scots pine stands close to a timber storage site. *Silva Fennica* 25: 133–145.
- Luoranan, J. & Kiljunen, N. 2006. Kuusen paakkutaimien viljelyopas. *Metsäntutkimuslaitoksen erillisjulkaisut*, 108 s.
- Luoranan, J. & Viiri, H. 2012. Soil preparation reduces pine weevil (*Hylobius abietis* L.) damage on both peatland and mineral soil sites one year after planting. *Silva Fennica* 46: 71.
- Luoranan, J. & Viiri, H. 2021. Comparison of the planting success and risks of pine weevil damage on mineral soil and drained peatland sites three years after planting. *Silva Fennica* 55: 10528.
- Luoranan, J., Rikala, R. & Smolander, H. 2011. Machine planting of Norway spruce by Bracke and Ecoplanter: an evaluation of soil preparation, planting method and seedling performance. *Silva Fennica* 45 107.

- 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.
- Luoranen, J., Saksa, T. & Lappi, J. 2018. Seedling, planting site and weather factors affecting the success of autumn plantings in Norway spruce and Scots pine seedlings. *Forest Ecology and Management* 419–420: 79–90.
- Luoranen, J., Riikonen, J. & Saksa, T. 2022a. Factors affecting winter damage and recovery of newly planted Norway spruce seedlings in boreal forests. *Forest Ecology and Management* 503: 119759.
- Luoranen, J., Laine, T. & Saksa, T. 2022b. Field performance of sand-coated (Conniflex®) Norway spruce seedlings planted in mounds made by continuously advancing moulder and in undisturbed soil. *Forest Ecology and Management* 517: 120259.
- Luoranen, J., Riikonen, J. & Saksa, T. 2023. Damage caused by an exceptionally warm and dry early summer on newly planted Norway spruce container seedlings in Nordic boreal forests. *Forest Ecology and Management* 528: 120649.
- 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.
- Långström, B. 1982. Abundance and seasonal activity of adult *Hylobius* weevils in reforestation areas during first years following final felling. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 106: 1–23.
- Långström, B. 1984. Windthrown Scots pines as brood material for *Tomicus piniperda* and *T. minor*. *Silva Fennica* 1984: 187–198.
- Martinsson, O. & Nilsson, B. 1987. The impact of *Cronartium flaccidum* on the growth of *Pinus sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2: 349–357.
- Matala, J., Kilpeläinen, H., Heräjärvi, H., Wall, T. & Verkasalo, E. 2020. Sawlog quality and tree dimensions of Scots pine 34 years after artificial moose browsing damage. *Silva Fennica* 54: 10389.
- Matala, J., Nikula, A., Pellikka, J., Aikio, S., Forsman, J., Henttonen, H., Holmala, K., Huitu, O., Jauni, M., Kojola, I., Melin, M., Paasivaara, A. & Pusenius, J. 2021. Hirvieläinten vaikutuksia yhteiskuntaan, elinkeinoihin ja ekosysteemiin. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 38/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 142 s. ISBN 978-952-380-217-9.
- Melin M., Ylioja T., Aarnio L., Hamunen K., Nevalainen S., Pouttu A. & Viiri H. 2021. Emergence levels of pine shoot beetles from roundwood piles of Scots pine and the cascading damage in the surrounding forests. *Silva Fennica* 55: 10525.
- Melin, M. & Terhonen, E. (toim.) 2022. Metsätuhot vuonna 2021. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 38/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 86 s. ISBN 978-952-380-422-7.
- Mitchell, S.J. 2013. Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis. *Forestry* 86: 147–157.

- Myllymäki, A. 1977. Outbreaks and damage by the field vole, *Microtus agrestis* (L.) since World War II in Europe. EPPO Bulletins 7: 177–207.
- Mönkkönen, M., Juutinen, A., Mazziotta, A., Miettinen, K., Podkopaev, D., Reunanen, P., Salmi-
nen, H. & Tikkanen, O-P. 2014. Spatially dynamic forest management to sustain biodi-
versity and economic returns. Journal of Environmental Management 134: 80–89.
- Netherer, S., Kandasamy, D., Jirosová, A., Kalinová, B., Schebeck, M. & Schlyter, F. 2021. Inter-
actions among Norway spruce, the bark beetle *Ips typographus* and its fungal symbi-
onts in the times of drought. Journal of Pest Science 94:591–614.
- Nevalainen, S., Nuorteva, H. & Pouttu, A. (toim.) 2018. Metsätuhot vuonna 2017. Luonnon-
vara- ja biotalouden tutkimus 44/2018. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 48 s. ISBN 978-
952-326-621-6.
- Nevalainen, S., Sirkiä S., Peltoniemi, M. & 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.
- Nevalainen, S., Matala, J., Korhonen, K.T., Ihalainen, A. & Nikula, A. 2016. Moose damage in
National Forest Inventories (1986–2008) in Finland. Silva Fennica 50: 1410.
<http://dx.doi.org/10.14214/sf.1410>.
- Nicoll, B.C., Gardiner, B.A., Rayner, B. & Peace, A.J. 2006. Anchorage of coniferous trees in re-
lation to species, soil type, and rooting depth. Canadian Journal of Forest Research 36:
1871–1883.
- Nilsson, U. & Örlander, G. 1995. Effects of regeneration methods on drought damage to
newly planted Norway spruce seedlings. Canadian Journal of Forest Research 25: 790–
802.
- Nordenhem, H. 1989. Age, sexual development, and seasonal occurrence of the pine weevil
Hylobius abietis (L.). Journal of Applied Entomology 108: 260–270.
- Nordlander, G. 1987. A method for trapping *Hylobius abietis* (L.) with a standardized bait and
its potential for forecasting seedling damage. Scandinavian Journal of Forest Research
2: 199–213.
- Nordlander, G., Bylund, H. & Björklund, N. 2005. Soil type and microtopography influencing
feeding above and below ground by the pine weevil *Hylobius abietis*. Agricultural and
Forest Entomology 7: 107–113.
- Nordlander, G., Nordenhem, H. & Bylund, H. 1997. Oviposition patterns of the pine weevil
Hylobius abietis. Entomologia Experimentalis et Applicata 85: 1–9.
- Nordlander, G., Örlander, G. & Langvall, O. 2003a. Feeding by the pine weevil *Hylobius abietis*
in relation to sun exposure and distance to forest edges. Agricultural and Forest Ento-
mology 5: 191–198.

- Nordlander, G., Bylund, H., Örlander, G. & Wallertz, K. 2003b. Pine weevil population density and damage to coniferous seedlings in a regeneration area with and without shelter-wood. *Scandinavian Journal of Forest Research* 18: 438–448.
- 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.
- Nordlander, G., Hellqvist, C., Johansson, K. & Nordenhem, H. 2011. Regeneration of European boreal forests: Effectiveness of measures against seedling mortality caused by the pine weevil *Hylobius abietis*. *Forest Ecology and Management* 262: 2354–2363.
- Nordlander, G., Mason, E.G., Hjelm, K., Nordenhem, H. & Hellqvist, C. 2017. Influence of climate and forest management on damage risk by the pine weevil *Hylobius abietis* in northern Sweden. *Silva Fennica* vol. 51 no. 5 article id 7751. 20 p.
- Norokorpi, Y. & Kärkkäinen, S. 1985. Maaston korkeuden vaikutus puusto- ja kasvupaikkatunnuksiin sekä tykkytuhoihin Kuusamossa. *Folia Forestalia* 632: 1–26.
- Nuorteva, H. & Kytö, M. (toim.) 2022a. Metsätuhot vuonna 2019. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 1/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 87 s. ISBN 978-952-380-347-3.
- Nuorteva, H. & Kytö, M. (toim.) 2022b. Metsätuhot vuonna 2020. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 2/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 72 s. ISBN 978-952-380-349-7.
- Nuorteva, H. (toim.) 2019. Metsätuhot vuonna 2018. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 85/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 60 s. ISBN 978-952-326-877-7.
- Nykänen, M.L., Peltola, H., Quine, C., Kellomäki, S. & Broadgate, M. 1997. Factors affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions. *Silva Fennica* 31: 193–213.
- Pearson, M., Saarinen, M., Minkkinen, K., Silvan, N. & Laine, J. 2011. Mounding and scalping prior to reforestation of hydrologically sensitive deep-peated sites: factors behind Scots pine regeneration success. *Silva Fennica* 45: 647–667.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Väisänen, H. & Ikonen, V.-P., 1999. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 647–661.
- Petersson, M., Örlander, G. & Nilsson, U. 2004. Feeding barriers to reduce damage by pine weevil (*Hylobius abietis*). *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 48–59.
- Petersson, M., Örlander, G. & Nordlander, G. 2005. Soil features affecting damage to conifer seedlings by the pine weevil *Hylobius abietis*. *Forestry* 78: 83–92.
- Petersson, M., Nordlander, G. & Örlander, G. 2006. Why vegetation increases pine weevil damage: Bridge or shelter? *Forest Ecology and Management* 225: 368–377.
- Pettersson, M., Kännaste, A., Lindström, A., Hellqvist, C., Stattin, E., Långström, B. & Borg-Karlson, A-K. 2008. Mini-seedlings of *Picea abies* are less attacked by *Hylobius abietis* than

- conventional ones: Is plant chemistry the explanation? *Scandinavian Journal of Forest Research* 23: 299–306.
- Pitkänen, A., Kouki, J., Viiri, H. & Martikainen, P. 2008. Effects of controlled forest burning and intensity of timber harvesting on the occurrence of pine weevils, *Hylobius* spp., in regeneration areas. *Forest Ecology and Management* 255: 522–529.
- Rautio, P., Hyppönen, M., Hallikainen, V., Niemelä, J., Välikangas, P., Jalkanen, R., Winsa, H., Hiltunen, A. & Bergsten, U. 2014. Kangasmetsien uudistamisen ongelmat Lapissa – kasvatetaanko kanervaa vai mäntyä? *Metsäntutkimuslaitoksen työraportteja* 321.
- Roll-Hansen, F. & Roll-Hansen, H. 1980. Microorganisms which invade *Picea abies* in seasonal stem wounds. 2. Ascomycetes, fungi imperfecti, and bacteria – general discussion, hymenomycetes included. *European Journal of Forest Pathology* 10: 396–410.
- 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.
- Ruosteenoja, K., Markkanen, T. & Räisänen, J. 2020. Thermal seasons in northern Europe in projected future climate. *International Journal of Climatology* 40: 4444–4462.
- Saksa, T. 2011. Kuusen istutustaimien menestyminen ja tukkimiehentäin tuhot eri tavoin muokatuilla uudistusaloilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 2011: 6634.
- Salminen, H., Lehtonen, M. & Hynynen, J. 2005. Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator. *Computers and Electronics in Agriculture* 49: 103–113.
- 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.
- Schindler, D., Jung, C. & Buchholz, A., 2016. Using highly resolved maximum gust speed as predictor for forest storm damage caused by the high-impact winter storm Lothar in Southwest Germany. *Atmospheric Science Letters* 17: 462–469.
- 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.
- Sikström, U., Hjelm, K., Hanssen, K.H., Saksa, T. & Wallertz, K. 2020. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review. *Silva Fennica* 54: 10172.
- Skogsstyrelsen 2021. Levererade skogsplantor 2020. Sveriges Officiella Statistik, Statistiska Meddelanden JO0313 SM 2001. <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/statistik/statistiska-meddelanden/sm-levererade-skogsplantor-2020.pdf>. Viitattu 22.3.2023.
- Solbreck, C. 1980. Dispersal distances of migrating pine weevils, *Hylobius abietis*, Coleoptera: Curculionidae. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 28: 123–131.

- Solbreck, C. & Gyldberg, B. 1979. Temporal flight pattern of the large pine weevil, *Hylobius abietis* L. (Coleoptera, Curculionidae), with special reference to the influence of weather. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* 88: 532–536.
- Sullivan, T.P. & Sullivan, D.S. 2010. Forecasting vole population outbreaks in forest plantations: the rise and fall of a major mammalian pest. *Forest Ecology and Management* 260: 983–993.
- Sundell, J., Huitu, O., Henttonen, H., Kaikusalo, A., Korpimäki, E., Pietiäinen, H., Saurola, P. & Hanski, I., 2004. Large-scale spatial dynamics of vole populations in Finland revealed by the breeding success of vole-eating avian predators. *Journal of Animal Ecology* 73: 167–178.
- 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.
- Suvanto, S., Lehtonen, A., Nevalainen, S., Lehtonen, I., Viiri, H., Strandström, M. & Peltoniemi, M. 2021. Mapping the probability of forest snow disturbances in Finland. *PLOS One* 16: e0254876.
- Teivainen, T. 1981. Geographic trends in voles in Finland in the years 1973–1980. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 21: 1–18.
- Tiihonen, P. 1970. Ruskean mäntypistiäisen (*N. Sertifer* Geoffr.) tuhojen vaikutuksesta männiköiden kasvuun Etelä-Pohjanmaalla, Pohjois-Satakunnassa ja Länsi-Uudellamaalla vuosina 1960–1967. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 71: 1–21.
- Thorsén, Å., Mattsson S. & Weslien J. 2001. Influence of stem diameter on the survival and growth of containerized Norway spruce seedlings attacked by pine weevils (*Hylobius* spp.). *Scandinavian Journal of Forest Research* 16: 54–66. doi.org/10.1080/028275-801300004415
- Tilastokeskus 2022. Elinkustannusindeksi 1951:10=100, <https://stat.fi/tilasto/khi#tables> (vuoden 2020 indeksi-arvo 1974)
- Toivonen, R. & Viiri, H. 2006. Adult large pine weevils *Hylobius abietis* feed on silver birch *Betula pendula* even in the presence of conifer seedlings *Agricultural and Forest Entomology* 8: 121–128. doi.org/10.1111/j.1461-9563.2006.00290.x
- Tukes. KemiDigi. Kemikaalituoterekisteri. <https://www.kemidigi.fi/kasvinsuojeluainerekisteri/haku> [Luettu 7.12.2022]
- Valinger, E., & Fridman, J. 1999. Models to assess the risk of snow and wind damage in pine, spruce, and birch forests in Sweden. *Environmental Management* 24: 209–217.
- Valinger, E. & Fridman, J., 2011. Factors affecting the probability of windthrow at stand level as a result of Gudrun winter storm in southern Sweden. *Forest Ecology and Management* 262: 398–403.

- Valtakunnan metsien 13. inventointi (VMI13). 2020. Maastotyön ohjeet 2020. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 163 s.
- Venäläinen, A., Lehtonen, I., Laapas, M., Ruosteenoja, K., Tikkanen, O.-P., Viiri, H., Ikonen, V.-P. & Peltola, H. 2020. Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: a literature review. *Global Change Biology* 26: 4178–4196.
- Viiri, H., Ahola, A., Ihalainen, A., Korhonen, K.T., Muinonen, E., Parikka, H. & Pitkänen, J. 2011. Kesän 2010 myrskytuhot ja niistä seuraava hyönteistuhoriski. *Metsätieteen aikakauskirja* 6559.
- Viiri H., Viitanen J., Mutanen A. & Leppänen J. 2019. Metsätuhot vaikuttavat Euroopan puumarkkinoihin – Suomessa vaikutukset toistaiseksi vähäisiä. *Metsätieteen aikakauskirja* 2019: 10200.
- Viitasaari, M. & Varama, M. 1987. Sahapistiäiset. 4, Havupistiäiset (Diprionidae). Julkaisuja Helsingin yliopisto, Maatalous- ja metsäeläintieteen laitos 10. 79 s.
- von Hofsten, H. & Weslien J. 2005. Temporal patterns of seedling mortality by pine weevils (*Hylobius abietis*) after prescribed burning in northern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20: 130–135
- Wallertz, K., Nordenhem, H. & Nordlander, G. 2014. Damage by the pine weevil *Hylobius abietis* to seedlings of two native and five introduced tree species in Sweden. *Silva Fennica* 48: 1188.
- Wallertz, K., Björklund, N., Hjelm, K., Petersson, M. & Sundblad, L.-G. 2018. Comparison of different site preparation techniques: quality of planting spots, seedlings growth and pine weevil feeding damage. *New Forests* 49: 705–722.
- 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.
- Wang, L., Zhang, J., Drobyshev, I., Clearly, M. & Rönnerberg, J. 2014. Incidence and impact of root infection by *Heterobasidion* spp., and the justification for preventative silvicultural measures on Scots pine trees: A case study in southern Sweden. *Forest Ecology and Management* 315: 153–159.
- Weslien, J. 1992. Monitoring *Ips typographus* (L.) populations and forecasting damage. *Journal of Applied Entomology* 114: 338–340.
- Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R., Hüttermann, A. (eds.) 1998. *Heterobasidion annosum*: biology, ecology, impact and control. Oxford University Press. 616 s. ISBN 978-085-199-275-4.
- Wulff, S., Liendelow, A., Lundin, L., Hansson, P., Axelsson, A.-L., Barklund, P., Wijk, S. & Stahl, G. 2012. Adapting forest health assessments to changing perspectives on threats – a case example from Sweden. *Environmental Monitoring Assessments* 184: 2453–2464.
- Yli-Kojola, H. & Nevalainen, S. 2006. Metsätuhojen esiintyminen Suomessa 1986–94. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2006, 97–180.

- Ylioja, T., Ahtikoski, A., Anttila, P., Haikarainen, S., Honkaniemi, J., Laitila, J., Melin, M., Piri, T. & Väätäinen, K. 2021. Metsätuholain arvioinnin jatkoselvitys : Kuorellisen puutavaran poiskuljetus ja männiköiden kantokäsittely turvemilla. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 23/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 77 s.
- Örlander, G. & Nilsson, U. 1999. Effect of reforestation methods on pine weevil (*Hylobius abietis*) damage and seedling survival. Scandinavian Journal of Forest Research 14: 341–354.
- Örlander, G., Nordlander, G., Wallertz, K. & Nordenhem, H. 2000. Feeding in the crowns of Scots pine trees by the pine weevil *Hylobius abietis*, Scandinavian Journal of Forest Research 15: 194–201.
- Zhao, T., Kandasamy, D., Krokene, P., Chen, J., Gershenzon, J & Hammerbacher, A. 2019. Fungal associates of the tree-killing bark beetle, *Ips typographus*, vary in virulence, ability to degrade conifer phenolics and influence bark beetle tunneling behavior. Fungal ecology 38: 71–79.

Liite

Vuosina 2010–2023 julkaistun vertaisarvioidun tuhohyönteiskirjallisuuden katsaus.

L1. Katsauksen päätulokset

L1.1. Kirjallisuushaun rajaaminen ja aiheen lähestymistapa

Selkeyttääksemme tämänhetkistä kansainvälistä tutkimuskenttää koskien keskeisimpiä puus-
totuhohyönteisiämme haimme tässä raportissa käsiteltyjä hyönteislajeja koskevat vertaisarvi-
oidut tutkimusjulkaisut vuodesta 2010 alkaen käyttämällä Web of Science -hakukonetta.
Teimme haut keväällä 2022, täydensimme aineistoa 15.2.2023 ja käytimme hakukriteereinä eri
lajien tieteellisiä nimiä. Näin menetellen löysimme kirjanpainajasta 766, ytimennävertäjistä
128, tukkimiehentäistä 198, mäntypistiäisistä 48 ja havununnasta 42 vertaisarvioitua katsaus-
tai tutkimusartikkelia. Hyödyllisiä artikkeleita olisi luultavasti löytynyt jonkin verran lisää väl-
jemmin hakutermein taikka muita hakukoneita (esim. Scopus, Google Scholar) tai eri instituu-
tioiden tietokantoja käyttämällä. Web of Science kuitenkin etsii julkaisuja kaikista keskeisim-
mistä metsäntutkimuksen julkaisusarjoista (kattavuus), tuottaa listoja vain vertaisarvioituista
julkaisuista (tiedon laatu) ja on suomalaisten metsätieteen ja ekologian tutkijoiden yleisimmin
käyttämä hakutietokanta (löydettävyyys), ja toisaalta käytettävissä ollut työaika oli rajallinen.
Uskomme silti näin tuottaneemme hyvän yleiskuvan viime vuosien tutkimuksesta.

Keräsimme kirjallisuutta viidestä näkökulmasta, jotka ovat tiedon soveltamiselle tärkeitä: tu-
holaislajin ja tuhokohteiden havaittavuus eri menetelmin, puulajierikoistuneisuus, maailmalla
jo käytössä olevat torjuntakeinot, ilmastonmuutoksen kannalta tärkeät seikat (mahdolliset le-
vittäytymis- ja runsastumisennusteet) ja tuholaislajin mukana kulkeutuvat muut lajit (tausta-
motiivina niiden kenties mahdollistama biologinen torjunta). Näillä rajauksilla tähän katsauk-
seen valikoitui 127 kirjanpainaja-, 61 ytimennävertäjä-, 79 tukkimiehentäi-, 75 mäntypistiäis-
ja 38 havununna-artikkelia.

Seuraavassa esittelemme lyhyesti tuoreimman tutkimuksen sellaiset havainnot, joilla voi olla
merkitystä puustotuhoihin varautumiselle Suomessa. On syytä korostaa, että yksityiskohtai-
sessa selostuksessa alempana (alaluvut 2–6) ei siinäkään pyritä aihepiiriin kautta aikain julkais-
tun kirjallisuuden yhteenvetoon, vaan nimenomaan kertomaan, millaista tutkimusta ja varsin-
kin millaisia havaintoja ja soveltamismahdollisuuksia kaikkein uusin tutkimustieto tarjoaa.

Seuraavassa esittelemme tiiviisti katsauksen päätulokset laji lajilta. Tarkempi selostus on kir-
jallisuusluettelon jälkeen seuraavassa Liitteessä.

1.2. Päätulosten yhteenveto

Yleisiä seikkoja:

- Vaikka keskeisimmät tämänhetkiset tuhonaiheuttajat näyttävät hyötyvän ilmaston lämpenemisestä, kaikki tuhonaiheuttajat eivät luultavasti siitä hyödy.
- Useiden lajien kyky sopeutua muuttuviin olosuhteisiin ja isäntäpuihin on suuri. Pitkälle erikoistuneet lajit sitä vastoin voivat kohdata vaikeuksia esimerkiksi ilmaston tai maankäytön muuttuessa.
- Levittäytymisen tai paikallisten tuhojen ennustamista vaikeuttavat esimerkiksi kannan- tiheydestä johtuvat muutokset yksilöiden kilpailuasemassa ja lisääntymisessä, sekä le- vittäytyjien kohtaamat aivan uudet abioottiset ja bioottiset tekijät.
- Biologisen ja kemiallisen torjunnan kehitystyössä on tärkeää tuhonaiheuttajien rinnalla tutkia myös laajasti vaikutukset muuhun eliöstöön sekä ympäristöön (maaperä, vesis- töt, pohjavesi, hengitysilma).
- Tutkimusta pitäisi suunnata (i) sääolojen, kasvupaikkavaihtelun ja seuralaislajien vuoro- vaikutuksiin tuholaislajin dynamiikan selittäjänä, (ii) tuholajin kannanvaihtelun eri vai- heille tyypilliseen seuralaislajistoon, ja (iii) monen lajin ilmeiseen valikoivuuteen suh- teessa isäntäpuulajin tilajakaumaan.

Kirjanpainaja:

- Kirjanpainajatutkimus on viime vuosina keskittynyt tuhokohteiden varhaiseen tunnistami- seen ja ennustemalleihin sekä toisaalta torjuntakeinoihin.
- Kirjanpainajan laaja-alaisten massaesiintymien juurisyy on yleensä tuulenkaato tai pit- kään jatkuva kuivuus. Laji hyötyy myös lämpötilojen noususta.
- Kirjanpainajan välttäneet puut ovat usein ryvästyneet, mikä kertoo siitä, etteivät kirjan- painajat iskeydy puihin satunnaisesti.
- Kuivina kesinä kirjanpainaja saattaa iskeytyä tavanomaista pienempiin puihin.
- Kirjanpainajariskiä näyttää vähentävän enemmän lehti- kuin mäntysekapuustoisuus.
- Kirjanpainajan asuttamat yksittäiset puut voidaan ulkoisten merkkien (puupuru ym.) asemesta tunnistaa infrapuna-aallonpituus- tai lämpökameralla noin 80 % tarkkuu- della, tai koulutetun koiran avulla.
- Kaukokartoitus- ja laserkeilausmenetelmillä voidaan erottaa kirjanpainajan asuttamat metsiköt terveistä jopa 70–80 % tarkkuudella, jos kohteista on havaintoaineisto ennen tuhoa. Luotettavuutta voidaan parantaa puusto-, kasvupaikka- ja topografiatiedoilla.
- Vaikka kirjanpainajaa on todettu useilta puulajeilta, kuten männyltä, laji on vahvasti juuri kuusen laji. Satunnaishavainnot muilta puulajeilta saattavat kuitenkin "hutien" si- jaan heijastaa isäntäpuulajijousta.
- Useimmat ilmastomallit ennakoivat kirjanpainajalle sopivien olosuhteiden, kuten kuus- ten kuivuusstressin, yleistyvän lähivuosikymmeninä.
- Torjuntahakkuut tehoavat massaesiintymään parhaiten sen välittömässä läheisyydessä. Biologiselle torjunnalle (mm. muurahaiskuoriaiset) ja muulle monimuotoisuudelle niistä – kuten kuolleen puun muustakin poistamisesta – on haittaa.
- Syöttipuilla voidaan vähentää paikallista kirjanpainajakantaa; sitä vastoin karkote- ja houkutuskemikaalien teho on vähäisempi.
- Feromonipyynti on hyvä kirjanpainajakannan seurantakeino, mutta samalla se jossain määrin vähentää kirjanpainajan luontaisia vihollisia, kuten muurahaiskuoriaisia.

