



Timo Möykkynen



Timo Pukkala

Timo Möykkynen ja Timo Pukkala

Juurikäävän leviäminen Etelä-Suomen kuusikoissa ja kuusi–mänty-sekametsissä mekanistisen mallin mukaan

Pukkala, T. & Möykkynen, T. 2007. Juurikäävän leviäminen Etelä-Suomen kuusikoissa ja kuusi–mänty-sekametsissä mekanistisen mallin mukaan. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2007: 5–18.

Juurikäävän aiheuttaman lahoisuuden kehittymistä Etelä-Suomen kuusikoissa ja kuusi–mänty-sekametsissä tutkittiin Rotstand-simulointimallin avulla. Terveen kuusikon kesäharvennukset lisäsivät voimakkaasti lahoisuutta kiertoajan lopulla. Kantokäsittelyillä lahoisuus pysyi alhaisena eli lähes talviharvennusvaihtoehdon tasolla. Lahoisuus väheni sitä enemmän mitä suurempi oli männyn osuus kesäharvennuskäsittelyssä. Kun terveen kuusikon päätehakkuu tehtiin kesällä, seuraavan kuusisukupolven lahoisuus oli suuri jo 20-vuotiaassa metsikössä ja lisääntyi edelleen kiertoajan loppua kohti, vaikka harvennukset tehtiin talvella. Kun päätehakkuu tehtiin talvella tai kannot käsiteltiin, seuraavan kiertoajan lahoisuus pysyi alhaisena. Lahon kuusikon päätehakkuuta seuraava talvella harvennettu puusukupolvi oli sitä lahoisempaa, mitä enemmän päätehakkuussa oli juurikäävän lahottamia puita. Mäntysekoitus vähensi vain hieman kuusten lahoisuutta lahon kuusikon jälkeen kasvatettavassa sekametsässä. Juurikäävän aiheuttamat puutavaralajisiirtymät tulivat selvimmän esille päätehakkuussa. Lahoisuus vähensi tukkipuun määrää päätehakkuussa 5,1–11,4% talvihakkuun käsiteltyn terveeseen metsikköön verrattuna. Osittain lahon sellupuun osuus vaihteli välillä 3–22 m³/ha ja metsään jäävää tyveystä tuli 0–2 m³/ha. Kuusikuitupuun määrä pysyi lähes vakiona, sillä lahoisuus aiheutti kuusitukin siirtymistä osittain lahoksi sellupuuksi. Sekametsässä tukin osuus kuusen hakkuupoistumasta suureni mäntysekoituksen lisääntyessä. Päätehakkuun kokonaispoistuma väheni kasvutappion ja kuolleisuuden takia lahoisuudesta riippuen 1,3–6,3% talvihakkuukäsittelyyn verrattuna.

Asiasanat: *Heterobasidion* spp, juurikääpä, simulointimalli, mekanistinen malli

Yhteystiedot: Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu

sähköposti: timo.moykkynen@joensuu.fi, timo.pukkala@joensuu.fi

Hyväksytty 14.2.2007

I Johdanto

Juurikäävät, *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. s. lato ovat ryhmä taloudellisesti merkittäviä metsäpuiden patogeenisia lahottajasieniä, joita esiintyy koko pohjoisen pallonpuoliskon lauhkealla vyöhykkeellä (Korhonen ja Stenlid 1998). Etelä-Suomessa kuusenjuurikääpä, *Heterobasidion parviporum* (Niemelä ja Korhonen) (S-tyyppi) on erikoistunut kuusen tyvilahottajaksi (Korhonen ja Piri 1994). Männynjuurikääpä *H. annosum* s. stricto (P-tyyppi) aiheuttaa kasvutappioita ja tappaa mäntyjä Kaakkois-Suomessa (Laine 1976, Kurkela ym. 1978). Se voi myös lahottaa kuusia ja monia muita puulajeja. Molempia lajeja esiintyy Suomessa lähinnä Kokkola–Joensuu-linjan eteläpuolella (Korhonen 1978, Korhonen ja Piri 1994).

Juurikääpä leviää sulan maan aikaan ilmassa olevilla itiöillä tuoreisiin kantoihin (Kallio 1970, Kallio 1971) ja kuusen korjuuvaurioihin (Isomäki ja Kallio 1974). Sen rihmasto kasvaa infektoituneista kannoista ja puista juuriyhteyksiä pitkin terveisiin naapuripuihin (Stenlid 1987) alkaen lahottaa kuusen sydänpuuta ja männyn juuria. Laho leviää juuristossa puusta puuhun aiheuttaen metsikköön laajenevia sairaiden puiden ryhmiä (Laine 1976, Stenlid 1987). Juurikääpä voi levitä myös seuraavaan puusukupolveen lahoista päätehakkuukannoista ja lahoista ylispuista (Piri 1996, Piri ja Korhonen 2001).

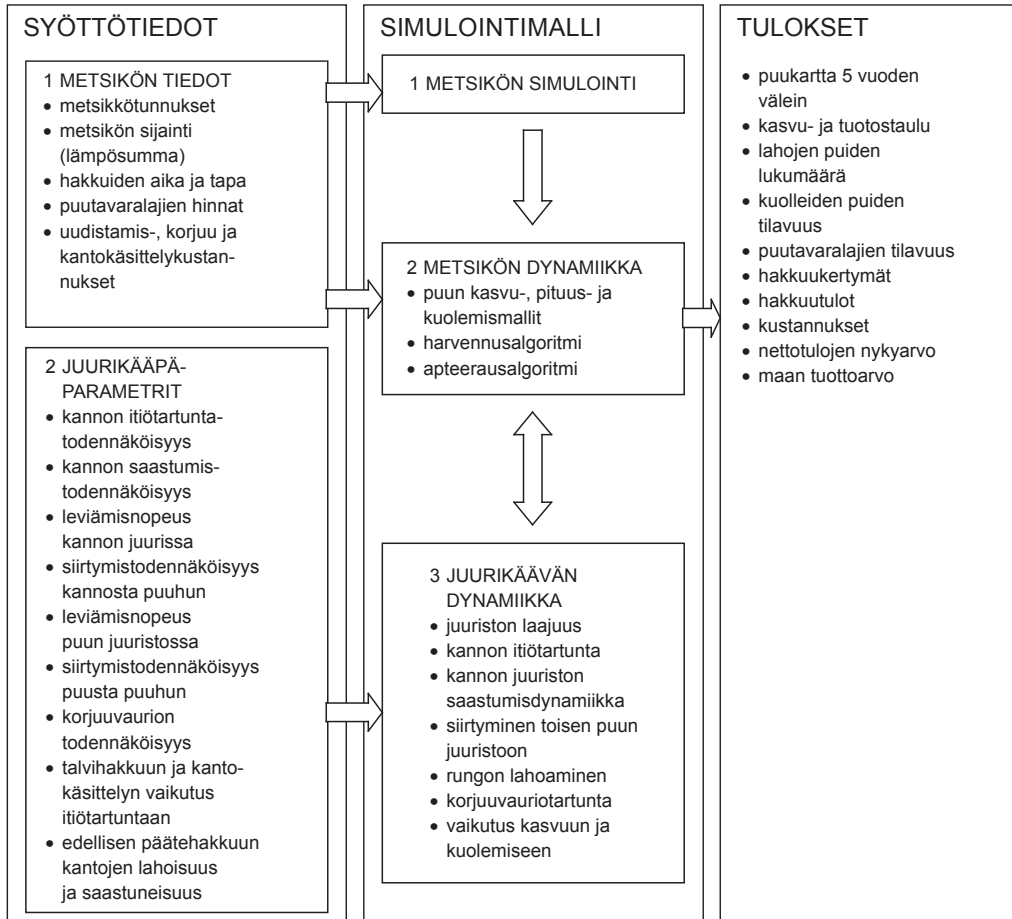
Etelä-Suomessa uudistuskypsien kuusikoiden tyvilahoisuus on yleisesti 15–30 % runkoluvusta. Tyvilahoisuudesta noin puolet ja lahon tilavuudesta noin 90 % on juurikäävän aiheuttamaa (Kallio ja Tamminen 1974, Tamminen 1985, Piri ym. 1990). Kuusen juurikääpälahosta noin 90 % aiheuttaa *H. parviporum* ja loput *H. annosum* s. str. (Piri ym. 1990, Korhonen ja Piri 1994). Päätehakkuiden kuusipuutavaran tilavuudesta lahoppuuta on Kaakkois-Suomessa n. 10 % (Kaarna-Vuorinen 2000). Tyvilahoisuus on yleisintä etelärannikon kangasmailla parhaiden kasvupaikkojen vanhoissa kuusikoissa (Tamminen 1985).

Juurikäävän leviämisen estäminen lahoa metsikköä seuraavaan puusukupolveen on vaikeaa. Toisen sukupolven lahoisuutta vähentäväksi metsänkäsittelymenetelmiksi on esitetty mm. päätehakkuukantojen poistoa, kulotusta, puulajin vaihtoa, sekametsien kasvattamista, harvennusten ja korjuuvaurioiden

vähentämistä sekä kiertoajan lyhentämistä. Lisäksi päätehakkuukantojen käsittely tai talvihakkuu estävät uusia itiötartuntoja. Ennestään terveiden metsikköjen juurikääpä-tartuntoja vähentävät harvennusten ajoittaminen talveen, kantojen käsittely juurikääpä-tartuntaa estävällä aineella kesäharvennuksissa sekä harvennuskertojen ja korjuuvaurioiden vähentäminen (Korhonen ym. 1998, Pratt ym. 1998).