- Kirjanpainajalla on seuralaisinaan runsaasti muita selkärangattomia, sieniä, bakteereita, sukkulamatoja ja viruksia. Näiden merkitys kirjanpainajakannan säätelijänä tunnetaan huonosti. Osa kuitenkin auttaa kirjanpainajakannan kasvua, osa taas kykenee tappaamaan merkittävän osan yksilöistä. Juurikäävällä ja kirjanpainajalla ei näytä olevan kovin vahvaa yhteyttä toisiinsa.
- Kirjanpainaja tuottaa osaltaan monen uhanalaisen metsälajin tarvitsemaa lahoppua ja käynnistää paikallisesti metsän sukkessiota, mutta äkillisesti muuttuvat valaistus-, tuuli- ja kosteusolot vaikuttavat myös mm. pohja- ja kenttäkerroskasvillisuuteen.
- Maahamme 1950-luvun tienoilla levittäytynyt kiiltokirjanpainaja (*Ips amitinus*) sekä pikkukirjanpainaja (*Ips duplicatus*) elävät kumpikin myös männyllä, ja ovat tällä hetkellä taloudellisesti vähämerkityksisiä.

Ytimennävertäjät:

- Ytimennävertäjien aiheuttamat haitat ovat lähinnä kasvutappioita, joita on etenkin puutavaran varastopaikkojen lähituntumassa.
- Ytimennävertäjätuhokohteita on jossakin määrin mahdollista tunnistaa samoin kuvausmenetelmin kuin kirjanpainajatuhojakin.
- Ytimennävertäjät kykenevät asuttamaan useita mäntylajeja ja satunnaisesti myös kuusia. Pystynävertäjä on puutavaran mukana kulkeutunut mm. Pohjois-Amerikkaan, missä se on voimakkaasti leviävä vieraslaji.
- Ilmastonmuutos voi hyödyttää ytimennävertäjiä (yleistyvät tuulenkaadot, pitkäkestoinen kuivuus); iskeymät yleistyvät kohteilla noin vuoden viipeellä.
- Lehtipuusekoitus vähentää ytimennävertäjätuhoja.
- Tuhoja voidaan vähentää myös syöttipuun ja feromonein. Myös jotkin kasvipohjaiset yhdisteet vähentävät ytimennävertäjien syöntiä käsitellyillä puilla.
- Ytimennävertäjillä on laaja seuralaislajijoukko, joista osa on niille hyödyllisiä, osa haitallisia.
- Ytimennävertäjät hyötyvät versosurmaepidemioista. Toisaalta Espanjassa pystynävertäjän iskeymät altistivat montereynmäntyjä etelänversosurmalle. Suomessa toistaiseksi tapaamaton, EU:n karanteenituhoojalistalla oleva pihkakoro asuttanee puita kaarna-kuoriaisten, kuten ytimennävertäjien, sisäänmeno- ja ulostuloreikien kautta.

Tukkimiehentäi:

- Tukkimiehentäitutkimus näyttää viime vuosina keskittyneen voimakkaasti torjunta- ja taimien suojauskeinoihin.
- Tukkimiehentäille kelpaavat kuusen ja männyn taimet, mutta myös monen muun puusuvun taimet. Kelpaavuuteen vaikuttavat taimien ikä, kuivuus- tai muu stressitekijä, geneettinen alkuperä ja näiden vuorovaikutukset.
- Ilmaston lämpeneminen oletettavasti parantaa tukkimiehentäin talvehtimisen onnistumista, lisääntymistä ja yksilöiden kasvua. Yleistyvät kuivuusjaksot luultavasti heikentävät taimia ja altistavat niitä tukkimiehentäille.
- Kantojen ja hakkuutähteen korjuu sekä koneellinen maanmuokkaus vähentävät tukkimiehentäin taimiin kohdistamaa syöntiä.
- Taimikoiden lehtipuusekoitus sekä isompikokoiset istutustaimet vähentävät tukkimiehentäin taimisyyntiä.
- Erilaiset vaha-, hiekka- ja liimapinnoitteet suojaavat taimia tehokkaasti.

- Eräät kasvien tuottamat ja muut orgaaniset yhdisteet, kuten metyylijasmonaatti, vähentävät käsitelyihin taimiin kohdistuvaa syöntiä.
- Eräiden sukkulamatojen liuokset voivat kantokäsittelynä vähentää tukkimiehentäitä jopa yli 90 %. Myös monien sienilajien torjuntatehoa on tutkittu paljon.

Mäntypistiäiset:

- Suomen 18 havupistiäislajista taloudellisesti merkittävimpiä ovat rusko- ja pilkkumäntypistiäinen.
- Laserkeilauksella voidaan päästä kohtalaiseen tarkkuuteen mäntypistiäistuhokohteiden ja yksittäisten tuhopuidenkin tunnistamisessa.
- Kasvun heikkeneminen neulasten syönnin seurauksena voi olla huomattava; Ranskassa havaittiin pilkkumäntypistiäisen aiheuttama 27–92 % alenema paksuuskasvussa. Suomalaisarviot ovat olleet maltillisempia, esimerkiksi 4–40 %.
- Pilkku- ja ruskomäntypistiäinen hyötynee kuivista ja lämpimistä kesistä sekä lauvoista talvista.
- Maailmalla mäntypistiäisten torjunnassa on käytetty mm. asetamipridipohjaista Mospi-lania ja pyrethrumia.
- Eräistä mäntypistiäisten elimistöstä eristetyistä bakteereista on mahdollista kehittää biologisen torjunnan työkaluja.

Havununna:

- Havununna on levittäytynyt maassamme viime vuosikymmeninä nopeasti pohjoisemmaksi.
- Havununnan ravintokasvikirjo sisältää mm. pääpuulajimme ja esimerkiksi mustikan.
- Puuston yksipuolisuus, yhden tai kahden puulajin voimakas dominointi ja puiden nuoruus altistavat havununnatuholle.
- Havununnatuhon etenemistä on mahdollista seurata satelliittikuva- ja muilla kaukokartoitusmenetelmillä. Infrapuna- ja lämpöantureilla on mahdollista karkealla tasolla havainnoida alkavaa defoliaatiota.
- Vuotuinen keskilämpötila vaikuttaa sademäärää enemmän tuhotodennäköisyyteen. Ilmaston lämpeneminen näyttää jo nyt hyödyttäneen havununnaa, mutta tuhot ovat Suomessa edelleen harvinaisia.
- Monet sieni-, bakteeri- ja viruslajit näyttävät ainakin laboratoriokokeissa tappavan havununnan toukkia; Venäjältä on myös viitteitä siitä, että havununnan massaesiintymän loppuvaiheessa eräät virukset yleistyvät merkittävästi.
- Havununnan (ja monen muun puita heikentävän tai tappavan lajin) massaesiintymät muuttavat esimerkiksi kohteen maaperän sienilajistoa ja voivat kasvattaa hiilidioksidipäästöjä.
- Havununnan ohella kannattaa huomioida myös lehtinunna, jolla on potentiaalia laajamittaistenkin puustokuolemien aiheuttamiseen. Sen ravintokasvikirjo on huomattavan laaja; maailmalta niitä tunnetaan yli 500. Lajia on tutkittu huomattavan runsaasti Pohjois-Amerikassa, missä se on 1800-luvun tuontilaji ja aiheuttanut laajoja puuston joukkokuolemia.

L2. Kirjanpainaja

L2.1. Kirjanpainaaja koskeva tutkimustieto

Kirjanpainaajan isäntäpuita, elinkiertoa, kannanhallintaa ja luontaisia vihollisia ovat kattavasti käsitelleet Wermelinger (2004) sekä hiljattain Hlásny ym. (2019) ja Schebeck ym. (2023) katsauksissaan. Pääosa nykymuotoisista kirjanpainaajan hallintasuosituksista Suomessa perustuu kyseisiin töihin ja kotimaisten tuhotutkijoiden kokemuksiin. Biedermann'in ym. (2019) ja Holzwarth'in ym. (2021) katsaukset kirjanpainaajan populaatiodynamiikkaan vaikuttavista tekijöistä vahvistivat yleiskuvaa esimerkiksi sää- ja kasvupaikkaolojen sekä puuston iän keskeisestä merkityksestä massaesiintymien säätelijöinä ja toisaalta loisten ja saalistajien merkitystä hiipuvien esiintymien vaiheissa.

Vaikka kirjanpainaajalle altistavat tekijät yleisellä taholla tunnetaan melko hyvin, alueellisesti saatetaan tehdä nykykäsityksiä täsmentäviä ja siten tietotasoa eteenpäin vieviä havaintoja:

Keski-Euroopassa Korolyova ym. (2022) havaitsivat, että kirjanpainaajan massaesiintymät välttäneet kuuset olivat ryhmittäin, mikä kertoo, että välttäminen ei ollut satunnaista. Kuusten selviytyvyyteen vaikuttivat odotetun negatiivisesti isompi koko sekä lisäksi puiden välinen kilpailu ilmeisen rajoittavista resursseista ja pienempikokoinen latvus, mikä kertonee heikommasta fotosynteesiaktiivisuudesta ja pienemmästä hiilivarastosta.

Keski-Euroopassa Nardi ym. (2023) tutkivat kirjanpainaajaesiintymien riippuvuutta topografiasta ja havaitsivat, että massaesiintymiä oli eniten alavilla mailla melko märkäpohjaisissa metsissä, mutta jyrkenteillä ja kuivassa maaperässä massaesiintymiä oli vähän. Lisäksi isäntäpuiden tiheys kasvatti mutta puulajisekoitus vähensi massaesiintymän todennäköisyyttä. Ensimmäinen, yllättävältä kuulostava havainto voi selittyä sillä, että kuivan ympäristön puut ovat alavien maiden puita paremmin sopeutuneet pitkään jatkuvaan kuivuuteen.

Ruotsissa Müller ym. (2022) tutkivat koneoppimisella, mitkä tekijät vaikuttavat kirjanpainaajariskiin kuivana ja tavanomaisena kesänä. Mahdollisina selittävinä tekijöinä olivat puustotunnukset, topografia, maaperän tyyppi ja kosteus sekä etäisyys avohakkuuseen tai aiempaan kirjanpainaajan massaesiintymään. Tutkijat havaitsivat, että riski oli korkeampi havuseka- kuin havu-lehtisekametsissä sekä yleisesti puustoltaan järeämissä metsissä. Kuivana kesänä kirjanpainaajan massaesiintymiä löytyi kuitenkin lähes yhtä paljon myös pienempipuustoisista metsistä; kuivuus voi siis altistaa nuorempiakin metsiä kirjanpainaajalle. Myös maaperän kosteus ja metsikön sijainti suhteessa selittäviin muuttujiin olivat tärkeitä etenkin kuivana kesänä.

Tsekissä Potterf ym. (2022) vertailivat 2000–2017 kuvatulla Landsat-aikasarjalla 122 suojelumetsäkohdetta, niitä 0,5–2 km etäisyydellä ympäröiviä talousmetsiä sekä muualla sijaitsevia talousmetsiä. Yleishavaintoina olivat ajanjakson kasvavat häiriöt, etenkin kirjanpainaajan aiheuttamat, ja suurempi häiriöiden määrän ja laajuuden kasvu molemmissa talousmetsätyypeissä kuin suojelualueilla (vuotuinen häiriötaso 2,2 vs. 1,8 % metsäalasta). Koko jakson kumulatiivinen häiriö oli suojelumetsissä noin 10 % ja talousmetsissä 31 %. Näyttääkin siltä, että suojelumetsien häiriönsieto oli kyseisellä alueella parempi, mikä voi selittyä esimerkiksi vertailtujen metsien eroilla puulaji- ja ikärakenteissa.

Käsitys siitä, että terävien avohakkuun ja varttuneen metsän reunojen kuuset eivät kaikissa tilanteissa ole erityisen herkkiä kirjanpainaajaesiintymille, on saanut tuoretta vahvistusta

(Stribirska ym. 2022, Ozcelik ym. 2022). Herkkyyteen vaikuttavat reunan pienilmasto (tuulisuus, avautumissuunta, hakkuutähteet ym.) sekä paikallinen kirjanpainajakannan tiheys ja hakkuun tai tuulenkaadon ajankohta.

L2.2. Kirjanpainajatuhojen tunnistamisen perinteiset ja uudet menetelmät

L2.2.1. Metsikkö- ja metsätilatason menetelmät

Kirjanpainajatuho on perinteisesti tunnistettu esimerkiksi järeiden kuusten tyvikaarnan pienistä rei'istä ja niistä karisseesta ruskeasta puupurusta sekä – puiden jo kuoltua – irronneen kaarnan paljastamista lajityypillisistä syömäjäljistä nilassa (esim. Wermelinger 2004). Kertäkäynti ei paljasta tuhon kehittymistä eikä välttämättä laajuuttakaan. Laajojen alueiden seurantaan maastokäynnit olisivat varsin kalliita ja työläitä toteuttaa.

Kirjanpainajan heikentämät puut voidaan periaatteessa lämpökameran avulla erottaa terveistä niiden korkeamman lämpötilan avulla, mikä onnistuu luotettavimmin kirkkaalla ja aurinkoisella säällä (Majdak ym. 2021). Toisaalta hyperspektrikameralla voidaan erottaa pieniä värieroja esimerkiksi puiden elävissä latvuksissa 500–900 nm aallonpituusalueella; kirjanpainajan heikentämiä puita on tällä tavoin tunnistettu 79 % onnistumistarkkuudella (Näsi ym. 2015, 2018).

Keinonenät saattavat lähitulevaisuudessa tarjota uusia mahdollisuuksia myös kirjanpainajan seurantaan, mutta ennen tekniikan valmistumista yksi vaihtoehto on kouluttaa koira tunnistamaan kaarnakuoriaisen iskemät puut. Ruotsissa koulutettiin koira synteettisten feromonien avulla tunnistamaan kirjanpainajat (Johansson ym. 2019). Koira onnistui tunnistamaan enintään sadan metrin päässä olevat puut jo siinä vaiheessa, kun kirjanpainajia oli saapunut rungolle mutta ne eivät vielä olleet ehtineet lisääntymään, ja tästä eteenpäin useiden viikkojen ajan. Keino mahdollistaa tuhopuiden ennakoivan poiston esimerkiksi kaupunkimetsissä, missä laajat poistohakkuut eivät välttämättä ole mahdollisia tai ne herättäisivät asukkaissa vastustusta.

Massaesiintymäkesiä voidaan jossakin määrin ennakoida edeltävän kesän ja kuluvan kevään säätilan perusteella, mutta tulevan kesän sademäärän ja lämpötilan ennustaminen on tarkoitukseen liian epävarmaa. Kasvien kevätfenologia voi tarjota tukea ennustemalleille. Esimerkiksi Saksassa puistolumikellon kukkimisen alkamis- ja hevoskastanjan silmujen puhkeamisajankohdat ennustivat kirjanpainajan loppukevään lennon suuruutta paremmin kuin lämpösumma (Zang ym. 2015).

L2.2.2. Kaukokartoitusmenetelmät laajemmille alueille

Kirjanpainajatuhokohteet voidaan kaukokartoitusmenetelmillä erottaa terveistä metsistä 70–80 % tarkkuudella, jos tuhokohteesta on samanlainen havaintoaineisto ennen tuhoa ja tuhopuita on ehtinyt kertyä verraten paljon. Yksinkertainen puustorakenne helpottaa tuhon havaittavuutta. Havaintojen luotettavuutta voidaan edelleen parantaa puusto-, kasvupaikka- ja topografiatiedoilla. Valon eri aallonpituuksia ilma- tai satelliittikuvista tarkastelemalla saadaan myös tietoa puiden tai puuryhmien kuntoeroista (Hellwig ym. 2021). Esimerkiksi Alaskassa USA:ssa kyettiin tällä tavoin melko luotettavasti erottamaan ulkoisesti vielä vihreät mutta kaarnakuoriaisten jo heikentämät havupuukeskittymät terveistä (Cessna ym. 2021).

Kaukokartoitukseen tarkoitettuja satelliitteja on lukuisia. Tavallisimmin esimerkiksi metsäntutkimuksessa käytetään yhdysvaltalaisen Landsat- tai eurooppalaisten Sentinel-satelliittien tuottamia kuva-aineistoja. Landsat-satelliitteja (nrot 5, 7 ja 8) on kiertänyt Maata jo vuodesta 1972, ja niitä hallinnoi Yhdysvaltain geologian tutkimuskeskus (United States Geological Survey). Sentinel-satelliitteja (esim. Sentinel-1A/B, Sentinel-2A/B, Sentinel-3A/B, Sentinel-5P, Sentinel-6 Michael Freilich) on ollut käytössä vuodesta 2014, ja niiden määrää on tarkoitus edelleen kasvattaa vuoteen 2030 asti. Sentinel-satelliitit ovat osa EU:n Copernicus-ohjelmaa, joka taas on EU:n, sen jäsenvaltioiden ja Euroopan avaruusjärjestön (ESA) ympäristötiedon palveluverkosto. Verkoston tavoitteita ovat mm. EU:n ympäristötiedon kerääminen ja erilaiset seurannat EU:n rajojen molemmin puolin. Kolmantena tahona julkaisuaineistoissa esiintyy alkujaan saksalainen, sittemmin kanadalaisomistuksessa ollut ja nykyään hylätty RapidEye, jolla oli vuosina 2009–2020 viisi kaukokartoitussatelliittia. Landsat-, Sentinel- ja RapidEye-satelliitit eroavat toisistaan mm. aallonpituuskirjon, erotuskyvyn ja kaksi- tai kolmiulotteisuuden suhteen; uudemmat ovat näillä mittareilla yleensä parempia, mutta pitkäaikaisaineistoja on paremmin saatavissa vanhemmille.

Tällä hetkellä puustotuhon tunnistaminen satelliittikuvista on menestykseltään vaihteleva ja riippuu mm. kuvankäytön tavoitteista, tuhonaiheuttajasta, puustorakenteista, kuvan erottelukyvystä sekä tarkasteltavasta valon aallonpituusalueesta. Esimerkiksi Landsat-kuvista hyönteistuhosta vain 15–30 % tunnistettiin oikein Itävallassa (Seibold ym. 2021). Kirjanpainajatuhoon tunnistus ei myöskään ole luotettavaa sellaisissa metsissä, joissa kirjanpainajaa on lähinnä yksittäisissä puissa tai muutaman puun ryhmissä (Fernandez-Carrillo ym. 2020). Sentinel-satelliittikuvista taas voitiin infrapuna-aallonpituuksiin perustuen luokitella oikein 78 % kirjanpainajatuho- ja terveistä metsiköistä jopa tilanteessa, jossa tuho oli vielä alkuvaiheessa ja neulaset vihreitä (Barta ym. 2021). Landsat- ja Sentinel-aineistojen mahdollistamalla hyperspektrikartoituksella voidaan melko tarkasti havaita esimerkiksi latvuston lehtivihreä- ja vesipitoisuuksia, jotka alenevat kirjanpainajan (tai muun puun kuntoa heikentävän tekijän) seurauksena (Abdullah ym. 2019a, 2019b, Hoeppe ym. 2020, Huo ym. 2021). Näitä muutoksia kyettiin melko luotettavasti erottamaan myös RapidEye-satelliittikuvista (Elatawneth ym. 2014, Balazy ym. 2019, Ali ym. 2021). Juuri spektri-, aika- ja topografiamuuttujat parantavat kirjanpainajatuho havaitsemistodennäköisyyttä merkittävästi (Oeser ym. 2017, Kloucek ym. 2019, Siych ym. 2019). Lisäksi muut kohdetta luonnehtivat piirteet, kuten kuiva-aineksen määrä tai typpipitoisuus, voivat parantaa tätä todennäköisyyttä (Ali ym. 2021).

Suurten alueiden yleistilanteen seuraamiseen satelliittikuvat kelpaavat paikallistasoa paremmin, ja tuottavat kiinnostavaa tietoa kirjanpainajan massaesiintymien dynamiikasta.

Esimerkiksi Barta ym. (2022a) käyttivät Landsat-lämpökuva-aineistoa (thermal imagery) ajanjaksolta 1985–2015 laajalla alueella Tsekin ja Saksan rajan tuntumassa selvittääkseen kirjainpainajatuhojen leviämistä ja niiden jälkeistä metsien palautumista. Lämpöpoikkeamat kuvasivat hyvin tuhojen etenemistä ja metsien toipumista. Keskimäärin tuho kohteella jatkui lähes 8,5 vuotta (huippu noin viisi vuotta tuhon alkamisesta); 80 % palautuminen vei lähes 18 vuotta. Tuhot olivat tavallisia vain tiettyinä vuosina, ja ne usein keskittyivät voimakkaasti topografiasta johtuen.

Laserkeilaus tehdään optisella tutkalla (LIDAR, Light Detection and Ranging), joka operoi näkyvän valon, lähi-infran ja/tai ultraviolettivalon taajuuksilla. Keskeinen ero tavanomaiseen tutkaan on, että LIDAR käyttää lyhyempiä aallonpituuksia. Menetelmä tuottaa kolmiulotteista pisteaineistoa, joka perustuu kohteen ja kaukokartoituslaitteen välisen etäisyyden sekä laitteen lähettämän laserpulssin (tiheä säderasteri) kulkuajan mittauksiin. Keilaus voidaan tehdä maanpinnasta käsin tai lentolaitteilla, kuten lentokone tai drooni. Menetelmän tarkkuus riippuu useista tekijöistä, kuten mittausetäisyys, laserkeilan leviäminen, mittalaitteen etenemisnopeus ja paikannustarkkuus, keilaustiheys, keilauslaitteiston tekniset ominaisuudet sekä keilattavan kohteen ominaisuudet. Keilauslaitteeseen palaavasta kaiusta voidaan mitata heijastusintensiteetti, johon siihenkin vaikuttavat monet tekijät, kuten keilattavan kohteen muoto, väri, sijainti tai pintarakenne. Keilaus tuottaa tehokkaasti ympäristöstä korkeusmalleja, mutta erilaisten epäjatkuvuuksien havaitsemiseen tai kerroksellisten rakenteiden mittaukseen menetelmä soveltuu huonommin. Metsien perusinventointeihin laserkeilaus kuitenkin soveltuu melko hyvin.

Laserkeilausta on jo kokeiltu puustotuhojen havainnoinnissa; esimerkiksi heijastusintensiteetin ja latvuksien defoliaation, neulasten värimuutosten ja runkojen pihkavuotojen välillä on yhteys (Junttila ym. 2019). Zakrzewska ja Kopec (2022) tutkivat drooniin kiinnitetyn infrapuna-aallonpituuskameran avulla, onko terveiden, heikentyneiden ja kuolleiden kuusten erottaminen toisistaan mahdollista. Tällä "latvuslämpötilamenetelmällä" tutkijat tunnistivat noin 60 % puista oikein, ongelmien kasautuessa heikentyneiden puiden erottamiseen terveistä ja kuolleista. Myös kuvausajankohta voi olla merkittävä havaittavuuden määrittäjä: Junttila ym. (2022) tutkivat droonikameran multispektrikuva-aineistoilla kirjainpainajakohteiden terveiden, heikentyneiden ja kuolleiden puiden erottamista. Luokittelun tarkkuus oli noin 78–85 %, ollen tarkempi loppu- kuin alkukesästä. Yhden kohteen koneoppimisen (Random Forest) tuottamien luokittelijoiden käyttö muilla kohteilla tuotti tarkkuudeksi noin 59–85 %. Näin ollen tällainen aineisto on hyödyllinen esimerkiksi meneillään olevan massaesiintymän seurannassa.

Vaikka kaukokartoitusaineistoon perustuva tuhokohteiden riittävän varma osoittaminen tai tuhonaiheuttajan tunnistaminen eivät vielä ole käden ulottuvilla, voidaan aineistojen avulla analysoida metsien rakennetta aluetasolla ja toisaalta tuottaa laadukasta tietoa metsädynamiikasta ja joistakin biologisista ilmiöistä, kuten puustotuhon kesto tai leviäminen (esim. Senf ym. 2017, Migas-Mazur ym. 2021). Rohkaisevasti Abdollahnejad ym. (2021) vertailivat WorldView-2-, Pleiades 1B- ja SPOT-6-satelliittikuvia droonikuvamateriaaliin Tsekissä. Kuusikoiden terveydentila näkyi voimakkaasti spektriheijastuksissa siten, että kuva-aineiston spektrierotuskyvystä riippuen on periaatteessa jo mahdollista tunnistaa esimerkiksi kuivuuden heikentämä kuusikko jopa kaksi vuotta ennen kirjainpainajien iskeytymistä. Barta ym. (2022b) vertailivat maalissyyskuun ajan maastokäyntejä droonikamerakuvauksiin kirjainpainajaiskeymien havaitsemisessa. Kamerassa oli hyperspektrisensori (CASI-1500, aallonpituusalue 400–1500 nm ja erotuskyky 0,5 m) ja seurannassa oli 75 iskeymä- ja 75 tervettä puuta. Tuloksien mukaan iskeytymisen alku havaittiin maastokäynneillä noin 23 päivää ennen kuin se havaittiin

kameralla; molemmilla menetelmillä iskeytymisen alku kuitenkin havaittiin kuuden viikon sisällä. Kun aineistoon yhdistetään muuta tietoa esimerkiksi pinnanmuodoista, metsävaroista, säätilasta tai hakkuutiedoista, voidaan jo laatia melko luotettavia ennustemalleja esimerkiksi kirjanpajan tuhokohteiden luultavimmista sijainneista (De Groot ja Ogris 2019, Gdulova ym. 2021).

L2.3. Kirjanpajan kelpuuttamat puulajit sekä puiden laadun merkitys

Kirjanpajaja on melko järeiden (rinnankorkeusläpimitaltaan yli 15-senttisten) kuusten laji, joka hyötyy kuivista ja kuumista kesistä, järeiden kuusten keskittymisestä sekä kuivumiselle altistavista maaston ominaisuuksista (Wermelinger 2004, Öhrn ym. 2014, Kautz ym. 2017, Netherer ym. 2019, Fora ym. 2021, Kamiska ym. 2021). Tätä yleiskuvaa vahvistaa myös Keski- ja Itä-Euroopan kuusikoiden dendrokronologinen tarkastelu, jossa päästiin kiinni myrsky- ja kaarnakuoriaishistoriaan 200 vuoden perspektiivissä (Cada ym. 2020). Metsän aiempi kirjanpajahistoria määrittelee myös nykyhetken riskiä (Janda ym. 2017), samoin kuin korjaamatta jääneet tuulituhot (Hrosso ym. 2021) ja toisaalta torjunta- ja muiden hakkuiden aiheuttamat vauriot jäävälle puustolle (Modlinger ja Novotny 2015). Myös Netherer ym. (2022) totesivat laboratoriokokeessa kuivuuden ja runkovaurioiden altistavan voimakkaasti kirjanpajan iskeymille.

Kirjanpajaja lisääntyy monta kertaa tehokkaammin meikäläisellä kuusella kuin esimerkiksi männyllä, joista jälkimmäiset vaikuttavat satunnaisilta kirjanpajajayksilöiden tekemiltä ”virhearvioinneilta”, joskin voivat toisaalta heijastaa yksilöeroja ja sitä kautta lajin ekologista joustavuutta (Schroeder ja Cocos 2018). Kirjanpajan on laboratoriossa ja kenttäoloissa todettu iskevän useisiin havupuulajeihin suvuissa *Abies*, *Larix*, *Pinus* ja *Pseudotsuga* (Jeger ym. 2017). Lisäksi meikäläisen kuusen ohella muut *Picea*-suvun puulajit voivat joutua kirjanpajan iskeymiksi. Esimerkiksi Turkissa kirjanpajaja iskee isokokoisiin idänkuusiin (*Picea orientalis*) erityisesti yhden puulajin metsiköissä (Akinci ja Aksu 2018). Kirjanpajaja on onnistunut lisääntymään myös mm. koristepuiksi tuoduissa sitkankuusessa (*Picea sitchensis*) ja pohjoisamerikkalaisissa musta- ja valkokuusessa (*Picea mariana* ja *P. glauca*) sekä joissakin *Picea*-hybrideissä (Jeger ym. 2017, Flø ym. 2018).

L2.4. Ilmastotekijät suhteessa kirjanpajajien massaesiintymiin ja levittäytymiseen

Viimeaikaiset ilmastomuutoksen mallinnukset koskien luonnonhäiriöitä (tässä kontekstissa erityisesti myrskyt, lämpötilapiikit ja kuivuus) ja puulajien menestymistä viittaavat siihen, että sään ääriolot yleistyvät ja eri puulajit tulevat menestymään lajikohtaisin tavoin. Esimerkiksi kuusi tulee luultavasti yhä enemmän kärsimään myrskyistä ja kuivuusjaksoista (esim. Lindner ym. 2010, Lasch-Born ym. 2015, Reyer ym. 2017, Venäläinen ym. 2020). Kuivuus altistaa kuuset merkittävässä määrin kirjanpajajalle (Hellwig ym. 2021).

Arkangelin oblastissa Venäjällä (keskisen Suomen tasalla) on meneillään ainakin kaksi vuosikymmentä kestänyt ajanjakso, jolloin alueella on havaittu poikkeuksellisen laajoja

kirjanpainajatuhoja (Trubin ym. 2022). Tuhojen esiintyvyyttä alueella selittää erityisen hyvin vuotuisen keskilämpötilan ja sademäärän yhdistelmä; nämä tekijät nimenomaan kesäkuiden osalta näyttäytyivät analyysissä erityisen merkittävinä.

Laajat puustotuhot voivat olla ongelmallisia metsäteollisuudelle, sillä ne voivat yhtäkkiesti tuottaa käsittelykapasiteetin ylittäviä määriä jalostettavaa puutavaraa; toisaalta metsänomistajan tuoreista tuulenkaatokuusista saama tuotto on 19–33 % alhaisempi kuin terveestä pystyvuusta saatava (Kärhä ym. 2018). Esimerkki viime aikojen nopeista laajamittaisista vaikutuksista kuusimetsiin löytyy Ruotsista. Juurisyy vuoden 2018 sikäläisille mittaville kuusikuolemille oli kuivuus ja toissijaisena myrskyt, joiden perään kirjanpainajan arvioitiin pelkästään kyseisenä vuonna tappaneen nelisen miljoonaa kuutiometriä kuusia (Öhrn ym. 2021). Kirjanpainajatuhot jatkuivat Ruotsissa voimakkaina seuraavinakin kesinä. Kakkossukupolvi voi periaatteessa voimistaa tuhovaikutusta. Fritscher ja Schroeder (2022) tutkivat kirjanpainajan kakkossukupolven ilmaantumisasajankohtia Ruotsissa ja havaitsivat keskimääräisen ajankohdan olevan etelässä 744 ja pohjoisessa 668 astepäivää (pohjana 5 celsius-astetta). Kakkossukupolvi havaittiin myös pohjoisessa joka vuosi, mutta yksilöiden osuus kokonaiskannasta oli hyvin pieni. Kirjanpainajan genomitutkimus Ruotsissa 56.–63. leveyspiireillä (Skånesta Umeån tasalle; 19 paikallispopulaatiota, 152 yksilöä) kertoo hyvin vähäisestä geneettisestä eriytymisestä, mikä luultavasti kertoo paitsi paikallisten sopeutumien vähäisyydestä mutta myös paikallispopulaatioiden huomattavasta ekologisesta kytkeytyneisyydestä (Ellerstrand ym. 2022).

Paikalliset säatekijät määrittävät kirjanpainajan massaesiintymien todennäköisyyttä. Lämpimät ja kuivat kesät (touko-syyskuut) lisäävät heikentyneiden kuusten osuutta, vauhdittavat kirjanpainajan kannankasvua ja edesauttavat yksilöiden levittäytymistä (Wermelinger 2004, katso myös Bryk ym. 2021). Kuivuus on hankalasti tutkittava muuttuja puustokuolemien kannalta, sillä useimmiten se vain heikentää kuusia kuitenkin altistaen ne muille ongelmille, kuten kirjanpainajalle. On myös vahvoja viitteitä siitä, että jotkut kuusten sienet ja kirjanpainajayksilöt ovat keskenään monimutkaisessa vuorovaikutuksessa (Netherer ym. 2021). Netherer'in ym. katsauksessa todettiin korkeiden lämpötilojen ja kuivuuden heikentävän kuusten puolustusyhdistetuotantoa, mikä sinällään altistaa kuuset kirjanpainajalle. Kuoriaisten mukanaan tuomat sinistäjä sienet saattavat edelleen heikentää puiden puolustusyhdistetuotantoa, tuottaa kirjanpainajia houkuttelevia nk. semiokemikaaleja ja mahdollisesti tarjota kuoriaisille myös ravinteita.

Yleisperiaate ennustemalleissa on, että vähäisempi selittävien muuttujien määrä parantaa mallin yleistettävyyttä erilaisiin tilanteisiin, kun taas suurempi määrä voi parantaa mallin sopivuutta tiettyyn tarkasteltavaan tilanteeseen. Hyvät selittävät muuttujat ovat sellaisia, joiden sisällyttämiselle on biologiset perusteet ja jotka sopivat lajin tunnettuun biologiaan. Kirjanpainajalle soveltuvien metsiköiden laadulla, koolla ja sijainnilla toisiinsa nähden on suuri merkitys esimerkiksi mallinnettaessa kuoriaisen vaivaamasta kuusikosta käynnistyvää ja potentiaalisesti lähialueille leviävää kirjanpainajan massaesiintymää (Wermelinger 2004). Lisäksi edellisvuosien hakkuut, lämpösumma, tuulituhot ja säästöpuut vaikuttavat puukuolleisuuteen ja voivat parantaa mallin toimivuutta (Vakula ym. 2015, Mezei ym. 2017). Muita biologisesti mielenkiintoisia muuttujia ovat esimerkiksi jotkut kasvupaikan erityispiirteet, kuten maannostyyppi ja topografia (Bentz ym. 2019, Kasumovic ym. 2019, Mezei ym. 2019) tai levittäytymismalleihin sisällytettävä vallitseva tuulensuunta (Pietzsch ym. 2021). Edelleen mallien realistisuutta voivat parantaa tiedot paikallisista kirjanpainajakantojen suuruuksista (Seidl ym. 2016, Kärvelä ym. 2016) tai lämpötilan ja puiden yleiskunnon muutoksista (Jakus ym. 2011). Verraten huonosti

tunnettuja ja selvästi lisätutkimusta vaativia seikkoja ovat kirjanpainajan runsautta tai levittäytymistä selittävien muuttujien vuorovaikutukset (Seidl ja Rammer 2017).

L2.5. Kirjanpainajatuhojen torjunta käytännössä

Pirtskhalava-Karpova ym. (2021) kuvaavat katsauksessaan erilaisia keinoja ja niiden tehokkuutta kirjanpainajakannan hillitsemisessä ja levittäytymisen estämisessä. Keskeisimpiä yleiskeinoja on vähentää kuusen kasvatusta erityisesti paikoilla, jotka ovat sille liian kuivia tai joilla olosuhteet vaihtelevat huomattavasti. Esimerkiksi Keski- ja Etelä-Euroopassa kuusta ei suositella kasvatettavan alavilla mailla ja muutenkin kuusen viljelyä suositellaan lähinnä vain yhdessä muiden puulajien kanssa (Faccoli ja Bernardinelli 2014, Dobor ym. 2020). Kuusen osuuden vähentäminen ja sekapuustoisuus oletettavasti lisäävät puuston yleistä ilmasto- ja myös kirjanpainajakestävyyttä (Dobor ym. 2020, Honkaniemi ym. 2020, Berthelot ym. 2021). Myös kaadettavan puutavaran käsittely on tärkeää: esimerkiksi kuusten kuoriminen estää kirjanpainajien lisääntymisen niissä (Hagge ym. 2019).

Kirjanpainajatuho voidaan yrittää pysäyttää torjuntahakkuilla, jotka ovat tehokkaimmillaan kirjanpainajapuiden välittömässä läheisyydessä ja kun välimatkaa on yli puoli kilometriä suojattaviin kuusikoihin (Pietzch ym. 2021). Hakkuut tulisi ajoittaa niin, että senhetkiset kirjanpainajayksilöt ovat kaadettavien puiden sisällä (Kasumovic ym. 2019). Eteläisessä Suomessa tämä vaihe on kesä-heinäkuun taitteessa. Erityisen tärkeitä ajoitus ja kirjanpainajan asuttamien puiden oikea tunnistaminen ovat kohteilla, joilla puiden mittavasta poistosta ”varmuuden vuoksi” voi aiheutua monimuotoisuuden heikkenemistä (esim. Kortmann ym. 2018) tai hakkuun toteuttajalle merkittävää mainehaittaa esimerkiksi kaupunkien ulkoilumetsissä. Hakkuut, joissa poistetaan kuollutta puustoa, ovat vahingollisia monimuotoisuudelle, mikä on hiljattain osoitettu tikoilla (Basile ym. 2023). Lisäksi Puolan Bialowiezassa havaittiin, että mopsilepakko (*Barbastella barbastellus*) käyttää kirjanpainajan tappamia kuusia, eritoten irtoamassa olevien kaarnasuikaleiden alustoja, päiväajan suojapaikkoina; näiden puiden korjuu luonnollisesti haittaa niitä (Rachwald ym. 2022).

Kirjanpainajan torjunnassa on kokeiltu myös karkoteaineita, syöttipuita (sentinel trees) ja feromoneja (Nadel ym. 2012, Sharma ym. 2019). Tsekissä kokeiltiin kasviperäisen karkotteen (valmistaja Fytofarm, Tsekki; verbenoni, 1,8-kineoli, raseeminen trans-konophthoriini ja GLV-1-heksanoli suhteessa 60:40:0,2:15) käyttöä kirjanpainajan hillinnässä ja havaittiin, että terveissä kuusikoissa karkote ohjasi kirjanpainajia pois kohteelta, mutta kuivuuden vaivaamilla kohteilla se ei tehonnut juuri mitenkään (Jakus ym. 2022). Kuusen erittämä (+)-trans-4-thujanoli on karkoteominaisuuksiltaan verrannollinen tunnettuihin karkotteisiin (1,8-kineoli ja verbenoni) (Jirosova ym. 2022a). Syöttipuut ovat esiintymäkohteella kaadettavia (kirjanpainajan tapauksessa) kuusia, joihin maassa elävien toukkien toivotaan kapuavan ja jotka heti tämän jälkeen viedään pois hävitettäväksi. Syöttipuilla lienee selkeä massaesiintymää vähentävä vaikutus avomaan ja varttuneen metsän reunassa, mutta tavanomaiset karkote- ja houkutusaineet eivät juuri näyttäisi lisäävän syöttipuiden tehoa (Lindmark ym. 2022). Tsekissä syöttipuun ja feromonin yhdistelmää on kokeiltu pikkukirjanpainajan (*Ips duplicatus*) vähentämiseksi myrskytuhoisuusikoissa melko huonolla menestyksellä (Sotola ym. 2021) ja Kiinassa samaa keinoa on melko laihoihin tuloksiin kokeiltu *Scolytus schevyrewi* -kaarnakuoriaisen hillinnässä (Zhu ym. 2021). Nämä tulokset vahvistavat yleistä käsitystä, että feromonipyynti

vähentää kirjanpainajakantaa korkeintaan paikallisesti johtuen feromonin diffuusista leviämisestä ympäristöön.

Vaikka feromonit ovat ilmeisen heikkotehoisia pyrittäessä vähentämään kirjanpainajia, ne ovat erinomaisia kirjanpainajakannan seurannassa; toisaalta suurina annoksina feromoneilla voi olla hättävää vaikutuksia kirjanpainajan luontaisiin vihollisiin. Kaupallisista feromoneista kirjanpainajaa houkuttelevat tehokkaasti IT Ecolure Extra, Ipsowit ja Pheroprax (Sramel ym. 2021). Kuhn ym. (2022) tutkivat feromonipyydysten kykyä vähentää paikallista kirjanpainajakantaa. Kenttätutkimuksessaan he vertailivat iskeymäpuiden määriä kohteilla, joilla oli joko (a) Ipsowit-feromonipyydytys, (b) puuhun kiinnitetty feromonin ja insektisidin yhdistelmä tai (c) ei pyyntiä. Nämä kohdeluokat erosivat vain marginaalisesti, mikä kertoo ainakin kyseisen feromonin heikosta tehosta kirjanpainajakannan rajoittamisessa (Kuhn ym. 2022). Heber ym. (2021) testasivat kuutta kaupallista feromonia kirjanpainajan houkuttelijana ja totesivat parhaaksi Tryposan-tuotteen, etenkin talvehtineiden lähtiessä loppukeväällä lentoon. Tryposan myös keräsi merkitsevästi vähemmän kirjanpainajaa saalistavia muurahaiskuoriaisia (*Thanasi-mus*) kuin esimerkiksi Pheroprax- ja IT Ecolure Extra -tuotteet. Pheroprax-annostuksen lisäyksellä oli merkittävä haitta: kun pyydyskohtainen feromoniannos nelinkertaistettiin, kirjanpainajamäärä kasvoi 16 %, mutta muurahaiskuoriaismäärä kasvoi peräti 196 %. Heber ym. (2021) esittivätkin, että sivusaaliin vähentämiseksi olisi mm. itse pyydyksiä kehitettävä valikoivamiksi.

Tuhontunnistus ja massaesiintymien torjunta voivat lähitulevaisuudessa mullistaa kaukokartoitusmenetelmien kehittyessä ja tuhontunnistuksen tullessa luotettavammaksi (katso edellä). Kirjanpainajan kannanhallinnan suunnittelussa voitaneen lähitulevaisuudessa hyödyntää maljeja, jotka perustuvat ainakin kaukokartoitusaineistoihin, digitaaliseen maaperätietoon ja puuston rakennetietoon (Duraciova ym. 2020).

L2.6. Kirjanpainajan seuralaislajit ja monimuotoisuus

Kirjanpainajien mukana elää suuri joukko muita eliölajeja, joista saattaa löytyä tulevaisuuden keinoja kirjanpainajakannan hillintään. Toisaalta voimakas kirjanpainajan massaesiintymä ja sen myötä laajat puiden kuolemat voivat vaikuttaa kohteen monimuotoisuuteen eri tavoin. Kirjanpainajan seuralaislajistoa onkin viime vuosina tutkittu varsin paljon.

Kirjanpainajan seuralaissienillä on suuri merkitys kuoriaisten kyvyssä levittäytyä, löytää isäntäpuita ja lisääntyä niissä. Yleisimmät kirjanpainajan suolistosta löytyneet sienet ovat kotelosieniä (Chakraborty ym. 2020). Suomalaisten myrskytuhokuusikoiden kirjanpainajista eristettiin 24 kotelo-, 2 kanta- ja 6 yhtymäsienilajia (Linnakoski ym. 2016). Puut, joissa on kirjanpainajan seuralaisina tavattavia sinistäjäseniä tai muita sieniosakkaita, houkuttavat kirjanpainajia enemmän kuin puut, joissa näitä sienisiä ei ole (Tanin ym. 2021). Esimerkiksi Zhao ym. (2019) havaitsivat viiden kirjanpainajan seuralaissienilajin tuottavan viittä kirjanpainajan feromonia. Kirjanpainajan mukanaan kuljettama *Endoconidiophora polonica* -sieni hajottaa puun puolustusyhdisteitä ja näin parantaa kuoriaisen mahdollisuuksia asuttaa puu (Wadke ym. 2016). Eräät kirjanpainajien mukana kulkeutuvat sienet tuottavat yhdisteitä, jotka todennäköisesti houkuttelevat paikalle kirjanpainajia (Jirosova ym. 2022b). Esimerkiksi kirjanpainajan kaksi symbionttisienilajia, *Grossmannia penicillata* ja *G. europioides*, tuottavat kirjanpainajan

kokoontumisferomonia (Zhao ym. 2015). Norjalaistutkimuksessa *Ceratocystis polonica* -infektio taas vähensi kuusen nilan typpi-, hiilihydraatti- ja lipidipitoisuuksia, luultavimmin koska sieni kulutti niitä omaan kasvuunsa, mikä alensi puiden sietokykyä kirjanpainajaa vastaan (Lahr & Krokene 2013). Toisaalta sinistäjäsieni-infektio voi nostaa puun puolustusterpeenien tuotannon monikymmenkertaiseksi ja näin suojata puuta kirjanpainajalta (Mageroy ym. 2020). Joitakin sinistäjäsiementen erittämiä yhdisteitä voitaneenkin hyödyntää kirjanpainajan torjunnassa, joskin aihe vaatii lisää tutkimusta (Kandasamy ym. 2016).

Kirjanpainajilla on mukanaan myös niiden itsensä elinkykyä heikentäviä sieniä, entomopatogeenejä. Vanicka ym. (2016) havaitsivat kirjallisuuskatsauksessaan, että kaarnakuoriaisten patogeenisuudet ovat yleisesti ottaen korkeampia luonnontilaisen kaltaisissa kuin tavanomaisissa talousmetsissä. Tulos voi johtua esimerkiksi siitä, että rakenteeltaan monipuolisemmissa metsissä elää useampia kirjanpainajalla elämään kykeneviä mutta mahdollisesti monia muitakin hyönteislajeja vaivaavia patogeenejä.

Sienten ohella kirjanpainajien elinkykyyn vaikuttavat kymmenet loiset (katso esim. Vega & Hofstetter 2015). Näiden merkitys kirjanpainajakannan säätelyssä on yleisesti ottaen huonosti tunnettu, mutta monien loisten kannat vaihtelevat enemmän tai vähemmän samanaikaisesti kirjanpainajapopulaation kannankehityksen myötä. Esimerkiksi kirjanpainajan toukilla loisiva *Dinotiscus eupterus* -loispistiäinen runsastui kirjanpainajan runsastumisen myötä myrskytuho-kuusikoissa 1–2 vuotta mutta romahti 3–4 vuotta tuhosta (Wermelinger ym. 2013). Kirjanpainajan elimistössä loisivat sukkula- ja loismadot voivat ainakin jossakin määrin heikentää kuoriaisten lisääntymistehoa ja kykyä tehdä emokäytäviä (Resnerova ym. 2022). Punkkien rooli kirjanpainajakannan säätelyssä taas on sekin pitkälle arvoitus, mutta niitä tavataan kirjanpainajayksilöistä hyvin yleisesti. Romaniassa kirjanpainajat kantoivat kuutta punkkilajia, joita havaittiin 20 %:ssa kuoriaisista, eniten kevätlennon aikana kuoriaisten peitinsiivissä (Paraschiv & Isaia 2020). Kaarnakuoriaisten toukkakäytävistä on tavattu kaksi yleistä *Paraleius*-punkkilajia, joista taksonin *P. leontonychus* on hiljattain todettu koostuvan ainakin kuudesta eri lajista (Schaffer ja Koblmüller 2020). Kirjanpainajien punkeista löydettiin kotimaisessa tutkimuksessa 15 sienilajia, joista kahdeksan oli hiivoja, yleisimpien ollessa *Grossmannia penicillata* ja kolme *Ophiostoma*-lajia (Linnakoski ym. 2021).

Kirjanpainajista on löydetty runsaasti bakteereja ja sieniä, joista osan merkitystä kuoriaisille ei tunneta, mutta esimerkiksi *Beauveria bassiana* -sieni heikentää yksilöiden elinkykyä ja lisääntymistä (esim. Hyblerova ym. 2021), vaikutuksen ollessa voimakkaampi kuin esimerkiksi mykoinsektisidi Boverolilla (Barta ym. 2020). Toisaalta Fora ym. (2022) tutkivat kenttäoloissa kuusten rungoille suihkutetun, samaa sienilajia sisältävän liuoksen tehoa kirjanpainajan käytävänmuodostuksen vähentämisessä; teho oli huomattavasti alempi kuin synteettisellä lambda-kyhalotriinillä (50 g/litra). Sienen tehoa heikensivät edelleen kasvava isäntäpuun koko sekä kuivuus ja korkea lämpötila. Kirjanpainajien torjunnassa *Beauveria pseudobassiana* on sekin erinomaisen potentiaalinen sienilaji, joka leviää tehokkaasti aiheuttaen viikossa sadan prosentin kuolleisuuden altistuneissa kirjanpainajissa (Kocacevik ym. 2016). Takov ym. (2022) testasivat *Metarhizium pemphigi* -sienen tehoa kirjanpainajien vähentämisessä laboratorio-oloissa. Kymmenen päivän koejaksolla kuolleisuus nousi 75 tai 100 prosenttiin liuoksilla, joissa oli vastaavasti $2,9 \times 10^3$ tai $6,4 \times 10^4$ konidiota millilitrassa. Toisaalta Peral-Aranega ym. (2020) eristivät kirjanpainajan eri kehitysasteista kolme *Pseudomonas*-bakteerilajia, jotka voivat vähentää kirjanpainajan mukana kulkeutuvien sienten kasvua (Peral-Aranega ym. 2020).

Kirjanpajan massaesiintymässä kuoriaiset voivat alkaa iskeytymään myös terveisiin kuusiin, millä on seurannaisvaikutuksia metsäkasvillisuuteen. Esimerkiksi eri putkilokasvi- ja jäkälälajit ovat sopeutuneet erilaisiin valaistusoloihin, ja ne muuttuvat voimakkaasti; myös maaperän vesitalous muuttuu puiden lakatessa käyttämästä vettä (esim. Tanona ja Czarnota 2019). Vaikutus kasvillisuuteen lienee saman tyyppinen kuin intensiivisessä poimintahakkuussa. Kirjanpajien tappamissa kuusikoissa myös maaperän mykorritsasienten määrä vähenee ja saprofyyttisienten ja bakteerien määrä kasvaa (Stursova ym. 2014). Massaesiintymä vaikuttaa lisäksi kuusikon ravinteiden pidätyskykyyn, joka voi alentua useiksi vuosiksi, eli huuhtoutuminen voi kasvaa (Jung ym. 2021). Mielenkiintoista on, että vaikka juurikäpä nostaa kuusten tuulenkaatoherkkyyttä, mistä kirjanpajaja simulointimallissa hyötyi, suoraa yhteyttä juurikäävän ja kirjanpajan välillä ei ole löytynyt (Honkaniemi ym. 2018).