Kuusi–mänty-sekametsien on todettu tuottavan suuremman nettotulojen nykyarvon kuin puhtaiden kuusikoiden (Vettenranta ja Miina 1999), ja nuori sekametsä kannattaa harvennuksissa pitää sekametsänä kiertoajan loppuun saakka (Pukkala ym. 1997). Sekametsien kasvattaminen on myös kiinnostava vaihtoehto juurikäävän torjumiseksi. Kuusi–mänty-sekametsien kuusissa on todettu olevan vähemmän lahoa kuin puhtaissa kuusikoissa (Rennerfelt 1946, Piri ym. 1990, Huse ym. 1994, Kaarna-Vuorinen 2000, Linden ja Vollbrecht 2002). Toisaalta Kangas (1952) ei havainnut eroa sekametsien ja puhtaiden kuusikoiden lahoisuudessa.

Juurikäävän leviämistä kuvaavia malleja on käytetty mm. havainnollistamaan tartunnan ja leviämisen mekanismeja, lahoisuuden määrän ennustukseen ja torjunnan kannattavuuden arviointiin (Pratt ym. 1998). Kuusen tyvilahon määrää ennustavia empiirisiä malleja on kehitetty Etelä-Ruotsin ja Tanskan olosuhteissa (Vollbrecht ja Agestam 1995, Vollbrecht ja Jørgensen 1995, Linden ja Vollbrecht 2002). Useimmat mallit ovat olleet mekanistisia, kuten Sitkan kuusen tyvilahoa kuvaava malli Skotlannissa (Pratt ym. 1989) ja WRD (Western Root Disease -malli) (Frankel 1998), joka kuvaa juurikäävän ja muiden juurilahottajasienien leviämistä useilla eri puulajeilla läntisessä Pohjois-Amerikassa. Etelä-Suomen kuusikoiden tyvilahoa kuvaavaa simulointimallia on käytetty kantokäsittelyn kannattavuuden arvioimiseen (Möykkynen ym. 1998) ja sairaiden metsikköiden käsittelyn optimointiin (Möykkynen ym. 2000, Möykkynen ja Miina 2002). Uusin juurikääpä-tartuntaa ja sen leviämistä kuvaava malli ”Rotstand” kehitettiin eurooppalaisena yhteistyönä MOHIEF (Modelling Of *Heterobasidion* Infection in European Forests) -hankkeessa (Woodward ym. 2003). Malli on kuvattu ja sillä on simuloitu juurikäävän levintää sekä tehty herkkyyss-analyyskejä Etelä-Ruotsin olosuhteissa julkaisussa Pukkala ym. (2005).



Kuva 1. Rotstand-mallin perusrakenne.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on 1) parametrisoida Rotstand-malli (Pukkala ym. 2005) Etelä-Suomen kuusikoiden ja kuusi-mänty-sekametsien olosuhteisiin, 2) tutkia eri hakkuuvuodenaikojen ja kantokäsittelyn vaikutusta juurikäävän aiheuttamaan lahoisuuteen, hakkuiden puutavaralajijakaumaan, kasvatappioihin ja kuolleisuuteen terveen tai saastuneen kuusikon tilalle perustetuissa toisen sukupolven kuusikoissa, sekä 3) tutkia mäntysekoituksen vaikutusta terveen tai lahon kuusikon paikalle perustetun kuusikon lahoisuuteen ja puutavaralajijakaumaan. Mallin ne parametrit ja piirteet, jotka eroavat alkuperäisestä mallista, selostetaan luvussa 2 Rotstand-mallin yleiskuvauksen yhteydessä (osatavoite 1). Mallilla saadut simulointitulokset raportoidaan luvussa 3 (osatavoitteet 2 ja 3).

2 Mallin kuvaus

2.1 Metsikködynamiikka

Rotstand-malli (Pukkala ym. 2005) jakaantuu kahden pääosaan: metsikön ja metsikködynamiikan simulointiin sekä juurikäävän dynamiikan simulointiin (kuva 1). Metsikködynamiikkaa kuvaava osa koostuu metsikkökoalan simuloinnista, puiden kasvu- ja kuolemismalleista sekä harvennus- ja apteerausalgoritmeista. Simuloidun koalan sijasta voidaan käyttää mitattua koalaa. Jos koala simuloidaan, puulajeittain ja -jaksoittain arvioiduista metsikkötunnuksista ennustetaan puusto-ositteen läpimittajakauma. Puiden paikat generoidaan eri

tavoin sen mukaan, onko kyseessä viljelty vai luontaisesti syntynyt metsä. Luontaisesti syntyneen metsän tilajärjestys noudattaa Poisson-jakaumaa (x - ja y -koordinaatit saadaan poimimalla satunnaislukuja tasajakaumasta). Koordinaattien generoinnissa voidaan käyttää ns. kovaa ydintä, jolloin jokaisen puuparin välinen etäisyys on vähintään kovan ytimen ilmoittama minimietäisyys.

Kun Rotstand-mallia käytetään Suomen oloissa, puiden läpimitan kasvua simuloidaan Miinan ja Pukkalan (2000) spatiaalisilla kasvumalleilla. Metsikön itseharvenemisraja lasketaan Pukkalan ja Miinan (1997) malleilla, ja puiden pituus Pukkalan ym. (1997) malleilla. Hakkuissa poistettavat rungot jaetaan puutavaralajeihin Laasasenahon (1982) runkokäyrämallia apuna käyttäen seuraavasti. Terveen kuusitukin minimiläpimitta on 16 cm ja kuusikuitupuun 6 cm. Jos tyvilahoisessa rungossa on tervettä pintapuuta alle 5 cm, tehdään tästä rungon osasta 30 cm:n tyveysiä. Jos tervettä pintapuuta on enemmän kuin 5 cm, tehdään 3 metriä pitkiä sellupölkkyjä, kunnes puu on lahotonta (Markku Halonen, henkilökohtainen tiedonanto). Lahottomasta rungon osasta tehdään tukkia ja kuitupuuta. Kuolleita puita ei lasketa mukaan hakkuupoistumaan. Rungossa mahdollisesti oleva laho oletetaan kartion muotoiseksi, jonka määräävät lahon tyviläpimitta ja korkeus.

2.2 Juurikäädynamiikka

Rotstand-mallin juurikäädynamiikkaa kuvaavassa osassa simuloidaan metsikön puiden juuristojen kasvua, kantojen juurikäädynamiikkaa ja saastumista, rihmaston leviämistä kannon juuristossa, siirtymistä puiden ja taimien juuristoon, leviämistä puiden juuristossa ja siirtymistä toisten puiden juuristoon, puiden lahoamista, kasvutappioita ja juurikäävistä aiheutuvaa puiden kuolemista. Juurikäädynamiikkaa kuvaavaa osamallia voidaan luonnehtia mekanistiseksi malliksi. Mallin tulosteina ovat 5-vuotisjaksoittain metsikön kasvu- ja tuotostiedot, lahojen puiden lukumäärä, kuolleiden puiden tilavuus ja puukartta. Lisäksi tulosteina ovat puutavaralajien kertymät eri hakkuissa sekä hakkuutulot kiertoajan kuluessa.

Tässä tutkimuksessa Rotstand-malli parametri-

soitiin kuvaamaan juurikäävän leviämistä Etelä-Suomen kuusikoissa ja kuusi-mänty-sekametsissä lämpösumma-alueella 1200 d.d. seuraavasti. Ympyränmuotoisten juuristojen laajuuden laskemiseksi käytettiin Hakkilan (1973) mallia kuuselle. Koska Hakkilan malli kuvasi yli 5 cm paksujen juuristojen laajuutta, käytettiin Peltolan ja Kellomäen (1993) korjauskerrointa 1,3 kuvaamaan yli 1 cm paksun juuriston laajuutta. Männyn juuriston sädettä kuvattiin Laitakarin (1929) aineistosta johdettua lineaarista mallia käyttäen.

$$\text{Kuusi: } \text{Säde} = 0,0678 d_{\text{kanto}} \quad (1)$$

$$\text{Mänty: } \text{Säde} = 0,444 + 0,086 d \quad (2)$$

Yhtälöissä 1 ja 2 *Säde* on juuriston säde 1 cm:n paksuuteen asti metreinä, d_{kanto} on kuusen kanto-läpimitta senttimetreinä ja d männyn rinnankorkeusläpimitta senttimetreinä.

Kantojen itiötartuntatodennäköisyys laskettiin lämpösumman (1200 d.d.) funktiona ja se oli kuusella 0,21 ja männyllä 0,04 (Pukkala ym. 2005; yhtälöt 1 ja 2). Kuusen kantojen tartunnasta 90 % oletettiin olevan kuusenjuurikäädynamiikkaa ja 10 % männynjuurikäädynamiikkaa. (Korhonen ja Piri 1994). Kantojen tartuntatodennäköisyyden oletettiin alenevan 95 % talvihakkuussa (Brandtberg ym. 1996) ja 90 %, jos kesähakkuun yhteydessä käytettiin kantokäsittelyä (Mäkelä ym. 1994).

Itiötartunnan saaneiden kantojen juuriston saastumistodennäköisyytenä käytettiin arvoa 0,80 (Pukkala ym. 2005, Jan Stenlid, henkilökohtainen tiedonanto). Juurikäävän rihmaston leviämisenopeutena kuusen- ja männynkantojen sekä kuolleiden puiden juurissa käytettiin 50 cm/v (Bendz-Hellgren ym. 1999). Juuriston saastumisdynamiikka on kuvattu Pukkala ym. (2005) yhtälöissä 5–8. Yhtälöiden mukaan juurikäädynamiikka leviää ensin kannon juuristossa ulospäin kannon koosta riippuvan ajan, esimerkiksi 20 cm:n kannossa 3 vuotta ja 30 cm:n kannossa 4 vuotta. Sen jälkeen juurikäävän saastuttama juuriston osa pysyy ennallaan 2 kertaa leviämisaajan verran. Sitten juurikäävän saastuttama juuriston osa supistuu nopeudella 0,5 kertaa leviämisenopeus kunnes rihmasto häviää kokonaan. Näitä yhtälöitä käytettiin kuvaamaan sekä kuusen että männyn juuristojen saastumisdynamiikkaa.

Juurikäävän siirtymistodennäköisyytenä saastuneesta kannon juuriston osasta päällekkäiseen puun juuristoon 5-vuotisjakson aikana käytettiin saman puulajin yksilöiden välillä arvoa 0,30 ja männystä kuuseen arvoa 0,30 tai 0,15. Puulajista riippuva siirtymistodennäköisyys on tätä tutkimusta varten tehty muutos Rotstand-malliin. Siirtymistodennäköisyys kuusen kannosta mäntyyn oli 0,30 tai 0,15, jos kyseessä oli männynjuurikääpä, ja 0, jos kyseessä oli kuusenjuurikääpä. Puolitettua siirtymistodennäköisyyttä eri puulajien välillä käytettiin kuvaamaan männyn ja kuusen juuristojen erilaista syvyysjakamaa (Laitakari 1929, Hakkila 1973) ja sitä, että eri puulajien välillä on vähemmän juurten yhteenkasvettumia kuin saman puulajin välillä (Laitakari 1929, Epstein 1978). Juurikäävän rihmaston leviämisenopeus oli elävän kuusen juuristossa 10 cm/v (Bendz-Hellgren ym. 1999) ja elävän männyn juuristossa 35 cm/v (Timo Kurkela, henkilökohtainen tiedonanto).

Kun juurikääpä on levinnyt puun tyvelle, alkaa kuusen rungon tyven lahoaminen (Pukkala ym. 2005; yhtälö 13) ja männyn kasvatappio (Pukkala ym. 2005; yhtälö 20). Kuusen rungot voivat saada juurikääpälahon myös kesäharvennusten korjuuvaurioista (Pukkala ym. 2005; yhtälö 14). Korjuuvaurion todennäköisyys jäävissä puissa oli 0,05 ja korjuuvaurion juurikääpä-tartunnan todennäköisyys 0,5 kertaa kantojen itiötartuntatodennäköisyys (Isomäki ja Kallio 1974).

Tyvilahon leviäminen on nopeinta alussa ja hidastuu lahoamisajan funktiona (Vasiliauskas 2001, Pukkala ym. 2005; yhtälö 13). Männynjuurikäävän aiheuttaman tyvilahon korkeutena kuudessa käytetään arvoa 0,7 kertaa kuusenjuurikäävän aiheuttaman lahon ennustettu korkeus (Vasiliauskas ja Stenlid 1998). Kuusen tyvilahon korkeuden ja lahon tyviläpimitan suhteena käytetään arvoa 20,5 (Tamminen 1985). Jos kuusen tyvilahon läpimitta on suurempi kuin sydänpuun läpimitta (Kärkkäinen 1985, Pukkala ym. 2005; yhtälö 16), alkaa kuusen kasvatappio, ja jos tyvilahon laskennallinen läpimitta on suurempi kuin puun läpimitta tyvellä, kuusi kuolee. Juurikäävän rihmaston levittyä männyn tyvelle sen läpimitan kasvu pienenee ajan funktiona (Kurkela ym. 1978). Läpimitan suhteellinen kasvatappio on suurempaa pienillä kuin suurilla puilla (Pukkala ym. 2005; yhtälö 20). Läpimitan kasvun vähentyessä

nollaan männyn oletetaan kuolevan, jolloin pienet puut kuolevat nopeammin kuin suuret puut.

Juurikäävän rihmasto pystyy leviämään elävien mutta saastuneiden kuusten juuristossa ulospäin 10 cm vuodessa (Bendz-Hellgren ym. 1999) ja männysten juuristossa 35 cm vuodessa (Timo Kurkela, henkilökohtainen tiedonanto). Juurikäävän siirtymistodennäköisyytenä saastuneesta puun juuriston osasta päällekkäiseen toisen puun juuristoon 5-vuotisjakson aikana käytettiin saman puulajin välillä arvoa 0,1 ja männystä kuuseen arvoa 0,1 tai 0,05. Kuusesta mäntyyn siirtymistodennäköisyys oli 0,1 tai 0,05, jos kyseessä oli männynjuurikääpä, ja 0, jos kyseessä oli kuusenjuurikääpä. Siirtymistodennäköisyyden oletettiin siis olevan suurempi kannosta puuhun kuin puusta puuhun. Siirtymistodennäköisyytenä toiseen puulajiin käytettiin joko samaa tai puolitettua arvoa kuin saman puulajin yksilöiden välillä.

Edellisen päätehakkuun kuusen kannot voidaan määritellä joko terveiksi, kaadettaessa tyvilahoiksi (lahot kannot) tai kaadettaessa juurikäävän itiötartunnan saaneiksi (saastuneet kannot). Lahojen kantojen juuristosta osa on jo kaatohetkellä juurikäävän rihmaston saastuttama. Tämä osa määräytyy kanto-läpimitan ja lahoamisajan perusteella (vuosimäärä, joka on kulunut siitä, kun juurikääpä saavutti puun tyven). Lahojen kantojen lahosta 90 % oletettiin olevan kuusenjuurikääpä ja 10 % männynjuurikääpä (Piri ym. 1990). Jos terveet puut hakattiin talvella tai niiden kannot käsiteltiin, näiden kantojen itiötartunnan todennäköisyyden oletettiin vähenevän vastaavasti 95 % (Brandtberg ym. 1996) tai 90 % (Mäkelä ym. 1994). Juurikäävän leviämistä lahoista tai saastuneista kannoista seuraavaan puusukupolveen simuloidaan samalla tavalla kuin infektoituneista ja saastuneista harvennuskannoista naapuripuihin. Uusi puusukupolvi pystyy saamaan tartunnan, jos taimien juuristo on päällekkäin lahon tai saastuneen kannon juuriston kanssa. Taimien tartunta on mahdollista, kun ne saavuttavat rinnankorkeusläpimitan, ja tyvilaho alkaa, kun tyviläpimitta on 10 cm eli kun sydänpuuta alkaa muodostua (Kärkkäinen 1985).

Simulointien alkumetsikkönä käytettiin 4 hehtaarin (200 m × 200 m) simuloitua istutuskuusikkoa lämpösumma-alueella 1200 d.d. Metsikön ikä oli 20 vuotta, pohjapinta-ala 15 m²/ha, runkoluku 2031 kpl/ha, keskipituus 8 m ja rinnankorkeusläpimitta

7–13 cm. Tilajärjestys oli satunnainen (Poisson-jakauma) sillä rajoituksella, että puiden välinen minimietäisyys oli 1,5 m. Metsikössä tehtiin ensiharvennus 35 vuoden iällä alaharvennuksena, toinen harvennus 50 vuoden iällä yläharvennuksena ja päätehakkuu 70 vuoden iällä. Ensiharvennuksessa hakattiin ajourat, joiden leveys oli 4 m ja ajouraväli 20 m. Edellisen puusukupolven päätehakkuukantoja oli 500 kpl/ha. Sekametsäsimuloinneissa generoitiin 200 m × 200 m kuusi–mänty-sekametsiä, joissa männyn osuus runkoluvusta oli 10 %, 30 %, 50 % tai 70 %. Harvennusvoimakkuus oli sama sekä kuusilla että mänyillä.