L3. Ytimennävertäjät

L3.1. Ytimennävertäjälajit ja tutkimus

Ytimennävertäjät ovat *Tomicus*-suvun kaarnakuoriaisia, joista Suomessa tavataan pysty- ja vaakanävertäjää (*T. piniperda* ja *T. minor*). *Tomicus*-suvusta tunnetaan maailmalta muitakin lajeja, joiden taloudellinen merkitys, isäntäpuulajit ja niihin kohdistuva tieteellinen mielenkiinto vaihtelevat. Kuitenkin koska saman suvun lajeilla on usein keskeisiä biologisia yhtäläisyyksiä, käsittelemme myös niitä soveltuvilta osin alempana.

Pystynävertäjä vaivaa eläviä, melko järeitä mäntyjä, vaakanävertäjä tavataan useimmiten kuolleista ja melko ohuistakin männyistä (esim. Morgan ym. 2004, Borkowski ja Skrzecz 2016, Borkowski 2017, 2021). Molemmat lajit aiheuttavat samanlaisia näkyviä oireita järsiessään muninnan jälkeen mäntyjen verso-osia ontoiksi. Ytimennävertäjät lisääntyvät tehokkaasti mm. ulko-varastoiduissa mäntypuupinoissa, mutta niiden aiheuttamat puustovahingot rajoittuvat männiköihin, jotka sijaitsevat enintään 300 m päässä varastopaikasta (Borkowski 2001, Ye ym. 2002, Melin ym. 2021, 2022). Yu ym. (2022b) mallinsivat ytimennävertäjien aiheuttamien versovaurioiden yleisyyttä (shoot damage ratio) määrittäviä tekijöitä Kiinassa ja havaitsivat vaurioiden olevan yleisimpiä tienvarsilla ja aiempien vuosien puustotuhokohteilla. Ytimennävertäjien massa ja hengissä säilyminen alenevat ravinnoksi kelpaavien männyn kasvaimien vähenyessä (Amezaga ja Garbisu 2001).

L3.2. Ytimennävertäjätuhojen tunnistaminen eri menetelmillä

Satelliittikuva- ja muiden kaukokartoitusaineistojen käyttöä ja rajoituksia käsiteltiin yleisellä tasolla kirjanpajan yhteydessä edellä. Hyperspektrikartoituksilla on mahdollista tunnistaa ytimennävertäjien vaivaamia männiköitä kohtalaisella tarkkuudella. Esimerkiksi vaakanävertäjän ja aasialaisen *Tomicus yunnanensis* -lajin heikentämät *Pinus yunnanensis* -mäntylajin asutut puut kyettiin WorldView 3 -satelliittikuvista luokittelemaan neljään vaurioasteluokkaan 78

% tarkkuudella (Yu ym. 2020), ja vaurion tunnistus onnistui lähes yhtä hyvin myös Sentinel 2 (Lin ym. 2018) sekä droonikamerakuvista (Liu ym. 2021). Wang ym. (2022) tarkastelivat lehtialaindeksin (leaf area index) vaikutusta ytimennävertäjän aiheuttamien versovaurioiden havaitsemistodennäköisyyteen infrapuna-LIDARilla. Lehtialaindeksi yleisesti ottaen kasvaa latvuspeittävyden kasvaessa. Keskeiset havainnot Wang ym. tutkimuksessa olivat, että tarkkuus oli varsin hyvä, joskin selvästi parempi puu- kuin metsikkötasolla, ja että kumpikin tulos heikkeni indeksin laskun myötä.

L3.3. Ytimennävertäjien isäntäpuulajit ja puiden laadun merkitys

Kuten kaarnakuoriaisilla yleensäkin, myös ytimennävertäjät hyötyvät sopivien isäntäpuiden keskittymisestä ja epäedullisista kasvupaikkaoloista (Vega ja Hofstetter 2015; katso myöhemmin). Suomessa ytimennävertäjien taloudellinen merkitys pitkälti rajoittuu paikallisiin mäntyjen kasvun hidastumisiin. Molempia lajeja on maailmalla tavattu useilta mäntylajeilta ja satunnaisesti myös mm. meikäläiseltä kuuselta (CABI 2021); seuraavassa esimerkkejä viime vuosien havainnoista. Pystynävertäjää löytyi Turkissa turkinmännyltä (*Pinus brutia*; Laz ym. 2018) ja vaa-kanävertäjää Kiinassa sikäläiseltä mäntylajilta (*Pinus yunnanensis*; Lu ym. 2014, Liu ym. 2019) ja Italian Sisiliassa euroopanmustamännyltä (*Pinus nigra*; Schebeck ym. 2016).

Ytimennävertäjät eivät ole mäntylajien suhteen kaikkiruokaisia, vaan vaihtelua kelpaavuudessa on paljon. Kanadassa pystynävertäjää on meikäläisen männyn ohella tavattu amerikapuna- ja banksinmännyltä (*Pinus resinosa* ja *P. banksiana*; Morgan ym. 2004) ja Yhdysvalloissa lisäksi loblolly- ja lyhytneulasmännyltä (*Pinus taeda* ja *P. echinata*), hyvin harvoin etelänsavannimännyltä (*Pinus elliottii*) eikä lainkaan pitkäneulasmännyltä (*Pinus palustris*) (Eager ym. 2004). Todettakoon, että pystynävertäjä on Pohjois-Amerikassa puutavaran tuonnissa vahingossa maahan tullut, nykyään voimakkaasti levittäytyvä vieraslaji (Haack ym. 2000, CABI 2021).

L3.4. Ilmastotekijät suhteessa ytimennävertäjien massaesiintymiin ja levittäytymiseen

Kirjanpajan tapaan on mahdollista, että ytimennävertäjän vaivaamat männiköt yleistyvät ilmastonmuutoksen myötä, etenkin lämpötilan nousun mutta myös oletettujen yleistyvien myrskytuhojen ja kuivuusjaksojen myötä. Lämpötila ja mäntypuun saatavuus ovat keskeisiä pystynävertäjän levinneisyyden määrittäjiä (Horn ym. 2012). Männikköihin osuvat myrskytuhot hyödyttävät ytimennävertäjiä, mutta korjaamatta jääneissä vahingoittuneissa puissa iskeymät yleistyvät noin vuoden viipeellä ja laskevat jälleen 3–4 vuoden kuluttua tuhosta (Öhrn ym. 2018). Pitkään jatkuva kuivuus altistaa männyn ytimennävertäjille heikentämällä niiden puolustuskemikaalien tuottoa ja elinvoimaa (Krams ym. 2012, Sanguesa-Barreda ym. 2012). Alkukesällä alkava kuivuus esimerkiksi alkuun lisää männyn pihkantuottoa, mutta loppukesällä tuotto vähenee (Rissanen ym. 2021). Yu ym. (2022a) tutkivat 2000–2017 Landsat-kuva-aineistoilla Lounais-Kiinassa ytimennävertäjien aiheuttamia puustokuolemia sikäläisellä mäntylajilla (*Pinus yunnanensis*). Voimakkaimmin tuhon laajuutta ennusti säätekijöistä kuivien ja kuumien kesien perättisyys. Näin ollen hyvin pitkäkestoiset kuivuusjaksot voivat altistaa männyn ytimennävertäjille ja muille tuhoaiheuttajille, kuten okakaarnakuoriaiselle (*Ips*

acuminatus). Esimerkiksi ilmaston lämpenemisen aiheuttama joidenkin kaarnakuoriaislajien runsastuminen ja levittäytyminen uusille alueille voi johtaa myös niiden sieniseuralaisten, kuten pihkakoron (*Fusarium circinatum*), levittäytymiseen entistä laajemmalle alueelle (Fernandez-Fernandez ym. 2019a).

L3.5. Ytimennävertäjätuhojen torjunta käytännössä

Lehtipuusekoitus (Gilbert ym. 2005) ja huolellinen hakkuiden suunnittelu vähentävät ytimennävertäjäkantoja. Hakkuut lisäävät ytimennävertäjätuhoja hyvin paikallisesti, vaikutuksen vähentyessä etäisyyden negatiivista eksponenttifunktiota noudatellen. Esimerkiksi pienaukko-hakkuussa ytimennävertäjän latvustuhoja löytyi enimmäkseen 10 m ja jo hyvin harvoin 50 m päässä aukosta (Komonen ja Kouki 2008). Ennallistettaessa männiköitä saatetaan poltettavalle alalle jättää eläviä pystypuita; kohteen polttaminen ei näytä lisäävän ytimennävertäjätuhoja sitä reunustavissa metsissä enempää kuin polttamattoman metsän avo- tai harvennushakkuut (Martikainen ym. 2006).

Poland ja Haack (2000) vertailivat eri kasvilajien lehdistä uutettavia alkoholeja pystynävertäjän torjunnassa männynillä. Mänty itse ei tuota kyseisiä yhdisteitä. Alkoholit olivat 1-heksanoli, (E)-2-hekseeni-1-oli, (Z)-2-hekseeni-1-oli ja (Z)-3-hekseeni-1-oli. Yksinään tai kahden yhdistelminä näiden vaikutus pystynävertäjämääriin oli varsin pieni, mutta kaikkia neljää yhdessä käytettäessä määrät alenivat 36–54 %.

Ytimennävertäjien kannanseurannassa ja ainakin paikallisesti vähentämisessä voidaan käyttää syöttipuita (sentinel trees) ja feromonipyydyksiä (esim. Cebeci ym. 2019). Puiden tuottamat semiokemikaalit voivat lisätä feromonin tehoa: esimerkiksi alfa- ja beta-pineeni ja metyylika-vikoli on Yhdysvalloissa osoitettu toimiviksi *Dendroctonus*-suvun kaarnakuoriaisilla (Munro ym. 2020). Toisaalta teho voi vaihdella mainittujen semiokemikaalien sekä limoneenin suhteen vuodenajan myötä, kuten montereynmännyniltä kerättyjen pystynävertäjänäytteiden vaihtelu osoitti Turkissa (Romon ym. 2017).

Myrkkykaasu disyaania (etaanidinitriili, C_2N_2) voidaan käyttää karanteenisuojauksessa puu-tuotteille ja tukeille aikuisia pystynävertäjiä vastaan. Pitoisuudesta riippuen kuolleisuus voi nousta lähelle sataa prosenttia (Park ym. 2021).

L3.6. Ytimennävertäjien seuralaislajit ja monimuotoisuus

Ytimennävertäjät kuljettavat mukanaan suurta joukkoa sieniä, mukaan lukien sinistäjiä. Usein ytimennävertäjiltä löytyvät sienet kuuluvat sukuihin *Ophiostoma* ja *Leptographium* (esim. Pan ym. 2020). Kiinassa vaakanävertäjä vaivaa useita mäntylajeja, ja vastaavasti kulloinenkin isäntäpuulaji ja myös maantieteellinen alue vaikuttivat havaittuun seuralaissienilajistoon (Wang ym. 2020). Lisäksi eri kaarnakuoriaislajien feromonit houkuttelevat ainakin jossakin määrin myös muita kaarnakuoriaislajeja, altistaen näin puita entistä suuremmille vaikutuksille; tämä

osoitettiin kolmella *Tomicus*-lajilla – joukossa vaakanävertäjä – Kiinassa sikäläisellä *Pinus yunnanensis* -männyllä (Wang ym. 2015).

Versosurman (*Gremmeniella abietina*) epidemia voi ruotsalaistutkimuksen mukaan kaksinkertaistaa ytimennävertäjän vaivaamien mäntyjen määrän verrattuna samoissa olosuhteissa kasvaviin, versosurmattomiin mäntyihin (Oliva ym. 2016). Ruotsalaistutkimuksen mukaan ytimennävertäjät toisaalta vaivasivat vain sellaisia mäntyjä, joiden harsuuntuneisuusasteen versosurma oli nostanut yli 90 prosentin (Sikström ym. 2011). Espanjassa pystynävertäjäiskeymät näyttivät altistavan montereynmäntyjä etelänversosurmalle (*Sphaeropsis sapinea*) (Lombardero ym. 2008).

Pihkakoro (*Fusarium circinatum*) on *Gibberella circinata* -sienen suvuton aste, joka aiheuttaa pihkakorotautia lukuisilla mäntylajeilla ja douglaskuusella (vieraslajit.fi). Sieni lienee alkujaan pohjoisamerikkalainen, ja se näyttää levinneen EU:n alueella puutavaran ja/tai taimikuljetuksen mukana ainakin eteläiseen Eurooppaan. Suomessa sientä ei ole tavattu; laji on EU:n alueella karanteenituhooja. Sieni kykenee asuttamaan puun lähinnä vain kuorivaurion, kuten kaarnakuoriaisen sisäänmeno- tai ulostuloreikien, kautta (Fernandez-Fernandez ym. 2019b). Espanjassa montereynmännillä sieni näyttää olevan yleinen (Bezoz ym. 2015, 2018, Aguayo ym. 2020). Perustettuaan lisääntyvän paikalliskannan sieni leviää sadeveden, tuulen ja hyönteisten kuljettamana, ja levittäytymisen on arveltu (mainittujen rajoitteiden ansiosta) olevan hidasta ja kantamaltaan verraten lyhyttä (Zamora-Ballesteros ym. 2019). Pystynävertäjä on todennetusti sienen vektori, mutta potentiaalisia vektoreita tunnetaan kymmeniä eri hyönteisryhmistä (Fernandez-Fernandez ym. 2019b). Kiinnostava havainto montereynmännillä Espanjassa oli, että pystynävertäjän iskeymien aiheuttamat pihkavuodot estävät pihkakoron asettumista puulle (Lombardero ym. 2019).

Ytimennävertäjien on maailmalla todettu kuljettavan paljon muitakin sienilajeja (Hausner ym. 2005, Jamaa ym. 2007, Jankowiak 2006, 2008, Jankowiak ja Bilaski 2007, Munoz-Adalia ym. 2017). Esimerkiksi Bezoz ym. (2018) eristivät espanjalaisilta montereynmänniltä pystynävertäjän käytävistä pihkakoron ohella 23 muuta sienilajia. Jotkin sienilajit ovat ytimennävertäjille hyödyllisiä: esimerkiksi *Canuingia tomici* -sieni vaaka- ja pystynävertäjien lisääntymiselimissä pidensi kuoriaisten elinikää ja kasvatti lisääntymistehoa (Goertz ym. 2017). Kluting ym. (2022) tutkivat pystynävertäjän toimimista metsäpaloalueiden sienilajiston vektorina; he havaitsivat, että sienillä ei näyttänyt olevan vaikutusta isäntäpuihin, mistä päätellen sienet eivät ainakaan tutkitussa kontekstissa olleet merkittäviä pystynävertäjän puunkäytön kannalta.

Suomalaisista pystynävertäjistä eristetyistä sienistä yleisimpiä ovat olleet *Beauveria bassiana*, *Penicillium velutinum*, *Ophiostoma canum* ja *O. minus* (Silva ym. 2015). Monien sienten vaikutukset kuoriaisiin itseensä tai niiden isäntäpuihin tunnetaan verraten huonosti, mutta *Beauveria bassiana* on kaarnakuoriaisten elinvoimaa voimakkaasti heikentävä laji (katso esim. Koivula ym. 2022). Sitä myös pidetään hyvin potentiaalisena kaarnakuoriaisten biologisessa torjunnassa.

L4. Tukkimiehentäi

L4.1. Tukkimiehentäituhojen tunnistaminen

Tukkimiehentäit vaivaavat erityisesti havupuutaimikoita. Tuhot ovat lähinnä taimiin kohdistuvaa kuoriosan syöntiä, joka aiheuttaa kaulaamisen tyyppisen vaikutuksen, johon taimet useimmiten kuolevat. Kuoriaiset syövät myös suurempien havupuiden kuorta ja kasvuja, mutta niille syönti ei ole tappavaa; kuten taimillakin, juuret ovat suositumpaa ravintoa kuin esimerkiksi oksat (Fedderwitz ym. 2018). Tukkimiehentäisyönti nostaa havupuutaimilla joidenkin puolustuskemikaalien tuotantoa, esimerkiksi hartsia ja monoterpeeniä, ja alentavat toisia, kuten eräitä polyfenoleja (Moreira ym. 2013).

Aikuisia tukkimiehentäitä tavataan varttuneissakin metsissä, mistä ne liikkuvat naapuritaimikoihin. Puolassa tutkittiin syöttipyydysaineistoilla tuoreita männyn istutustaimikoita sekä niitä reunustavia, puustoltaan vanhempia kasvatus- ja varttuneita männiköitä (Skrzecz ym. 2021). Kuoriaistiheys oli korkeampi vanhoissa (61–69-vuotiaissa) kuin nuoremmassa (5–11-vuotiaissa) reunustavissa metsissä, mutta kummassakin tukkimiehentäistiheys nousi tuoreen taimikon reunaa kohti.

L4.2. Tukkimiehentäin isäntäpuulajit ja niiden laadun merkitys

Taimitarhalla kasvatetut ja luontaisesti syntyneet kuusentaimet näyttävät kelpaavan yhtäläisesti tukkimiehentäille; toisaalta kelpaavuuteen vaikuttavat taimien ikä, mahdollinen kuivuuden tai muiden olosuhteiden aiheuttama stressi, geneettinen alkuperä ja näiden yhteisvaikutukset (Nybakken ym. 2021). Geneettinen vaihtelu on merkittävä tukkimiehentäiresistenssin määrittäjä (Zas ym. 2017).

Keskimäärin tukkimiehentäyksilö näyttäisi syövän kuusen- tai männyntaimen juurta 4–5 kertaa päivässä, kullakin kerralla noin 13 cm² (Fedderwitz ym. 2015). Tukkimiehentäisyönti lisää männyntaimien juuriston mykorritsasienten kolonisaatiota ja vaikuttaa hienojuurten rakentamiseen ja kemialliseen puolustukseen (Tiiva ym. 2019). Puolalaisessa hakkuukantotutkimuksessa kuusi näytti mäntyä heikommalta ravinnolta tukkimiehentäille, ja mm. toukokuolleisuus oli korkeampi (Vele 2022b). Kyseisessä tutkimuksessa toukkia löytyi enemmän männynkannoilla, mutta ne olivat pienempikokoisia, mikä voi johtua kovemmasta yksilöiden välisestä kilpailusta hyvälaatuisesta ravinnosta.

Tukkimiehentäille kelpaa meikäläisten männyn ja kuusen ohella suurehko joukko muitakin havupuulajeja, ja usein kotoisia puulajejamme paremmin. Dolezal ym. (2021) testasivat kenttäkokeessa seuraavien puulajien maistuvuutta tukkimiehentäille: kuusi, mänty, rauduskoivu, Euroopanlehtikuusi (*Larix decidua*), douglaskuusi (*Pseudotsuga menziesii*) ja saksanpihta (*Abies alba*). Suosituimmaksi osoittautui douglaskuusi, toiseksi eniten maistui meikäläinen kuusi ja vähiten tuli syödyksi rauduskoivu. Myös rannikkomänty (*Pinus pinaster*) ja monteirenmänty kelpaavat hyvin tukkimiehentäille (Lopez-goldar ym. 2020). Mainituissa

tutkimuksessa havaittiin korrelaatio korkeamman lämpötilan ja suuremman tukkimiehentäitiheyden välillä. Toisaalta samoilla mäntylajeilla hakkuutähteen suurempi määrä nosti tukkimiehentäitiheyttä, joka yleisesti laski uudistushakkuusta kuluneen ajan myötä (Villamor ym. 2019). Ruotsalaiskokeessa tukkimiehentäit suosivat douglaskuusta ja sitkankuusta (*Picea sitchensis*) ja merkitsevästi vähemmän meikäläistä kuusta (Wallertz ym. 2014).

L4.3. Ilmastotekijät suhteessa tukkimiehentäin massaesiintymiin ja levittäytymiseen

Pureswaran ym. (2018) tarkastelivat kirjallisuuskatsauksessaan ilmastomuutoksen potentiaalisia vaikutuksia puustotuhoja aiheuttaville hyönteisille. Yksi johtopäätös oli, että eri lajit oletettavasti reagoivat varsin eri suuntaisesti, minkä johdosta massaesiintymälajeista vain osa tullee laajentamaan esiintymisalueitaan ja jatkamaan massaesiintymään. Katsauksessa etenkin talviajan lämpötila näytti keskeiseltä levittäytymisten ja massaesiintymien määrittelijänä.

Keskilämpötilan nousu kasvattaa tukkimiehentäin toukkien ja aikuisten massaa, jolla on luultavasti positiivinen vaikutus tukkimiehentäin lisääntymiskykyyn ja talvehtimisen onnistumiseen (Inward ym. 2012). Myös pitkittyvät syksyt oletettavasti lisäävät tukkimiehentäin aiheuttamia taimituhoja (Tan ym. 2010). Joutsensaari ym. (2015) esittivät empiirisiin havaintoihin perustuen, että ilmaston lämpeneminen saattaisi eri tavoin muuttaa myös alailmakehän koostumusta: esimerkiksi tukkimiehentäin massaesiintymät nostavat paikallisesti ilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuuksia monikymmen- ja sekundääristen aerosolien pitoisuuksia monisatakertaisiksi.

Ilmaston lämpeneminen yhdessä maaperän typen määrän kasvun kanssa saattaa lisätä tukkimiehentäin männynjuuriin kohdistamaa syöntiä ja osin tästä johtuen paikallisesti ilmassa olevien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuuksia (Tiiva ym. 2018, Rasheed ym. 2020). Ilmastomuutosmallien usein ennustamat, yleistyvät kuivuusjaksot voivat nekin heikentää havupuutaimien fysiologiaa ja puolustusta ja näin altistaa niitä tukkimiehentäiden syönnille (Suarez-Vidal ym. 2019).

L4.4. Tukkimiehentäin torjunta käytännössä

Puustotuhoja aiheuttavia hyönteislajeja koskeva tutkimus keskittyy lajikohtaisesti varsin erilaisiin asioihin; esimerkiksi kirjanpainajalla on tutkittu runsaasti massaesiintymien havaittavuutta, kun taas tukkimiehentäitutkimuksessa korostuvat voimakkaasti erilaiset suoran torjunnan keinot (esim. Lalik ym. 2021b). Torjunnassa ovat hyödyksi seurannat ja ennustemallit: esimerkiksi feromoniansakuopat (50–100 ansaa/ha; Lalik ym. 2019) tuottavat laadukkaan aineiston; ennustemalleissa keskeisiä muuttujia ovat mm. istutustaimien tiheys, hakkuusta kulunut aika ja kohdepaikkakunnan lämpösumma (Nordlander ym. 2017). Seuraavassa jaottelimme tukkimiehentäin torjuntaa käsittelevää tutkimusta kantojen ja hakkuutähteen korjuuseen, maanmuokkaukseen, taimien laatuun ja istuttamiseen, kemiallisiin yhdisteisiin ja biologiseen torjuntaan.

Itä-Suomessa havaittiin hakkuukantojen ja -tähteiden korjuun alentavan tukkimiehentäin kuusen istutustaimiin kohdistamaa syöntiä (Rahman ym. 2015, 2018, Piri ym. 2018). Kannonkorjuun poistoajankohta vaikuttaa kantojen juurisyöntiin siten, että jo toisena kesänä syöntiaste puolittuu; näin ollen kannonkorjuu on hyvä ajoittaa heti hakkuun jälkeen (Rahman ym. 2018). Eteläisen ja keskisen Suomen mineraali- ja turvemailla kuusentaimien riski joutua tukkimiehentäin syömäksi oli samanlainen, ja molemmissa syönti laski jyrkästi hakkuuta seuraneina vuosina (Luoranen ja Viiri 2021). Lehtipuusekoitus kuusitaimikossa saattaa vähentää kuusentaimien syöntiä, kuten pyökin (*Fagus sylvatica*) osalta havaittiin keskieuropalaisessa laboratoriokeudessa; maastossa tätä hyötyä ei kuitenkaan havaittu (Tudoran ym. 2021a).

Maanmuokkaus vähentää tukkimiehentäin aiheuttamia taimituhoja, joskin teho riippuu käytettävästä menetelmästä. Kun tuhoja ylipäättään on vähän, muokkaus parantaa taimien selviytävyyttä 15–20 %, ja auraus ja mätästys ovat tässä mielessä tehokkaampia kuin kevyemmät menetelmät (Sikström ym. 2020). Paljastuneen mineraalimaan määrä istutuskohdassa vähentää tukkimiehentäituhhoa (Wallertz ym. 2018). Mänty ja kuusi suositellaankin istuttamaan paljastuneeseen mineraalimaahan, ja uudistusala olisi syytä muokata myös ennen taimitarhalla kemiallisilla torjunta-aineilla käsiteltyjen taimien istuttamista (Nordlander ym. 2011, Wallertz ja Petersson 2011, Luoranen ja Viiri 2012, Luoranen ym. 2017). Vele (2022a) tutki tukkimiehentäiaikuisten kuoriutumista hakkuukannoilta sammalpeitteisessä ja paljastuneessa mineraalimaassa ja havaitsi merkitsevästi enemmän aikuisia ensin mainituissa mikroympäristöissä. Myös tämä tulos viittaa siihen, että maanmuokkaus vähentää tukkimiehentäituhhoa, minkä takana saattaa olla sammalen säilyttämät maaperän olot tai suoja saalistajilta, joista tukkimiehentäit hyötyvät (Vele 2022a). Tästä aiheesta on varhaisempiakin tutkimuksia, mutta ne eivät osuneet haetuille julkaisu vuosille.

Myös taimien ominaisuudet ja istutustekniset seikat vaikuttavat tukkimiehentäituhoihin. Kuusen solukkoviljelyt taimet näyttävät olevan tarhataimia kestävämpiä ja tuhoaste lienee alhaisempi mahdollisesti siksi, että solukkoviljely aktivoi taimia suojaavien sekundääristen aineenvaihduntayhdisteiden syntyä (Puentes ym. 2018). Myös isompikokoiset taimet selviytyvät paremmin kuin pienemmät, rungon paksuuden ollessa keskeinen (Nordlander ym. 2011, Luoranen ym. 2017). Suurempi istutussyvyys (8 cm tai 3 cm) ja varhaisrystyn istutusajankohta (elösyyskuu tai marras- tai seuraavan vuoden toukokuu) näyttävät parantavan kuusentaimien selviytävyyttä; luultavimmin kesällä tai varhain syksyllä istutetut taimet ehtivät juurtua ja pystyvät näin toipumaan syönnistä paremmin kuin huonosti juurtuneet taimet (Wallertz ym. 2016, Luoranen ja Viiri 2017).

Taimia voidaan suojata mekaanisesti erilaisin kalvoin, mutta myös kemiallisin yhdistein. Kemiallisista kasvinsuojeluaineista esimerkiksi asetamipridi ja tiakloroprodi vähentävät merkitsevästi taimituhoja (Olenici ym. 2018). Oosporeiini, jota eristetään *Beauveria caledonica*-sienestä, ei näytä juurikaan vähentävän tukkimiehentäin taimiin kohdistamaa syöntiä eikä myöskään tapa aikuisia tukkimiehentäitä (McNamara ym. 2019). Galko ym. (2022) testasivat eri taimiensuojausmenetelmiä: alpha-kypermetriini suihkutettuna, liimasuihke (Vermifix), C- ja F-tyyppin vahasuojaus (Norsk Wax) ja mekaaninen kauluri (muovikuori). Halvin ja tehokkain oli ensin mainittu, seuraavana liima; kaulurit olivat kalleimpia ja verraten heikkotehoisia, ja siinänsä tehokkaan vahan teho taas hiipui vuodessa. Vahasuojaus vähentää kuusentaimien tukkimiehentäituhhoa enemmän kuin hyönteismyrkyt; puistopuutilanteita ajatellen suojaus tehoa meikäläisellä kuusella paremmin kuin douglaskuusella (Lalik ym. 2020). Luoranen ym. (2022b) tarkastelivat kuusentaimilla laikkumättäisiin istuttamisen ja hiekkapinnoitteen (Coniflex) tehoa tukkimiehentäituhojen hillinnässä. Kaksivuotisessa seurannassa molemmat

vähensivät merkittävästi taimien syöntiä verrattuna muokkaamattomaan maahan tai suojaamattomiin taimiin.

Muiden kuin isäntäkasvilajien yhdisteet ovat tukkimiehentäikontekstissa erityisen paljon tutkittuja. Esimerkiksi kurkuma (*Curcuma longa*), maustemeirami (*Origana majorama*), mausteneilikka (*Syzagium aromaticum*), intiankumina (*Trachyspermum ammi*), suopursu (*Rhododendron tomentosum*) sekä afrikkalainen hernekasvi *Cordeauxia edulis* tuottavat öljyä sekä meta-noli- ja heksaaniyhdisteitä, jotka vähentävät merkittävästi tukkimiehentäin taimiin kohdistamaa syöntiä (Egigu ym. 2011, Azeem ym. 2020).

Erityisen paljon tutkittu suoja-aine on metyylijasmonaatti, joka suojaa esimerkiksi kuusensiemeniä huomattavasti paremmin kuin nikotiiniamidi, joka sekin on teholtaan hyvä (Berglund ym. 2016, Chen ym. 2021a). Iskeymät vähenevät näillä keinoilla jopa yli 60 %, ja kertäkäsittely voi suojata tarhataimia jopa kaksi kasvukautta (Chen ym. 2021b). Metyylijasmonaattikäsittely lisää kuusen kestävyttä myös tukkimiehentäin levittämää *Endoconidiopohora polonica* -sinistäjäsiementä vastaan, mutta taimien kestävyys vaihtelee kloonien välillä näkyen mm. terpeenipitoisuuseroina (Linnakoski ym. 2017, Puentes ym. 2021). Metyylijasmonaatti muuttaa volatiili-terpeenien suhteita nilassa ja neulasissa, mm. lisäten betapineenipitoisuuksia männyllä ja kuusella, mutta beta- ja alfafineenin suhde kasvaa enemmän männyllä kuin kuusella, mikä voi selittää metyylijasmonaatin paremman suojavaikutukseen ensin mainitulla (Lundborg ym. 2016). Käsittelyn haittapuolina kuusentaimilla ovat heikentyvä pituus- ja juurten kasvu sekä heikompi pakkaskestävyys (Fedderwitz ym. 2020).

Metyylijasmonaatti suojaa taimia tukkimiehentäin aiheuttamilta vaurioilta myös rannikko- ja montereynmännyllä sekä pinjalla ja kuusella (Zas ym. 2014, Lundborg ym. 2019). Käsittely vähentää tukkimiehentäin aiheuttamia kuorivaurioita, kaulausvaikutusta ja kuolleisuutta. Suojaus on tehokkaampi rannikkomännyllä ja pinjalla kuin meikäläisellä männyllä (Zas ym. 2019). Erot mäntylajien välillä saattavat selittyä terpeenien erilaisella indusoitumisella (Lundborg ym. 2019). Rannikkomännyllä metyylijasmonaattikäsittely nostaa taimien rungon pihkapitoisuutta noin 40 % ja vähentää tukkimiehentäituhoja yli 20 % (Sampedro ym. 2011).

Sukkulamatoja sisältävillä liuoksilla voidaan tehokkaasti hillitä tukkimiehentäin kannantiheyksiä havupuutaimikoissa. Käsittelyjä voidaan tehdä taimille sekä hakkuutähteille ja kannoille. Lajit *Steinernema carpocapsae* ja *Heterohabditis downesi* ovat torjuntakeinoja, joiden muulle lajistolle aiheuttama riski on matala (Harvey ym. 2016, Kapranas ym. 2017). Käsitellyissä kannoissa elävien tukkimiehentäin toukkien kuolleisuus voi mainittuja kahta sukkulamatoa käyttäen olla 82–96 % ja koteloiden 15–16 % (Williams ym. 2015). *Steinernema carpocapsae* -madon asuttama puuaines (kanto tai taimi) kelpaa huonommin tukkimiehentäille kuin *H. downesi* -madon asuttama; tukkimiehentäin pinnalla ensin mainittu laji myös liikkuu aktiivisemmin (Ennis ym. 2010). Edelleen tukkimiehentäiaikuisten kuolleisuus oli ensin mainitulla käsitellyllä puuaineella korkeampi (vastaavasti 87–93 % ja 43–57 %; Girling ym. 2010). Toisaalta Puolassa todettiin *Steinernema feltiae* ja *S. kranseii* -sukkulamatolajiliuoksen aiheuttaneen jopa 100 % kuolleisuuden tukkimiehentäin toukilla (Tumialis ym. 2013). On tärkeää huomioida, että tukkimiehentäipopulaatio ei ole vähentynyt kaikissa kokeissa (Dillon ym. 2012). Tehoon vaikuttavat esimerkiksi liuoksen sukkulamatoipitoisuus, käytetty määrä ja käyttöajankohta.

Monet biologisessa torjunnassa käytettävät sienet tehoavat myös tukkimiehentäihin. Syöttöpuilla, joissa on *Beauveria bassiana* -sientä, voidaan yrittää vähentää tukkimiehentäipopulaatiota: tukkimiehentäit saavat usein tappavan sienitartunnan jo hyvin lyhyen kontaktin jälkeen

(Lalik ym. 2021a, Barta ym. 2019). *Beauveria caledonica* -sienen kuromaitiöt ruiskutettuna havupuukantoihin lisäävät maaperässä elävien tukkimiehentäiden kuolleisuutta, ja sienitartuntaa on aikuisissa havaittu jopa 18 cm syvyyteen (Williams ym. 2013, McNamara ym. 2018). *Bacillus thuringiensis* -sieni heikentää ja jopa tappaa tukkimiehentäitä, mutta vaikutus vaihtelee sieni-isolaatin ja liuoksen vahvuuden mukaan; yllättäen tukkimiehentäihin tehoa alkuaan kaksisiipisten (Diptera) torjuntaan kehitetty *B. thuringiensis israelensis* (Tudoran ym. 2021b). Myös *Metarhizium robertsii* ja *M. brunneum* tappavat eri kehitysvaiheiden tukkimiehentäitä (Ansari ja Butt 2012). Tukkimiehentäiyksilöistä on myös eristetty *Penicillium expansum* -sientä, jonka pääasiallinen haihtuva yhdiste on styreeni; sen todettiin kokeessa vähentävän tukkimiehentäin kiinnostusta männyn oksiin (Azeem ym. 2013).

L4.6. Tukkimiehentäin seuralaislajit ja monimuotoisuus

Hyönteisten kanssa elää suuri joukko muita eliöitä, joista osa haittaa niiden elämää, osa on niille hyödyllisiä ja osa saattaa ainoastaan kulkeutua hyönteisen mukana paikasta tai isännästä toiseen. Tukkimiehentäin ruokailupurusta on eristetty sieniä esimerkiksi suvuista *Penicillium*, *Ophiostoma*, *Mucor*, *Leptographium*, *Eucasphaeria*, *Rhizosphaera*, *Debaryomyces* ja *Candida* (Jankowiak ja Bilanski 2013, Azeem ym. 2015). Jotkut kulkeutujat ovat metsätaloudellisesti haitallisia. Tukkimiehentäin saattaa esimerkiksi levittää etelänversosurmaa (*Diplodia sapinea*). Sieni on eristetty tukkimiehentäiyksilöistä, ja sen on myös havaittu tarttuvan puuaineksesta kuoriaisiin (Drenkhan ym. 2017).

Muurahaiset vaikuttavat tukkimiehentäihin, millä saattaa olla taimituhoja vähentävä vaikutus. Esimerkiksi pihamauriainen (*Lasius niger*) vähensi taimi-iskeymiä laboratorio-olosuhteissa (Manak ym. 2017) ja kaljukekomuurahaiset (*Formica polyctena*) iskivät voimakkaammin tukkimiehentäitä sisältäviin havupuutaimiin kuin niitä sisältämättömiin (Manak ym. 2016). Toisaalta punakekomuurahaiset (*Formica rufa*) eivät ole kaikissa kuusentaimien altistuskokeissa vaikuttaneet tukkimiehentäin syöntiin; vähentävä vaikutus juontuu mahdollisesti muurahaisten halusta suojella niitä kasviyksilöitä, joilla elää runsaimmin kirvoja (Manak ym. 2015).

Tukkimiehentäin torjunnassa on suuria mahdollisuuksia esimerkiksi sienillä, bakteereilla ja sukkulamadoilla tehtävässä biologisessa torjunnassa. Tukkimiehentäin suolistossa elää rikas bakteeri- (Berasategui ym. 2016) ja alkueläinlajisto. Itävallassa ja Puolassa tukkimiehentäiaikuisista on esimerkiksi eristetty *Gregarina hylobii*, *Ophryocystis hylobii*, *Nosema hylobii*, sekä sienet *Beauveria bassiana* ja *B. brongniartii* (Wegensteiner ym. 2015). Eri seuralaiseliöryhmien – samoin kuin mekaanisten ja kemiallisten torjuntakeinojen – vaikutus tukkimiehentäiden eri kehitysvaiheisiin voi vaihdella ja vaikutukset saattavat myös olla additiivisia (McNamara ym. 2018, Hardy ym. 2020). Tutkimusta kannattaa kohdentaa vaikutusten riippuvuuteen tukkimiehentäin elinkierron vaiheesta, vuodenajasta, pitkäaikaisesta säätilasta ja erilaisista abioottisten ja bioottisten tekijöiden vuorovaikutuksista.

L5. Mäntypistiäiset

L5.1. Mäntypistiäistuhojen tunnistamisen menetelmät

Suomessa tavataan 18 havupistiäislajia (Diprionidae), joista taloudellisesti merkittävimpiä ovat männyllä elävät rusko- ja pilkkumäntypistiäinen. Tavallisimpia vaikutuksia puustolle ovat kasvun alenemat toukkien neulassyönnistä ja siten heikentyneestä puiden yhteyttämisestä johtuen. Joskus puita myös kuolee syönnin seurauksena, etenkin jos syöntiä tapahtuu useampana perättäisenä vuonna. Tuhojen havainnointi on perinteisesti ollut näköaistiin perustuvaa.

Turkissa seurattiin onnistuneesti pilkkumäntypistiäisen populaatiokoon vaihtelua feromoni-ansoilla (Simsek ja Kondur 2017b). Feromoni oli ([2S, 3R, 7R]-3,7-dimetyyli-2-tridekanoli) asestaatti ja propionaatti, ja pyydystyyppi oli Lund I (Anderbrandt ym. 1989). Turkkilaiskirjoittajien mukaan pyyntiteho on niin hyvä, että mainitulla feromonin ja pyydystyyppin yhdistelmällä voitaisiin myös hillitä lajin kannankokoa, ainakin paikallisesti.

MODIS on satelliittisensori, jolla voidaan havainnoida etenkin suuren mittakaavan ajallisia muutoksia maapallolla (Lu ym. 2015). Sensorin tuottama kuva on matalaresoluutioista, parhaimmillaan noin 250 metriä. Itä-Suomessa tällaisella sensoriaineistolla yritettiin kartoittaa ruskomäntypistiäistuhoja (Olsson ym. 2016). Tunnistustarkkuus oli vain noin 50 % ja heikkeni, mitä pitempään tuho oli ollut kohteella käynnissä.

Mäntypistiäistuhoja voidaan havainnoida myös laserkeilausmenetelmillä. Lentokoneella tai droonilla keilattaessa, yhdistettynä ilmakehän aineistoon, havaitaan yksittäisillä puilla oleva pilkkumäntypistiäisen aiheuttama neulaskato 80–87 % tarkkuudella (Kantola ym. 2010, 2013, Vastaranta ym. 2013).

L5.2. Mäntypistiäisten isäntäpuulajit ja niiden laadun merkitys

Rusko- ja pilkkumäntypistiäisen sekä tähtikudospistiäisen isäntäpuiksi käyvät meikäläisen männyn ohella monet muutkin mäntylajit (*Pinus*) (CABI 2019, 2020a, 2020b). Tähtikudospistiäinen on levittäytynyt lähes koko Suomeen, mutta merkittäviä puustotuhvoja se on aiheuttanut ainoastaan Porin Ytyerissä alkaen kesästä 2006 (metsainfo.luke.fi). Puolalaistutkimuksen mukaan tähtikudospistiäisen esiaikuisia (loppuvaiheen toukat ja kotelot) löytyi maaperästä enemmän mäntymetsikön keski- kuin reunaosissa, ja enimmäkseen metrin etäisyydellä isäntäpuistaan (Slawski ym. 2019).

Rusko- ja pilkkumäntypistiäisen aiheuttamia neulastuhoja havaitaan taimikoista varttuneisiin männiköihin, useimmiten kuivilla kasvupaikoilla mutta joskus myös turvemailla (Nevalainen ym. 2015). Tuhon laajuus riippuu myös maaperän ravinteisuudesta ja topografiasta. Pilkkumäntypistiäistuhot Itä-Suomessa olivat yleisempiä ravinnerikkailla ja tasamaan kasvupaikoilla kuin ravinneköyhillä ja rinnekohteilla (Kosunen ym. 2017). Syötyjen puiden kasvun alenema vaihtelee huomattavan paljon; esimerkiksi Ranskassa todettiin pilkkumäntypistiäisen

massaesiintymien alentaneen paksuuskasvua 27–92 % (Perot ym. 2013). Mielenkiintoista on, että alenema näkyi kohonneena kasvuna ranskalaismetsiköiden muilla puulajeilla, mutta ei läheskään samassa suhteessa.

Itä-Suomessa tutkittiin pilkkumäntypistiäisen defoliaatiota 15 vuoden ja 184 mänty-yksilön aineistolla (Blomqvist ym. 2022). Tilavuuskasvu väheni noin 4 % vähäisen, 21 % kohtalaisen ja 40 % voimakkaan defoliaation puilla.

L5.3. Ilmastotekijät suhteessa mäntypistiäisten massaesiintymiin ja levittäytymiseen

Ilmastomuutos oletettavasti vaikuttaa eri puustotuholaisiin eri tavoin. Esimerkiksi Saksassa ajanjaksolla 1800–2011 pilkkumäntypistiäistuhoja oli eniten niinä vuosina, jolloin kesälämpötilat olivat korkeita, mutta tilanne oli päinvastainen mänty-yökkösellä (*Panolis flammea*) ja mäntykehräajällä (*Dendrolimus pini*) (Haynes ym. 2014). Saksassa 2002–2016 tavatut pilkkumäntypistiäistuhot voitiin selittää ennen kaikkea ilmasto- ja vain vähäisessä määrin kasvu- paikkatekijöillä, kun taas havununnalla (*Lymantria monacha*) suurin tuhoja selittävä tekijä ei ollut ilmastoperusteinen, vaan tuhometsikköä ympäröivän metsän puustorakenne (Hentschel ym. 2018). Ilmaston lämpeneminen näyttää levittävän tähtikudospistiäisen massaesiintymiä pohjoisemmaksi Virossa (Voolma ym. 2016).

Saksalaismänniköissä pilkkumäntypistiäiselle alttiit kasvupaikat saatiin ennustettua 95 % luotettavuudella, kun muuttujina olivat kosteus, lämpötila ja kokonaishaihdunta edellisenä ja ku- luvana vuonna suhteutettuna männyn silmujen puhkeamisajankohtaan (Möller ym. 2017). Vi- rossa taas 46 mänty-yksilön kasvutiedot ajanjaksolla 1887–2006 kertoivat, että mäntypistiäis- ten massaesiintymiä edelsivät kuivat ja lämpimät kesät sekä lauhdat talvet, mutta esiintymiä ei selkeästi voitu yhdistää sademäärä- tai lämpötilakynnysarvoihin (Hanso ja Drenkhan 2012).

Tuhohyönteiset lisäävät isäntäpuiden ilmaan erittämien yhdisteiden määriä, mikä voi pieneltä osin kytkeytyä ilmastomuutokseen. Männynntaimien monoterpeeniemi-ssiot kohosivat 14- kertaiksi rusko- ja 16-kertaiksi pilkkumäntypistiäisen syönnin seurauksena, ja seskviterpee- niemi-ssiot kohosivat jopa seitsenkertaiksi verrattuna terveisiin puihin (Beyaert ym. 2012, Ghimire ym. 2013). Tähtikudospistiäisen syönti taas voi kolminkertaistaa männynntaimien sesk- viterpeeniemi-ssiot (Kivimäenpää ym. 2016). Emissio on sitä voimakkaampaa, mitä korkeampi lämpötila (Kivimäenpää ym. 2016, Ghimire ym. 2017). Männyn puolustusyhdisteiden erityis voi käynnistyä jo ilmassa olevista mäntypistiäisten feromoneista (Bittner ym. 2019).

L5.4. Mäntypistiäisten torjunta käytännössä

Mospilanilla, jonka tehoaine on 20 % asetamipridi, on onnistuttu tappamaan 95–99 % tähti- kudospistiäisen toukista (Glowacka ym. 2014). Turkissa havaittiin, että pyretriumi ja eräät sel- laiset biopestisidit, jotka sisältävät *Bacillus thuringiensis*- bakteeria (Spruzit ja DiPel), tuhoavat sekä rusko- että pilkkumäntypistiäisten toukkia tehokkaasti; niitä on myös Turkissa yritetty käyttää mäntypistiäistuhojen hillinnässä (Soktur ja Tozlu 2019). Turkissa *Bacillus atrophaens* -

bakteerikannat tuhosivat laboratoriossa pilkkumäntypistiäisen toukkia ja ovat siten potentiaalisia kontrolliorganismeja (Dadasoglu ym. 2016). Iskender ja Yildirim (2022) eristivät ruskomäntypistiäisen elimistöstä 13 bakteeritaksonia (mm. *Pseudomonas* sp., *Staphylococcus* sp., *Bacillus megaterium*, *Klebsiella oxytoca*, *Raoultella planticola*, *Pantoea agglomerans*, *Staphylococcus pasteurii* ja *Acinetobacter lwoffii*) ja testasivat laboratoriossa näiden patogeenisyyden. He havaitsivat tehokkaimmaksi *Pseudomonas*-bakteerin, joka tappoi 60 % toukista. Celik ja Sevim (2022) eristivät pilkkumäntypistiäisen toukkien suolistosta 18 bakteerikantaa, joiden tehoa toukkien tappajina testattiin laboratoriossa. Kaikki bakteerit nostivat kuolleisuutta ainakin jonkin verran, mutta paljon tutkittu *B. thuringiensis* -bakteerin 37-4 -kanta tappoi 57 % ja *Pseudomonas mirabilis* peräti 100 % toukista 10 päivässä altistuksesta.

Sarikaya ym. (2022) tutkivat eri kasvilajeista uutettavien öljyjen tehoa ruskomäntypistiäisen toukkien torjunnassa. Kasvit olivat punaeukalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*), sitruuname-lissa (*Melissa officinalis*) ja turkinmeirami (*Origanum onites*), ja liuoksen vahvuus oli enintään 1 %. Kaikki johtivat lähes 100 % kuolleisuuteen kahdessa vuorokaudessa vahvimalla liuoksella.

Yksi männyn puolustusvasteista on erittäin (E)-beta-proteiinia, joka houkuttelee mäntypistiäisen toukilla loisivia loispistiäisiä. Hundacker ym. (2022) tunnistivat puolustuksen käynnistävän proteiinin, "diprioniinin", jolla käsitelty männyn lisäsivät (E)-beta-farneseenin eritystä. Heidän järjestämässään laboratoriokokeessa ko. proteiinilla käsitelty männynoksat houkuttelivat loispistiäisiä (katso alempana).

L5.5. Mäntypistiäisten seuralaislajit ja monimuotoisuus

Mäntypistiäisten kannanhallinnassa biologisella torjunnalla on oma merkityksensä, joskin merkityksen suuruus mäntypistiäisten kannankehityksen eri vaiheissa vaatii lisätutkimuksia. Torjunnassa helpoin kohde ovat mäntypistiäisten toukat. Torjunnan näkökulmasta kannattaisi tutkia sieniiä, viruksia ja bakteereja, mutta myös hyönteisiä syöville eri lajiryhmillä, kuten varpuslinnuilla, on merkitystä.

Kokeissa tali- ja sinitiaiset haistoivat pilkkumäntypistiäisen syömät männynoksat terveitä oksia helpommin, ja kykenivät tunnistamisen myös pelkästään näköönsä luottamalla (Mäntylä ym. 2017, 2020). Tali- ja sinitiaiset tunnustivat männynoksilla olevien pilkkumäntypistiäisen munat niistä lähtevien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden avulla (Mäntylä ym. 2018). Syödyistä männynoksista mitattiin syömättömiä enemmän kaikkiaan 21 haihtuvaa yhdistettä (Mäntylä ym. 2017).

Espanjassa pilkkumäntypistiäisen munia loisi voimakkaimmin *Neochrysocharis formosa* -loispistiäinen; loispistiäistä löytyi 19–33 % munaryhmistä, joissa 24–35 % munista oli loisittu (Selfa ym. 2017). Loispistiäisiä saattaa houkuttaa mäntypistiäisten oma feromonituotanto, mutta myös mäntyjen erittämät yhdisteet. Esimerkiksi ruskomäntypistiäisen muninta lisää männyn seskviterpeenituotantoa, mutta myös suoraan houkuttelee *Closterocerus ruforum* -loispistiäisiä (Kopke ym. 2010). Lisäksi edellä mainittu, männyn erittämä (E)-beta-farneseeni houkuttelee tätä loispistiäistä (Beyaert ym. 2010).

L6. Havununna

L6.1. Havununnan massaesiintymät ja lähilaji lehtinunna

Havununna on Suomessa kotoperäinen laji, joka vähitellen levittäytyy pohjoisemmas. Keski-Euroopassa lajilla on ajoittain ollut massaesiintymiä: esimerkiksi Tsekissä ajanjaksolla 1784–2010 todettiin kaikkien aikojen suurin massaesiintymä 1917–1927, ja tuorein massaesiintymäksi luokiteltu oli 1993–1996 (Uhlikova ym. 2011). Katso myös ilmastotarkastelu alempana.