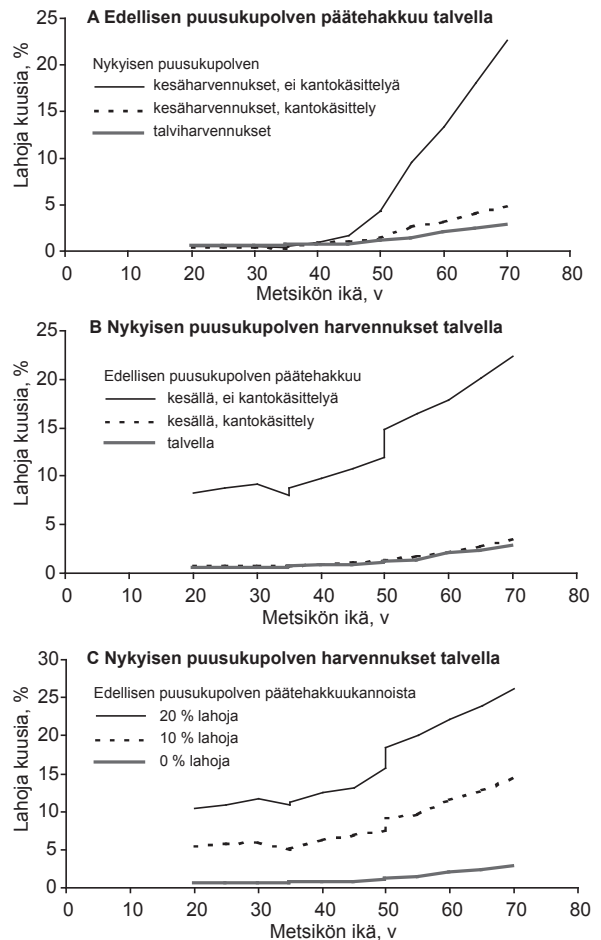
Tutkittavina ”käsittelyinä” olivat terveen kuusikon talvi- ja kesäharvennus kantokäsittelyllä tai ilman (3 käsittelyä). Toisena sarjana käsittelyjä tarkasteltiin talvella tai kesällä päätehakattua (kantokäsittelyä tai käsittelemätöntä) kuusikkoa seuraavan, talvella harvennetun kuusikon lahoisuuden ja hakkuukertymän kehittymistä (3 käsittelyä). Kolmantena sarjana selvitettiin päätehakatun metsikön lahoisuuden vaikutusta seuraavan sukupolven kuusikon lahoisuuteen (lahoastetta). Viimeisenä tutkittiin mäntysekoituksen vaikutusta terveen ja lahon kuusikon paikalle perustetun metsikön lahoisuuteen (5 eri puulajisekoitusta).

3 Simulointitulokset

3.1 Käsittelyn vaikutus juurikäävän aiheuttamaan lahoisuuteen

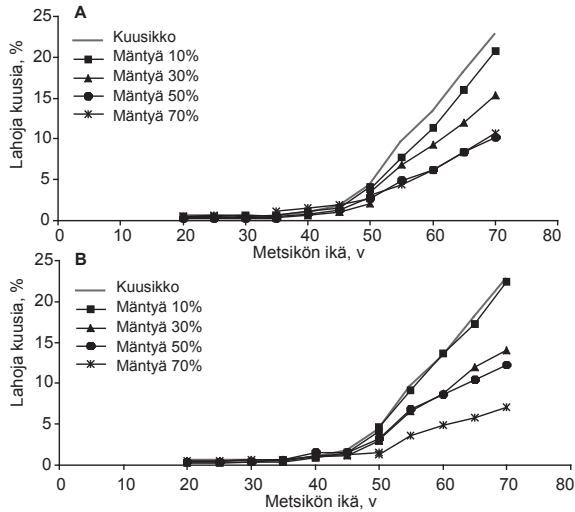
Hakkuun ajankohta ja kantokäsittely

Terveen kuusikon kesäharvennuksiset lisäsivät voimakkaasti lahoisuutta kiertoajan lopulla (kuva 2A). Kantokäsittelyillä lahoisuus pysyi lähes yhtä alhaisena kuin talviharvennusvaihtoehdossa. Kun terve kuusikko päätehakattiin kesällä eikä kantoja käsitelty, seuraavan kuusisukupolven lahoisuus oli suuri jo 20-vuotiaassa alkumetsikössä (kuva 2B). Lahoisuus lisääntyi hieman kiertoajan loppua kohden, vaikka harvennuksia tehtiin talvella. Kun edellisen kuusisukupolven päätehakkuu tehtiin talvella tai kannot käsiteltiin, seuraavan kiertoajan lahoisuus pysyi alhaisena. Lahon, talvella hakatun kuusikon pääte-



Kuva 2. Kuusikon lahoisuuden kehitys, kun edellisen sukupolven kuusikko on terve ja se päätehakataan talvella (A), edellisen sukupolven kuusikon päätehakkuu on talvella tai kesällä joko ilman kantokäsittelyä tai sen kanssa (B) tai talvella päätehakatun kuusikon kannoista osa on lahoja (C). Osakuvassa A uuden sukupolven kuusikko harvennetaan joko talvella tai kesällä ilman kantokäsittelyä tai sen kanssa. Lahoisuuteen lasketaan juurikäävän lahottamat ja tappamat puut.

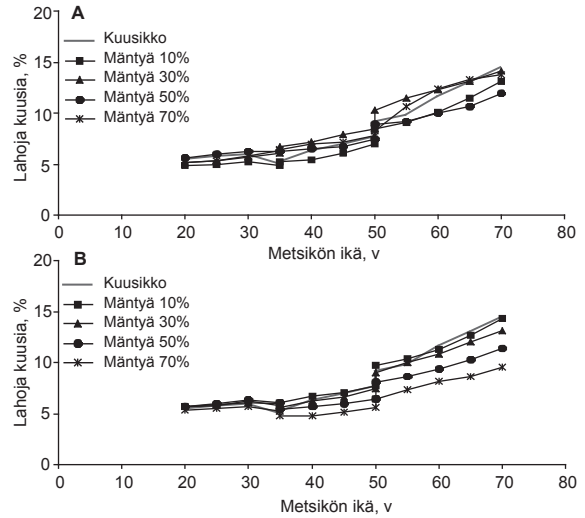
hakkuuta seuraava puusukupolvi oli sitä lahoisempaa, mitä enemmän päätehakkuussa oli juurikäävän lahottamia puita (kuva 2C). Lahoisuus oli suuri jo kiertoajan alussa ja lisääntyi lievästi kiertoajan aikana talviharvennuksista huolimatta.



Kuva 3. Mäntysekoituksen (% runkoluvusta 20-vuotiaassa alkumetsikössä) vaikutus terveeseen talvella hakatun kuusikon paikalle perustetun kesällä harvennetun metsikön kuusten lahoisuuteen. Osakuvassa A juurikäävän siirtymistodennäköisyys toisen puun juuristoon ei riipu siitä, onko toinen puu samaa vai eri lajia. Osakuvassa B siirtymistodennäköisyys toiseen puulajiin on 50% pienempi kuin siirtyminen saman lajin puuhun.

Mäntysekoitus

Kun terve kuusikko päätehakattiin talvella, mäntysekoitus vähensi seuraavan sukupolven kuusien lahoisuutta sitä enemmän mitä suurempi oli männyn osuus, kun käytettiin kesäharvennuksia (kuva 3). Kun edellisen sukupolven kuusikko oli ollut talvipäätihakkuuta tehtäessä laho, niin talviharvennuksia käytettäessä mäntysekoitus vähensi hieman kuusten lahoisuutta (kuva 4). Mäntysekoitus vähensi kuusen lahoisuutta enemmän, kun juurikäävän rihmaston siirtymistodennäköisyytenä eri puulajien välillä käytettiin 50% alhaisempaa arvoa kuin saman puulajin yksilöiden välillä (kuvat 3B ja 4B).



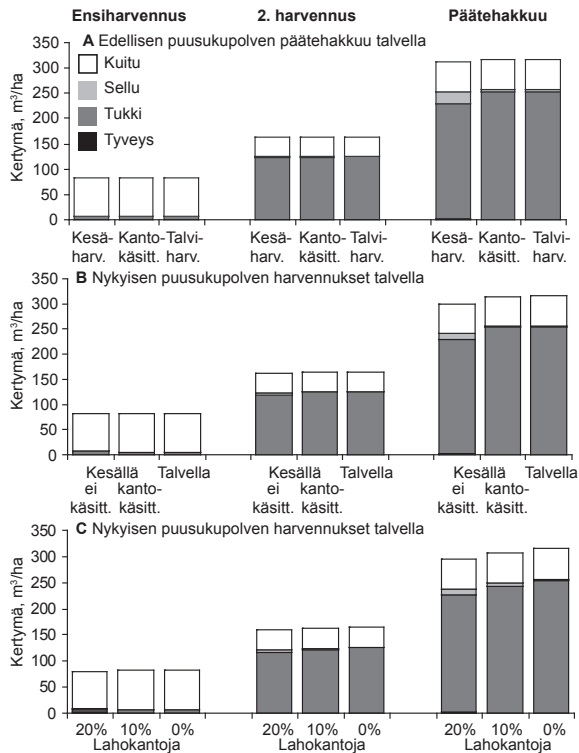
Kuva 4. Mäntysekoituksen (% runkoluvusta 20-vuotiaassa alkumetsikössä) vaikutus lahon talvella hakatun kuusikon paikalle perustetun talvella harvennetun metsikön kuusten lahoisuuteen (edellisen sukupolven puista 10%:ssa on juurikäävän aiheuttamaa tyvilahoa). Osakuvassa A juurikäävän siirtymistodennäköisyys toisen puun juuristoon ei riipu siitä, onko toinen puu samaa vai eri lajia. Osakuvassa B siirtymistodennäköisyys toiseen puulajiin on 50% pienempi kuin siirtyminen saman lajin puuhun.