Havununnan lähilaji lehtinunna (*Lymantria dispar*) on eteläinen lähilaji, joka on parhaillaan levittäytymässä Suomeen. Sille kelpaavat ravinnoksi niin tammi, raudus- kuin hieskoivukin, joten ravintokasvien puute ei rajoita sen leviämistä Pohjois-Euroopassa (Fält-Nardmann ym. 2018a). Lämpötilat sitä vastoin rajoittavat ainakin jossain määrin, sillä toukat syövät 10–30°C:ssa ja kehittyvät 15–30°C:ssa (Keena ja Shi 2019). Pohjois-Amerikkaan laji levittäytyi alkuun jo 1800-luvun lopulla onnettomasti päättyneen ”silkkiperhoskokeilun” ansiosta, mutta myös sittemmin useampaan otteeseen oletettavasti aasialaisten rahtilaivojen mukana; laivojen kansirakenteissa olleet lehtinunnan vastakuoriutuneet toukat voivat kutomansa seitin avulla levittäytyä tuontisatamien läheisyyteen, mahdollisesti löytää uusia isäntäpuulajeja (lajilta tunnetaan yli 500 isäntäpuulajia) ja jatkaa levittäytymistään (Mastro ym. 2021). Yhdysvalloissa on massiivinen lehtinunnan hillintään tähtäävä ohjelma, johon kuuluvat riskinarviointi, tuontisatamien seurannat ja mahdollisten uusien esiintymien hävittäminen, aluksien siivoaminen ja kasvintuontisertifioinnit sekä yleinen kannanseuranta (Mastro ym. 2021).

L6.2. Havununnatuhojen tunnistamisen menetelmät

Havununnan levittäytymistä on viime vuodet seurattu Suomessa Luonnonvarakeskuksen feromonipyyntiverkostolla (Melin ym. 2020). Puustotuhoja laji on tähän asti aiheuttanut hyvin satunnaisesti maan lounaisosissa, mutta lajia on seurannassa jo tavattu 64. leveyspiirillä (noin Kuhmon korkeudella) ja kaikilla 62. leveyspiirin seurantakoealoilla (noin Jyväskylän korkeudella). Havununnakannat ovat etelässä olleet paikoin niin korkeita, että laji saattaa lähivuosina aiheuttaa paikallisia puustokuolemia. Vastaavan tapaisia feromoniseurantoja on toteutettu hyvällä menestyksellä myös lehtikuusikoissa Mongoliassa (Wang ym. 2017) ja männiköissä Romaniassa (Stanca-Moise ym. 2017). Havununnakantaa voidaan seurata myös valopyydyksin (Kurihara ym. 2022).

Neulas- ja lehtikatoa aiheuttavien hyönteisten massaesiintymiä on vähintään kokeiluluonteisesti pyritty seuraamaan satelliittiaineistojen avulla. Havununnan defoliaatiota männiköissä on Koillis-Saksassa arvioitu RapidEye -multispektriaineistolla, josta johdettiin NDVI-kasvillisuusindeksi ja NDRE-puna-alue-indeksi; indeksit kuvasivat hyvin lehvästön määrää, mutta erottelivat huonosti eri defoliaatioluokkia (Marx ja Kleinschmit 2017). Indeksit yhdistämällä luokittelussa kuitenkin yllettiin 71–81 % tarkkuuteen.

L6.3. Havununnan isäntäpuulajit, koko- ja kehitysluokat

Havununnan toukille kelpaa hyvin laaja kirjo puulajeja, ensisijaisesti mänty, kuusi ja koivut, mutta niille maistuu myös suuri osa muistakin kotimaisista puulajeista ja suuri joukko puistopuulajeista (mm. sukuja *Abies*, *Picea*, *Pseudotsuga*, *Tsuga*, *Betula*, *Malus*, *Prunus* ja *Quercus*), samoin mustikka (Keena 2003, CABI 2020c). Laboratoriokokeessa toukat kehittyivät nopeammin männyllä ja kuusella kuin douglaskuusella (Fuldner ja Spork 2003).

Havununnan massaesiintymän voimakkuus riippuu voimakkaasti kohdemetsikköä ympäröivän metsämaiseman rakenteesta (Hentschel ym. 2018). Syönnille altistavia alueen piirteitä olivat mm. alhainen puulajidiversiteetti ja yhden tai muutaman lajin vahva dominointi sekä toisaalta puuston nuoruus. Lehtinunnalla taas on havaittu useamman perättäisen massaesiintymävuoden tappavan puita moninkertaisesti yksittäiseen vuoteen nähden (Clark ym. 2022), mutta tämä lienee mahdollista myös havununnalla. Lisäksi lehtinunnan massaesiintymän laajuuteen vaikuttanee enemmän vuotuinen keskilämpötila kuin sademäärä, ja paikallisella tasolla muiden kuin sopivien isäntäpuiden kasvava osuus vähentää isäntäpuiden kohtaamaa syöntiä (Haynes ym. 2022). Toisaalta eteläeurooppalaisen tammivaltaisen metsän korkeampi puulajikirjo paransi puuston toipumistodennäköisyyttä lehtinunnan massaesiintymästä talous- mutta ei luonnonalaisissa metsissä, joissa eroja ei ollut (Blanco-Rodriguez ja Espelta 2022).

Puut tuottavat erilaisia yhdisteitä kohdatessaan nilaa tai lehtiä syöviä hyönteisiä. Esimerkiksi valkokuusen (*Picea glauca*) neulasiin kertyy terpeenibiosynteesissä runsaasti geranyyli-geranyyli-rasvahappojen estereitä, jotka vähentävät havununnan toukkien niihin kohdistamaa syöntiä (Nagel ym. 2014).

L6.4. Ilmastotekijät suhteessa havununnan massaesiintymiin ja levittäytymiseen

Havununna on Suomessa luontaisesti levinnyt 1990-luvun alusta lähtien noin 200 km kahdessa vuosikymmenessä jo 63. leveyspiirille (Fält-Nardmann ym. 2018c). Tämän lienee mahdollistanut joko munien kohentunut selviytyminen talven yli (jäätymisraja noin -29°C) tai tehostunut aikuisten lisääntyminen ja leviäminen; korkeat alkukesän lämpötilat sitä vastoin eivät näytä selittävän leviämistä (Fält-Nardmann ym. 2018c).

Ulkoilman lämpötila sinänsä ei välttämättä kovin hyvin ennusta havu- tai lehtinunnankaan levittäytymistä tai yksittäisen kohteen herkkyyttä massaesiintymälle. Yhdysvalloissa havaittiin, että lehtinunnan levittäytymistä pohjoiseen ilmaston lämpenemisen mukana rajoittavat voimakkaasti ongelmat pariutumiskumppanien löytämisessä (nk. Allee-vaikutus) ja talviaikainen kuolleisuus (Tobin ja Raffa 2022). Näin ollen levittäytyvän lajin paikallista vaikutusta ei välttämättä voi ennakoida pelkästään levittäytymisnopeuden perusteella. Toisaalta lehtinunnalla on Aasiassa havaittu, että kivimateriaalin, johon lehtinunnanaaras munii, lämpötila on talvisin huomattavasti korkeampi kuin ilman lämpötila, mistä syystä munien selviytyvyys voi olla parempi kuin ilmalämpötilan mittauksista voitaisiin päätellä (Ananko ym. 2022).

Havu- ja lehtinunnapopulaatiot ovat ajanjaksolta 1951–1980 ajanjaksolle 1981–2010 levinneet Itä-Siperiassa merkittävästi pohjois- ja itäsuunnassa (Vasyukevich ym. 2013). Myös uudehkot

ilmastoskenaariot ennakoivat lajin kykenevän levittäytymään pohjoisemmaksi, mutta keskilämpötilan nousu 3,6–5,8°C verran auttaa havununnaa tässä enintään 200–300 km, koska talvilämpötilat (Fält-Nardmann ym. 2018b) ja edellä kuvatut muut seikat edelleen todennäköisesti rajoittavat lajin selviytyvyyttä ja lisääntymiskykyä. Toisaalta CLIMEX-ilmastoskenaarioissa tarkasteltu lämpeneminen 1,4–5,8°C ennusti havununnan voivan Euroopassa siirtää pohjoista esiintymisrajaansa jopa 500–700 km ja etelärajaansa 100–900 km (Vanhanen ym. 2007)!

Puustotuhopotentialin muutosta ilmastonmuutoksen myötä on vaikea ennakoida, mutta Saksassa todettiin 200 vuoden puustotuho- ja puiden kasvuaineistoilla, että esimerkiksi mäntykehräjän (*Dendrolimus pini*) massaesiintymät olivat harvinaisempia [sic] lämpiminä vuosina ja vuosikymmeninä, mutta ilmaston lämmetessä havununnakannan syklisyys katosi, eli sen kanta kääntyi tasaisen runsaaksi (Haynes ym. 2014). Lämpötilan nousu ei loputtomiin hyödytä havununnaa: kokeellinen nousu 15°C:sta 25°C:en laski havununnan toukkien selviytyvyyttä 44 %:sta 21 %:iin, mutta lehtinunnan toukkien selviytyvyys kohosi 50 %:sta 100 %:iin; samalla molempien lajien kehitysaika munasta aikuiseksi lyheni (Karolewski ym. 2007). Kun eri puolilta Yhdysvaltoja kerätyt lehtinunnan toukkaryhmät altistettiin ilmaston lämpenemistä simuloivaan laboratoriokokeeseen, toukat kasvoivat nopeammin ja niiden kehitys nopeutui (Walter ym. 2022). Vaikka nämä tekijät vaihtelivat jonkin verran maantieteellisesti, eteläiset toukat menestyivät pohjoisia paremmin (ibid.).

Havununnayksilöiden selviytyvyyteen vaikuttavat yksilöiden mahdollisesti muuttuvasta metaboliasta lähtien monet seikat, kuten muuttuvat kuivuusolot, muna- ja toukkaloisinta ja saalisuus. Kukarskih ym. (2022) havaitsivat, että kuivuus ja ilmansaasteiden määrä altistivat kaupunkipuita havununnan massaesiintymille.

L6.5. Havununnan torjunta käytännössä

Ilmateitse levitetty hyönteismyrkky Mimic LV (vaikuttava aine 24 % tebufenotsidi) aiheutti 99 % kuolleisuuden puolalaismänniköiden havununnapopulaatioissa (Glowacka ym. 2018). Lehtinunnalla taas lepidosidi, jonka pohjana on yhdistelmänä *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* -bakteeri ja nukleopolyhedrovirus sekä optinen kirkaste, tehosi laboratorio-oloissa erinomaisesti eri toukkavaiheisiin (Akhanaev ym. 2022).

Monet sienet, virukset ja bakteerit oletettavasti rajoittavat havununnan kannan kasvua ainakin jossakin määrin. Laboratoriokokeessa *Isaria fumosorosea* -sieni tuhosi havununnan toukkia, mutta alttius sienelle vaikuttaa luonnonoloissa olevan alhainen (Kereselidze ym. 2014). Sienilaji *Entomophaga maimaiga* tehoaa jossakin määrin havununnan mutta selvästi paremmin lehtinunnan toukkiin, kertoen isäntälajierikoistumisesta (Pilarska ym. 2016). Lehtinunnalla toukkien altistaminen laboratoriossa *Hyphantria cunea* -granulovirukselle ($5,6 \times 10^6$ okkluusioyksikköä/ml) aiheutti korkean kuolleisuuden 10 päivää altistuksesta (Bayramoglu ym. 2021). Lehtinunnan toukista eristetty bakulovirus tappoi laboratoriokokeessa tehokkaasti lehtinunnan toukkia (Rabalski ym. 2016). Viiden itäsiiperialaisen havununnainvaasion loppuvaiheissa perhosen kannat romahtivat nähtävästi pääasiassa nukleopolyvirusten (NPV) ja loispistiäisten (Tachinidae ja Sarcophagidae) vaikutuksesta (Ilyinykh 2011). Näiden seuralaislajien

ekologia ja teho havununnan kannan hillinnässä selkeästi vaativat lisätutkimuksia, mutta niillä tai vastaavan tyyppisillä organismeilla on potentiaalia tuhojen välttämisen kannalta.

L6.6. Havununnan seuralaisorganismit, puustotuhot ja monimuotoisuus

Laajamittaiset puustokuolemat vaikuttavat voimakkaasti metsänpohjan valaistus- ja muihin pienilmasto-oloihin ja edelleen esimerkiksi pohja- ja kenttäkerroskasvillisuuteen ja niistä riippuvaiseen muuhun lajistoon. Saksassa havununnatuho muutti sieni- muttei maaperän bakteerilajistoa (Beule ym. 2017). Maaperän ektomykorritsasienet vähenivät, mutta monet patogeenit lisääntyivät pintamaassa (ibid.). Sienten yleisen runsastumisen ohella bakteerimäärä kasvoi neulasissa, pohjakerroksessa ja pintamaan orgaanisessa kerroksessa (Grunig ym. 2018a). Lisäksi mitä ilmeisimmin puiden neulaskato ja maanpinnan runsastunut orgaaninen aines voimistivat maaperän CO₂-emissiot 4–14-kertaisiksi ja N₂O-emissiot 9–10-kertaisiksi, kertoen muutoksista maaperän ravinnekierrossa ja hiilivarastossa (Grunig ym. 2018b).

Havununnan vaikutus puiden kasvuun ja selviytyvyyteen saattaa ilmasto- ja kasvupaikkatekijöiden ohella riippua myös muista havununnan ja isäntäpuiden seuralaislajeista, mutta asia vaatii tutkimuksia. Eri tuhonaiheuttajilla voi myös olla tunnettua useammin kumulatiivisia vaikutuksia. Esimerkiksi Espanjassa on havaittu, että paikoilla, joilla oli aikaisemmin todettu havununnan massaesiintymä, misteli (*Viscum album*) heikensi puiden kasvua enemmän kuin sel-laisilla paikoilla, joilla massaesiintymää ei oltu todettu (Camarero ym. 2019).

L7. Kirjallisuus

- Akhanaev, Y., Pavlushin, S., Polenogova, O., Klementeva, T., Lebedeva, D., Okhlopko, O., Kolosov, A. & Martemyanov, V. 2022. The effect of mixtures of *Bacillus thuringiensis*-based insecticide and multiple nucleopolyhedrovirus of *Lymantria dispar* L. in combination with an optical brightener on *L. dispar* larvae. *Biocontrol* 67: 331–343.
- Ananko, G.G., Kolosov, A.V. & Martemyanov, V.V. 2022: Rock Microhabitats Provide Suitable Thermal Conditions for Overwintering Insects: A Case Study of the Spongy Moth (*Lymantria dispar* L.) Population in the Altai Mountains. *Insects* 13: 712.
- Anderbrandt, O., Löfqvist, J., Jönsson, J. & Marling, E. 1989: Effects of pheromone trap type, position and colour on the catch of the pine sawfly *Neodiprion sertifer* (Geoff.) (Hym., Diprionidae). *Journal of Applied Entomology* 107: 365–369.
- Bayramoglu, Z., Gencer, D. & Demir, I. 2021. Bioactivity of a betabaculovirus, *Hyphantria cunea* granulovirus, in six lepidopteran insects as potential hosts. *Turkish Journal of Entomology* 45: 417–424.
- Beule, L., Gruning, M.M., Karlovsky, P. & L-M-Arnold, A. 2017. Changes of Scots pine phyllosphere and soil fungal communities during outbreaks of defoliating insects. *Forests* 8: 316.

- Beyaert, I., Kopke, D., Stiller, J., Hammerbacher, A., Yoneya, K., Schmidt, A., Gershenzon, J. & Hilker, M. 2012. Can insect egg deposition 'warn' a plant of future feeding damage by herbivorous larvae? *Proceedings of the Royal Society Ser. B Biological Sciences* 279: 101–108.
- Beyaert, I., Waschke, N., Scholz, A., Varama, M., Reinecke, A. & Hilker, M. 2010. Relevance of resource-indicating key volatiles and habitat odour for insect orientation. *Animal Behaviour* 79: 1077–1086.
- Bittner, N., Hundacker, J., Achotegui-Castells, A., Anderbrant, O. & Hilker, M. 2019. Defense of Scots pine against sawfly eggs (*Diprion pini*) is primed by exposure to sawfly sex pheromones. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 116: 24668–24675.
- Blanco-Rodriguez, M.A. & Espelta, J.M. 2022: Tree species composition and management influence short-term resilience to defoliation by *Lymantria dispar* L. in oak forests. *Forest Ecology and Management* 520: 120399.
- CABI 2019: *Acantholyda posticalis* (pine tree web-spinning sawfly). CABI Digital Library. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.2530>.
- CABI 2020a: *Neodiprion sertifer* (European pine sawfly). CABI Digital Library. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.35835>.
- CABI 2020b: *Diprion pini* (common pine sawfly). CABI Digital Library. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.19194>.
- CABI 2020c: *Lymantria monacha* (nun moth). <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.31811>.
- Camarero, J.J., de Andres, E.G., Sanguesa-Barreda, G., Rita, A. & Colangelo, M. 2019. Long- and short-term impacts of a defoliating moth plus mistletoe on tree growth, wood anatomy and water-use efficiency. *Dendrochronologia* 56: 125598.
- Celik, T. & Sevim, A. 2022: Bacterial pathogens from *Diprion pini* L. (Hymenoptera: Diprionidae) and their biocontrol potential. *Biologia* 77: 3001–3013.
- Clark, K.L., Aoki, C., Ayres, M., Kabrick, J. & Gallagher, M.R. 2022: Insect infestations and the persistence and functioning of oak-pine mixedwood forests in the mid-Atlantic region, USA. *PLOS ONE* 17: e0265955. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0265955>.
- Dadasoglu, F., Tozlu, G., Kotan, R., Gokturk, T. & Karagoz, K. 2016. Biological control of pine sawfly (*Diprion pini* L.) and molecular characterisation of effective strains. *Romanian Biotechnological Letters* 21: 11272–11280.
- Fält-Nardmann, J.J.J., Klemola, T., Ruohomäki, K., Niemelä, P., Roth, M. & Saikkonen, K. 2018a. Local adaptations and phenotypic plasticity may render gypsy moth and nun moth future pests in northern European boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research* 48: 265–276. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0481>.
- Fält-Nardmann, J.J.J., Ruohomäki, K., Tikkanen, O.-P. & Neuvonen, S. 2018b. Cold hardiness of *Lymantria monacha* and *L. dispar* (Lepidoptera: Erebidæ) eggs to extreme winter

- temperatures: implications for predicting climate change impacts. *Ecological Entomology* 43: 422–430. <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. 2018c. The recent northward expansion of *Lymantria monacha* in relation to realised changes in temperatures of different seasons. *Forest Ecology and Management* 427: 96–105.
- Fuldner, K. & Spork, T. 2003. Development of the nun moth (*Lymantria monacha* Linnaeus, 1758: Lepidoptera, Lymantriidae) on Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*), spruce (*Picea abies*) and pine (*Pinus sylvestris*) under controlled conditions). 2003. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 174: 84–88.
- Ghimire, R.P., Kivimäenpää, M., Kasurinen, A., Häikiö, E., Holopainen, T. & Holopainen, J.K. 2016. Herbivore-induced BVOC emissions of Scots pine under warming, elevated ozone and increased nitrogen availability in an open-field exposure. *Agricultural and Forest Meteorology* 242: 21–32.
- Ghimire, R.P., Markkanen, J.M., Kivimäenpää, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P. & Holopainen, J.K. 2013. Needle removal by pine sawfly larvae increases branch-level VOC emissions and reduces below-ground emissions of Scots pine. *Environmental Science & Technology* 47: 4325–4332.
- Glowacka, B., Bystrowski, C. & Skrzecz, I. 2018. Efficacy of Mimic 240 LV in the protection of Scots pine *Pinus sylvestris* L. against the nun moth *Lymantria monacha* L. and the pine lappet moth *Dendrolimus pini* L. *Sylvan* 162: 403–410.
- Glowacka, B., Skrzecz, I. & Bystrowski, C. 2014. Reducing the abundance of great pine web-spinning pine sawfly *Acantholyda posticalis* Mats. in pine stands. *Sylvan* 158: 323–330.
- Gokturk, T. & Tozlu, G. The effect of pyrethrum and *Bacillus thuringiensis* biopesticides on *Diprion pini* L. and *Neodiprion sertifer* (Geoffr.) (Hymenoptera: Diprionidae) larvae. *Pakistan Journal of Zoology* 51: 989–994.
- Gruning, M.M., Beule, L., Meyer, S., Karlovsky, P. & L-M-Arnold, A. 2018a. The abundance of fungi, bacteria and denitrification genes during insect outbreaks in Scots pine forests. *Forests* 9: 497.
- Gruning, M.M., Germeshausen, F., Thies, C. & L-M-Arnold, A. 2018b. Increased forest soil CO₂ and N₂O emissions during insect infestation. *Forests* 9: 612.
- Hanso, M. & Drenkhan, R. 2012. Lophodermium needle cast, insect defoliation and growth responses of young Scots pines in Estonia. *Forest Pathology* 42: 124–135.
- Haynes, K.J., Allstadt, A.J. & Klimetzek, D. 2014. Forest defoliator outbreaks under climate change: effects on the frequency and severity of outbreaks of five pine insect pests. *Global Change Biology* 20: 2004–2018.
- Haynes, K.J., Liebhold, A.M., Lefcheck, J.S., Morin, R.S. & Wang, G.M. 2022: Climate affects the outbreaks of a forest defoliator indirectly through its tree hosts. *Oecologia* 198: 407–418.