3.2 Käsittelyn vaikutus puutavaralajijakaumaan ja hakkuupoistumaan

Hakkuun ajankohta ja kantokäsittely

Kun terve kuusikko päätehakattiin talvella, seuraavan sukupolven harvennusten ajankohta (kesä/talvi) ja kantokäsittely vaikuttivat vasta päätihakkuun puutavaralajiosuuksiin (kuva 5A). Tämä johtui siitä, että juurikäpä pääsi metsikköön ensimmäisen kerran vasta ensiharvennuksessa. Kesäharvennusten käyttö pienensi kuusitukin hakkuukertymää 10,6%, koska osa tukista siirtyi osittain lahoksi sellupuuksi, joka lisääntyi 3 kuutiometriä 22 kuutiometriin/ha. Kesäharvennusten käyttö myös pienensi päätihakkuun kokonaispoistumaa 1,3%, mikä johtui juurikäävän aiheuttamista kasvutappioista ja kuolleisuudesta.

Kun terve kuusikko päätehakattiin kesällä ja seuraava kuusisukupolvi harvennettiin talvella (kuva 5B), puutavaralajisiirtymät olivat hyvin samansuuntaiset kuin terveen kuusikon kesäharvennuskäsitte-



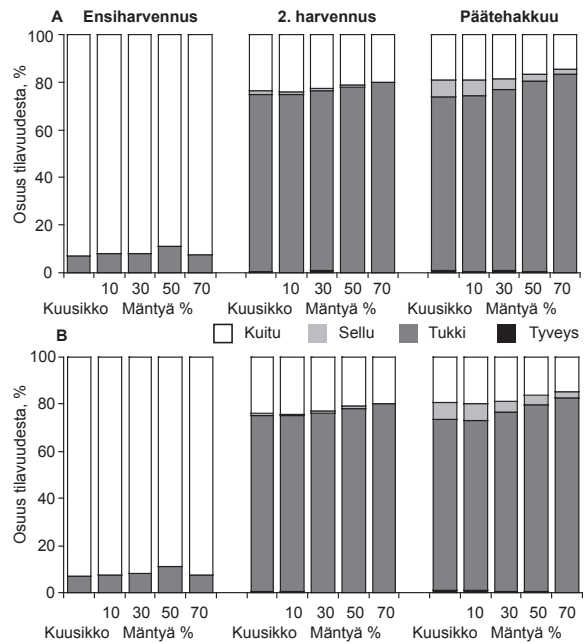
Kuva 5. Kuusikon hakkuupoistuman (ensiharvennus, 2. harvennus, päätehakkuu) jakaantuminen puutavaralajeihin, kun edellisen sukupolven kuusikko on terve ja se päätehakataan talvella (A), päätehakkuu on talvella tai kesällä joko ilman kantokäsittelyä tai sen kanssa (B) tai talvella päätehakatun kuusikon kannoista osa on lahoja (C). Osakuvassa A uuden sukupolven kuusikko harvennetaan joko talvella tai kesällä ilman kantokäsittelyä tai sen kanssa.

lyssä. Päätehakkuun kokonaispoistuma väheni edellisen sukupolven kesäpäätehakkuun takia 5,4 %.

Kun edellisen kuusisukupolven puista ja päätehakkuukannoista 10 % tai 20 % oli lahoja, talvella harvennetun seuraavan kuusisukupolven tukkipuun osuus väheni päätehakkuussa 5,1 % tai 11,4 %, ja sellupuun osuus suureni 3 kuutiometristä 7 tai 11 kuutiometriin/ha (kuva 5C). Kokonaishakkuupoistuma väheni lahoisuuden lisääntyessä 2,8 % tai 6,3 % terveeseen kuusikkoon verrattuna.

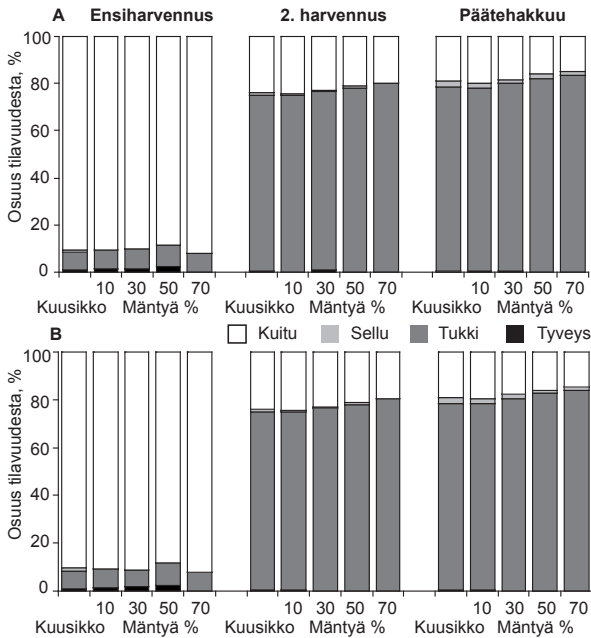
Mäntysekoitus

Kesäharvennuksin käsitellyn sekametsän ensiharvennuksen puutavaralajijakaumissa ei ollut suurta



Kuva 6. Mäntysekoituksen (% runkoluvusta 20-vuotiaassa alkumetsästä) vaikutus terveen talvella hakatun kuusikon paikalle perustetun metsikön kuusihakkuukertymän (ensiharvennus, 2. harvennus, päätehakkuu) jakaantumiseen eri puutavaralajeihin. Harvennukset tehdään kesällä ilman kantokäsittelyä. Osakuvassa A juurikäävän siirtymistodennäköisyys toisen puun juuristoon ei riipu siitä, onko toinen puu samaa vai eri laji. Osakuvassa B siirtymistodennäköisyys toiseen puulajiin on 50 % pienempi kuin siirtyminen saman lajin puuhun.

vaihtelua (kuva 6). Toisessa harvennuksessa kuusitukkipuun osuus kasvoi ja kuusikuitupuun, sellupuun sekä tyveyksen osuudet pienivät männyn osuuden runkoluvusta kasvaessa. Tämä ilmiö näkyi vielä selvemmin päätehakkuussa. Sellupuuta oli runsaammin ensiharvennuksen saakka terveen sekametsän päätehakkuussa kuin lahon kuusikon jälkeen kasvatetun talviharvennetun metsikön päätehakkuussa (kuva 7). Sekametsän kuuset olivat päätehakkuuvaiheessa sekä suurempia että terveempiä kuin puhtaiden kuusikoiden puut. Juurikäävän siirtymistodennäköisyyden puolittaminen eri puulajien välillä ei vaikuttanut paljontaan hakkuiden puutavaralajijakaumiin (kuvat 6B ja 7B).



Kuva 7. Mäntysekoituksen (% runkoluvusta 20-vuotiaassa alkumetsikössä) vaikutus lahon talvella hakatun kuusikon paikalle perustetun metsikön kuusihakkuukertymän (ensiharvennus, 2. harvennus, päätehakkuu) jakaantumiseen eri puutavaralajeihin (edellisen sukupolven puista 10%:ssa on juurikäävän aiheuttamaa tyviahoa). Osakuvassa A juurikäävän siirtymistodennäköisyys toisen puun juuristoon ei riipu siitä, onko toinen puu samaa vai eri laji. Osakuvassa B siirtymistodennäköisyys toiseen puulajiin on 50% pienempi kuin siirtyminen saman lajin puuhun.

4 Tulosten tarkastelua

4.1 Vaikutukset lahoisuuteen

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin vain juurikäävän aiheuttamaa kuusikoiden tyvilahoisuutta. Muita tyvilahon aiheuttajia ovat mm. pohjanmesisien *Armillaria borealis*, nuijamesisien *Armillaria cepistipes* ja korjuuvaurioihin iskeytyvä verinahakka *Stereum sanguinolentum* (Hallaksela 1984). Juurikäävän osuus tyvilahoisten kuusten lukumäärästä on eri tutkimuksissa vaihdellut 46 ja 60%:n välillä ja keskimääräinen kokonaislahoisuus Etelä-Suomen ja Ahvenanmaan päätehakkuukäisissä metsissä on ollut 18–31% runkoluvusta (Kallio ja Tamminen 1974,

Tamminen 1985, Piri ym. 1990, Kaarna-Vuorinen 2000). Niinpä kokonaislahoisuuden arvioimiseksi päätehakkuissa on tämän tutkimuksen simulointitulosten lahoisuuteen lisättävä 7–17%-yksikköä. Kuusen tyvilahon tilavuudesta juurikääpä aiheuttaa noin 90% (Tamminen 1985), joten lahoppuun kokonaistilavuuden arvioimiseksi tämän tutkimuksen lukuihin on lisättävä n. 10%.

Terveen, talvella avohakatun kuusikon tilalle perustetun uuden kuusikon kaksi kesäharvennusta tuottivat 70 vuoden iällä 23%:n juurikäävän aiheuttaman lahoisuuden kiertoajan lopussa. Tämä johtui siitä, että harvennuksissa syntyi paljon itiötartunnan saaneita ja saastuneita kantoja, joista laho levisi naapuripuihin. Useissa tutkimuksissa on havaittu, että mitä useampia ja aikaisempia kesäharvennuksia tehdään, sitä enemmän kiertoajan lopulla on lahoisuutta (Stenlid 1987, Venn ja Solheim 1994, Vollbrecht ja Agestam 1995, Stenlid ja Redfern 1998). Etelä-Suomen kuusikoiden tyvilahotutkimuksissa on havaittu huomattavasti korkeampiakin, 52–75%:n lahoisuuksia, mutta metsikön käsittelyhistoria on ollut tuntematon (Kallio ja Tamminen 1974, Tamminen 1985, Piri ym. 1990, Piri 1996, Piri ja Korhonen 2001).

Kesällä tehty terveän kuusikon päätehakkuu aiheutti kantojen itiötartunnan ja saastumisen sekä juurikäävän siirtymisen istutustaimikkoon. Rönnberg ja Jørgensen (2000) esittivät, että tämän kaltaisella leviämisellä on suuri merkitys lahoisuuden siirtymisessä kuusisukupolvesta toiseen. Stenlidin ja Redfernin (1998) mukaan on kuitenkin epäselvää, onko itiötartunnan saaneilla vai ennestään lahoilla kannoilla suurempi merkitys juurikäävän leviämisessä seuraavaan puusukupolveen.

Talvella hakatun lahon kuusikon tilalle perustetussa kuusikossa oli runsaasti juurikäävän lahottamia puita jo ennen ensiharvennusta. Lahoisuus lisääntyi kiertoajan loppupuolella talviharvennuksista huolimatta puusta puuhun leviämisen takia. Lahoisuuden nopea lisääntyminen heti toisen harvennuksen jälkeen johtui siitä, että yläharvennuksessa kasvamaan jätetyissä pienissä puissa oli enemmän lahoisuutta kuin poistetuissa suurissa puissa. Juurikäävän siirtymistä lahosta kuusisukupolvesta toiseen on havaittu useissa tutkimuksissa (Stenlid 1987, Piri 1996, Rönnberg ja Jørgensen 2000, Piri ja Korhonen 2001, Piri 2003b). Pirin (2003a) tulosten mukaan 20-vuotiaan istutustaimikon lahoisuus oli 9–11%, kun edel-

lisen päätehakkuun kuusista 20 % oli juurikäävän lahottamia. Simulointituloksemme vastasivat hyvin tätä havaintoa.

Mäntysekoitus vähensi juurikäävän aiheuttamaa kuusten lahoisuutta, jos harvennukset tehtiin kesällä ja edellisen puusukupolven kannot olivat saastumattomia. Vasta yli 30 %:n mäntysekoitus alensi selvästi kuusten lahoisuutta. Kuusten seassa olleet männyt estivät kuusenjuurikäävän leviämistä saastuneista harvennuskannoista naapurikuusiin. Juurikäävän siirtymistodennäköisyyden puolittamisella eri puulajien välillä oli looginen mutta pieni vaikutus lahoisuuteen. Lindenin ja Vollbrechtin (2002) empiirisen tutkimuksen mukaan Etelä-Ruotsissa kesällä harvennettujen mänty-kuusi-sekametsien kuusten kokonaislahoisuus väheni samansuuntaisesti kuin tässä tutkimuksessa. Em. tutkimuksen kuusikoiden lahoisuus 70 vuoden iällä oli kuitenkin noin kaksinkertainen, koska alueen kantotartuntataso on korkeampi (Brandtberg ym. 1996) ja harvennuksia oli neljä, ensiharvennus jo 20-vuotiaana.

Mäntysekoitus alensi vain hieman lahon kuusikon paikalle perustetun, talviharvennuksin käsitellyn metsikön kuusten lahoisuutta. Sekametsän kuusten suuri lahoisuus johtui luultavasti siitä, että suurin osa kuusten tartunnoista tuli laajajuuristoista lahoista kannoista. Puusta puuhun siirtymisestä johtuva lahoisuus, jota mäntysekoitus vähentää, oli tähän verrattuna vähäisempää. Jos lahoja päätehakkuukantoja olisi vähemmän, männyin vaikutus olisi luultavasti suhteellisesti suurempi. Sekametsässä kuusten etäisyys toisistaan on suurempi kuin puhtaassa kuusikossa, mikä hidastaa kuusenjuurikäävän leviämistä (Linden ja Vollbrecht, 2002). Kuusten välisiä juuriyhteyksiä on sekametsässä vähemmän kuin kuusikossa (Stenlid 1985, Piri ym. 1990). Eri puulajien välillä on vähemmän puusta puuhun leviämässä tärkeitä juurten yhteenkasvettumia kuin saman puulajin välillä (Epstein 1978, Piri 2003b). On myös havaittu, että juurikäävän kanssa kilpailevia sienilajeja on sekametsissä enemmän kuin puhtaissa kuusikoissa (Holmer ja Stenlid 1997, Korhonen ym. 1998). Rennerfeltin (1946) mukaan kuusten lahoisuus väheni merkittävästi Etelä-Ruotsin sekametsissä puhtaisiin kuusikkoihin verrattuna, mutta Kangas (1952) ei havainnut eroa kuusten lahoisuudessa Etelä-Suomen puhtaissa kuusikoissa ja sekametsissä.

Piri ym. (1990) havaitsivat, että mäntysekoitus vähensi päätehakkuukuusikon juurikäävän lahottamien puiden osuutta ja kokonaislahoisuutta, mutta koivusekoituksella oli lievempi vaikutus kuusten lahoisuuteen. Piri (2003a) ei havainnut lehtipuusekoituksen vaikuttavan 2–23-vuotiaiden istutuskuusten lahoisuuteen. Kaarna-Vuorisen (2000) mukaan mäntysekoitus vähensi ja lehtipuusekoitus lisäsi kuusten lahoisuutta. Husen ym. (1994) tutkimuksessa mäntysekoitus vähensi kuusten lahoisuutta Norjan päätehakkuumetsiköissä, mutta koivusekoituksella oli pienempi lahoisuutta vähentävä vaikutus. Metsikön käsittelyhistoria oli em. tutkimuksissa kuitenkin tuntematon ja puulajisuhteet ovat voineet muuttua harvennuksissa kiertoajan kuluessa.

4.2 Vaikutukset puutavaralajijakaumaan ja hakkuupoistumaan

Juurikäävän aiheuttaman lahoisuuden suurimmat vaikutukset puutavaralajijakaumaan tulivat esille vasta päätehakkuussa. Kuusikon tukkipuun määrä päätehakkuussa väheni eri simuloinneissa juurikääpälahon takia 5,1–11,4 % talvihakkuun käsiteltyyn kuusikkoon verrattuna. Kallion ja Tammisen (1974) mukaan Ahvenanmaan kuusikoiden tukkipuun määrä aleni lahon takia keskimäärin 21,5 %. Tammisen (1985) mukaan tukkipuun määrä väheni päätehakkuussa tyvilahon takia metsiköittäin 0–37 % ollen keskimäärin 8,5 %. Kaarna-Vuorisen (2000) mukaan tukkipuun määrä väheni tyvilahon takia kunnittain 1–33 % ollen keskimäärin 9,1 % ja Tuimalan (1979) mukaan tukkipuu väheni 5,5–10,9 % terveeseen kuusikkoon verrattuna.

Simuloinneissamme lahoa sisältävän sellupuun määrä päätehakkuussa oli 0,9 %–7,1 % tilavuudesta. Tyveyksen määrä lisääntyi lahoisuuden kasvaessa, mutta oli aina pieni. Kuusikuitupuun määrä pysyi lähes vakiona, koska siirtymää tapahtui lähinnä kuusitukista osittain lahoksi sellupuuksi. Kallion ja Tammisen (1974) mukaan Ahvenanmaan kuusikoiden kuusikuitupuun määrä aleni tyvilahon takia 12,2 %. Sellupuun määrä kasvoi lahon takia 1 prosentista 9,9 prosenttiin kokonaistilavuudesta. Tammisen (1985) aineistossa sellupuun osuus vaihteli metsälautakunnittain välillä 4,6 %–13,7 % ollen keskimäärin 6,7 % puuston tilavuudesta. Mäkelän

ym. (1998) mukaan Etelä-Suomessa teollisuudelle tulevasta kuusipuusta lahoa sellupuuta oli 5,8%. Tämän lisäksi metsään jäävää ylilahoa tyveystä oli 1,2%. Lahoisuus, puutavaralajien laatuvaatimukset ja katkontaohjeet olivat kuitenkin kaikissa em. tutkimuksissa erilaiset.

Päätehakuun kokonaishakkuupoistuma pieni kasvatappion ja kuolleisuuden takia lahoisuudesta riippuen 0,6–6,3%. Suurimmat tappiot tulivat käsittelyissä, joissa edellinen kuusisukupolvi oli laho tai sen päätehakkuu oli tehty kesällä. Kallion ja Tammisen (1974) mukaan Ahvenanmaan kuusikoiden puutavarasaannon määrä aleni lahon takia 6,3%. Bendz-Hellgren ja Stenlid (1995) havaitsivat, että tyvilahoisten kuusten läpimitan kasvu aleni 9% 5-vuotisjakson aikana. Tämän arvioitiin lisäävän lahotappioita Ruotsissa 70% verrattuna puutavaralajisiirtymistä aiheutuviin taloudellisiin tappioihin. Eteläruotsalaisessa kuusikossa, joka oli saanut juurikäpätartunnan 17 vuotta sitten tehdysässä ensiharvennuksessa, oli lahojen puiden viiden vuoden tilavuuskasvu 23% alempi kuin terveiden puiden ja kasvatappio kasvoi ajan kuluessa (Bendz-Hellgren ja Stenlid 1997). Tammisen (1985) mukaan tyvilahoiset kuuset kasvoivat sitä huonommin, mitä suurempi osuus tyviläpimitasta oli lahoa, ja puiden suhteellinen tilavuuskasvuprosentti pieneni sadasta 50%:iin, kun lahon osuus läpimitasta suureni nolasta yhteen. Kun Etelä-Suomessa kuusikon puutavaralajisiirtymistä aiheutuvat kiertoajan taloudelliset tappiot ovat keskimäärin noin 5% (Korhonen ja Lipponen 2001), niin kasvatappio ja kuolleisuus lisäävät merkittävästi juurikäävän aiheuttamia taloudellisia menetyksiä.

Kun terve kuusikko päätehakattiin talvella, ja sen paikalle perustetun mänty-kuusi-sekametsän harvennukset tehtiin kesällä ilman kantokäsittelyä, mäntysekoitus vähensi juurikäävästä johtuvia puutavaralajisiirtymiä. Juurikäävän ensimmäinen tilaisuus saastuttaa metsikkö oli vasta ensiharvennuksessa, mutta tästä huolimatta mäntysekoituksen edullinen vaikutus oli nähtävissä jo toisessa harvennuksessa 15 vuoden päästä. Erot olivat selvemmät päätehakkuussa, jossa osittain lahoa sellupuuta jouduttiin tekemään sitä suurempi osuus kuusen kertymästä mitä vähemmän metsikössä oli mäntyä. Myös kuusikuitupuun osuus suurentui mäntysekoituksen pienentyessä kuusitukin kustannuksella. Kos-

ka sekä kuusitukki että kuusikuitu ovat kokonaan lahottomia, tämä siirtymä johtui osaksi juurikäävän aiheuttamista kasvatappioista; mitä suurempi osuus metsikön puista oli mäntyä, sitä suurempia kuuset olivat päätehakkuuhetkellä. Juurikäävän aiheuttaman kasvatappion lisäksi siirtymä voi johtua siitä, että männyn aiheuttama kilpailuvaikutus on pienempi kuin kuusen, jolloin kuuset kasvavat sitä paremmin mitä suurempi osuus puustosta on mäntyä, vaikka metsikössä ei olisi lainkaan juurikääpä. Kun juurikäävän siirtyminen eri puulajien yksilöiden välillä oli vaikeampaa kuin saman puulajin yksilöiden välillä, simulointitulokset olivat lähes samanlaiset kuin oletettaessa siirtymistodennäköisyys riippumattomaksi siitä, ovatko naapuripuut samaa vai eri lajia.

Kun osittain laho kuusikko päätehakattiin talvella ja sen tilalle perustettiin mänty-kuusimetsikkö, jota harvennettiin talvisin, mäntysekoituksen positiivinen vaikutus oli pienempi kuin silloin, kun edellisen sukupolven metsikkö on terve. Vaikutus näkyi selvimmin päätehakkuussa, jossa tukkikokoisesta puusta jouduttiin tekemään sitä useammin sellupuuta mitä vähemmän metsikössä oli mäntysekoitusta. Kuusitukin osuuden lisääntyminen männyn osuuden suurentuessa johtuu osittain siitä, että mänty kilpailee kuusen kanssa vähemmän kuin toinen kuusi. Kuuset siis kasvavat sekametsässä paremmin. Osittain siirtymä johtuu siitä, että männyn osuuden vähentyessä juurikäävän aiheuttamat kasvatappiot suurentuvat. Sillä, onko juurikäävän siirtymistodennäköisyys juuristosta toiseen samanlainen vai erilainen eri puulajien kuin saman lajin yksilöiden välillä ei näyttäisi olevan juuri vaikutusta hakkuiden puutavaralajijakaumiin.

4.3 Johtopäätökset

Johtopäätöksensä on, että mäntysekoitus vähentää vain hieman juurikäävän lahottaman kuusikon paikalle istutetun metsikön kuusten lahoisuutta. Ennestään terveen metsikön juurikäpätuhoja voidaan vähentää voimakkaasti sekametsää kasvattamalla, mutta vielä tehokkaampia tapoja ovat harvennusten tekeminen talvella tai kantojen käsitteleminen kesäharvennuksissa juurikäpäpartuntaa estävällä aineella. Terve kuusikko kannattaa päätehakata talvella tai kannot tulee käsitellä, jotta juurikäpä ei

leviäisi seuraavaan kuusisukupolveen. Juurikäävän aiheuttama kasvatappio ja kuolleisuus lisäävät merkittävästi puutavaralajisiirtymien perusteella arvioituja taloudellisia tappioita kuusikoissa.

Tutkimuksen tulokset ovat suuntaa-antavia, koska mallin kaikkien osien validointi ei ole mahdollista pitkäaikaisten lahoisuusseurantakokeiden puuttuessa Etelä-Suomesta. Lahoinventointitutkimusten metsiköiden käsittelyhistoria on ollut lähes aina tuntematon.

Kiitokset

Tutkimus tehtiin Metsämiesten Säätiön apurahalla.

Kirjallisuus

- 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.
- & Stenlid, J. 1997. Decreased volume growth of *Picea abies* in response to *Heterobasidion annosum* infection. *Canadian Journal of Forest Research* 27(10): 1519–1524.
- , Lipponen, K., Solheim, H. & Thomsen, I.M. 1998. The Nordic Countries. Julkaisussa: Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R. & Hüttermann, A. (toim.). *Heterobasidion annosum: biology, ecology, impact and control*. CAB International. ISBN 0 85199 275 7. s. 333–345.
- , Brandtberg, P.-O., Johansson, M., Swedjemark, G. & Stenlid, J. 1999. Growth rate of *Heterobasidion annosum* in *Picea abies* established on forest land and arable land. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14(5): 402–407.
- Brandtberg, P.-O., Johansson, M. & Seeger, P. 1996. Effects of season and urea treatment on infection of stumps of *Picea abies* by *Heterobasidion annosum* in stands on former arable land. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11(3): 261–268.
- Epstein, A.H. 1978. Root graft transmission of tree pathogens. *Annual Review of Phytopathology* 16: 181–192.
- Frankel, S. 1998. User's guide to the western root disease model, Version 3.0. General Technical Report PSW-GTR-165. Pacific Southwest Research Station, USDA, Forest Service. 160 s.
- Hakkila, P. 1973. Mechanized harvesting of stumps and roots. A sub-project of the joint Nordic research programme for the utilization of logging residues. Seloste: Kanto- ja juuripuun koneellinen korjuu. Yhteispohjoismaisen hakkuutähdetutkimuksen alaprojekti. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 77(1). 71 s.
- Hallaksela, A.-M. 1984. Causal agents of butt-rot in Norway spruce in southern Finland. Seloste: Kuusen tyvilahon aiheuttajat Etelä-Suomessa. *Silva Fennica* 18(3): 237–243.
- Holmer, L. & Stenlid, J. 1997. *Resinicium bicolor*, a potential biological control agent against *Heterobasidion annosum*. *European Journal of Forest Pathology* 27: 159–172.
- Huse, K.J., Solheim, H. & Venn, K. 1994. Råte i gran registrert på stubber etter hogst vinteren 1992. Summary: Stump inventory of root and butt rots in Norway spruce cut in 1992. Rapport fra Skogforsk 23. 26 s.
- Isomäki, A. & Kallio, T. 1974. Consequences of injury caused by timber harvesting machines on the growth and decay of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). Seloste: Puunkorjuukoneiden aiheuttamien vaurioiden vaikutus kuusen lahoamiseen ja kasvuun. *Acta Forestalia Fennica* 136. 25 s.
- Kaarna-Vuorinen, L. 2000. Kuusen (*Picea abies* (L.) Karst.) lahoisuus, sen taloudelliset vaikutukset ja syyt Kaakkois-Suomen päätehakuuleimikoissa. Helsingin yliopiston metsäekonomian laitoksen julkaisuja 8. 82 s.
- Kallio, T. 1970. Aerial distribution of the root-rot fungus *Fomes annosus* (Fr.) Cooke in Finland. *Acta Forestalia Fennica* 107. 55 s.
- 1971. Protection of spruce stumps against *Fomes annosus* (Fr.) Cooke in by some wood-inhabiting fungi. Seloste: Kuusenkantojen maannousemasieni-infektion estäminen muutamia puussa kasvavia sieniä käyttäen. *Acta Forestalia Fennica* 117. 20 s.
- & Tamminen, P. 1974. Decay of spruce (*Picea abies* (L.) Karst. in the Åland islands. Seloste: Ahvenanmaan kuusten lahovikaisuus. *Acta Forestalia Fennica* 138. 42 s.
- Kangas, E. 1952. Maannousemasiemen (*Polyporus annosus* Fr.) esiintymisestä, tartunnasta ja tuhoista Suomessa. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 40(33). 34 s.

- Korhonen, K. 1978. Intersterility groups of *Heterobasidion annosum*. Seloste: Juurikäävän risteytymissuhteet. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 94(6): 25 s.
- & Piri, T. 1994. The main hosts and distribution of the S and P groups of *Heterobasidion annosum* in Finland. *Julkaisussa: Johansson, M. & Stenlid, J. (toim.). Proceedings of the Eighth International Conference on Root and Butt Rots, August 1993. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. s. 260–267.*
- & Lipponen, K. 2001. Juurikäöpä – lajit, levinneisyys ja torjunnan nykytilanne. *Metsätieteen aikakauskirja* 3: 453–457.
- & Stenlid, J. 1998. Biology of *Heterobasidion annosum*. *Julkaisussa: Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R. & Hüttermann, A. (toim.). Heterobasidion annosum: biology, ecology, impact and control. CAB International. ISBN 0 85199 275 7. s. 43–70.*
- , Delatour, C., Greig, B.J.W. & Scönhar, S. 1998. Silvicultural control. *Julkaisussa: Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R. & Hüttermann, A. (toim.). Heterobasidion annosum: biology, ecology, impact and control. CAB International. ISBN 0 85199 275 7. s. 283–313.*
- , Lipponen, K., Bendz, M., Johansson, M., Ryen, I., Venn, K., Seiskari, P. & Niemi, M. 1994. Control of *Heterobasidion annosum* by stump treatment with "ROTSTOP", a new commercial formulation of *Phlebiopsis gigantea*. *Julkaisussa: Johansson, M. & Stenlid, J. (toim.). Proceedings of the Eighth International Conference on Root and Butt Rots, August 1993. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. s. 675–685.*
- Kurkela, T., Nikkanen, O. & Kukkonen, H. 1978. Tyvitervaksen (maannousemasiinen) aiheuttamat kasvutapitot männiköissä. *Metsä ja Puu* 10: 22–23.
- Kärkkäinen, M. 1985. Puutiede. Sallisen kustannus, Hämeenlinna. 415 s. ISBN 951-99628-2-4.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume equations for pine, spruce and birch. Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*. 108. 74 s.
- Laine, L. 1976. The occurrence of *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. in woody plants in Finland. Seloste: Juurikäävän (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) esiintyminen puuvartisilla kasveilla Suomessa. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 90(3). 53 s.
- Laitakari, E. 1927. Männyn juuristo. Morfologinen tutkimus. Summary: The root system of pine (*Pinus sylvestris*). A morphological investigation. *Acta Forestalia Fennica* 33. 380 s.
- Linden, M. & Vollbrecht, G. 2002. Sensitivity of *Picea abies* to butt rot in pure stands and in mixed stands with *Pinus sylvestris* in Southern Sweden. *Silva Fennica* 36(4): 767–778.
- Miina, J. & Pukkala, T. 2000. Using numerical optimization for specifying individual-tree competition models. *Forest Science* 46(2): 277–283.
- Mäkelä, M., Ari, T., Korhonen, K. & Lipponen, K. 1994. Kantokäsittely koneellisessa hakkuussa. Summary: Stump treatment in mechanized timber harvesting. *Metsätehon katsaus* 3. 8 s.
- , Lipponen, K. & Sainio, M. 1998. Tyvilahoa sisältävän kuusen määrä, laatu ja käyttömahdollisuudet sellun raaka-aineena. *Metsätehon raportti* 50. 29 s.
- Möykkynen, T. & Miina, J. 2002. Optimizing the management of a butt-rotted *Picea abies* stand infected by *Heterobasidion annosum* from the previous rotation. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17(1): 47–52.
- , Miina, J. & Pukkala, T. 2000. Optimizing the management of a *Picea abies* stand under risk of butt rot. *Forest Pathology* 30(2): 65–76.
- , Miina, J., Pukkala, T. & von Weissenberg, K. 1998. Modelling the spread of butt rot in a *Picea abies* stand in Finland to evaluate the profitability of stump protection against *Heterobasidion annosum*. *Forest Ecology and Management* 106: 247–257.
- Peltola, H. & Kellomäki, S. 1993. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fennica* 27(2): 99–111.
- Piri, T. 1996. The spreading of the S type of *Heterobasidion annosum* from Norway spruce stumps to the subsequent tree stand. *European Journal of Forest Pathology* 26(4): 193–204.
- 2003a. Early development of root rot in young Norway spruce planted on sites infected by *Heterobasidion* in southern Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 604–611.
- 2003b. Silvicultural control of *Heterobasidion* root rot in Norway spruce forests in southern Finland. Regeneration and vitality fertilization of infected stands. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 898. 64 s.
- & Korhonen, K. 2001. Infection of advance regeneration of Norway spruce by *Heterobasidion parviporum*. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 937–942.
- , Korhonen, K. & Sairanen, A. 1990. Occurrence of

- Heterobasidion annosum in pure and mixed spruce stands in southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 5: 113–125.
- Pratt, J.E., Redfern, D.B. & Burnand, A.C. 1989. Modelling the spread of *Heterobasidion annosum* in Sitka spruce plantations in Britain. Julkaisussa: Morrison, D.J. (toim.). *Proceedings of the Seventh International Conference on Root and Butt Rots*, Canada, August 1988. Forestry Canada, Victoria, British Columbia. s. 308–319.
- , Johansson, M. & Hüttermann, A. 1998. Chemical control of *Heterobasidion annosum*. Julkaisussa: Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R. & Hüttermann, A. (toim.). *Heterobasidion annosum: biology, ecology, impact and control*. CAB International. ISBN 0 85199 275 7. s. 259–282.
- Pukkala, T. & Miina, J. 1997. A method for stochastic multi-objective optimization of stand management. *Forest Ecology and Management* 98: 189–203.
- , Miina, J., Kurttila, M. & Kolström, T. 1997. A spatial yield model for optimizing the thinning regime of mixed stand of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13: 31–42.
- , Möykkynen, T., Thor, M., Rönnerberg, J. & Stenlid, J. 2005. Modeling infection and spread of *Heterobasidion annosum* in even-aged Fennoscandian conifer stands. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 74–84.
- Rennerfelt, E. 1946. Om rottröten (*Polyporus annosus* Fr.) i Sverige. *Meddelanden från Statens Skogsforskningsinstitut* 35(8). 88 s.
- Rönnerberg, J. & Jørgensen, B.B. 2000. Incidence of root and butt rot in consecutive rotations of *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15(2): 210–217.
- Stenlid, J. 1985. Population structure of *Heterobasidion annosum* as determined by somatic incompatibility, sexual incompatibility and isoenzyme patterns. *Canadian Journal of Botany* 63(12): 2268–2273.
- 1987. Controlling and predicting the spread of *Heterobasidion annosum* from infected stumps and trees of *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2: 187–198.
- & Redfern, D.B. 1998. Spread within the tree and stand. Julkaisussa: Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R. & Hüttermann, A. (toim.). *Heterobasidion annosum: biology, ecology, impact and control*. CAB International, ISBN 0 85199 275 7. s. 125–141.
- Tamminen, P. 1985. Butt rot in Norway spruce in southern Finland. *Seloste: Kuusen tyvilahoisuus Etelä-Suomessa*. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 127. 52 s.
- Tuimala, A. 1979. Kuusen lahon aiheuttamista puutavara-lajisiirtymistä ja kantohintamenetyksistä. *Silva Fennica* 13(4): 333–342.
- Vasiliauskas, R. 2001. Damage to trees due to forestry operations and its pathological significance in temperate forests: a literature review. *Forestry* 74: 319–332.
- & Stenlid, J. 1998. Spread of S and P group isolates of *Heterobasidion annosum* within and among *Picea abies* trees in central Lithuania. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 961–966.
- Venn, K. & Solheim, H. 1994. Root and butt rot in first generation of Norway spruce affected by spacing and thinning. Julkaisussa: Johansson, M. & Stenlid, J. (toim.). *Proceedings of the Eighth International Conference on Root and Butt Rots*, August 1993. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. s. 642–645.
- Vettenranta, J. & Miina, J. 1999. Optimizing thinnings and rotation of Scots pine and Norway spruce mixtures. *Silva Fennica* 33(1): 73–84.
- Vollbrecht, G. & Agestam, E. 1995. Modelling incidence of root rot in *Picea abies* plantations in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 10: 74–81.
- & Jørgensen, B. 1995. Modelling the incidence of butt rot in plantations of *Picea abies* in Denmark. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 1887–1896.
- Woodward, S., Pratt, J.E., Pukkala, T., Spanos, K.A., Nicolotti, G., Tomiczek, C., Stenlid, J., Marçais, B. & Lakomy, P. 2003. MOHIEF: Modelling of *Heterobasidion annosum* in European forests, a EU-funded research program. Julkaisussa: LaFlamme, G., Bérubé, J. & Bussiès, G. (toim.). *Root and butt rot of forest trees*. *Proceedings of the IUFRO Working Party 7.02.01 Quebec City, Canada, September 16–22, 2001*. Canadian Forest Service, Information Report LAU-X-126. s. 423–427.

60 viitettä