- Hentschel, R., Möller, K., Wenning, A., Degenhardt, A. & Schroder, J. 2018. Importance of ecological variables in explaining population dynamics of three important pine pest insects. *Frontiers in Plant Science* 9: 1667.
- Hentschel, R., Möller, K., Wenning, A., Degenhardt, A. & Schroder, J. 2018. Importance of ecological variables in explaining population dynamics of three important pine pest insects. *Frontiers in Plant Science* 9: 1667.
- Honkaniemi, J., Ojansuu, R., Kasanen, R. & Heliövaara, K. 2018. Interaction of disturbance agents on Norway spruce: A mechanistic model of bark beetle dynamics integrated in simulation framework WINDROT. *Ecological Modelling* 388: 45–60.
- Honkaniemi, J., Rammer, W. & Seidl, R. 2020. Norway spruce at the trailing edge: the effect of landscape configuration and composition on climate resilience. *Landscape Ecology* 35: 591–606. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00964-y>
- Hrosso, B., Mezei, P., Potterf, M., Majdak, A., Blazenec, M., Korolyova, N. & Jakus, R. 2020. Drivers of spruce bark beetle (*Ips typographus*) infestations on downed trees after severe windthrow. *Forests* 11: 1290.
- Hundacker, J., Bittner, N., Weise, C., Brohan, G., Varama, M. & Hilker, M. 2018. Pine defense against eggs of an herbivorous sawfly is elicited by an annexin-like protein present in egg-associated secretion. *Plant Cell and Environment* 45: 1033–1045.
- Huo, L.N., Persson, H.J. & Lindberg, E. 2021. Early detection of forest stress from European spruce bark beetle attack, and a new vegetation index: Normalized distance red & SWIR (NDRS). *Remote Sensing of Environment* 255: 112240.
- Hyblerova, S., Medo, J. & Barta, M. 2021. Diversity and prevalence of entomopathogenic fungi (Ascomycota, Hypocreales) in epidemic populations of bark beetles (Coleoptera, Scolytinae) in spruce forests of the Tatra National Park in Slovakia. *Annals of Forest Research* 64: 129–145.
- Ilyinykh, A. 2011. Analysis of the causes of declines in Western Siberian outbreaks of the nun moth *Lymantria monacha*. *Biocontrol* 56: 123–131.
- Iskender, N.A. & Yildirim, B. 2022: Molecular characterization of bacteria isolated from *Neopridion sertifer* and their pathogenic effects. *Fresenius Environmental Bulletin* 31: 3937–3946.
- Jakus, R., Modlinger, R., Kaspar, J., Majdak, A., Blazenec, M., Korolyova, N., Jirosova, A. & Schlyter, F. 2022: Testing the Efficiency of the Push-and-Pull Strategy during Severe *Ips typographus* Outbreak and Extreme Drought in Norway Spruce Stands. *Forests* 13: 2175.
- Jakus, R., Zajickova, L., Cudlin, P., Blazenec, M., Turcani, M., Jezik, M., Lieutier, F. & Schlyter, F. 2011. Landscape-scale *Ips typographus* attack dynamics: from monitoring plots to GIS-based disturbance models. *iForests – Biogeosciences and Forestry* 4: 256–261.
- Janda, P., Trotsiuk, V., Mikolas, M., Bace, R., Nagel, T.A., Seidl, R., Seedre, M., Morrissey, R.C., Kuchel, S., Jaloviar, P., Jasik, M., Vysoky, J., Samonil, P., Cada, V., Mrhalova, H., Labusova, J., Novakova, M.H., Rydval, M., Mateju, L & Svoboda, M. 2017. The historical

- disturbance regime of mountain Norway spruce forests in the Western Carpathians and its influence on current forest structure and composition. *Forest Ecology and Management* 388: 67–78.
- Jeger, M., Bragard, C., Caffier, D., Candresse, T., Chatzivassiliou, E., Dehnen-Schmutz, K., Gilioli, G., Miret, J.A.J., MacLeod, A., Navarro, M.N., Niere, B., Parnell, S., Potting, R., Rafoss, T., Rossi, V., Urek, G., Van Bruggen, A., Van der Werf, W., West, J., Winter, S., Kertesz, V., Aukhojee, M. & Gregoire, J.C. 2017. Pest categorisation of *Ips typographus*. *EFSA Journal* 15: 4881.
- Jirosova, A., Kalinova, B., Modlinger, R., Jakus, R., Unelius, CR., Blazenec, M. & Schlyter, F. 2022a: Anti-attractant activity of (+)-trans-4-thujanol for Eurasian spruce bark beetle *Ips typographus*: Novel potency for females. *Pest Management Science* 78: 1992–1999.
- Jirosova, A., Modlinger, R., Hradecky, J., Ramakrishnan, R., Berankova, K. & Kandasamy, D. 2022b: Ophiostomatoid fungi synergize attraction of the Eurasian spruce bark beetle, *Ips typographus* to its aggregation pheromone in field traps. *Frontiers in Microbiology* 13: 980251.
- Johansson, A., Birgersson, G. & Schlyter, F. 2019. Using synthetic semiochemicals to train canines to detect bark beetle-infested trees. *Annals of Forest Science* 76: 58.
- Jung, H., Senf, C., Beudert, B. & Krueger, T. 2021. Bayesian hierarchical modeling of nitrate concentration in a forest stream affected by large-scale forest dieback. *Water Resources Research* 57: e2020WR027264.
- Junttila, S., Holopainen, M., Vastaranta, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Kaartinen, H., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2019. The potential of dual-wavelength terrestrial lidar in early detection of *Ips typographus* (L.) infestation – Leaf water content as a proxy. *Remote Sensing of Environment* 231: 111264.
- Junttila, S., Näsi, R., Koivumäki, N., Imangholiloo, M., Saarinen, N., Raisio, J., Holopainen, M., Hyypä, H., Hyypä, J., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Vastaranta, M. & Honkavaara, E. 2022: Multispectral Imagery Provides Benefits for Mapping Spruce Tree Decline Due to Bark Beetle Infestation When Acquired Late in the Season. *Remote Sensing* 14: 909.
- Kaminska, A., Lisiewicz, M., Kraszewski, B. & Sterenczak, K. 2021. Mass outbreaks and factors related to the spatial dynamics of spruce bark beetle (*Ips typographus*) dieback considering diverse management regimes in the Białowieża forest. *Forest Ecology and Management* 498: 119530.
- Kandasamy, D., Gershenzon, J. & Hammerbacher, A. 2016. Volatile organic compounds emitted by fungal associates of conifer bark beetles and their potential in bark beetle control. *Journal of Chemical Ecology* 42: 952–969.
- Kantola, T., Vastaranta, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., Kankare, V., Talvitie, M. & Hyypä, J. 2013. Classification of needle loss of individual Scots pine trees by means of airborne laser scanning. *Forests* 4: 386–403.
- Kantola, T., Vastaranta, M., Yu, X.W., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., Talvitie, M., Kaasalainen, S., Solberg, S. & Hyypä, J. 2010. Classification of defoliated trees using

- tree-level airborne laser scanning data combined with aerial images. *Remote Sensing* 2: 2665–2679.
- Kurkela, T., Nikkanen, O. & Kukkonen, H. 1978. Tyvitervaksen (maannousemasienen) aiheuttamat kasvutappiot männikössä. *Metsä ja puu* 10: 33–35.
- Kärhä, K., Anttonen, T., Poikela, A., Palander, T., Lauren, A., Peltola, H. & Nuutinen, Y. 2018. Evaluation of salvage logging productivity and costs in windthrown Norway spruce - dominated forests. *Forests* 9: 280.
- Karolewski, P., Grzebyta, J., Oleksyn, J. & Giertych, M.J. 2007. Effects of temperature on larval survival rate and duration of development in *Lymantria monacha* (L.) on needles of *Pinus sylvestris* (L.) and in *L. dispar* (L.) on leaves of *Quercus robur* (L.). *Polish Journal of Acology* 55: 595–600.
- Kärvemo, S., Johansson, V., Schroeder, M. & Ranius, T. 2016. Local colonization-extinction dynamics of a tree-killing bark beetle during a large-scale outbreak. *Ecosphere* 7: e01257.
- Kasumovic, L., Lindelow, A. & Hrasovec, B. 2019. Overwintering strategy of *Ips typographus* L. (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) in Croatian spruce forests on lowest elevation. *Sumarski List* 143: 19–24.
- Kautz, M., Meddens, A.J.H., Hall, R.J. & Arneth, 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.
- Keena, M.A. & Shi, J. 2019. Effects of temperature on first instar *Lymantria* (Lepidoptera: Erebidae) survival and development with and without wood. *Environmental Entomology* 48: 655–666.
- Keena, M.A. 2003. Survival and development of *Lymantria monacha* (Lepidoptera: Lymantriidae) on North American and introduced Eurasian tree species. *Journal of Economic Entomology* 96: 43–52.
- Kereselidze, M., Draganova, S., Pilarska, D. & Linde, A. 2014. Susceptibility of *Lymantria monacha* and *L. dispar* to the entomopathogenic fungus *Isaria fumosorosea* Wize. *Sumarski List* 138: 185–191.
- Kivimäenpää, M., Ghimire, R.P., Sutinen, S., Häikiö, E., Kasurinen, A., Holopainen, T. & Holopainen, J.K. 2016. Increases in volatile organic compound emissions of Scots pine in response to elevated ozone and warming are modified by herbivory and soil nitrogen availability. *European Journal of Forest Research* 135: 343–360.
- Kloucek, T., Komarek, J., Surovy, P., Hrach, K., Janata, P. & Vasicek, B. 2019. The use of UAV mounted sensors for precise detection of bark beetle infestation. *Remote Sensing* 11: 1561.
- Kocacevik, S., Sevim, A., Eroglu, M., Demirbag, Z. & Demir, I. 2016. Virulence and horizontal transmission of *Beauveria pseudobassiana* SA Rehner & Humber in *Ips sexdentatus* and *Ips typographus* (Coleoptera: Curculionidae). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 40: 241–248.

- Kopke, D., Beyaert, I., Gershenzon, J., Hilker, M. & Schmidt, A. 2010. Species-specific responses of pine sesquiterpene synthases to sawfly oviposition. *Phytochemistry* 71: 909–917.
- Koren, M., Jakus, R., Zapotocky, M., Barka, I., Holusa, J., Duraciova, R. & Blazenec, M. 2021. Assessment of machine learning algorithms for modeling the spatial distribution of bark beetle infestation. *Forests* 12: 395.
- Korolyova, N., Buechling, A., Duraciova, R., Zabihi, K., Turcani, M., Svoboda, M., Blaha, J., Swarts, K., Polacek, M., Hradecky, J., Cervenka, J., Nemcak, P., Schlyter, F. & Jakus, R. 2022: The Last Trees Standing: Climate modulates tree survival factors during a prolonged bark beetle outbreak in Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 322: 109025.
- Kortmann, M., Hurst, J., Brinkmann, R., Heurich, M., Gonzalez, R.S., Muller, J. & Thorn, S. 2018. Beauty and the beast: how a bat utilizes forests shaped by outbreaks of an insect pest. *Animal Conservation* 21: 21–30.
- Kosunen, M., Kantola, T., Starr, M., Blomqvist, M., Talvitie, M. & Lyytikäinen-Saarenmaa, P. 2017. Influence of soil and topography on defoliation intensity during an extended outbreak of the common pine sawfly (*Diprion pini* L.). *iForest – Biogeoscience and Forestry* 10: 164–171.
- Kuhn, A., Hautier, L. & San Martin, G. 2022: Do pheromone traps help to reduce new attacks of *Ips typographus* at the local scale after a sanitary cut? *PeerJ* 10: e14093.
- Kukarskih, V.V., Devi, N.M., Bubnov, M.O., Komarova, A.V. & Agaforov, L.I. 2022: Radial growth of Scots pine in urban and rural populations of Ekaterinburg megalopolis. *Dendrochronologia* 74: 125974.
- Kurihara, K., Ito, T., Sato, Y., Uesugi, T., Yamauchi, S., Komatsu, M., Saito, S., Domae, M. & Nishino, H. 2022: Management of Nuisance Macromoths in Expressways Through Academic- Industrial Collaboration: Light Trap Designed on the Basis of Moths' Preferences for Light Attributes. *Zoological Science* 39: 307–319.
- Lahr, E.C. & Krokene, P. 2013. Conifer stored resources and resistance to a fungus associated with the spruce bark beetle *Ips typographus*. *PLOS One* 8: e72405.
- Lasch-Born, P., Suckow, F., Gutsch, M., Reyer, C., Hauf, Y., Murawski, A. & Pilz, T. 2015. Forests under climate change: potential risks and opportunities. *Meteorologische Zeitschrift* 24: 157–172.
- Lindmark, M., Wallin, E.A. & Jonsson, B.G. 2022: Protecting forest edges using trap logs - Limited effects of associated push-pull strategies targeting *Ips typographus*. *Forest Ecology and Management* 505: 119886.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M.J. & Marchetti, M. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259: 698–709.

- Linnakoski, R., Lasarov, I., Veteli, P., Tikkanen, O.-P., Viiri, H., Jyske, T., Kasanen, R., Duong, T.A. & Wingfield, M.J. 2021. Filamentous fungi and yeasts associated with mites phoretic on *Ips typographus* in Eastern Finland. *Forests* 12: 743.
- Linnakoski, R., Mahilainen, S., Harrington, A., Vanhanen, H., Eriksson, M., Mehtätalo, L., Pappinen, A. & Wingfield, M.J. 2016. Seasonal succession of fungi associated with *Ips typographus* beetles and their phoretic mites in an outbreak region of Finland. *PLOS One* 11: e0155622.
- Luoranen, J. & Viiri, H. 2012. Soil preparation reduces pine weevil (*Hylobius abietis* (L.)) damage on both peatland and mineral soil sites one year after planting. *Silva Fennica* 46: 151–161.
- Luoranen, J., Laine, T. & Saksa, T. 2022: Field performance of sand-coated (Conniflex (R)) Norway spruce seedlings planted in mounds made by continuously advancing moulder and in undisturbed soil. *Forest Ecology and Management* 517: 120259.
- 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.
- Luoranen, J. & Viiri, H. 2021. Comparison of the planting success and risks of pine weevil damage on mineral soil and drained peatland sites three years after planting. *Silva Fennica* 55: 10528.
- Mageroy, M.H., Christiansen, E., Långström, B., Borg-Karlson, A.K., Solheim, H., Björklund, N., Zhao, T., Schmidt, A., Fossdal, C.G. & Krokene, P. 2020. Priming of inducible defenses protects Norway spruce against tree-killing bark beetles. *Plant Cell and Environment* 43: 420–430.
- Majdak, A., Jakus, R. & Blazenec, M. 2021. Determination of differences in temperature regimes on healthy and bark-beetle colonised spruce trees using a handheld thermal camera. *iForest – Biosciences and Forestry* 14: 203–211.
- Manak, V., Björklund, N., Lenoir, L. & Nordlander, G. 2015. The effect of red wood ant abundance on feeding damage by the pine weevil *Hylobius abietis*. *Agricultural and Forest Entomology* 17: 57–63.
- Manak, V., Björklund, N., Lenoir, L. & Nordlander, G. 2017. Testing associational resistance against pine weevils mediated by *Lasius* ants attending conifer seedlings. *Journal of Applied Entomology* 141: 411–416.
- Manak, V., Björklund, N., Lenoir, L., Knape, J. & Nordlander, G. 2016. Behavioural responses of pine weevils to non-consumptive interactions with red wood ants. *Journal of Zoology* 299: 10–16.
- Mäntylä, E., Kipper, S. & Hilker, M. 2020. Insectivorous birds can see and smell systemically herbivore-induced pines. *Ecology and Evolution* 10: 9358–9370.
- Mäntylä, E., Kleier, S., Kipper, S. & Hilker, M. 2017. The attraction of insectivorous tit species to herbivore-damaged Scots pines. *Journal of Ornithology* 158: 479–491.

- Mäntylä, E., Kleier, S., Lindstedt, C., Kipper, S. & Hilker, M. 2018. Insectivorous birds are attracted by plant traits induced by insect egg deposition. *Journal of Chemical Ecology* 44: 1127–1138.
- Marx, A. & Kleinschmit, B. 2017. Sensitivity analysis of RapidEye spectral bands and derived vegetation indices for insect defoliation detection in pure Scots pine stands. *iForest – Biosciences and Forestry* 10: 659–668.
- Mastro, V.C., Munson, A.S., Wang, B.D., Freyman, T., Humble, L.M. & Coyle, D. 2021. History of the Asian *Lymantria* species program: A unique pathway risk mitigation strategy. *Journal of Integrated Pest Management* 12: 31.
- McNamara, L., Dolan, S.K., Walsh, J.M.D., Stephens, J.C., Glare, T.R., Kavanagh, K. & Griffin, C.T. 2019. Oosporein, an abundant metabolite in *Beauveria caledonica*, with a feedback induction mechanism and a role in insect virulence. *Fungal Biology* 123: 601–610.
- McNamara, L., Kapranas, A., Williams, C.D., O'Tuama, P., Kavanagh, K. & Griffin, C.T. 2018. Efficacy of entomopathogenic fungi against large pine weevil, *Hylobius abietis*, and their additive effects when combined with entomopathogenic nematodes. *Journal of Pest Science* 91: 1407–1419.
- Melin, M., Viiri, H., Tikkanen, O.-P., Elfving, R. & Neuvonen, S. 2020. From a rare inhabitant into a potential pest - status of the nun moth in Finland based on pheromone trapping. *Silva Fennica* 54: 10262.
- Melin, M., Ylioja, T., Aarnio, L., Hamunen, K., Nevalainen, S., Pouttu, A. & Viiri, H. 2021: Emergence levels of pine shoot beetles from roundwood piles of Scots pine and the cascading damage in the surrounding forests. *Silva Fennica* 55: 10525.
- Melin, M., Ylioja, T., Aarnio, L., Hamunen, K., Nevalainen, S., Pouttu, A. & Viiri, H. 2022: Ytimenävertäjien lisääntyminen metsässä varastoiduissa mäntypinoissa sekä tästä aiheutuva seurannaistuhon riski pinoja ympäröiville metsille. *Metsätieteen aikakauskirja* 2022: 10692.
- Mezei, P., Blazenec, M. & Grodzki, W., Skvarenina, J. & Jakus, R. 2017. Influence of different forest protection strategies on spruce tree mortality during a bark beetle outbreak. *Annals of Forest Science* 74: 65.
- Mezei, P., Potterf, M., Skvarenina, J., Rasmussen, J.G. & Jakus, R. 2019. Potential solar radiation as a driver for bark beetle infestation on a landscape scale. *Forests* 10: 604.
- Migas-Mazur, R., Kycko, M., Zwijacz-Kozica, T. & Zagajewski, B. 2021. Assessment of sentinel-2 images, support vector machines and change detection algorithms for bark beetle outbreaks mapping in the Tatra mountains. *Remote Sensing* 13: 3314.
- Modlinger, R. & Novotny, P. 2015. Quantification of time delay between damages caused by windstorms and by *Ips typographus*. *Central European Forestry Journal* 61: 221–231.
- Möller, K., Hentschel, R., Wenning, A. & Schröder, J. 2017. Improved outbreak prediction for common pine sawfly (*Diprion pini* L.) by analyzing floating 'climatic windows' as keys for changes in voltinism. *Forests* 8: 319.

- Morgan, R.E., de Groot, P. & Smith, S.M. 2004. Susceptibility of pine plantations to attack by the pine shoot beetle (*Tomicus piniperda*) in southern Ontario. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2528–2540.
- Müller, M., Olsson, P.O., Eklundh, L., Jamali, S. & Ardo, J. 2022: Features predisposing forest to bark beetle outbreaks and their dynamics during drought. *Forest Ecology and Management* 523: 120480.
- Munoz-Adalia, E.J., Sanz-Ros, A.V., Flores-Pacheco, J.A., Hantula, J., Diez, J.J., Vainio, E.J. & Fernandez, M. 2017. *Sydowia polyspora* dominates fungal communities carried by two *Tomicus* species in pine plantations threatened by *Fusarium circinatum*. *Forests* 8: 127.
- Munro, H.L., Gandhi, K.J.K., Barnes, B.F., Montes, C.R., Nowak, J.T., Shepherd, W.P., Villari, C. Sullivan, B.T. 2020. Electrophysiological and behavioral responses of *Dendroctonus frontalis* and *D. terebrans* (Coleoptera: Curculionidae) to resin odors of host pines (*Pinus* spp.). *Chemoecology* 30: 215–231.
- Nadel, R.L., Wingfield, M.J., Scholes, M.C., Lawson, S.A. & Slippers, B. 2012. The potential for monitoring and control of insect pests in Southern Hemisphere forestry plantations using semiochemicals. *Annals of Forest Science* 69: 757–767.
- Nagel, R., Berasategui, A., Paetz, C., Gershenzon, J. & Schmidt, A. 2014. Overexpression of an isoprenyl diphosphate synthase in spruce leads to unexpected terpene diversion products that function in plant defense. *Plant Physiology* 164: 555–569.
- Nardi, D., Jactel, H., Pagot, E., Samalens, J.C. & Marini, L. 2023: Drought and stand susceptibility to attacks by the European spruce bark beetle: A remote sensing approach. *Agricultural and Forest Entomology* 25: 119–129.
- Näsi, R., Honkavaara, E., Blomqvist, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Hakala, T., Viljanen, N., Kantola, T. & Holopainen, M. 2018. Remote sensing of bark beetle damage in urban forests at individual tree level using a novel hyperspectral camera from UAV and aircraft. *Urban Forestry & Urban Greening* 30: 72–83.
- Näsi, R., Honkavaara, E., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Blomqvist, M., Litkey, P., Hakala, T., Viljanen, N., Kantola, T., Tanhuanpää, T. & Holopainen, M. 2015. Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level. *Remote Sensing* 7: 15467–15493.
- Netherer, S., Kandasamy, D., Jirosova, A., Kalinova, B., Schebeck, M. & Schlyter, F. 2021. Interactions among Norway spruce, the bark beetle *Ips typographus* and its fungal symbionts in times of drought. *Journal of Pest Science* 94: 591–614.
- Netherer, S., Panassiti, B., Pennerstorfer, J. & Matthews, B. 2019. Acute drought is an important driver of bark beetle infestation in Austrian Norway spruce stands. *Frontiers in Forests and Global Change* 2: 39.
- Netherer, S., Schebeck, M., Morgante, G., Rentsch, V. & Kirisits, T. 2022. European Spruce Bark Beetle, *Ips typographus* (L.) Males Are Attracted to Bark Cores of Drought-Stressed Norway Spruce Trees with Impaired Defenses in Petri Dish Choice Experiments. *Forests* 13: 537.

- Nevalainen, S., Sirkiä, S., Peltoniemi, M. & 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.
- Nikolov, C., Konopka, B., Kajba, M., Galko, J., Kunca, A. & Jansky, L. 2014. Post-disaster forest management and bark beetle outbreak in Tatra National Park, Slovakia. *Mountain Research and Development* 34: 326–335.
- Nordlander, G., Hellqvist, C., Johansson, K. & Nordenhem, H. 2011. Regeneration of European boreal forests: Effectiveness of measures against seedling mortality caused by the pine weevil *Hylobius abietis*. *Forest Ecology and Management* 262: 2354–2363.
- Nordlander, G., Mason, E.G., Hjelm, K., Nordenhem, H. & Hellqvist, C. 2017. Influence of climate and forest management on damage risk by the pine weevil *Hylobius abietis* in northern Sweden. *Silva Fennica* 51: 7751.
- Nybakken, L., Floistad, I.S., Mageroy, M., Lomsdal, M., Stralberg, S., Krokene, P. & Asplund, J. 2021. Constitutive and inducible chemical defences in nursery-grown and naturally regenerated Norway spruce (*Picea abies*) plants. *Forest Ecology and Management* 491: 119180.
- Oeser, J., Pflugmacher, D., Senf, C., Heurich, M. & Hostert, P. 2017. Using intra-annual Landsat time series for attributing forest disturbance agents in Central Europe. *Forests* 8: 251.
- Öhrn, P., Berlin, M., Elfstrand, M., Krokene, P. & Jönsson, A.M. 2021. Seasonal variation in Norway spruce response to inoculation with bark beetle-associated bluestain fungi one year after a severe drought. *Forest Ecology and Management* 496: 119443.
- Öhrn, P., Björklund, N. & Långström, B. 2018. Occurrence, performance and shoot damage of *Tomicus piniperda* in pine stands in southern Sweden after storm-felling. *Journal of Applied Entomology* 142: 854–862.
- Öhrn, P., Långström, B., Lindelöw, A. & 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. <https://doi.org/10.1111/afe.12044>
- Olenici, N., Bouriaud, O. & Manea, I.A. 2018. Efficient conifer seedling protection against pine weevil damage using neonicotinoids. *Baltic Forestry* 24: 201–209.
- Oliva, J., Stenlid, J., Grönkvist-Wichmann, L., Wahlström, K., Jonsson, M., Drobyshev, I. & Stenström, E. 2016. Pathogen-induced defoliation of *Pinus sylvestris* leads to tree decline and death from secondary biotic factors. *Forest Ecology and Management* 379: 273–280.
- Oliva, J., Thor, M. & Stenlid, J. 2010. Reaction zone and periodic increment decrease in *Picea abies* trees infected by *Heterobasidion annosum* s.l. *Forest Ecology and Management* 260: 692–698.
- Olsson, P.O., Kantola, T., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Jonsson, A.M. & Eklundh, L. 2016. Development of a method for monitoring of insect induced forest defoliation - limitation of MODIS data in Fennoscandian forest landscapes. *Silva Fennica* 50: 1495.

- Ozcelik, M.S., Tomaskova, I., Surovy, P. & Modlinger, R. 2022: Effect of Forest Edge Cutting on Transpiration Rate in *Picea abies* (L.) H. Karst. *Forests* 13: 1238.
- Pan, Y., Lu, J., Chen, P., Yu, Z.F., Zhang, H.H., Ye, H. & Zhao, T. 2020. Ophiostomatales (Ascomycota) associated with *Tomicus* species in southwestern China with an emphasis on *Ophiostoma canum*. *Journal of Forest Research* 31: 2549–2562
- Paraschiv, M. & Isaia, G. 2020. Disparity of phoresy in mesostigmatid mites upon their specific carrier *Ips typographus* (Coleoptera: Scolytinae). *Insects* 11: 771.
- Park, M.G., Ren, Y.L. & Lee, B.H. 2021. Preliminary study to evaluate ethanedinitrile (C₂N₂) for quarantine treatment of four wood destroying pests. *Pest Management Science* 77: 5213–5219.
- Peral-Aranega, E., Saati-Santamaria, Z., Kolarik, M., Rivas, R. & Garcia-Fraile, P. 2020. Bacteria belonging to *Pseudomonas typographi* sp. nov. from the bark beetle *Ips typographus* have genomic potential to aid in the host ecology. *Insects* 11: 593.
- Perot, T., Vallet, P. & Archaux, F. 2013. Growth compensation in an oak-pine mixed forest following an outbreak of pine sawfly (*Diprion pini*). *Forest Ecology and Management* 295: 155–161.
- Pietzsch, B.W.; Peter, F.J.; Berger, U. 2021. The effect of sanitation felling on the spread of the European spruce bark beetle - an individual-based modeling approach. *Frontiers in Forests and Global Change* 4: 704930.
- Pilarska, D., Hajek, A.E., Keena, M., Linde, A., Kereselidze, M., Georgiev, G., Georgieva, M., Mirchev, P., Takov, D. & Draganova, S. 2016. Susceptibility of larvae of nun moth, *Lymantria monacha* (Linnaeus, 1758) (Lepidoptera), to the entomopathogenic fungus *Entomophaga maimaiga* Humber, Shimazu and Soper (Entomophthorales) under laboratory and field conditions. *Acta Zoologica Bulgarica* 68: 117–126.
- Piri, T., Viiri, H. & Hyvönen, J. 2020. Does stump removal reduce pine weevil and other damage in Norway spruce regenerations? Results of a 12-year monitoring period. *Forest Ecology and Management* 465: 118098.
- Pirtskhalava-Karpova, N.R., Karpov, A.A., Kozlovski, E.E. & Grishchenko, M.Y. 2021. Protection of spruce forests from outbreaks of *Ips typographus* (Review). *Lesnoy Zhurnal* 4: 55–67.
- Poland, T.M. & Haack, R.A. 2000. Pine shoot beetle, *Tomicus piniperda* (Col., Scolytidae), responses to common green leaf volatiles. *Journal of Applied Entomology* 124: 63–69.
- Potterf, M., Svitok, M., Mezei, P., Jarcuska, B., Jakus, R., Blazenec, M. & Hlásny, T. 2022: Contrasting Norway spruce disturbance dynamics in managed forests and strict forest reserves in Slovakia. *Forestry* 2022: cpac045.
- Puentes, A., Högberg, K.A., Björklund, N. & Nordlander, G. 2018. Novel avenues for plant protection: plant propagation by somatic embryogenesis enhances resistance to insect feeding. *Frontiers of Plant Science* 9: 1553.

- Puentes, A., Zhao, T., Lundborg, L., Björklund, N. & Borg-Karlson, A.K. 2021. Variation in methyl jasmonate-induced defense among Norway spruce clones and trade-offs in resistance against a fungal and an insect pest. *Frontiers in Plant Science* 12: 678959.
- Pureswaran, D.S., Roques, A. & Battisti, A. 2018. Forest insects and climate change. *Current Forestry Reports* 4: 35–50.
- Rabalski, L., Krejmer-Rabalska, M., Skrzecz, I., Wasag, B. & Szewczyk, B. 2016. An alphabaculovirus isolated from dead *Lymantria dispar* larvae shows high genetic similarity to baculovirus previously isolated from *Lymantria monacha* – an example of adaptation to a new host. *Journal of Invertebrate Pathology* 139: 56–66.
- Rachwald, A., Apoznanski, G., Thor, K., Wiecek, M. & Zapart, A. 2022: Nursery Roosts Used by Barbastelle Bats, *Barbastella barbastellus* (Schreber, 1774) (Chiroptera: Vespertilionidae) in European Lowland Mixed Forest Transformed by Spruce Bark Beetle, *Ips typographus* (Linnaeus, 1758) (Coleoptera: Curculionidae). *Forests* 13: 1073.
- Rahman, A., Viiri, H. & Tikkanen, O.-P. 2018. Is stump removal for bioenergy production effective in reducing pine weevil (*Hylobius abietis*) and *Hylastes* spp. breeding and feeding activities at regeneration sites? *Forest Ecology and Management* 424: 184–190.
- Rahman, A., Viiri, H., Pelkonen, P. & Khanam, T. 2015. Have stump piles any effect on the pine weevil (*Hylobius abietis* L.) incidence and seedling damage? *Global Ecology and Conservation* 3: 424–432.
- Rasheed, M.U., Julkunen-Tiitto, R., Kivimäenpää, M., Riikonen, J. & Kasurinen, A. 2020. Responses of soil-grown Scots pine seedlings to experimental warming, moderate nitrogen addition and bark herbivory in a three-year field experiment. *Science of the Total Environment* 733: 139110.
- Resnerova, K., Schovankova, J., Horak, J. & Holusa, J. 2022: Relationships between the fecundity of bark beetles and the presence of antagonists. *Scientific Reports* 12: 7573.
- Reyer, C.P.O., Bathgate, S., Blennow, K., Borges, J.G., Bugmann, H., Delzon, S., Faias, S.P., Garcia-Gonzalo, J., Gardiner, B., Gonzalez-Olabarria, J.R., Gracia, C., Hernandez, J.G., Kellomäki, S., Kramer, K., Lexer, M.J., Lindner, M., van der Maaten, E., Maroschek, M., Muys, B., Nicoll, B., Palahi, M., Palma, J.H.N., Paulo, J.A., Peltola, H., Pukkala, T., Rammer, W., Ray, D., Sabate, S., Schelhaas, M.J., Seidl, R., Temperli, C., Tome, M., Yousefpour, R., Zimmermann, N.E. & Hanewinkel, M. 2017. Are forest disturbances amplifying or canceling out climate change-induced productivity changes in European forests? *Environmental Research Letters* 12: 34027.
- Rissanen, K., Hölttä, T., Back, J., Rigling, A., Wermelinger, B. & Gessler, A. 2021. Drought effects on carbon allocation to resin defences and on resin dynamics in old-grown Scots pine. *Environmental and Experimental Botany* 185: 104410.
- Roitto, M., Rautio, P., Markkola, A., Julkunen-Tiitto, R., Varama, M., Saravesi, K. & Tuomi, J. 2009. Induced accumulation of phenolics and sawfly performance in Scots pine in response to previous defoliation. *Tree Physiology* 29: 207–216.

- Romon, P., Aparicio, D., Palacios, F., Iturrondobeitia, J.C., Hance, T. & Goldarazena, A. 2017. Seasonal terpene variation in needles of *Pinus radiata* (Pinales: Pinaceae) trees attacked by *Tomicus piniperda* (Coleoptera: Scolytinae) and the effect of limonene on beetle aggregation. *Journal of Insect Science* 17: 98.
- Sampedro, L., Moreira, X. & Zas, R. 2011. Resistance and response of *Pinus pinaster* seedlings to *Hylobius abietis* after induction with methyl jasmonate. *Plant Ecology* 212: 397–401.
- Sanguesa-Barreda, G., Linares, J.C. & Camarero, J.J. 2015. Reduced growth sensitivity to climate in bark-beetle infested Aleppo pines: Connecting climatic and biotic drivers of forest dieback. *Forest Ecology and Management* 357: 126–137.
- Sarikaya, O., Sarikaya, A.G., Sen, I. & Gencal, T. 2022: Larvicidal Effect of Some Essential Oils Against Larvae of the European Pine Sawfly [*Neodiprion Sertifer* (Geoff.)]. *International Journal of Life Science and Pharma Research* 12: L29–L34.
- Schaffer, S. & Koblmüller, S. 2020. Unexpected diversity in the host-generalist oribatid mite *Paraleius leontonychus* (Oribatida, Scheloribatidae) phoretic on Palearctic bark beetles. *PeerJ* 8: e9710.
- Schebeck, M., Schopf, A., Ragland, G.J., Stauffer, C. & Biedermann, P.H.W. 2023: Evolutionary ecology of the bark beetles *Ips typographus* and *Pityogenes chalcographus*. *Bulletin of Entomological Research* 113: 1–10.
- Schebeck, M., Wrzosek, M., Clausi, M., Tarasco, E., Tkaczuk, C. & Wegensteiner, R. 2016. First record of *Beauveria bassiana* on *Tomicus minor* in Sicily. *Bulletin of Insectology* 69: 311–317.
- Schroeder, M. & Cocos, D. 2018. Performance of the tree-killing bark beetles *Ips typographus* and *Pityogenes chalcographus* in non-indigenous lodgepole pine and their historical host Norway spruce. *Agricultural and Forest Entomology* 20: 347–357.
- Sebold, J., Senf, C. & Seidl, R. 2021. Human or natural? Landscape context improves the attribution of forest disturbances mapped from Landsat in Central Europe. *Remote Sensing of Environment* 262: 112502.
- Seidl, R. & Rammer, W. 2017. Climate change amplifies the interactions between wind and bark beetle disturbances in forest landscapes. *Landscape Ecology* 32: 1485–1498.
- Seidl, R., Müller, J., Hothorn, T., Bassler, C., Heurich, M. & Kautz, M. 2016. Small beetle, large-scale drivers: how regional and landscape factors affect outbreaks of the European spruce bark beetle. *Journal of Applied Ecology* 53: 530–540.
- Seidl, R., Schelhaas, M.J., Rammer, W. & Verkerk, P.J. 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change* 4: 806–810.
- Selfa, J., Polidori, C., Asis, J.D., De Pedro, L., Pujade-Villar, J. & Tormos, J. 2017. Random pattern of parasitism and female-biased sex ratio in the egg parasitoid *Neochrysocharis formosa* attacking the pine sawfly *Diprion pini* in mountain forests of Spain. *Phytoparasitica* 45: 85–93.

- Senf, C., Pflugmacher, D., Hostert, P. & Seidl, R. 2017. Using Landsat time series for characterizing forest disturbance dynamics in the coupled human and natural systems of Central Europe. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 130: 453–463.
- Sharma, A, Sandhi, R.K. & Reddy, GVP. 2019. A Review of interactions between insect biological control agents and semiochemicals. *Insects* 10: 439.
- Sikström, U., Hjelm, K., Hanssen, K.H., Saksa, T. & Wallertz, K. 2020. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia - a review. *Silva Fennica* 54: 10172.
- Sikström, U., Jacobson, S., Pettersson, F. & Weslien, J. 2011. Crown transparency, tree mortality and stem growth of *Pinus sylvestris*, and colonization of *Tomicus piniperda* after an outbreak of *Gremmeniella abietina*. *Forest Ecology and Management* 262: 2108–2119.
- Silva, X., Terhonen, E., Sun, H., Kasanen, R., Heliövaara, K., Jalkanen, R. & Asiegbu, F.O. 2015. Comparative analyses of fungal biota carried by the pine shoot beetle (*Tomicus piniperda* L.) in northern and southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 30: 497–506.
- Simsek, Z. & Kondur, Y. 2017a. Determination of the natural enemies of *Diprion pini* L. (Hymenoptera: Diprionidae) in Cankiri, Turkey. *Frasenius Environmental Bulletin* 26: 6749–6759.
- Simsek, Z. & Kondur, Y. 2017b. Determination of fight period of *Diprion pini* L. (Hymenoptera: Diprionidae) in Sankiri Scots pine forests via pheromone traps. *Kastamanu University Journal of Forestry Faculty* 17: 194–208.
- Skrzecz, I., Sukovata, L., Jablonski, T., Sowinska, A. & Szmidla, H. 2021. Spatio-temporal distribution of *Hylobius abietis* in Scots pine stands - implications for pest monitoring. *Journal of Pest Science* 94: 1393–14040.
- Slawski, M., Mokrzycki, T., Perlinski, S., Rutkiewicz, A. & Slawska, M. 2019. Distribution of wintering pre-imaginal stages of the great web-spinning pine sawfly *Acantholyda posticalis* Mats. in Scots pine stands being the outbreak centres. *Sylwan* 163: 556–563.
- Sotola, V., Holusa, J., Kuzelka, K. & Kula, E. 2021. Felled and lure trap trees with uncut branches are only weakly attractive to the double-spined bark beetle, *Ips duplicatus*. *Forests* 12: 941.
- Sramel, N., Kavcic, A., Kolsek, M. & de Groot, M. 2021. Estimating the most effective and economical pheromone for monitoring the European spruce bark beetle. *Journal of Applied Entomology* 145: 312–325.
- Stanca-Moise, C., Brereton, T. & Blaj, R. 2017. The control of the defoliator *Lymantria monacha* L. populations (Lepidoptera: Lymantridae) by making use of pheromone traps in the forest range Miercurea Sibuiului (Romania) in the period 2011–2015. *Scientific Papers – Series Management Economic Engineering in Agriculture and Rural Development* 17: 327–331.
- Stribrska, B., Hradecky, J., Cepl, J., Tomaskova, I., Jakus, R., Modlinger, R., Netherer, S. & Jirosova, A. 2022. Forest margins provide favourable microclimatic niches to swarming

- bark beetles, but Norway spruce trees were not attacked by *Ips typographus* shortly after edge creation in a field experiment. *Forest Ecology and Management* 506: 119950.
- Stursova, M., Snajdr, J., Cajthaml, T., Barta, J., Santruckova, H. & Baldrian, P. 2014. When the forest dies: the response of forest soil fungi to a bark beetle-induced tree dieback. *ISME Journal* 8: 1920–1931.
- Stych, P., Jerabkova, B., Lastovicka, J., Riedl, M. & Paluba, D. 2019. A comparison of WorldView-2 and Landsat 8 images for the classification of forests affected by bark beetle outbreaks using a support vector machine and a neural network: A case study in the Sumava mountains. *Geosciences* 9: 396.
- Suarez-Vidal, E., Sampedro, L., Voltas, J., Serrano, L., Notivol, E. & Zas, R. 2019. Drought stress modifies early effective resistance and induced chemical defences of Aleppo pine against a chewing insect herbivore. *Environmental and Experimental Botany* 162: 550–559.
- Takov, D., Barta, M., Toshova, T., Doychev, D. & Pilarska, D. 2022: On the pathogenicity of *Metarhizium pemphigi* against *Ips typographus* L. *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences* 75: 554–560.
- Tan, J.Y., Wainhouse, D., Day, K.R. & Morgan, G. 2010. Flight ability and reproductive development in newly-emerged pine weevil *Hylobius abietis* and the potential effects of climate change. *Agricultural and Forest Entomology* 12: 427–434.
- Tanin, S.M, Kandasamy, D. & Krokene, P. 2021. Fungal interactions and host tree preferences in the spruce bark beetle *Ips typographus*. *Frontiers in Microbiology* 12: 695167.
- Tanona, M. & Czarnota, P. 2019. Natural disturbances of the structure of Norway spruce forests in Europe and their impact on the preservation of epixylic lichen diversity: a review. *Ecological Questions* 30: 7–17.
- Teikari A. 2019. Metsäsijoittamisen muodot ja niiden vertailu. Opinnäytetyö, Lahden ammattikorkeakoulu, 50 s.
- Thom, D., Rammer, W. & Seidl, R. 2017. The impact of future forest dynamics on climate: interactive effects of changing vegetation and disturbance regimes. *Ecological Monographs* 87: 665–684.
- Tiihonen, P. 1970. Ruskean mäntypistiäisen (*N. Sertifer* Geoffr.) tuhojen vaikutuksesta männiköiden kasvuun Etelä-Pohjanmaalla, Pohjois-Satakunnassa ja Länsi-Uudellamaalla vuosina 1960–1967. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 71: 1–21.
- Tiiva, P., Häikiö, E. & Kasurinen, A. 2018. Impact of warming, moderate nitrogen addition and bark herbivory on BVOC emissions and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings. *Tree Physiology* 38: 1461–1475.

- Tiiva, P., Julkunen-Tiitto, R., Häikiö, E. & Kasurinen, A. 2019. Belowground responses of Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings to experimental warming, moderate nitrogen addition, and bark herbivory. *Canadian Journal of Forest Research* 49: 647–660.
- Tobin, P.C. & Raffa, K.F. 2022: Spread rates do not necessarily predict outbreak dynamics in a broadly distributed invasive insect. *Forest Ecology and Management* 520: 120357.
- Trubin, A., Mezei, P., Zabihi, K., Surovy, P. & Jakus, R. 2022: Northernmost European spruce bark beetle *Ips typographus* outbreak: Modelling tree mortality using remote sensing and climate data. *Forest Ecology and Management* 505: 119829.
- Tudoran, A., Bylund, H., Nordlander, G., Oltean, I. & Puentes, A. 2021a. Using associational effects of European beech on Norway spruce to mitigate damage by a forest regeneration pest, the pine weevil *Hylobius abietis*. *Forest Ecology and Management* 486: 118980.
- Tudoran, A., Nordlander, G., Karlberg, A. & Puentes, A. 2021b. A major forest insect pest, the pine weevil *Hylobius abietis*, is more susceptible to Diptera- than Coleoptera-targeted *Bacillus thuringiensis* strains. *Pest Management Science* 77: 1303–1315.
- Tumialis, D., Skrzecz, I., Mazurkiewicz, A., Pezowicz, E. & Goral, K. 2013. Sensitivity of *Hylobius abietis* (L.) larvae on native species and isolates of entomopathogenic nematodes. *Sylvan* 157: 769–794.
- Uhlikova, H., Nakladal, O., Jakubcova, P. & Turcani, M. 2011. Outbreaks of the nun moth (*Lymantria monacha*) and historical risk of regions in the Czech Republic. *Sumarski List* 135: 477–486.
- Vakula, J., Zubrik, M., Galko, J., Gubka, A., Kunca, A., Nikolov, C. & Bosel'a, M. 2015. Influence of selected factors on bark beetle outbreak dynamics in the Western Carpathians. *Central European Forestry Journal* 61: 149–156.
- 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.
- Vanicka, H., Lukasova, K. & Holusa, J. 2016. Infection levels of pathogens in the European spruce bark beetle *Ips typographus* (Coleoptera: Curculionidae) at managed and unmanaged forest locations: a meta-data analysis. *Central European Forestry Journal* 62: 216–222.
- Vastaranta, M., Kantola, T., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., Kankare, V., Wulder, M.A., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2013. Area-based mapping of defoliation of Scots pine stands using airborne scanning LiDAR. *Remote Sensing* 5: 1220–1234.
- Vasyukevich, V.V., Titkina, C.N., Davidovich, E.A. & Vasyukevich, N.V. 2013. Changes in boundaries of gypsy moth and nun moth (*Lymantria dispar* and *Lymantria monacha*, Lymantriidae, Lepidoptera) ranges due to the global warming: a model approach. *Zoologicheskyy Zhurnal* 92: 1377–1382.
- Vega, F.E. & Hofstetter, R.W. (eds.) 2015. Bark beetles. Elsevier. ISBN 978-0-12-417156-5.

- Vele, A. 2022a: Effect of moss cover on the abundance of the large pine weevil (*Hylobius abietis*). Reports of Forestry 67: 213–216.
- Vele, A. 2022b: Pine or spruce? Comparison of stump suitability for the large pine weevil *Hylobius abietis* (L.) development. Sylwan 166: 114–122.
- Venäläinen, A., Lehtonen, I., Laapas, M., Ruosteenoja, K., Tikkanen, O.-P., Viiri, H., Ikonen, V.-P. & Peltola, H. 2020. Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: A literature review. Global Change Biology 26: 4178–4196.
- Viiri, H. & Luoranen, J. 2017. Deep planting of Norway spruce seedlings: effects on pine weevil feeding damage and growth. Canadian Journal of Forest Research 47: 1468–1473.
- Voolma, K., Hiiesaar, K., Williams, I.H., Ploomi, A. & Jogar, K. 2016. Cold hardiness in the pre-imaginal stages of the great web-spinning pine-sawfly *Acantholyda posticalis*. Agricultural and Forest Entomology 18: 432–436.
- Wadke, N., Kandasamy, D., Vogel, H., Lah, L., Wingfield, B.D., Paetz, C., Wright, L.P., Gershenson, J. & Hammerbacher, A. 2016. The bark-beetle-associated fungus, *Endoconidiophora polonica*, utilizes the phenolic defense compounds of its host as a carbon source. Plant Physiology 171: 914–931.
- Wallertz, K. & Petersson, M. 2011. Pine weevil damage to Norway spruce seedlings: effects of nutrient-loading, soil inversion and physical protection during seedling establishment. Agricultural and Forest Entomology 13: 413–421.
- Wallertz, K., Björklund, N., Hjelm, K., Petersson, M. & Sundblad, L.G. 2018. Comparison of different site preparation techniques: quality of planting spots, seedling growth and pine weevil damage. New Forests 49: 705–722.
- Wallertz, K., Hanssen, K.H., Hjelm, K. & Floistad, I.S. 2016. Effects of planting time on pine weevil (*Hylobius abietis*) damage to Norway spruce seedlings. Scandinavian Journal of Forest Research 31: 262–270.
- Wallertz, K., Nordenhem, H. & Nordlander, G. 2014. Damage by the pine weevil *Hylobius abietis* to seedlings of two native and five introduced tree species in Sweden. Silva Fennica 48: 1188.
- Walter, J.A., Thompson, L.M., Powers, S.D., Parry, D., Agosta, S.J. & Grayson, K.L. 2022: Growth and development of an invasive forest insect under current and future projected temperature regimes. Ecology and Evolution 12: e9017.
- Wang, J., Zhang, Z., Kong, X., Wang, H. & Zhang, S. 2015. Intraspecific and interspecific attraction of three *Tomicus* beetle species during the shoot-feeding phase. Bulletin of Entomological Research 105: 225–233.
- Wang, P., Chen, G.F., Zhang, J.S., Xue, Q., Zhang, J.H., Chen, C. & Zhang, Q.H. 2017. Pheromone-trapping the nun moth, *Lymantria monacha* (Lepidoptera: Lymantriidae) in Inner Mongolia, China. Insect Science 24: 631–639.

- Wang, H.M., Liu, F., Zhang, S.F., Kong, X.B., Lu, Q. & Zhang, Z. 2020. Epibiotic fungal communities of three *Tomicus* spp. infesting pines in Southwestern China. *Microorganisms* 8: 15.
- Wegensteiner, R., Tkaczuk, C., Balazy, S., Griesser, S., Rouffaud, M.A., Stradner, A., Steinwender, B.M., Hager, H. & Papierok, B. 2015. Occurrence of pathogens in populations of *Ips typographus*, *Ips sexdentatus* (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) and *Hylobius* spp. (Coleoptera, Curculionidae, Curculioninae) from Austria, Poland and France. *Acta Protozoologica* 54: 219–232.
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.018>
- Wermelinger, B., Obrist, M.K., Baur, H., Jakoby, O. & Duelli, P. 2013. Synchronous rise and fall of bark beetle and parasitoid populations in windthrow areas. *Agricultural and Forest Entomology*, 15: 301–309.
- Williams, C.D., Dillon, A.B., Ennis, D., Hennessy, R. & Griffin, C.T. 2015. Differential susceptibility of pine weevil, *Hylobius abietis* (Coleoptera: Curculionidae), larvae and pupae to entomopathogenic nematodes and death of adults infected as pupae. *Biocontrol* 60: 537–546.
- Williams, C.D., Dillon, A.B., Harvey, C.D., Hennessy, R., McNamara, L. & Griffin, C.T. 2013. Control of a major pest of forestry, *Hylobius abietis*, with entomopathogenic nematodes and fungi using eradicator and prophylactic strategies. *Forest Ecology and Management* 305: 212–222.
- Ye, H., Haack, R.A. & Petrice, T.R. 2002. *Tomicus piniperda* (Coleoptera: Scolytidae) within and between tree movement when migrating to overwintering sites. *Great Lakes Entomologist* 35: 183–192.
- Yu, L.F., Huang, J.X., Zong, S.X., Huang, H.G. & Luo, Y.Q. 2018. Detecting shoot beetle damage on Yunnan pine using Landsat time-series data. *Forests* 9: 39.
- Yu, L.F., Zhan, Z.Y., Ren, L.L., Zong, S.X., Luo, Y.Q. & Huang, H.G. 2020. Evaluating the potential of WorldView-3 data to classify different shoot damage ratios of *Pinus yunnanensis*. *Forests* 11: 417.
- Yu, L.F., Zhan, Z.Y., Zhou, Q., Gao, B.T., Ren, L.L., Huang, H.G. & Luo, Y.Q. 2022a: Climate Drivers of Pine Shoot Beetle Outbreak Dynamics in Southwest China. *Remote Sensing* 14: 2728.
- Yu, L.F., Zhan, Z.Y., Ren, L.L., Liu, Y.J., Huang, H.G. & Luo, Y.Q. 2022b: Effects of stand and landscape level variables on shoot damage ratios caused by shoot beetles in Southwest China. *Forest Ecology and Management* 507: 120030.
- Zakrzewska, A. & Kopec, D. 2022: Remote sensing of bark beetle damage in Norway spruce individual tree canopies using thermal infrared and airborne laser scanning data fusion. *Forest Ecosystems* 9: 100068.

- Zamora-Ballesteros, C., Diez, J.J., Martin-Garcia, J., Witzell, J., Solla, A., Ahumada, R., Capretti, P., Cleary, M., Drenkhan, R., Dvorak, M., Elvira-Recuenco, M., Fernandez-Fernandez, M., Ghelardini, L., Gonthier, P., Hernandez-Escribano, L., Ios, R., Markovskaja, S., Martinez-Alvarez, P., Munoz-Adalia, E.J., Nowakowska, J.A., Oszako, T., Raposo, R., Santini, A. & Hantula, J. 2019. Pine pitch canker (PPC): pathways of pathogen spread and preventive measures. *Forests* 10: 1158.
- Zang, C., Helm, R., Sparks, T.H. & Menzel, A. 2015. Forecasting bark beetle early flight activity with plant phenology. *Climate Research* 66: 161–170.
- Zas, R., Björklund, N., Nordlander, G., Cendan, C., Hellqvist, C. & Sampedro, L. 2014. Exploiting jasmonate-induced responses for field protection of conifer seedlings against a major forest pest, *Hylobius abietis*. *Forest Ecology and Management* 313: 212–223.
- Zas, R., Björklund, N., Sampedro, L., Hellqvist, C., Karlsson, B., Jansson, S. & Nordlander, G. 2017. Genetic variation in resistance of Norway spruce seedlings to damage by the pine weevil *Hylobius abietis*. *Tree Genetics & Genomics* 13: 111.
- Zas, R., Poceiro, M.S., Lores, M., Rolke, L.M. & Sampedro, L. 2019. Phenotyping tree resistance to a bark-chewing insect, the pine weevil *Hylobius abietis*. *Annals of Applied Biology* 175: 236–245.
- Zhao, T., Axelsson, K., Krokene, P. & Borg-Karlson, A.K. 2015. Fungal symbionts of the spruce bark beetle synthesize the beetle aggregation pheromone 2-methyl-3-buten-2-ol. *Journal of Chemical Ecology* 41: 848–852.
- Zhao, T., Ganji, S., Schiebe, C., Bohman, B., Weinstein, P., Krokene, P., Borg-Karlson, A.K. & Unelius, C.R. 2019. Convergent evolution of semiochemicals across Kingdoms: bark beetles and their fungal symbionts. *ISME Journal* 13: 1535–1545.
- Zhu, X.F., Xu, B.Q., Qin, Z.J., Kader, A., Song, B., Chen, H.Y., Liu, Y. & Liu, W. 2021. Identification of candidate olfactory genes in *Scolytus schevyrewi* based on transcriptomic analysis. *Frontiers in Physiology* 12: 717698.



**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi

