



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 38/2024

HAKEMA

Hakkuutähteiden keruun mahdollisuudet poro- ja metsätalouden yhteensovittamisessa.

**Antti-Juhani Pekkarinen, Juha Laitila, Jouko Kumpula,
Ville Hallikainen, Pasi Rautio, Jukka Siitari, Sami Hoppula,
Pasi Aatsinki, Jukka Lahti ja Eero Holmström**

HAKEMA

Hakkuutähteiden keruun mahdollisuudet poro- ja metsätalouden yhteensovittamisessa.

**Antti-Juhani Pekkarinen, Juha Laitila, Jouko Kumpula,
Ville Hallikainen, Pasi Rautio, Jukka Siitari, Sami Hoppula,
Pasi Aatsinki, Jukka Lahti ja Eero Holmström**



Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

Viittausohje:

Pekkarinen, A.-J., Laitila, J., Kumpula, J., Hallikainen, V., Rautio, P., Siitari, J., Hoppula, S., Aatsinki, P., Lahti, J. & Holmström, E. 2024. HAKEMA : Hakkuutähteiden keruun mahdollisuudet poro- ja metsätalouden yhteensovittamisessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 38/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 66 s.

Antti-Juhani Pekkarinen ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-1993-6429>



ISBN 978-952-380-913-0 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-913-0>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Antti-Juhani Pekkarinen, Juha Laitila, Jouko Kumpula, Ville Hallikainen, Pasi Rautio, Jukka Siitari, Sami Hoppula, Pasi Aatsinki, Jukka Lahti ja Eero Holmström

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2024

Julkaisu vuosi: 2024

Kannen kuva: Sami Hoppula

Tiivistelmä

Antti-Juhani Pekkarinen¹, Juha Laitila², Jouko Kumpula³, Ville Hallikainen⁴, Pasi Rautio⁴, Jukka Siitari³, Sami Hoppula⁴, Pasi Aatsinki⁴, Jukka Lahti⁴, Eero Holmström¹

¹ Luonnonvarakeskus, Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki

² Luonnonvarakeskus, Yliopistokatu 6 B, 80100 Joensuu

³ Luonnonvarakeskus, Saarikoskentie 8, 99870 Inari

⁴ Luonnonvarakeskus, Ounasjoentie 6, 96200 Rovaniemi

HAKEMA-hankkeessa pilotoitiin hakkuutähteiden keräämistä jäkäläkankailta puunkorjuun yhteydessä sekä tutkittiin keräämisen kustannuksia ja hyötyjä metsä- ja porotaloudelle. Hankkeessa luotiin pitkäaikainen koeasetelma, jossa Kemin-Sompion paliskunnan alueelle Metsähallituksen hallinnoimiin metsiin perustettiin yhteensä kaksikymmentäviisi yhden hehtaarin kokoista koealaa, joiden puusto ja kasvillisuus inventointiin ensimmäisen kerran syksyllä 2022. Koealoista yhteensä viisi hehtaaria arvottiin kontrollialueiksi ja lopuilla kahdellakymmenellä hehtaarilla suoritettiin jatkuvapeitteisen metsänkäsittelyn mukaiset hakkuut maaliskuussa 2023. Hakkuutavoiksi valittiin poimintahakkuu ja pienalakasvatus (josta usein käytetään myös nimitystä pienaukkohakkuu). Käsitellyt koealat inventoitiin uudestaan syksyllä 2023 ja lopuksi osa koealoista aidattiin, jotta tulevaisuudessa voidaan tutkia jatkuvapeitteisen metsänkäsittelyn, hakkuutähteiden keruun sekä poron laiduntamisen yhteis- ja erillisvaikutuksia alueen kasvillisuuteen, puustoon ja maaperään.

Koealojen perustamisen lisäksi hankkeessa selvitettiin jatkuvapeitteisen metsänkäsittelyn hakkuiden sekä hakkuutähteiden ja niiden keruun vaikutuksia poro- ja metsätalouteen. Hakkuutähteiden keruun suorat kustannukset laskettiin koehakkuutyömailta saatujen korjuuolosuhdetietojen pohjalta hyödyntäen olemassa olevia kustannusmalleja. Korjuukustannuslaskelmissa huomiottiin hakkuutähteiden kasoille hakkuun lisäkustannus sekä hakkuutähteiden metsäkuljetuksen kustannus. Hakkuutähteiden pienen kertymän takia keruun yksikkökustannukset (€/m³) olivat korkeat, mutta kustannukset pinta-alaa (€/ha) kohti olivat keskimäärin vain noin 200 € per ha (160–235 €/ha). Kuormakoon kasvattaminen poimintahakkuualoilla aiheuttaisi haasteita, joten todennäköisesti tehokkain tapa alentaa hakkuutähteiden keruun kustannuksia, olisi pitää metsäkuljetusmatkat mahdollisimman lyhyinä.

Koealoilta kerättyjen inventointitietojen pohjalta hankkeessa tutkittiin myös hakkuutähteiden keruun onnistumista, metsän uudistumispotentiaalia sekä hakkuiden ja hakkuutähteiden välittömiä vaikutuksia koealojen jäkälä- ja luppomääriin. Hakkuutähteiden keruulla oli selvä vaikutus hakkuutähteiden peittävyteen. Sen kokonaispeittävyys laski keruun vaikutuksesta kuitenkin vain noin 20–40 %. Sen sijaan käytännössä kaikki korkeammat (yli 20 cm korkeat) hakkuutähdekasat, joilla on myös todennäköisesti pitkäaikaisimmat vaikutukset laidunkasveihin ja porojen laiduntamiseen, saatiin kerättyä pois.

Porojen tärkeimmille talviravintokasveille, jäkälille ja varvuille, hakkuilla ja hakkuutähteillä havaittiin voimakkaan negatiiviset vaikutukset. Hakkuiden jälkeisenä kesänä varpujen ja poronjäkäliden yhteenlasketut keskimääräiset biomassat olivat 20–40 % pienemmät, kuin hakkuita edeltäneenä kesänä. Koealojen kasvillisuusinventointiaineistojen tilastolliset analyysit osoittivat, että hakkuutähteen peittävyydellä sekä poistetun puuston kokonaismäärällä oli selvä

jäkälän biomassaa ja peittävyttä pienentävä vaikutus. Poistetun puuston määrän lisääntymisen aiheutti noin 100–200 kg/ha pudotuksen jäkälän biomassaan lähtötilanteen ollessa 400 kg/ha. Hakkuut pudottivat myös lupon määrän puustossa keskimäärin alle puoleen siitä, mitä se oli ennen hakkuita. Männyn taimien määrä ennen hakkuita korreloi negatiivisesti puuston tiheyden kanssa, mutta kokonaisuudessaan taimiaineksen määrä alueella vaikuttaa hyvältä jatkuvapeitteistä metsänhoitoa ajatellen.

Lopuksi hankkeessa tehtiin kokonaisarvio hakkuutähteiden keruun vaikutuksista poro- ja metsätaloudelle. Bioekonomisen porotalousmallin avulla arvioitiin laidunmetsien arvoa porotaloudelle eri tilanteissa ja verrattiin sitä arvioon metsätalouden kantorahatuloista ja hakkuutähteiden korjuun kustannuksista. Mallin avulla saadut ratkaisut viittaavat siihen, että hakkuutähteiden keruu poimintahakkuiden yhteydessä on tietyissä tilanteissa taloudellisesti kannattavaa, kun huomioidaan sen pidempiaikaiset vaikutukset yhtäaikaisesti sekä poro- että metsätaloudelle. Se, missä tapauksessa hakkuutähteiden keruu on kokonaistaloudellisesti kannattavaa, riippuu muun muassa hakkuusyklin pituudesta, hakkuutähteiden vaikutuksen voimakkuudesta jäkälän biomassaan ja kasvuun, hakkuutähteiden korjuun kustannuksista sekä alueen laidunarvosta porotaloudelle.

Asiasanat: hakkuutähteet, porotalous, metsätalous, poronhoito, metsänhoito, jatkuva kasvatusta, porolaitumet, jäkälät

Abstract

Antti-Juhani Pekkarinen¹, Juha Laitila², Jouko Kumpula³, Ville Hallikainen⁴, Pasi Rautio⁴, Jukka Siitari³, Sami Hoppula⁴, Pasi Aatsinki⁴, Jukka Lahti⁴ and Eero Holmström¹

¹ Luonnonvarakeskus, Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki

² Luonnonvarakeskus, Yliopistokatu 6 B, 80100 Joensuu

³ Luonnonvarakeskus, Saarikoskentie 8, 99870 Inari

⁴ Luonnonvarakeskus, Ounasjoentie 6, 96200 Rovaniemi

The HAKEMA project piloted the collection of harvest residues from lichen pastures and studied the costs and benefits of the collection for forestry and reindeer husbandry. A total of twenty-five one-hectare study plots were established in forests managed by Metsähallitus in the Kemin-Sompio reindeer herding district. Five hectares of the plots remained as control areas, and continuous cover forest harvesting was performed for the remaining twenty hectares in March 2023.

In addition to the establishment of experimental plots, the project also investigated the effects of harvesting residues and its collection on reindeer husbandry and forestry. The costs of removing harvesting residues were calculated using existing cost models and data from the experimental harvesting sites. The unit costs of removing harvesting residues (€/m³) were high, but the costs per area (€/ha) were relatively low (160-235 €/ha). It seems that the most effective way to reduce the cost of harvesting residue removal would be to keep the forest haulage distances as short as possible.

By analyzing the inventory data collected from experimental plots, the project also investigated the effectivity of harvesting residue removal, the forest regeneration potential in study sites and the effects of continuous cover forestry and collection of harvesting residues on ground and arboreal lichens. A strong negative impact on reindeer food plants was observed due to forest harvesting and harvesting residues. Analyses of the vegetation inventory data from the experimental plots showed that the coverage of harvesting residues and the total amount of wood removed had a negative effect on lichen biomass and cover. Logging also reduced the biomass of arboreal lichens in tree stand by over half from the original amount. Based on the amounts of calculated pine saplings the forest regeneration potential in the study sites appeared to be good.

Finally, the project carried out an overall assessment of the impacts of harvesting residue removal on reindeer and forestry. A bioeconomic reindeer husbandry model was used for estimating the value of the forest areas as a reindeer pasture under different scenarios. The value for reindeer husbandry was then compared with the estimated stumpage income and the costs of removing harvesting residues. The model's solutions suggest that removing harvesting residues can be economically viable, if the longer-terms effects on both reindeer husbandry and forestry are simultaneously considered. Whether the removal of harvesting residues becomes economically viable depends on the length of the forest harvesting cycle, cost of harvesting residue removal, the grazing value of the area for reindeer and the effects of logging on lichen biomass and growth.

Keywords: harvesting residues, slash, reindeer management, forest management, reindeer husbandry, uneven-aged management, lichens

Sisällys

1. Johdanto	7
2. Hankkeen tavoitteet ja tutkimusasetelma	11
2.1. Systemin vaikutussuhteiden kuvaus	13
2.2. Maastokoeasetelman kuvaus.....	13
3. Menetrit	17
3.1. Hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutukset metsätaloudelle.....	17
3.1.1. Hakkuutähteiden keruun onnistuminen	17
3.1.2. Hakkuutähteiden keruun kustannukset	17
3.1.3. Vaikutukset metsän uudistumiseen.....	20
3.2. Hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutukset porotaloudelle	21
3.2.1. Vaikutukset poronjäkäliin	21
3.2.2. Vaikutukset lupon määrään	22
3.3. Arvio taloudellisista vaikutuksista poro- ja metsätaloudelle	24
3.3.1. Metsätalouden nettotulojen arviointi	24
3.3.2. Porotalouden nettotulojen arviointi	24
4. Tulokset ja pohdinta.....	29
4.1. Hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutukset metsätaloudelle.....	29
4.1.1. Hakkuutähteiden keruun onnistuminen	29
4.1.2. Hakkuutähteiden keruun kustannukset	31
4.1.3. Vaikutukset metsän uudistumiseen.....	36
4.2. Hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutukset porotaloudelle	41
4.2.1. Vaikutukset poronjäkäliin	41
4.2.2. Vaikutukset lupon määrään	48
4.3. Arvio taloudellisista vaikutuksista poro- ja metsätaloudelle	51
4.3.1. Arvio metsätalouden nettotuloista	51
4.3.2. Arvio porotalouden nettotuloista	52
4.3.3. Arvio poro- ja metsätalouden kokonaistuloista	57
4.4. Yhteenveto kokonaisvaikutuksista poro- ja metsätaloudelle.....	59
5. Johtopäätökset.....	61
Viitteet.....	62

1. Johdanto

Ilmastonmuutoksen torjunta, sen aiheuttamat muutokset sekä siihen sopeutuminen aiheuttavat merkittäviä paineita uusiutuvien luonnonvarojen kestäväälle käytölle. Erityisesti pohjoisilla alueilla ilmastonlämpenemisen vaikutukset on arvioitu keskimääräistä suuremmiksi (IPCC 2018). Samaan aikaan lisääntyvät paineet maankäyttöä kohtaan vaikuttavat perinteisten pohjoisten elinkeinojen ja kulttuurien elinvoimaisuuteen (Heggberget ym. 2002). Nämä muutokset vaativat elinkeinoilta uusia sopeutumiskeinoja sekä eri maankäyttömuotojen yhteensovittamista.

Lapissa poronhoito ja metsätalous ovat keskeisimmät elinkeinot, jotka hyödyntävät maa-ekosysteemien tuottamia uusiutuvia luonnonvaroja. Molemmat tarvitsevat laajoja maa-alueita ja niillä on myös suuria suoria ja välillisiä aluetaloudellisia vaikutuksia (Knuuttila 2021). Poronhoidolla on lisäksi keskeinen sosiaalinen ja kulttuurinen merkitys syrjäisten ja pienten kylien poronhoitoyhteisöjen elämäntavalle ja elinvoimaisuudelle. Poronhoito muodostaa erityisesti saamelaiselle kulttuurille yhden tärkeimmistä kivijaloista. Ilmastonmuutos ja sen torjunta vaikuttavat merkittävästi sekä metsä- että porotalouteen ja samalla kokonaisuudessaan näiden elinkeinojen pohjoiseen toimintaympäristöön. Metsävarojen kestävä käyttö on sekä Suomen, EU:n että koko maailman ilmastotoimien, ilmastopolitiikan ja biodiversiteetin säilyttämiseen tähtäävien toimien keskiössä (esim. Euroopan komissio 2021). Poronhoidon osalta ilmaston lämpeneminen muuttaa porojen laidunnusolosuhteita ja porotalouden toimintaympäristöä merkittävästi (Heggberget ym. 2002). Erityisesti perinteinen luonnonlaitumiin pohjautuva poronhoito ja siihen kytkeytyvä paikallinen kulttuuriperimä ovat suurten sopeutumispaineiden edessä.

Lapissa poro- ja metsätalouselinkeinojen sopeutumiskyvyn kannalta keskeistä olisikin kyetä yhteensovittamaan luonnonlaitumiin tukeutuvan poronhoidon ja kestävänsä metsätalouden tavoitteet. Yhteensovittaminen ei kuitenkaan usein ole onnistunut molempia osapuolia tyydyttävällä tavalla (Jokinen 2019). Syitä poron- ja metsänhoidon välisiin vastakkaisiin intresseihin ja ristiriitoihin on useita, mutta poronhoidon kannalta erityisesti aikaisemmin laajasti käytössä olleet avohakkuisiin ja voimalliseen maanmuokkaukseen perustuvat metsänhoitotavat ovat olleet ongelmallisia, sillä tärkeät maajäkälä- ja luppolaitumet kärsivät eniten näistä metsänkäsittelymenetelmistä (Roturier & Bergsten 2006). Myös laidunten pirstoutuminen ja laidunrauhan puute sekä nykyisin kasvavassa määrin ilmastonmuutoksen aiheuttamat muutokset vaikuttavat monella tavalla negatiivisesti poronhoitoon (Kumpula ym. 2019, Turunen ym. 2020). Metsätalouden tuottavuus on puolestaan alentunut mm. erimielisyyksistä nousseiden metsäkiistojen takia, jotka ovat rajoittaneet ja muuttaneet metsätalouden toimintaa ja toimintamahdollisuuksia alueella.

Ristiriitojen keskiössä ovat hakkuiden sekä välittömät että pitkäaikaiset vaikutukset porojen laidunresursseihin ja niiden käytettävyyteen. Luonnonlaitumien riittävyys on keskeisin tekijä taloudellisesti, ekologisesti ja sosiaalisesti kestävässä poronhoidossa (Pekkarinen ym. 2020). Erityisesti talvilaitumet ovat avainasemassa. Myös selvityksessä Ylä-Lapin metsä- ja porotalouden yhteensovittamisesta (Saarela 2003) todetaan Suomen lainsäädännön lähtevän siitä, että poronhoidon tulisi perustua luonnonlaitumiin. Konkreettisesti tämä ilmenee muun muassa maa- ja metsätalousministeriön (MMM) esittäessä kullekin paliskunnalle suurimmat sallitut poroluvut nimenomaan talvilaidunten kestävänsä tuottokyvyn perusteella.

Metsätalous, maankäyttö ja ilmaston lämpeneminen muuttavat siis merkittävästi porolaitumia ja porotalouden toimintaympäristöä (Pape & Löffler 2012). Eri tekijöiden kumuloituvat vaikutukset heikentävät laidunten kuntoa ja käytettävyyttä sekä poronhoidon tuottavuutta ja kannattavuutta (Kumpula ym. 2014, 2019, Pekkarinen ym. 2020, 2021). Tämä muodostaa itseään vahvistavan kierteen, sillä laidunympäristön heiketessä, pirstoutuessa ja vähentyessä myös porojen itsensä aiheuttama laidunnuspaine vaikuttaa yhä enemmän laidunten kuntoon (Kumpula ym. 2014, Pekkarinen ym. 2021). Talvilaidunten liiallinen heikentyminen johtaa usein myös siihen, että on tuotannollisesti ja taloudellisesti järkevää siirtyä pääasiassa luonnonlaitumiin tukeutuvasta poronhoidosta yhä enemmän talvilaitumia korvaavaan lisäruokintaan (Pekkarinen ym. 2015). Eryteisesti mikäli talvilaidunten kunto, laatu ja saatavuus laskevat riittävän alas, on lisäruokinta ainoa mahdollisuus taloudellisesti kannattavaan poronhoitoon. Lisäruokintaan siirtyminen ei kuitenkaan välttämättä suojaa laitumia. Taloudellis-ekologisen porotalousmallin tulokset viittaavat siihen, että ollakseen taloudellisesti kannattavaa, lisäruokinta vaatii entistä suurempia poromääriä (Pekkarinen ym. 2015). Suurempi poromäärä entisestään kuluttaa jäljelle jääneitä laitumia, vaikka merkittävä osa talviravinnosta tulisikin lisäruokinasta. Tämän vuoksi riittävän laajat ja tuottavat luonnonlaitumet sekä laidunten tuottokykyyn mitoitettut poromäärät ovat keskeisessä asemassa perinteisen porotalouden kestäväen tulevaisuuden varmistamiseksi.

Talvilaitumina iäkkäät luppokuusikot ja -männiköt sekä jäkäläkankaat ovat tärkeimpiä laidunresursseja poronhoidolle. Laadultaan parhaiden vanhojen laidunmetsien osuus on kuitenkin vähentynyt merkittävästi viimeisten vuosikymmenien aikana metsätalouden seurauksena, mikä on myös vähentänyt entisestään hyvien jäkäläkankaiden ja luppometsien osuutta (Kumpula & Oinonen 2018, Kumpula ym. 2019). Vaikka luonnontilaiset vanhat metsät ovatkin parhaita laidunalueita poroille, voivat myös talousmetsät sopia hyvin porojen laidunalueiksi. Tämä kuitenkin vaatisi metsänhoitotoimia, joilla voidaan säädellä metsien tiheyttä, laatua ja ikärakennetta porojen ravintokasveille ja poronhoidolle soveltuvammaksi. Metsätalous on täten yksi merkittävimmistä maankäyttömuodoista, joka voi osaltaan vaikuttaa laidunten kuntoon ja käytettävyyteen sekä porotalouden kannattavuuteen.

Kiistat poro- ja metsätalouden välillä ovat usein kulminoituneet valtion metsien hoidosta vastaavan Metsähallituksen käyttämille ja hoitamille metsätalousalueille. Osittain tämä johtuu siitä, että Metsähallitus on ylivoimaisesti suurin metsätaloustoimija Lapin alueella. Toisaalta poronhoitolain mukaan erityisesti poronhoitoa varten tarkoitetulla alueella valtion maita ei saa käyttää tavalla, josta on huomattavaa haittaa poronhoidolle (Finlex 1990). Metsähallitus onkin viime vuosikymmeninä kehittänyt toimintatapojaan niin, että sen on mahdollista hallinnoida entistä monitavoitteisemmin Lapin luonnonvaroja ja ratkaista niihin liittyviä kiistoja (Jokinen 2019). Poronhoitoalueella Metsähallitus pyrkii toiminnassaan aina huomioimaan puunkorjuun ohella porotalouden sekä metsien muut käyttötarpeet (Sundman ym. 2019).

Nykyisin Metsähallitus suosii Lapin alueella aikaisempaa laajemmin peitteisyyttä ylläpitäviä hakkuutapoja sekä pyrkii välttämään porolaitumille haitallisia maanmuokkausmenetelmiä. Esimerkiksi korkeilla alueilla (yli 280 m merenpinnan yläpuolella) olevilla kuivien kankaiden männiköillä metsää käsitellään vain peitteellisen metsänkäsittelyn kasvatushakkuilla (Sundman ym. 2019). Kun nykyisin metsätaloudessa huomioidaan metsien monikäytön tarpeet aikaisempaa huomattavasti paremmin, ovat tarkastelun keskiöön nousseet muun muassa poro- ja metsätalouden yhteensovittamisen haasteet ja mahdollisuudet. Positiivisesta kehityksestä huolimatta on osoittautunut vaikeaksi löytää sellaisia konkreettisia keinoja, jotka auttavat

löytämään kumpaakin osapuolta tyydyttäviä ratkaisuja erityisesti alueille, joilla poronhoidon kannalta tärkeät jäkälälaitumet sijaitsevat.

Aikaisemmat tutkimukset antavat viitteitä siitä, että Metsähallituksen nykyisin suosimat harvennushakkuut ja peitteellisen metsänhoidon menetelmät, voisivat metsätalouden tulojen ylläpidon lisäksi, paikoin jopa parantaa maajäkälkien kasvua ja siltä osin hyödyttää paikallista poronhoitoa (Miina ym. 2020). Puunkorjuun ohessa muodostuvat hakkuutähteet voivat kuitenkin kumota tämän hyödyn (Bråkenhielm & Liu 1998, Akujärvi ym. 2014), jolloin metsä- ja porotalouden tavoitteiden yhteensovittaminen voi jäädä saavuttamatta. Myös Saarelan (2003) selvityksessä Ylä-Lapin metsä- ja porotalouden yhteensovittamisesta viitataan siihen, että nykyisissä metsänkäsittelymenetelmissä muun muassa hakkuutähte sekä luppolaidunten määrän väheneminen muodostavat selviä haittoja poronhoidolle. Tämän vuoksi HAKEMA-hankkeessa selvitettiin peitteellisen metsänkäsittelyn menetelmien ja niiden ohessa tehtävän hakkuutähteiden keruun osalta seuraavia kysymyksiä: 1) Voidaanko hakkuutähteen keräämisellä ylläpitää ja parantaa jäkälälaidunten laatua ja käytettävyyttä? 2) Mitä ja kuinka suuria kustannuksia hakkuutähteen keräämisestä syntyy? 3) Mitä kokonaisvaikutuksia hakkuutähteen keruulla on poro- ja metsätalouteen? 4) Mitä mahdollisuuksia menetelmä antaa poro- ja metsätalouden tarpeiden yhteensovittamisessa?

HAKEMA-hanke toteutettiin Kemin-Sompion paliskunnan alueella, jossa hakkuutähteen poiskeruu jäkäläkkökankailta, on ollut säännöllisesti esillä paliskunnan ja Metsähallituksen neuvotteluissa viime vuosikymmeninä. Konkreettisia toimenpiteitä ei kuitenkaan aikaisemmin ollut saatu yhteisesti sovittua. Asian edistämiseksi päätettiin Luonnonvarakeskuksen (LUKE) poron- ja metsätutkimuksen sekä Kemin-Sompion paliskunnan ja Metsähallituksen yhteistyön kautta lähteä pilotoimaan hakkuutähteen keruuta sekä selvittämään korjuun vaikutuksia. Hankkeen menestykselliseen toteuttamiseen vaadittu toimiva yhteistyö eri tahojen välillä toimi samalla osaltaan myös konkreettisenä esimerkkinä poro- ja metsätalouden yhteensovittamisen edistämiseksi. Hankkeen tuloksia voidaan soveltaa myös monien muiden paliskuntien alueella, sillä asia on tärkeä ja akuutti ympäri poronhoitoaluetta. Kemin-Sompion paliskunta oli kuitenkin erinomainen kohde pilottihankkeen toteuttamiseen, sillä poroja laidunnetaan luonnonlaitumilla ympäri vuoden ja alueella on runsaasti valtion maita. Sekä poro- että metsätalous ovat alueella erittäin merkittäviä elinkeinoja. Erityisen sopivaksi alueen tekevät talousmetsissä sijaitsevat runsaat suhteellisen hyväkuntoiset jäkäläalueet sekä kattava metsä-autotieverkosto. Metsähaketta käyttäviä lämpölaitoksia sijaitsee noin sadan kilometrin päästä koealueilta, mutta hakkuutähteen jatko- ja hyödyntämistä ei otettu tarkasteluun tässä hankkeessa mm. pitkien kuljetusetäisyyksien ja laitosten laatuvaatimusten takia.

Hankkeen tuloksille sekä perustetuilla koealoilla tehtävälle jatkotutkimukselle on suuri tarve poronhoitoalueella, sillä hakkuutähteen keruun vaikutuksia on toistaiseksi tutkittu pääosin Etelä-Suomessa. Aikaisemmat tutkimukset viittaavat kuitenkin siihen, että hakkuutähteen keruulla voitaisiin vähentää metsätalouden harjoittamisesta poronhoidolle aiheutuvaa haittaa (Bråkenhielm & Liu 1998, Akujärvi ym. 2014). Porotaloudelle syntyvän hyödyn suuruutta tai keräämisen kustannuksia ei kuitenkaan ole aikaisemmin systemaattisesti tutkittu poronhoitoalueella. Porolaidunten parantaminen, erityisesti jäkälkien ja lupon säilymisen ja kasvuolosuhteiden ylläpitämiseksi sekä parantamiseksi, edellyttää monilta osin metsien käsittely-, korjuu- ja kasvatustutkimusten kokonaisvaltaista kehittämistä ja muuttamista (Kumpula & Oinonen 2018). Ruotsissa tehdyt tutkimukset osoittavat, että jatkuvapeitteinen kasvatustapa ja harvennukset voisivat estää porolaidunten määrän vähenemistä ja jopa lisätä niitä (Miina ym. 2020).

Edellä mainittujen menetelmien ohessa tehtävä hakkuutähteiden kerääminen ja maanmuokkauksen keventäminen voisivat lisätä jäkälän peittävyden kasvua (Sandström ym. 2016).

Hakkuutähteiden keruun vaikutusten kokonaisvaltainen huomioiminen eri elinkeinoihin kohdistuvien vaikutusten osalta on merkittävä kokonaisuus elinkeinojen yhteensovittamista kehitettäessä. Vuosituhannen vaihteessa toteutetun Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitoksen ja Metsähallituksen yhteistutkimuksessa arvioitiin nimenomaan hakkuutähteiden aiheuttavan merkittävimmän haitan. Kyseissä tutkimuksissa hakkuutähteet peittivät erityyppisissä tutkimissa hakkuissa alleen keskimäärin 24 % hakkuualasta (Kumpula ym. 2003). Hakkuutähteiden aiheuttama paksu neulas- ja oksakerros todennäköisesti heikentää jäkälän menestymistä ja edistää sen vähittäistä korvautumista sammalilla ja varvuilla. Hakkuutähteet toimivat myös kaivuuhaittana, vähentäen tai jopa kokonaan lopettaen porojen kaivuun hakkuualueilla paksun lumen vallitessa (Kumpula ym. 2007). Poro voi myös välttää hakkuualueita, koska kokee mätänevän hakkuutähteen hajun epämiellyttävänä.

Myöskään metsäluonnon kannalta erittäin runsas hakkuutähteiden määrä maaperässä ei ole luontainen tila. Paikallisesti esimerkiksi tuulenskaatoalueilla voi olla runsaastikin oksa- ja neulastähdettä, mutta laaja-alaisia hakkuuta vastaavia hakkuutähdemääriä ja niiden hajoamista seuraavaa runsasta ravinnemäärää ei todennäköisesti luonnonmetsissä usein löydy. Toisaalta hakkuutähteiden sisältämät ravinteet parantavat maaperän ravintotaloutta ja voivat lisätä puuston kasvua sekä metsätalouden tuottavuutta. Hakkuutähteet voivat kuitenkin myös hidastaa luontaista taimettumista (Hyppönen & Salminen 2013, Hyppönen ym. 2014). Merkittävimmän haitan hakkuutähteistä oletetaan kuitenkin syntyvän porotaloudelle. Tämän vuoksi hakkuutähteiden korjuu onkin vuosituhaten vaihteen jälkeen ollut toistuvasti esillä, kun on puhuttu metsätalouden ja poronhoidon välisten ristiriitojen sovittelusta.

Aiheeseen todetusta merkittävästä huolimatta, siitä ei ole aikaisemmin tuotettu kokonaisvaltaista analyysia poro- ja metsätalouden kannattavuuden ja kestävyuden kannalta. HAKEMA-hankkeen tavoitteena oli vastata tähän puutteeseen. Hankkeessa tutkittiin hakkuutähteiden keräämistä yhtenä keinona, jolla poro- ja metsätalouden intressejä voitaisiin yhteensovittaa entistä paremmin. Tämän vuoksi hankkeeseen osallistui merkittävältä osin poro- ja metsätalouden toimijoita, poron- ja metsähoidon tutkijoiden lisäksi. Hankeidea ja sen suunnittelu alkoi paikallisten poronhoitajien toiveista ja hakkeen suunnittelua jatkettiin yhteistyössä metsä- ja porotalouden edustajien kanssa. Lapin poro- ja metsätalouden toimijoiden kannalta on keskeistä selvittää, voidaanko hakkuutähteiden keruu järjestää tavalla, joka mahdollistaisi elinkeinojen paremman toiminnan samoilla alueilla. Tätä tarkoitusta varten HAKEMA-hankkeessa selvitettiin 1) jatkuvapeitteisen metsänhoidon ohessa tehtävästä hakkuutähteiden keruusta aiheutuvia suoria kustannuksia metsätaloudelle, 2) hakkuutähteiden keruun ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon hakkuiden hyötyjä ja kustannuksia poro- ja metsätaloudelle ja 3) hakkuutähteiden keruun ja jatkuvapeitteisten hakkuiden vaikutuksia poron tärkeimmille ravintokasveille sekä metsän uudistumiselle. Näiden pohjalta tuotettiin yhteenveto jatkuvapeitteisen hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun hyödyistä ja haitoista molemmille elinkeinoille. Tuotettu kuvaus on kuitenkin vasta ensimmäinen vaihe hakkuutähteiden jättämisen ja keruun kokonaisvaikutusten selvittämiseksi, sillä muutokset, jotka pohjoisessa luonnossa tapahtuvat, ovat usein hitaita. Tämän vuoksi hankkeessa käsitellyt ja inventoidut koealat on perustettu pitkäaikaisiksi seurantakoealoiksi, joiden inventoinnit tulevaisuudessa tarkentavat ja päivittävät tässä hankkeessa tuotettua tietoa hakkuutähteiden keruun ja jatkuvapeitteisen metsänkäsittelyn pitkäaikaisvaikutuksista muuttuvassa ympäristössä.

2. Hankkeen tavoitteet ja tutkimusasetelma

HAKEMA-hankkeen tavoitteena oli pilotoida valtio-omisteisella poronhoitoalueella sijaitsevalla metsätalousalueella hakkuutähteiden keräämistä jäkäläkankailta jatkuvapeitteisten hakkuiden yhteydessä sekä tutkia keräämisen kustannuksia ja hyötyjä metsä- ja porotaloudelle. Hankkeessa arvioitiin hakkuutähteiden keräämisen taloudellisia kokonaisvaikutuksia tarkastelemalla keräämisen aiheuttamia kustannuksia puunkorjuulle ja metsätaloudelle sekä keräämisen hyötyjä porotaloudelle. Pilottihanke pohjautui tiiviiseen yhteistyöhön elinkeinojen ja niihin liittyvän tutkimuksen välillä.

Hankkeen päätavoitteena oli tuottaa arvio hakkuutähteiden keruun ja hakkuiden kokonaisvaikutuksista poro- ja metsätaloudelle. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi hankkeessa pilotoitiin hakkuutähteiden keräämistä sekä pyrittiin vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin.

Tutkimuskysymys 1: Mitkä ovat hakkuutähteiden keruun suorat kustannukset?

Tutkimuskysymykseen 1 vastaamiseksi hankkeessa perustettiin koealat, joilla tehtiin jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen hakkuut. Tutkimuksessa käytettiin hakkuumenetelminä poimintahakkuuta, joissa jäljelle jäänyt puusto pyrittiin jättämään pohjapinta-alaltaan (ppa) noin 10 m²/ha tiheyteen sekä pienalakasvatusta (kutsutaan usein myös pienaukkohakkuuksi), jossa aukon kooksi valittiin 0,3 ha. Puolelta hakkuukoealoista hakkuutähteet kerättiin pois hakkuiden yhteydessä ja puolelta koealoista hakkuutähteet jätettiin puunkorjuun ja metsänhoidon sen hetkisten vakiintuneiden käytäntöjen mukaisesti. Koehakkuutyömailla ainespuun kertymä mitattiin rungoittain hakkuukoneen mittalaitteen avulla hakkuun yhteydessä ja hakkuutähteen määrä kuormainvaakamittauksen avulla metsäkuljetuksen yhteydessä. Korjuu suoritettiin talvella, jotta maaperävaurioiden riski voitiin minimoida ja hakkuutähteiden talteen saanto maksimoida, kun hakkuutähteet voitiin kuormata metsätraktorin kyytiin lumen päältä. Hakkuutähteiden keruun suorat kustannukset laskettiin hakkuista ja metsäkuljetuksesta koottujen mittatietojen pohjalta hyödyntäen aikaisemmin kehitettyjä tuottavuus- ja kustannusmallia. Laskenta perustui aines- ja energiapuun integroidun korjuun tuottavuus- ja kustannusmallien hyödyntämiseen sekä koehakkuutyömailta saatuun korjuuolosuhdetietoon ainespuun ja hakkuutähteen kertymistä poimintahakkuilla ja pienalakasvatuksessa. Hakkuutähteiden korjuukustannuslaskelmissa huomioitiin hakkuutähteiden kasauksen hakkuun tuottavuutta alentava vaikutus ainespuunkorjuussa sekä hakkuutähteiden metsäkuljetuksen kustannus.

Tutkimuskysymys 2: Mitkä ovat hakkuiden, hakkuutähteiden ja hakkuutähteiden keruun kasvillisuusvaikutukset poron ravintokasveille ja metsän uudistumiselle?

Tutkimuskysymykseen 2 vastaamiseksi, käsiteltäville alueille perustettiin yhteensä kaksikymmentäviisi yhden hehtaarin kokoista koealaa. Näistä koealoista kahdellekymmenelle suoritettiin tutkimuskysymyksessä 1 kuvatut hakkuut ja viisi jätettiin kontrollialoiksi. Käsitelyjen kohdentuminen koealoille arvottiin. Perustetuilla koealoilla inventoitiin porojen ravintokasvien määrät, puuston ikä ja määrät ja taimiaineksen määrä hakkuuta edeltäneenä syksynä. Hakkuiden jälkeisenä syksynä käsitellyt koealat inventoitiin uudestaan, jotta voitiin tutkia hakkuutähteiden keruun onnistumista sekä hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutuksia porojen tärkeimpiin ravintokasveihin ja taimiainekseen.

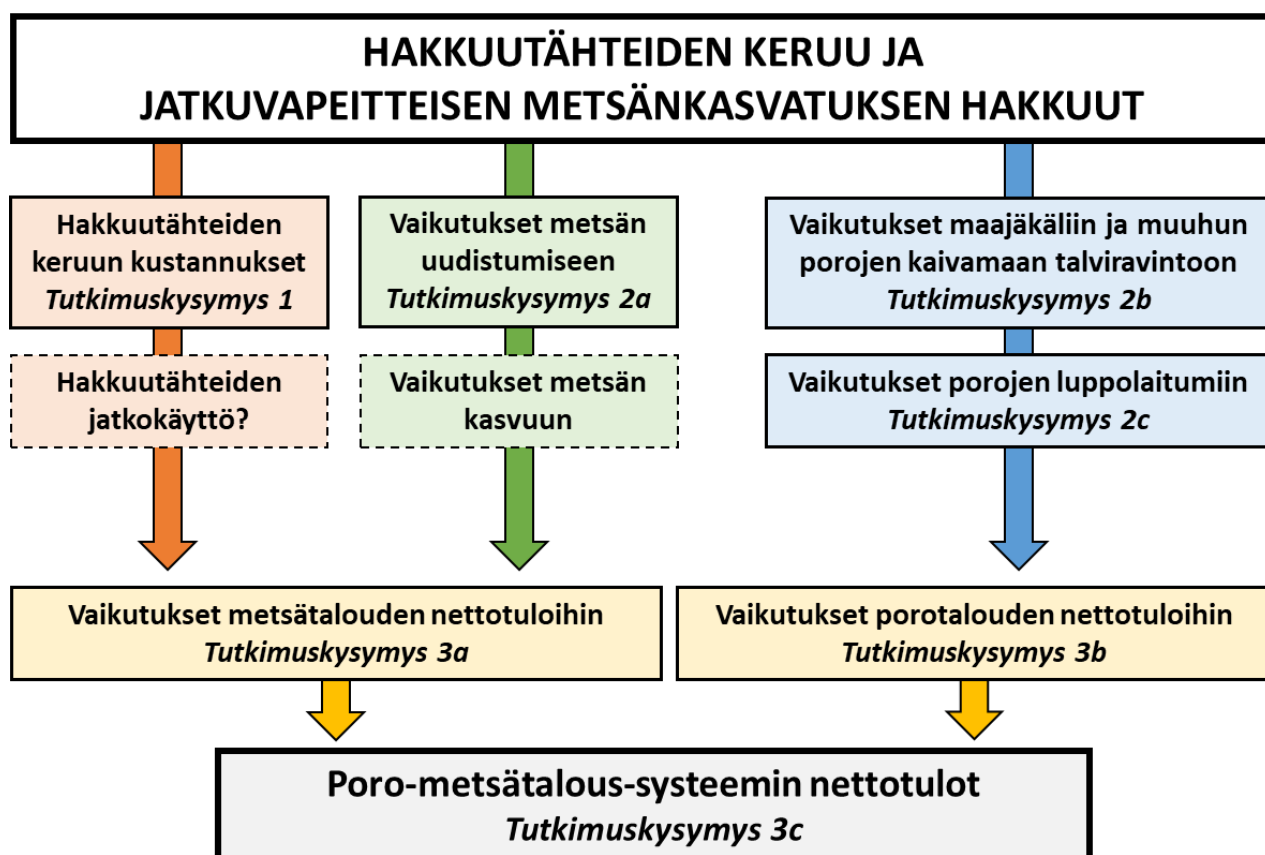
Tutkimuskysymys 3: Mitkä ovat hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun pitkän aikavälin taloudelliset kokonaisvaikutukset poro- ja metsätaloudelle?

Tutkimuskysymykseen 3 vastaamiseksi koottiin kokonaiskuvaus hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun taloudellisista vaikutuksista poro- ja metsätaloudelle. Kokonaiskuvaus perustuu tutkimuskysymysten 1 ja 2 tuloksiin sekä olemassa olevalla taloudellis-ekologisella porotalousmallilla (Tahvonen ym. 2014, Pekkarinen ym. 2015, Pekkarinen 2018) laskettuihin tuloksiin. Taloudellis-ekologisella porotalousmallilla arvioitiin hakkuutähteiden keruun pitkän aikavälin taloudellisia kokonaisvaikutuksia porotaloudelle. Yhdistämällä mallilla lasketut arviot porotalouden tuottavuudesta, tutkimuskysymyksen 1 mukaiset arviot hakkuutähteiden keruun kustannuksista sekä arvio metsätalouden tuottavuudesta, saatiin kokonaisarvio hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun pitkäaikavälin taloudellisista vaikutuksista poro- ja metsätaloudelle.

Yhdessä tutkimuskysymysten 1–3 tulokset tuottavat pohjan kokonaiskuvaukselle hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun vaikutuksista poro- ja metsätaloudelle. Luonnonprosessit pohjoisessa ovat kuitenkin erittäin hitaita, joten monet hakkuutähteiden keruun aiheuttamista vaikutuksista tulevat näkymään koealoilla vasta vuosien ja jopa vuosikymmenten päästä. Tämän vuoksi HAKEMA-hankkeessa perustetut koealat jätetään pysyviksi seurantakoealoiksi, joilla tullaan seuraamaan hakkuutähteiden ja niiden keruun, käytettyjen metsänkäsittelymenetelmien sekä poron laidunnuksen vaikutuksia porojen ravintokasveihin ja metsän uudistumiseen sekä kasvuun. Nämä pitkäaikaisen seurannan tulokset tulevat tarkentamaan hankkeessa tehtyjä arvioita hakkuutähteiden keruun ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon pitkäaikaisvaikutuksista poro- ja metsätaloudelle.

2.1. Systemin vaikutussuhteiden kuvaus

Hankkeessa tehdyn tutkimuksen kohteena olivat Lapin kuivien ja kuivahkojen mäntykankaiden poro-metsätalous-systeemit. Erityisesti hankkeessa oltiin kiinnostuneita siitä, minkälaisia kokonaisvaikutuksia hakkuutähteiden keruulla jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen hakkuiden yhteydessä on näihin systeemeihin ja mitä suuruusluokkaa nämä vaikutukset ovat. Vaikutussuhteiden ymmärtämiseksi sekä hankkeessa tehdyn tutkimuksen luokittelemiseksi systeemin vaikutustekijöistä luotiin yksinkertainen kuvaus. Kuvan 1 vaikutussuhdekaavio kuvaa niitä tärkeimpiä tekijöitä, joita hakkuutähteiden keruulla ja hakkuilla arvioitiin olevan tarkasteltavana olevaan poro-metsätalous-systeemiin.



Kuva 1. Hakkuutähteiden keruun ja jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen hakkuiden vaikutussuhteet poro- ja metsätalouden nettotuloihin.

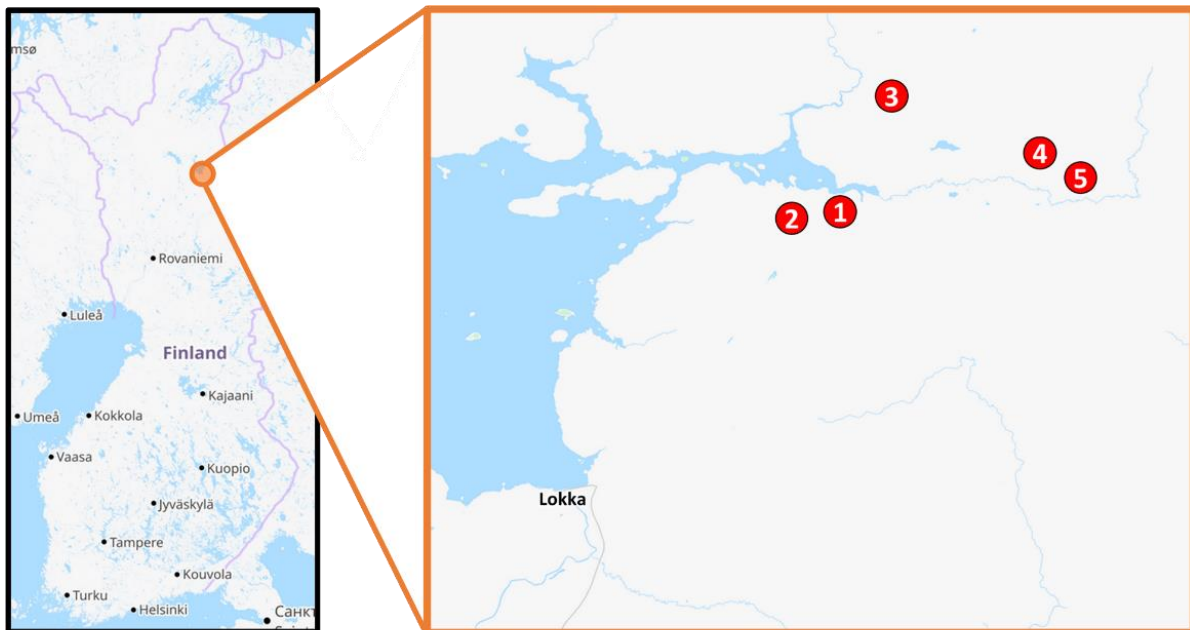
2.2. Maastokoeasetelman kuvaus

Taulukko 1. esittää HAKEMA-hankkeessa perustettujen koealojen hierarkian, käytetyn terminologian sekä eri koealojen koot ja määrät. Kaikki koealat sijaitsivat yhden hehtaarin kokoisten (100 m x 100 m) käsittelyruutujen sisällä. Näitä käsittelyruutuja perustettiin yhteensä kaksikymmentäviisi kappaletta siten, että viisi käsittelyruutua sijaitsivat aina lähellä toisiaan, muodostaen kasvupaikkatyyppiltään ja puustoltaan mahdollisimman homogeenisen hakkuukohteen. Hakkuukohteita oli täten viisi ja ne toimivat toistoina käsitellyille. Kunkin hakkuukohteen viidestä käsittelyruuduista kaksi käsiteltiin poimintahakkuilla ja kaksi pienalakasvatushakkuilla, yhden ruudun jäädessä hakkaamattomaksi kontrolliruuduksi. Jokaisessa hakkuukohteessa sekä poimintahakkuun että pienalakasvatushakkuun toisesta ruudusta kerättiin hakkuutähteet

ja toiselle ruudulle ne jätettiin. Kokeen yhteispinta-ala on täten 25 ha, josta 20 ha käsiteltiin jatkuvapeitteisen metsänkäsittelyn hakkuilla ja 5 ha jätettiin kontrollialaksi. Hakkuukohteet valittiin Kemin-Sompion paliskunnan, Metsähallituksen ja Luonnonvarakeskuksen kesken Metsähallituksen hallinnoimista metsistä Sodankylän ja Savukosken kuntien alueelta. Valitut hakkuukohteet sijaitsevat Lokan kylästä koilliseen ja ne numeroitiin yhdestä viiteen. Kuva 2. näyttää hakkuukohteiden numeroinnin sekä niiden sijoittumisen alueelle.

Taulukko 1. Koeasetelman hierarkia, käytetty terminologia sekä eri koealojen koot ja määrät.

Nimi	Määrä, kpl	Koko	Muoto
Hakkuukohteet	5	5 ha	5 lähekkäin sijoitettua 1 ha ruutua
↙			
Käsittelyruutu	25	1 ha	100 m x 100 m ruutu
↙			
Puustokoeala	200	0.02 ha	8 m säteinen ympyrä
↙			
Taimikoeala	200	50 m ²	3,99 m säteinen ympyrä
Kasvillisuusruutu	400	0,25 m ²	0,5 m x 0,5 m ruutu
* Relaskoopikoealat	125	vaihteleva	vaihteleva

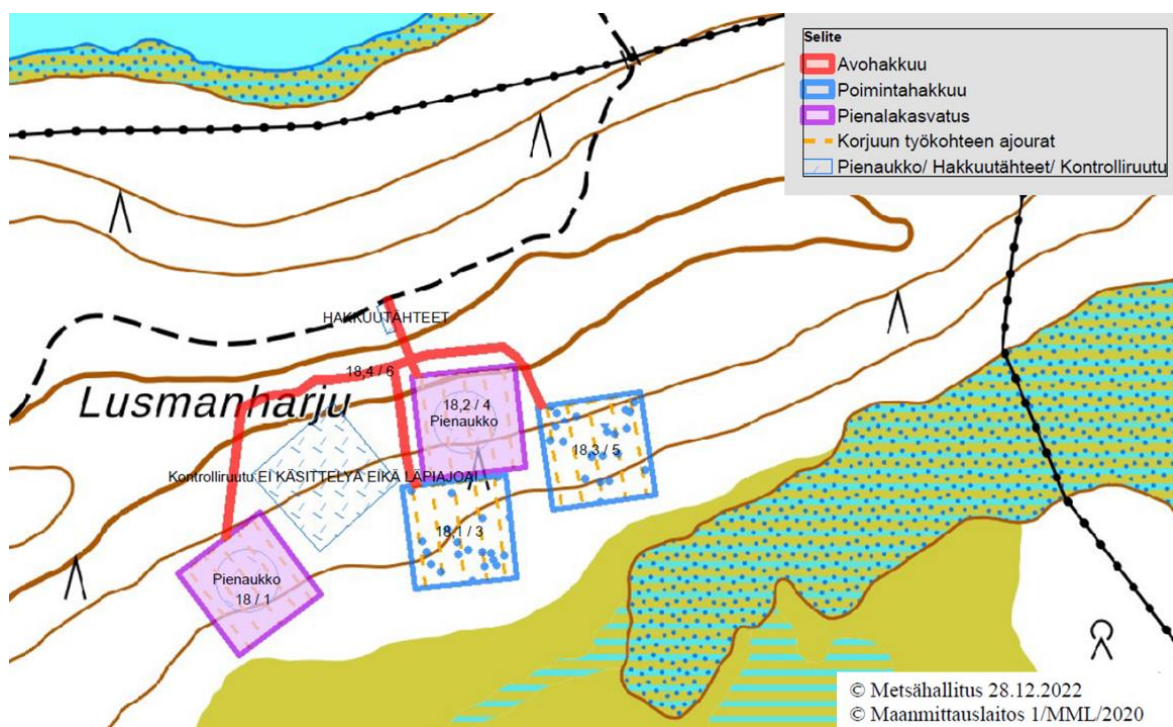


Kuva 2. Hakkuukohteita on viisi ja ne sijaitsevat osin Sodankylän ja osin Savukosken kunnassa, noin 30 kilometriä koilliseen Lokan kylästä.

Kullakin hakkuukohteella on viisi yhden hehtaarin kokoista käsittelyruutua (Kuva 3), jotka numeroitiin yhdestä viiteen. Numerointi aloitettiin lounaasta, josta kierrettiin myötäpäivään tai mikäli ruudut olivat linjassa, numeroitiin ne lounaasta koilliseen. Samaa periaatetta käytettiin myös kaikessa muussa numeroinnissa, kuten koealojen ja kulmapaalujuen numeroinnissa. Käsittelyruudut merkittiin maastoon muovisilla sinisillä kulmapaaluilla, jotka ovat halkaisijoltaan

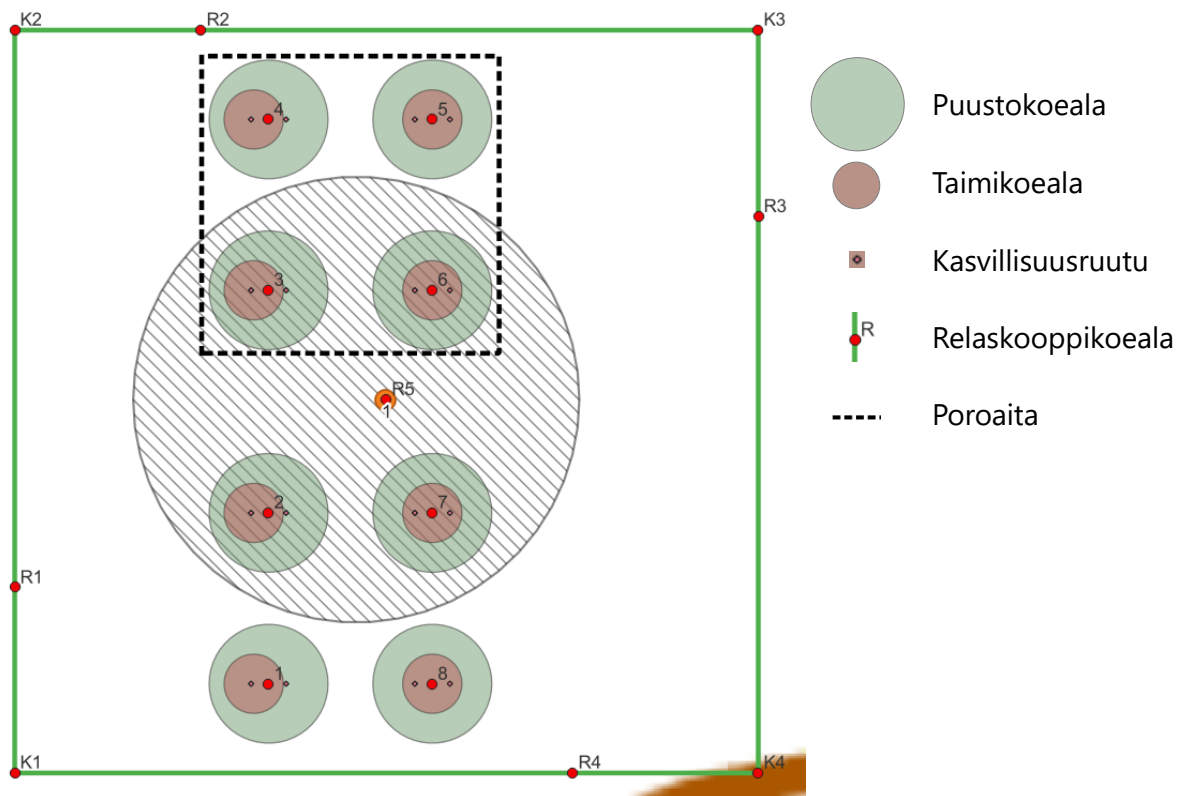
noin 3–4 cm. Ruudun ensimmäisen kulman sijainti määritettiin joko GPS-paikannuksen tai aikaisemmin merkityn viereisen ruudun perusteella. Muiden kulmien paikat määritettiin käyttämällä kulmaprismaa sekä 100 m mittaista nauhaa.

Jokaisen viiden hakkuukohteen jokaiselle viidelle käsittelyruudulle (1 ha pinta-ala) arvottiin käsittelyt niin, että kullakin hakkuukohteella on jokainen käsittely yhteen kertaan edustettuna. Erilaisia käsittelyjä oli täten viisi ja ne koostuivat kahdesta eri hakkuutavasta ja kahdesta eri hakkutähteen käsittelytavasta sekä kontrollista, jossa hakkuuta ei suoritettu ja johon ei täten myöskään hakkuutähteitä muodostunut. Valitut hakkuutavat olivat pienalakasvatus ja poimintahakkuu. Hakkuutähteen keruutavat ovat hakkuutähteen keruu ja hakkuutähteen jättö. Näistä muodostuivat seuraavat viisi käsittelyä; 1) pienalakasvatus, hakkuutähteen keruu, 2) pienalakasvatus, hakkuutähteen jättö, 3) poiminta, hakkuutähteen keruu, 4) poiminta, hakkuutähteen jättö sekä 5) kontrolli.



Kuva 3. Kullekin hakkuukohteelle sijoitettiin viisi käsittelyruutua, joille eri käsittelyt arvottiin. Esimerkkikuvassa hakkuukohde 1 ja sille sijoitetut käsittelyruudut.

Kuva 4. esittää eri koalojen sijoittumisen käsittelyruudulle. Kullekin käsittelyruudulle asetettiin kahdeksan ympyrän muotoista puustokoealaa (8 m säde), kahdeksan ympyränmuotoista taimikoealaa (3,99 m säde) ja kuusitoista neliönmuotoista kasvillisuuskoealaa (0,5 m sivu). Hankkeen lopuksi syksyllä 2023 puolet koaloista aidattiin (Kuva 4, musta katkoviiva), jotta tulevissa seurantatutkimuksissa porojen pitkäaikainen laidunnusvaikutus pystytään erottamaan muista tekijöistä. Lisäksi käsittelyruuduille asetettiin neljä puolikasta relaskooppikoealaa, jotka ovat 25 m etäisyydellä käsittelyruutujen kulmista. Yksi täyden pyörähdyksen relaskooppikoeala asetettiin käsittelyruudun keskusta. Kullakin puustokoealalta otettiin lisäksi maaperänäytteet yhdeksästä koosta, mutta niiden analysointiin ei HAKEMA-hankkeen aikana ollut resursseja, joten ne pakastettiin ja tullaan analysoimaan jatkohankkeissa.



Kuva 4. Käsittelyruutujen (100 x 100 m) kulmien (K1–K4) sekä koealojen (1–8) numerointi ja sijoittuminen käsittelyruudulle. Käsittelyruuduille asetettiin kahdeksan puustokoealaa (8 m säde) ja taimikoealaa (3,99 m säde) sekä kuusitoista kasvillisuusruutua (0,5 m x 0,5 m). Lisäksi kuva esittää relaskooppikoealojen sijainnit ja numeroinnin (R1–R5). Musta katkoviiva esittää syksyllä 2023 tehtyjen aitojen sijoittumista ja viivoitettu ympyrä pienaukon (eli pienalakasvatuksen) sijoittumisen.

3. Metodit

3.1. Hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutukset metsätaloudelle

3.1.1. Hakkuutähteiden keruun onnistuminen

Hakkuutähteiden keruun onnistumista arvioitiin tarkastelemalla hakkuutähteiden keskimääräisiä peittävyksiä koealoilla, joilta hakkuutähteet kerättiin ja vertaamalla niitä hakkuutähteiden peittävyksiin koealoilla, joilta hakkuutähteitä ei kerätty. Hakkuutähteiden peittävyksiä ja määriä arvioitiin kolmella eri tavalla. Ensimmäiseksi hakkuutähteiden peittävyys arvioitiin silmämääräisesti taimikoealoilta (3,99 m säteiset ympyräkoealat). Toiseksi puustokoealoilta (8 m ympyräkoealat) kirjattiin ylös kaikki suuret hakkuutähdeksat, joiden keskimääräinen korkeus oli yli 20 cm ja ala vähintään 1 m². Kolmanneksi kasvillisuusruutujen (0,5 m x 0,5 m ruutu) solmumittauksissa kirjattiin ylös jokaisen solmun kohdalle osunut hakkuutähde ja sen korkeus maanpinnasta.

Kolmesta eri arviointitavasta solmumittaukseen pohjaava arvio tuottaa todennäköisesti luotettavimman kuvan hakkuutähteiden kokonaispeittävyksistä. Se sisältää myös vähiten mitataajasta johtuvia virhelähteitä. Tämän vuoksi solmumittauksisten tuloksia käytettiin ensisijaisena arviona hakkuutähteiden peittävyksistä ja korkeuksista, kun vertailtiin hakkuualueille jäänyttä hakkuutähteiden määrää eri käsittelyjen välillä. Hakkuutähdeksajen mittaukset puustokoealoilta antavat toisaalta kattavan ja systemaattisen kuvan suurten hakkuutähdeksajen määrästä eri käsittelyjen välillä. Myös taimikoealoilta arvioidut hakkuutähteiden peittävydet raportoitiin, mutta niihin arvioidaan sisältyvän eniten epävarmuutta.

Eri arviointitavoilla saaduista hakkuutähteiden peittävyksistä laskettiin kustakin keskimääräiset hakkuutähteiden peittävydet eri metsänkäsittelyille. Poimintahakkuun osalta menetelmät olivat poimintahakkuu, jossa hakkuutähteet kerätään ja poimintahakkuu, jossa hakkuutähteet jätetään. Pienalakasvatushakkuissa 70 % käsittelyruudusta käsiteltiin vastaavilla poimintahakkuilla kuin poimintahakkuissa koko käsittelyruutu, mutta lisäksi käsittelyruudun keskelle haktiin noin 0,3 ha kokoinen puuton aukko. Tämän vuoksi pienalakasvatuksen osalta hakkuutähteiden keskimääräiset peittävydet laskettiin erikseen puuttomalle aukolle sekä sitä ympäröivälle välialueelle. Oletuksena oli, että hakkuutähteiden keskimääräiset peittävydet välialueilla olisivat lähellä poimintahakkuualueilta arvioituja peittävyksiä, sillä molemmilla alueilla metsä käsiteltiin samalla tavalla. Aukon osalta tulosten voidaan olettaa kuvaavan tilannetta, joka olisi avohakkuualueilla. Koska koejärjestelyssä sekä aukolle että välialueelle osui yhtä monta koealaa (4 puusto- ja taimikoealaa sekä 8 kasvillisuusruutua), pienalakasvatuksen keskimääräisiä hakkuutähteiden peittävyksiä laskettaessa välialueiden ja aukon peittävyksiä painotettiin suhteessa 0,7 / 0,3.

3.1.2. Hakkuutähteiden keruun kustannukset

Korjuuolosuhdetiedot

Hakkuutähteiden keruun korjuukustannuslaskelmat perustuivat 100 m x 100 m koehakkuuruuduilta (käsittelyruutu) johdettuun korjuuolosuhdetietoon hakkuutähteiden ja ainespuun kertymistä (m³/ha), sekä hakkuupoistuman tiheydestä (runkoja/ha) ja järeystä (m³), kun

hakkuutapoina olivat pienalakasvatus ja poimintahakkuu (Taulukko 2). Hakkuukoeruutujen puunkorjuu suoritettiin talvella (maaliskuu 2023), jolloin voitiin minimoida maaperävaurioiden riski ja maksimoida hakkuutähteiden saanto korjuussa, kun hakkuutyön yhteydessä kasoihin hakatut hakkuutähteet voitiin kuormata suoraan lumen päältä kuormatraktorin kyytiin.

Ainespuun osalta määrän mittausta perustui Komatsu 931 hakkuukoneen mittalaitteen keräämään hpr-tietoon koehakkuuruuduilta hakattujen runkojen ja rungoista katkottujen puutaveralajien tilavuuksista (Taulukko 3) ja kappalemääristä. Hakkuutähteen määrä selvitettiin puolestaan kuormainvaakamittauksen avulla metsäkuljetuksen yhteydessä (Komatsu 875 kuormatraktori). Kuormainvaakamittaukseen perustuvat hakkuutähteen tuoremassat muunnettiin kiintokuutiometreiksi virallisella muuntokertoimella 950 kg/m^3 . Tutkimuksessa käytetyt mitaustavat ja muuntokertoimet ovat vakiintuneita ja puutavaranmittauslain mukaisia käytäntöjä aines- ja energiapuun korjuussa (Heikurainen ym. 2018, Heikurainen ym. 2019, Heikurainen ym. 2020).

Koeruuduilla hakkuut toteutettiin siten, että ne vastasivat vallitsevia metsänhoitosuosituksia puuston harvennusvoimakkuuden (m^2/ha), kuin myös ajouravälin (m) ajouran määrän (m/ha) osalta. Korjuukustannuslaskelmassa ajouraväli oli 20 m ja ajouraa hehtaarilla oli 600 m (Niemi 1992). Pienalakasvatus erosi poimintahakkuusta siten, että koehakkuuruudun keskelle tehtiin 0,3 ha kokoinen pienaukko. Hakkuukoeruutujen hakkuut ja metsäkuljetus toteutettiin viidellä eri kohteella, joissa hakkuutapoina olivat pienalakasvatus ja poimintahakkuu. Yhteensä hakkuukoeruutuja oli kymmenen kappaletta (Taulukko 2).

Taulukko 2. Hakkuukoeruutujen mukaiset korjuuolosuhteet.

Kohde ja hakkuutapa	Hakkuutähte kertymä, m^3/ha	Ainespuu kertymä, m^3/ha	Hakkuupoistuman tiheys, runkoja/ha	Hakkuupoistuman järeys, m^3
1. Pienalakasvatus	12,6	70,0	335	0,21
1. Poimintahakkuu	7,1	40,9	259	0,16
2. Pienalakasvatus	13,2	59,0	297	0,20
2. Poimintahakkuu	8,2	46,5	267	0,17
3. Pienalakasvatus	13,4	54,3	236	0,23
3. Poimintahakkuu	10,0	47,1	283	0,17
4. Pienalakasvatus	14,4	45,7	391	0,12
4. Poimintahakkuu	9,6	38,3	329	0,12
5. Pienalakasvatus	12,9	43,8	278	0,16
5. Poimintahakkuu	8,9	33,4	230	0,15

Taulukko 3. Ainespuun kertymä (m^3/ha) hakkuukoeruuduilta puutavaralajeittain.

Kohde ja hakkuutapa	Mäntytukki, m^3/ha	Mänty pikkutukki, m^3/ha	Mäntykuitu, m^3/ha	Koivukuitu, m^3/ha	Ainespuu yht., m^3/ha
1. Pienalakasvatus	1,0	43,0	26,0	0,0	70,0
1. Poimintahakkuu	0,0	17,6	23,3	0,0	40,9
2. Pienalakasvatus	0,4	20,8	37,8	0,0	59,0
2. Poimintahakkuu	2,2	21,1	23,2	0,0	46,5
3. Pienalakasvatus	3,9	24,2	23,3	3,0	54,3
3. Poimintahakkuu	5,5	20,8	20,7	0,2	47,1
4. Pienalakasvatus	0,0	16,2	29,3	0,2	45,7
4. Poimintahakkuu	0,0	13,8	24,4	0,1	38,3
5. Pienalakasvatus	0,0	21,1	22,7	0,0	43,8
5. Poimintahakkuu	0,0	13,9	19,5	0,0	33,4

Korjuukustannusten laskentaperusteet

Hakkuutähteiden korjuukustannuslaskelmissa huomiointiin hakkuutähteiden kasoille hakkuun lisäkustannus sekä hakkuutähteiden metsäkuljetuksen kustannus. Korjuukustannuslaskelmassa oletettiin, että hakkuutähteiden keruuta ja talteen saantoa edistävän työtavan vuoksi, hakkuukoneen tuottavuus alenee 10 % (Jylhä ym. 2019) verrattuna normaaliin hakkuutapaan, jossa hakkuutähteitä ei pyritä kasaamaan hakkuutyön yhteydessä. Hakkutähteiden korjuukustannukset laskettiin pinta-alaa ($\text{€}/\text{ha}$) ja kiintokuutiometriä ($\text{€}/\text{m}^3$) kohden hakkuukoeruutuja vastaavissa korjuuolosuhteissa (Taulukko 2). Saatuja tuloksia verrattiin ainespuun korjuukustannuksiin vastaavilla hakkuukoeruuduilla.

Hakkuukoneen tuottavuus hakkuukoeruutuja vastaavissa korjuuolosuhteissa (Taulukko 2) laskettiin Laitila & Repola (2023) ajanmenekkimalleilla, jossa puulajin (mänty) ohella ainespuuhakkuun tuottavuutta selitettiin hakkuupoistuman tiheydellä (runkoja/ha) ja rungkon käyttöosan tilavuudella (m^3). Hakkuukustannukset laskettiin työtavalle, jossa hakkuutähteiden kasaus oli kytketty osaksi hakkuutyötä, sekä työtavalle, jossa kasaukseen ei kiinnitetä huomioita. Hakkuutähteiden kasoille hakkuun lisäkustannus oli em. työtapojen välinen kustannusero ($\text{€}/\text{m}^3$). Laskelmassa hakkuukoneen käyttötuntikustannus (Alv 0 %) oli 119,8 $\text{€}/\text{h}$ (Laitila & Repola 2023) ja mallilla (Laitila & Repola 2023) lasketut tehotuntituottavuudet ($\text{m}^3/\text{E}_0\text{h}$) muutettiin käyttötuntituottavuuksiksi ($\text{m}^3/\text{E}_{15}\text{h}$) kertoimella 1.276 (Väätäinen ym. 2007).

Hakkuutähteiden ja ainespuun metsäkuljetuksen tuottavuudet hakkuukoeruutuja vastaavissa korjuuolosuhteissa (Taulukko 2) laskettiin Asikainen ym. (2001) ja Nurmisen ym. (2006) ajanmenekkimalleilla, joissa metsäkuljetuksen ajanmenekkiä selitettiin kertymällä (m^3/ha), metsäkuljetusmatkalla (m) ja kuormatraktorin kuormakoolla (m^3). Hakkutähteiden ja ainespuun korjuukustannuslaskelmissa metsäkuljetusmatka oli 300 m ja kuormatraktorin käyttötuntikustannus (Alv 0 %) oli 85 $\text{€}/\text{h}$ (Laitila & Repola 2023). Metsäkuljetuksen tehotuntituottavuudet muutettiin käyttötuntituottavuuksiksi kertoimella 1,224 (Väätäinen ym. 2007) sekä hakkuutähteiden että ainespuun metsäkuljetuksessa. Ainespuulla kuormatraktorin kuormakoko oli 11 m^3 (Laitila & Repola 2023) ja hakkuutähteillä 5,2 m^3 . Hakkuutähteillä kuormakoko perustui kuormainvaakamittaukseen ja metsäkuljetuksen toteutuneiden kuormien keskiarvoon koehakkuuruuduilta.

3.1.3. Vaikutukset metsän uudistumiseen

Hakkuutähteiden vaikutus taimien määrään

Taimien määrät, iät ja pituudet laskettiin kultakin 3,99 m säteiseltä taimikoealalta ennen hakkuuta kesällä 2022. Hakkuiden jälkeen kesällä 2023 taimien määrät ja pituudet mitattiin uudestaan koealoilta, joille oli suoritettu jatkuvapeitteisen metsänhoidon hakkuut. Hakkuutähteiden vaikutusta hakkuun jälkeiseen männyntaimien määrään mallinnettiin yleistetyillä lineaarisilla sekamalleilla. Jakaumaoletus oli negatiivinen binomijakauma, jossa käytettiin neliöityä varianssifunktiota (quadratic variance function, NB2-parametrisointi). Hierarkiatasot mallissa olivat hakkuukohte, käsittelyruutu ja taimikoeala. Kahdelle ylimmälle tasolle estimoitii vakion varianssi (random intercept model). Malli laskettiin R-ohjelmointiympäristössä kirjastolla glmmTMB (Brooks ym. 2017).

Ensimmäisenä malleissa testattiin käsittelyn vaikutus. Käsittelyjä oli neljä, poiminta- ja pienalakasvatushakkuu ja kummastakin oli koealat hakkuutähteiden keruulla ja ilman keruuta. Kaikki neljä käsittelyä oli arvottu. Käsittelyn vaikutusta testattiin ilman kovariaatteja sekä ottamalla malliin mukaan kasvupaikan karuutta kuvaava jäkäliden peittävyys ja myös männyn- taimien lukumäärä ennen hakkuuta. Kaikkien kolmen muuttujan pareittaiset yhdysvaikutukset testattiin ja otettiin malliin ne, jotka olivat merkitseviä 5 %:n riskitasolla.

On huomattava, että hakkuun jälkeinen taimimäärä saattoi olla suurempi tai pienempi kuin ennen hakkuuta, koska kummallakin mittauskerralla mitattiin vain 10 cm ja pitemmät taimet, jolloin siirtymää taimiaineskohortista taimiksi esiintyi ja toisaalta hakkuu oletettavasti vahingoitti ja poisti taimia. Malleissa, joissa käsittely oli muuttujana, käytettiin painokertoimia siten, että pienalakasvatushakkuussa pienaukossa olevia koealoja painotettiin kertoimella 0,3 ja aukon ulkopuolella olevia koealoja kertoimella 0,7. Tämä korjaus painotuksella tehtiin sen vuoksi, että koealat jakautuivat aukkoon ja sitä ympäröivälle alueelle suhteessa 0,5 ja 0,5, mutta aukon todellinen osuus koko käsittelyruudusta on vain 30 %. Poimintahakkuussa ei vastaavia painotuksia tarvinnut käyttää (skaalattu painotus oli 1).

Toisissa malleissa testattiin hakkuutähteiden peittävyden vaikutusta männyntaimien määrään. Malleihin otettiin mukaan myös kasvupaikkaa kuvaava jäkäliden peittävyys ja männyn- taimien määrä ennen hakkuuta koealalla. Myös hakkuussa poistetun puuston määrää (runko- luku, pohjapinta-ala ja puuston runkotilavuus) testattiin mallissa. Kaikki muuttujien väliset pareittaiset yhdysvaikutukset testattiin.

Myös mahdollisten negatiiviselle binomijakaumalla ylimääräisten nollahavaintojen määrä testattiin ja mallinnettiin tarvittaessa (zero-inflated malli, Brooks ym. 2017). Mallin odotusarvon poikkeamaa havaitusta selitettävän muuttujan keskiarvosta korjattiin ennusteissa suhdekor- jauskertoimella (ratio estimator, Snowdon 1991). Ennusteet muutettiin hehtaariohtaisiksi. Taimimäärää ei voitu käyttää mallissa hehtaariohtaisena selittävänä muuttujana konvergoi- tumisongelmien vuoksi. Yhdysvaikutusten ennusteissa niiden laskenta-arvot valittiin siten, että tulokset olisivat mahdollisimman havainnollisia ja ennusteet pysyisivät havaittujen ja- kaumien rajoissa. Muuttujien päävaikutusten keskinäistä korrelointia tarkasteltiin laskemalla päävaikutuksille VIF-arvot (Variance Inflation Factor), joiden tuli pysyä arvoltaan < 5.

Metsien taimettuminen ja taimien varhaiskehitys ennen hakkuuta

Männynntaimien määrää tutkimusmetsissä ennen hakkuuta mallinnettiin yleistetyillä lineaarisilla sekamalleilla. Jakaumaoletus oli negatiivinen binomijakauma, jossa käytettiin neliöityä varianssifunktiota (quadratic variance function, NB2-parametrisointi). Hierarkiatasot mallissa olivat hakkuukohde, käsittelyruutu ja taimikoeala. Kahdelle ylimmälle tasolle estimoitii vakion varianssi (random intercept model). Malli laskettiin R-ohjelmointiympäristössä kirjastolla glmmTMB (Brooks ym. 2017).

Muuttujia malliin valittaessa varmistettiin, että muuttujien päävaikutukset eivät korreloi liian voimakkaasti keskenään. Korrelointia kuvaavan VIF-arvon (Variance Inflation Factor) oli oltava <5 . Päävaikutusten lisäksi malliin tarjolla olevien ja valittujen muuttujien pareittaiset yhdysvaikutukset testattiin. Mallien odotusarvon poikkeamaa havaitusta selitettävän muuttujan keskiarvosta korjattiin ennusteissa suhdekorjauskertoimella (ratio estimator, Snowdon 1991). Ennusteet muutettiin hehtaarikohtaisiksi. Puuston runkoluku, pohjapinta-ala tai tilavuus olivat tärkeimmät malleissa testatut selittävät muuttujat. Kasvupaikkaa kuvaavina muuttujina testattiin koealalta mitattua poronjäkälien tai sammalkerroksen peittävyttä.

Männynntaimien pituutta mallinnettiin yleisellä lineaarisella sekamallilla vasteen ollessa log-muunnettu männynntaimien pituus. Aineisto muodostui mittauksista ennen hakkuuta. Hierarkiatasot mallissa olivat hakkuukohde, käsittelyruutu, taimikoeala ja männyn taimi. Kolmelle ylimmälle tasolle estimoitii vakion varianssi (random intercept model). Malli estimoitii R-kirjastolla nlme (Pinheiro & Bates 2000, 2023). Mallin ennusteet laskettiin R-kirjastolla effects (Fox & Weisberg 2019). Muuttujien korrelointia kuvaavan VIF-arvon (Variance Inflation Factor) oli oltava <5 . Päävaikutusten lisäksi malliin tarjolla olevien ja valittujen muuttujien pareittaiset yhdysvaikutukset testattiin.

Selittävinä muuttujina mallissa testattiin puuston tunnuksista runkolukua, pohjapinta-alaa ja runkotilavuutta sekä kasvupaikkaa kuvaavia tunnuksia, kuten sammalien tai jäkälien peittävyttä pohjakerroksesta ja varpujen peittävyttä kenttäkerroksesta. Taimen ikä ja sen eri potenssit olivat tärkeimmät testattavat selittävät muuttujat mallissa. Iän paras eksponentti valittiin käymällä eksponentit 0,1–2,0 läpi 0,1:n välein mallissa. Paras eksponentti oli se, missä Akaiken informaatio kriteeri (AIC) minimoitui. Mallin "runkona" oli siis ikä plus joku iän eksponentti. Kun log-normaalien mallien havainnot palautetaan alkuperäiselle asteikolle, odotusarvo on yleensä aliarvio todellisesta. Niinpä mallin odotusarvon poikkeamaa havaitusta selitettävän muuttujan keskiarvosta korjattiin ennusteissa suhdekorjauskertoimella (ratio estimator, Snowdon 1991).

3.2. Hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutukset porotaloudelle

3.2.1. Vaikutukset poronjäkäliin

Eri tekijöiden vaikutuksia poronjäkäliin arviointiin tekemällä peittävyys- ja biomassamallit poronjäkälille. Poronjäkälien peittävyttä ja biomassaa mallinnettiin ympyräkoealoilla sijaitsevien 50 x 50 cm:n kasvillisuusruutujen solmumittausaineistosta. Peittävyysmallit olivat yleistettyjä lineaarisia sekamalleja binomijakaumaoletuksella. Myös mallin hajontaparametri estimoitii. Mallin, jossa mukana olivat hakkuumenetelmä ja mittauskerta (ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen), hierarkiatasot olivat alenevassa järjestyksessä: hakkuukohde, käsittelyruutu, taimikoeala, kasvillisuusruutu ja mittauskerta, joista neljälle ensimmäiselle estimoitii varianssit.

Mallissa, joka laskettiin hakkuutähteiden peittävyden vaikutukselle (vain hakkuun jälkeiset mittaukset), hierarkiatasoja oli yksi vähemmän, eli mittauskertaa ei ollut mallissa ja varianssit estimoitii kolmelle ylimmälle tasolle (hakkuukohte, käsittelyruutu ja taimikoeala). Kasvillisuusruutujen mittauksia ei siis keskiarvoistettu, vaan peittävydet (ja myös biomassat) hyödynnettiin ruutukohtaisina. Peittävyysmalli estimoitii R-kirjaston MASS funktiolla glmmPQL (Venables & Ripley 2002).

Poronjäkälien biomassat kussakin kasvillisuusruudussa laskettiin aluksi ruudusta mitatun jäkälien peittävyden ja elävän osan pituuden perusteella hyödyntämällä Kumpulan ym. (2006) kehittämää biomassakaavaa poronjäkälille. Jäkälien biomassamallit olivat hierarkialtaan ym. ominaisuuksiltaan samanlaisia, mutta mallit olivat yleisiä lineaarisia sekamalleja, vasteen oltuksena log-muunnettu normaalijakauma. Jäkälän biomassa mallinnettiin grammoina koeruudulla, mutta ennustekuvissa muunnettiin kilogrammoiksi hehtaarilla. Biomassamalli estimoitii R-kirjastolla nlme (Pinheiro & Bates 2000, 2023). Mallien ennusteet laskettiin R-kirjastolla effects (Fox & Weisberg 2019), kuten myös peittävyysmallin ennusteet.

Muuttujien korrelointia kuvaavan VIF-arvon (Variance Inflation Factor) oli oltava <5 . Päävaikutusten lisäksi malliin tarjolla olevien ja valittujen muuttujien pareittaiset yhdysvaikutukset testattiin.

Sekä peittävyys- että biomassamallien tärkeimpinä selittävinä muuttujina käytettiin seuraavia muuttujia: hakkuumenetelmä (4-luokkainen), mittauskerta ja näiden yhdysvaikutus sekä vaihtoehtona näille muuttujille hakkuun jälkeinen hakkuutähteiden peittävyys. Nämä muuttujat sisällytettiin malleihin riippumatta niiden merkitsevyydestä, koska ne edustivat testattavaa koejärjestelyä.

Lisäksi hakkuumenetelmämalleissa testattiin sammalien ja varpujen peittävyksiä (kasvillisuuskoelaloilla) sekä niiden yhdysvaikutuksia, poistetun puuston määrää (runkoluku, runkotilavuus, pohjapinta-ala) ja ennen hakkuuta vallinnutta puuston määrää. Hakkuutähteiden peittoa testaavissa malleissa testattiin samoja kovariaatteja, mutta oletuksena oli, että poistetun puuston määrä korreloi voimakkaasti hakkuutähteiden määrän kanssa eikä lisäisi mallin selitysvoimaa merkittävästi.

Malleissa, joissa oli mukana hakkuumenetelmä ja mittauskerta (ennen ja jälkeen hakkuun), pienalakasvatushakkuussa hakkuun jälkeisiä havaintoja painotettiin vastaamaan pienaukon pinta-alan suhdetta hehtaarin tutkimusalaan. Koealoja oli hakkuun jälkeen pienaukolla neljä ja ympäröivällä harvennetulla alueella saman verran, mutta pienaukon ja ympäröivän alan pinta-alasuhde oli 0,3/0,7. Painotus vaikutti vain hyvin vähän tuloksiin.

Mallien odotusarvon poikkeamaa havaitusta selitettävän muuttujan keskiarvosta korjattiin ennusteissa suhdekorjauskertoimella (ratio estimator, Snowdon 1991). Ennusteet muutettiin hehtaarikohtaisiksi.

3.2.2. Vaikutukset lupon määrään

Hakkuiden vaikutusta luppolaitumiin arvioitiin tarkastelemalla lupon määrää ennen hakkuuta sekä hakkuissa poistetun lupon määrää. Lupon määrä arvioitiin puustokoealoilla (8 m säde) olevista koepuista kolmessa korkeusvyöhykkeessä (alle 2 m, 2–5 m ja yli 5 m). Kussakin korkeusvyöhykkeessä lupon runsaus arvioitiin runsausindekseillä välillä 0–4, joissa lupon suhteelliset määrät eri indekseillä ovat: 0= ei luppoo, 1= vähän luppoo, 2= jonkin verran luppoo,

3= kohtalaisesti loppoa ja 4= runsaasti loppoa. Arvioidut runsausindeksit muutettiin lupon grammamääräksi eri vyöhykkeissä kussakin koepuussa hyödyntämällä aikaisempia tutkimuksia ja julkaisemattomia aineistoja lupon määristä puustossa (Liu ym. 2000, Sipilä ym. 2000, Jaakkola ym. 2006, RKTL/Nieminen 2005 julkaisematon, Kumpula ym. 2014 julkaisematon). Indeksit vastasivat puun korkeusvyöhykkeissä 2–5 m ja >5 m seuraavia luppobiomassoja: 0=0 g/puu, 1=125 g/puu, 2=250 g/puu, 3=500 g/puu ja 4 =1000 g/puu. Korkeusvyöhykkeissä <2 m vastaavat indeksien luppobiomassat olivat: 0=0 g/puu, 1=2 g/puu, 2=4 g/puu, 3=8 g/puu ja 4 =16 g/puu.

Mallinnettavana vastemuuttujana luppomalleissa oli lupon kokonaisbiomassa puussa grammoina ilmaistuna. Muuttujaan tehtiin logaritimuunnos jakauman normalisoimiseksi (log-normaali jakauma). Mallit olivat lineaarisia sekamalleja, joiden hierarkiatasot olivat korkeimmasta alkaen hakkuukohde, käsittelyruutu, puustokoeala ja koepuu. Kolmelle ylimmälle tasolle estimoitii vakion varianssit (random intercept model). Malli estimoitii R-kirjastolla nlme (Pinheiro & Bates 2000, 2023). Mallin ennusteet laskettiin R-kirjastolla effects (Fox & Weisberg 2019).

Selittävinä muuttujina malleissa testattiin: 1) puun läpimitta rinnan tasalta, 2) puun ikä, 3) ympyräkoealan puuston runkotiheys, 4) puuston pohjapinta-ala ja 5) puuston runkotilavuus. Muuttujia malliin valittaessa varmistettiin, että muuttujien päävaikutukset eivät korreloi liian voimakkaasti keskenään. Korrelointia kuvaavan VIF-arvon (Variance Inflation Factor) oli oltava <5. Päävaikutusten lisäksi malliin tarjolla olevien ja valittujen muuttujien pareittaiset yhdysvaikutukset testattiin.

Malli laadittiin ympyräkoealoilta mitattujen koepuiden avulla. Koepuista oli mitattu rinnankorkeusläpimitan lisäksi myös puun ikä. Kaikista koealan puista oli mitattu vain rinnankorkeusläpimitta, joten puille, joista ei mitattu ikää estimoitii ikä puulajin ja rinnankorkeusläpimitan avulla. Iän ja läpimitan riippuvuus aineistossa oli kuitenkin melko heikko. Ikää ei estimoitu lineaarisella mallilla, vaan parametrittomalla imputointimenetelmällä puulajin ja puun rinnankorkeusläpimitan perusteella, R-kirjastolla missForest (Stekhoven & Buehlmann 2012, Stekhoven 2022). Imputointi tehtiin kymmenen kertaa ja puun iäksi määritettiin näiden imputointien keskiarvo. Näin saatiin ympyräkoealan koko puujoukolle rinnankorkeusläpimitat ja iän estimaatit.

Kun lupon määrä puissa ja määrän jakauma oli määritetty mallien avulla, saatiin metsikön luppobiomassa ennen hakkuuta ja hakkuussa puiden mukana poistettu luppobiomassan arvio kertomalla puun keskimääräinen luppobiomassa runkoluvulla ennen hakkuuta ja hakkuussa poistetulla runkoluvulla. Jotta näin voitiin menetellä, oli puun luppobiomassan jakauman puujoukossa oltava lähellä normaalijakaumaa, jotta keskiarvo edustaisi riittävän hyvin puujoukkoa.

Pienalakasvatushakuussa ympyräkoealat jakaantuivat hehtaarin tutkimusalalla siten, että neljä koealaa sijaitsi pienaukolla ja neljä pienaukkoa ympäröivällä harvennetulla alueella. Koska pienaukko edusti 0,3 hehtaarin alaa ja sitä ympäröivä harvennettu ala 0,7 hehtaarin alaa, pienalakasvatushakuun poistettua lupon määrää estimoitaaessa painotettiin koealoja ko. painoilla, jotta poistetun luppobiomassan estimaatti vastaisi pinta-alasuhdetta 0,3/0,7.

3.3. Arvio taloudellisista vaikutuksista poro- ja metsätaloudelle

Tutkimuskysymysten 1 ja 2 tulosten sekä poro- ja metsätalouden tuottavuuden arvion pohjalta koottiin kokonaiskuvaus hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun taloudellisista vaikutuksista poro- ja metsätaloudelle. Arvio metsätalouden nettotuloista laskettiin huomioimalla tutkimuskysymyksessä 1 lasketut hakkuutähteiden keruusta syntyvät tulot sekä hakkuista saatavat kantorahatulot. Porotalouden nettotulot arvioitiin käyttämällä Luken ja Helsingin yliopiston yhdessä kehittämää taloudellis-ekologista porotalouden systeemimallia (Tahvonen ym. 2014, Pekkarinen ym. 2015) ja huomioimalla tutkimuskysymyksen 2 tulokset ja havainnot.

3.3.1. Metsätalouden nettotulojen arviointi

Metsätalouden nettotulot arvioitiin huomioimalla tutkimuskysymyksessä 1 lasketut hakkuutähteiden keruusta syntyvät kustannukset sekä hakkuista saatavat kantorahatulot. Kantorahatulot arvioitiin käyttämällä Taulukon 3 hehtaarikohtaisia ainespuun kertymiä sekä vuoden 2022 keskimääräisiä puutavaralajikohtaisia harvennushakkuiden kantorahatuloja Lapin maakunnassa (Luke Tilastotietokanta 2022). Harvennushakkuiden kantorahatuloja käytettiin, koska koealojen lähtöpuuston rakenteen vuoksi poimintahakkuut eivät juurikaan poikenneet tyypillisestä harvennushakkuusta. Myös pienalakasvatuksessa 70 prosenttia koealasta harvennettiin harvennushakkuuta vastaavalla tavalla ja vain 30 prosentin alalta poistettiin kaikki puut.

3.3.2. Porotalouden nettotulojen arviointi

Porotalouden nettotulot arvioitiin käyttämällä Luken ja Helsingin yliopiston kehittämää taloudellis-ekologista systeemimallia (Tahvonen ym. 2014, Pekkarinen ym. 2015, Pekkarinen 2018). Malli perustuu poro-jäkälä-dynamiikkaan, mutta huomioi osin myös poron muut luontaiset talviaikaiset ravintolähteet sekä lisärehun. Ekologinen malli nojaa laajasti käytettyihin teorioihin ja metodeihin, kuten eläinyksilöiden optimaalisen ravinnon valinnan teoriaan ja dynamiiseen ikä- ja sukupuoliluokkaiseen mallirakenteeseen. Taloudellinen optimointi ratkaistiin kehittyneillä matemaattisilla algoritmeilla (AMPL ja Knitro -ohjelmistot; Artelys 2024). Malli sisältää kuvauksen porotalouden tuloista ja kustannuksista sekä huomioi korkokannan vaikutukset. Malli muodostaa yksityiskohtaisen monitieteisen kuvauksen poro-laidun-dynamiikasta ja porotaloudesta, joten se soveltuu erinomaisesti laidunvaikutusten taloudelliseen arviointiin.

Arviot porotalouden tuloista laskettiin kolmelle eri esimerkkiskenaariolle. Skenaariot valittiin niin, että niiden avulla voidaan tarkastella hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutuksia porotalouteen eri tilanteiden ja oletusten vallitessa. Ensimmäisessä skenaariossa (Ei luppoo, ei ruokintaa) keskityttiin ainoastaan kaivettavaan ravintoon, joten siinä ei huomioitu porojen luvosta tai lisäruokinnasta saamaa ravintoa. Toisessa skenaariossa (Luppo, ei ruokintaa) huomioitiin molemmat luontaiset talviajan ravintolähteet eli kaivettava ravinto (maajäkälät, varvut, heinät) sekä luppo, mutta ei lisäruokintaa. Viimeisessä skenaariossa (Luppo, lisäruokinta) huomioitiin sekä luontaiset ravintolähteet että laitumille viety maltillinen maastoruokinta (maksimissaan 0,3 kg per poro per päivä). Kussakin skenaariossa systeemin alkutila ja rajoitteet määritettiin niin, että mikäli ulkoisia muutoksia ei tule, pysyy systeemi alkutilaa vastaavassa tilassa koko simulaatiojakson (100 vuotta) ajan.

Jokaiselle kolmelle eri skenaarioille laskettiin neljä eri ratkaisua, jotka kuvaavat eri metsänkäsittelyjen vaikutuksia porotaloudelle. Ensimmäisessä ratkaisussa oletettiin, ettei hakkuita tehdä, joten systeemi pysyy alkutilan mukaisessa tilassa. Toinen ratkaisu kuvaa

poimintahakkuita, joissa hakkuutähteitä ei kerätä ja joka johtaa jäkäläbiomassan tippumiseen neljästä sadasta kolmeensataan kilogrammaan hehtaaria kohden. Kolmas ja neljäs ratkaisu kuvaavat tilannetta, jossa poimintahakkuiden yhteydessä hakkuutähteet kerätään ja jäkäläbiomassa putoaa neljästä sadasta kolmeensataan viiteenkymmeneen kiloon. Kolmas ja neljäs ratkaisu poikkeavat toisistaan kuitenkin jäkälän kasvun osalta niin, että kolmannessa oletetaan jäkälän kasvun pysyvän samana hakkuiden jälkeen, mutta neljännessä jäkälän kasvun oletetaan paranevan 25 %, johtuen hakkuita seuraavasta valoisuuden lisääntymisestä. Ensimmäisissä ratkaisuisissa oletetaan täten, että hakkuut ja hakkuutähteet vaikuttavat ainoastaan jäkälän biomassaan hakkuiden jälkeen, mutta viimeisessä (neljännessä) ratkaisussa oletetaan, että hakkuilla ja hakkuutähteillä on lisäksi vaikutus myös jäkälän kasvunopeuteen. Analyysin yksinkertaistamiseksi kaikissa skenaariossa oletettiin, että metsänkäsittelytoimena on poimintahakkuu.

Eri ratkaisuisissa käytetyt kolme eri jäkäläbiomassan alkutilaa, kuvaavat hakkuiden ja hakkuutähteiden välittömiä vaikutuksia jäkälän saatavuuteen. Poronjäkälien biomassojen alkutiloina malleissa käytettiin 400 kg/ha, 350 kg/ha ja 300 kg/ha jäkäläbiomassoja. Korkein jäkäläbiomassa (400 kg/ha) kuvaa tilannetta ennen mahdollisia hakkuita. 400 kg/ha valittiin, koska se on lähellä kaikilta koealoilta mitattujen jäkäläbiomassojen keskiarvoa (Taulukko 4). Tilanteessa, jossa hakkuita ei tehdä, oletettiin, että jäkäläbiomassa pysyy myös tulevaisuudessa samassa tilassa. Tämän vuoksi poromäärä (poroa per 1000 ha jäkälälaidunta) sovitettiin mallin avulla niin, että kyseisellä poromäärällä jäkälän vuosittainen kasvu vastaa porojen aiheuttamaa kulutusta ja systeemi pysyy täten tasapainotilassa.

Alin jäkäläbiomassan alkutilanne (300 kg/ha) valittiin kuvaamaan sellaista poimintahakkuiden jälkeistä tilannetta, jossa hakkuutähteitä ei kerätä. Laskennassa oletetaan täten, että jäkäläbiomassa tippuu 25 % poimintahakkuiden myötä, kun hakkuutähteitä ei kerätä. Käytetty arvio saattaa olla hieman todellista pudotusta pienempi, sillä koealojen mittausten perusteella jäkäläbiomassa tippui keskimäärin 35 % poimintahakkuissa, kun hakkuutähteitä ei kerätty (Taulukko 4). Laskennassa päädyttiin kuitenkin käyttämään konservatiivisempaa pienempää pudotusta osin sen takia, että käytetyllä mallilla on erittäin vaikea laskea kestävän porotalouden tuloja, mikäli jäkäläbiomassa on alle 300 kg/ha, sillä kyseisessä tilanteessa porot eivät saa kaivettavasta ravinnosta riittävästi energiaa kohtuullisen lisääntymistuloksen varmistamiseksi. Lisäruokinnan tai runsaiden luppolaitumien avulla elinvoimainen poropopulaatio säilyy myös alle 300 kg/ha jäkäläbiomassalla. Tulokset ratkaistiin kuitenkin aluksi ilman lisäruokinnan mahdollisuutta tai luppolaitumia, jotta pystyttiin analysoimaan hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun vaikutuksia yksinomaan kaivettavaan ravintoon. Tämän jälkeen analyysiin lisättiin luppolaitumet koealoilta lasketun arvion mukaisesti ja lopuksi skenaariot ratkaistiin mahdollistaen maltillisen lisäruokinnan (maksimissaan 0,3 kg lisärehua per poro per talvipäivä).

Jäkäläbiomassa 350 kg/ha valittiin kuvaamaan poimintahakkuiden ja hakkuutähteiden keruun jälkeistä alkutilannetta. Tässä tapauksessa oletettu jäkäläbiomassan putoaminen on 12,5 %, joka vastaa lähelle Taulukossa 4 todettua jäkäläbiomassan osuuden pudotusta. Käytetty oletus 12,5 % jäkäläbiomassan pudotuksesta on todennäköisesti varovainen arvio, sillä tämän tutkimuksen poimintahakkuualat, joilta hakkuutähteet poistettiin, olivat sattumalta lähtötilanteen jäkäläbiomassaltaan alhaiset. Mikäli lähtötilanne olisi ollut lähempänä 400 kg/ha, olisi suhteellinen pudotus saattanut olla yli 12,5 %. Kokonaisuudessaan kuitenkin laskennassa käytetyt 12,5 % ja 25 % pudotukset tarjoavat todennäköisesti hyvin suuntaa antavan ja riittävän konservatiivisen kuvan hakkuiden jälkeisten jäkäläbiomassojen mahdollisista eroista hakkuutähteiden keruun ja jätön välillä poimintahakkuualoilla.

Taulukko 4. Koealoilta mitatut poron ravintokasvien keskimääräiset biomassat ennen ja jälkeen eri metsänkäsittelyjen.

	Pienalakasvatus						Poimintahakkuu					
	Hakkuutähteiden jätö			Hakkuutähteiden keruu			Hakkuutähteiden jätö			Hakkuutähteiden keruu		
	2022	2023	Muutos	2022	2023	Muutos	2022	2023	Muutos	2022	2023	Muutos
	kg/ha	kg/ha	%	kg/ha	kg/ha	%	kg/ha	kg/ha	%	kg/ha	kg/ha	%
Poronjäkäliät	423	245	-42	386	230	-40	431	282	-35	287	252	-12
Variksenmarja	299	187	-37	216	221	2	259	194	-25	297	213	-28
Mustikka	126	83	-34	102	68	-33	72	49	-33	114	92	-20
Puolukka	268	145	-46	200	140	-30	250	165	-34	362	233	-36
Kanerva	192	129	-33	204	180	-12	270	167	-38	285	249	-13
Varvut yht.	884	543	-39	722	609	-16	852	575	-33	1 058	787	-26

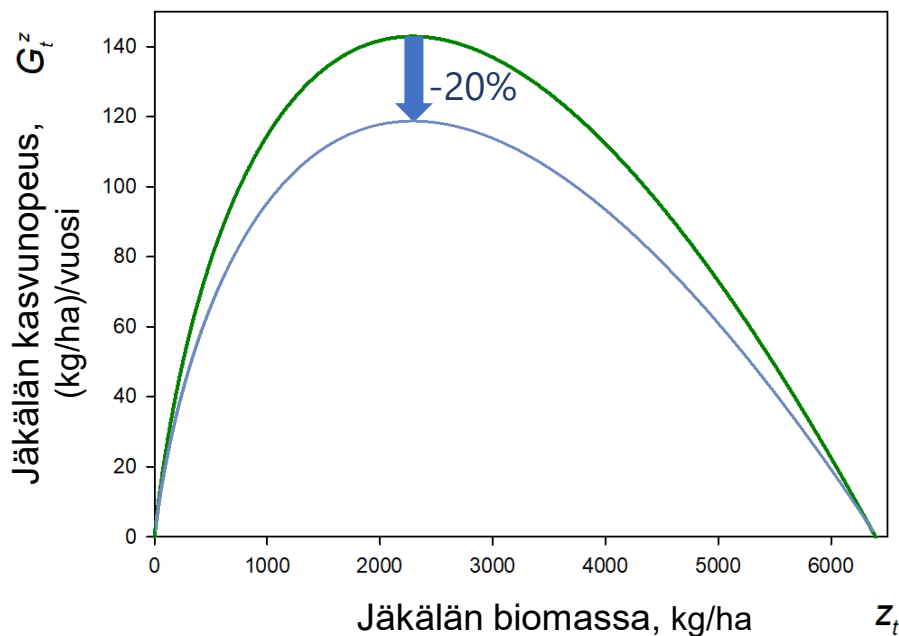
Hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutuksia jäkälän kasvunopeuteen ei pystytty vielä hankkeen aikana tutkimaan, sillä kasvunopeuden aiheuttamat muutokset näkyvät vasta useamman vuoden päästä. Aikaisemmat tutkimukset kuitenkin viittaavat siihen, että liian tiheä puusto hidastaa jäkälän kasvunopeutta (Tonteri ym. 2022). Samoin voidaan olettaa, että suuret määrät hitaasti hajoavaa hakkuutähdettä heikentävät jäkälän kasvua pitkän aikaa ja täten laskevat jäkälän keskimääräistä kasvunopeutta alueella. Tahvonen ym. (2014) mallissa jäkälän vuotuinen kasvunopeus määritettiin funktiona jäkälän biomassasta. Funktio pohjautuu dataan, joka on kerätty hyviltä jäkälän kasvupaikoilta vanhoista ja varttuneista männiköistä. Pekkarinen ym. (2015) tutkimuksessa käytettiin samaa jäkälän kasvufunktiota vanhoissa ja varttuneissa metsissä, mutta nuorissa metsissä kasvunopeuden oletettiin olevan 40 % hitaampaa. Tämän tutkimusalueen metsissä oli piirteitä sekä nuorista että varttuneista metsistä, joten niiden osalta päädyttiin käyttämään kasvunopeutta, joka on 20 % alempi suhteessa jäkälän kasvunopeuteen vanhoissa ja varttuneissa mäntymetsissä. Kuva 5 esittää jäkälän kasvufunktion vanhoissa ja varttuneissa metsissä (korkeampi käyrä) sekä 20 % hitaamman kasvunopeuden (matalampi käyrä), jonka oletettiin vallitsevan tutkimusalueen metsissä ennen hakkuita.

Ensimmäisissä ratkaisuissa oletettiin, että kasvunopeus pysyy samalla hakkuita edeltäneellä kasvunopeuden tasolla myös hakkuiden jälkeen. Sen sijaan viimeisessä ratkaisuissa (neljäs ratkaisu) oletettiin, että poimintahakkuiden vuoksi lisääntynyt valoisuus nostaa jäkälän kasvunopeuden samalle tasolle kuin varttuneissa ja vanhoissa metsissä. Lisäksi oletettiin, että mikäli hakkuutähteitä ei kerätä, hidastavat ne jäkälän kasvua niin, että kasvu pysyy samalla hakkuita edeltäneellä 20 % alemmalla kasvunopeuden tasolla valoisuusolosuhteiden paranemisesta huolimatta.

Kaikissa ratkaisuissa poropopulaation rakenne oletettiin mallin taloudellisen optimiratkaisun mukaiseksi, jossa vasateurastus on voimakasta ja lisääntyvän populaation vaatimet teurastetaan noin 9,5 vuoden iässä ja hirvaat noin 5,5 vuoden iässä. Tällainen porokannan rakenne on myös lähellä nykyistä porokannan rakennetta suuressa osassa poronhoitoaluetta. Tulevien vuosien kehitystä simuloitaessa oletettiin, ettei poromäärää pienennetä, vaikka se olisikin optimiratkaisu hakkuiden vaikutuksiin sopeutumiseksi. Täten poromäärän minimirajoitteeksi asetettiin poropopulaation koko vuonna 0, eli hakkuita edeltäneen vuoden poromäärä.

Taulukko 5 esittää eri skenaarioiden ja ratkaisujen oletukset, joiden pohjalta systeemin optimiratkaisut laskettiin. Optimiratkaisut laskettiin maksimoimalla porotalouden nettotulojen nykyarvoa olettaen 0 % korkotason. Optimointilaskelmat tehtiin taulukossa 5 esitettyjen erittäin voimakkaiden rajoitusten mukaisesti. Voimakkaita rajoituksia käytettiin, jotta pystyttiin kuvaamaan hakkuita edeltävää tilannetta koealoilla sekä laskemaan ratkaisut olettaen, ettei poromäärää tulla alentamaan hakkuiden vuoksi.

Vertailun vuoksi optimiratkaisut laskettiin myös ilman taulukossa 5 esitettyjä rajoitteita. Rajoittamattomista optimiratkaisuksista voidaan arvioida hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutuksia teoreettisissa tilanteissa, joissa jäkäläbiomassa olisi optimitasolla ja poronhoito sopeutuisi optimaalisesti hakkuiden aiheuttamiin muutoksiin. Rajoittamattomassa optimiratkaisussa optimaalinen sopeutuminen tapahtuu säätämällä vapaasti poropopulaation kokoa ja rakennetta sekä lisäruokinnan määrää vuosittain. Lisäksi laskettiin muutoin rajoittamattomia optimiratkaisuja vastaavat ratkaisut, mutta joissa poromäärää ylläpidettiin niin, ettei sen annettu alentua optimaalisen tasapainotilan poromäärästä, vaikka hakkuut vähentäisivät jäkäläbiomassaa. Tällöinkin sopeutuminen tapahtuu sovittamalla poropopulaation kokoa ja rakennetta sekä lisäruokinnan määrää, mutta porojen määrän ei sallita laskevan alkuperäistä populaatiokokoa pienemmäksi.



Kuva 5. Jäkälän kasvufunktio (Tahvonen ym. 2014) varttuneissa ja vanhoissa mäntymetsissä (ylempi käyrä) sekä oletettu jäkälän kasvunopeus koealueilla ennen hakkuita (alempi käyrä).

Taulukko 5. Eri skenaariossa ja ratkaisuisa käytetyt oletukset ja rajoitteet.

	Skenaario 1:	Skenaario 2:	Skenaario 3:
	Ei luppoa, ei ruokintaa	Luppo, ei ruokintaa	Luppo, ruokinta
Lupon saatavuus ja luppolaidunten pinta-ala			
Saatavuus (kg/ha)	0	5	5
Pinta-ala ennen hakkuita (ha per ha jäkälälaidunta)	0	1	1
Pinta-ala hakkuiden jälkeen (ha per ha jäkälälaidunta)	0	0,5	0,5
Lisäruokinta			
Maksimiruokinta (kg per eloporo per päivä)	0	0	0,3
Jäkälän biomassa ja jäkälän kasvunopeus			
Maksimibiomassa (kg/ha)	400	400	400
Biomassa vuonna t=0 (kg/ha)			
*Ratkaisu 1	400	400	400
*Ratkaisu 2	300	300	300
*Ratkaisut 3 ja 4	350	350	350
Jäkälän kasvunopeus suhteessa maksimiin (kuva 5)			
*Ratkaisu 1	0,8	0,8	0,8
*Ratkaisu 2	0,8	0,8	0,8
*Ratkaisu 3	0,8	0,8	0,8
*Ratkaisu 4	1	1	1
Eloporomäärän rajoite			
Minimipopulaatio (poroa per 1000 ha jäkälälaidunta)	273	285	293
Ikäluokkarakenteen rajoitteet			
Vaadinten maksimiosuus (%) eloporoista per ikäluokka	11	11	11
Hirvaiden maksimiosuus (%) eloporoista per ikäluokka	1,5	1,5	1,5

*Ratkaisu 1: Ei hakkuita

*Ratkaisu 2: Poimintahakkuut, hakkuutähteiden jättö

*Ratkaisu 3: Poimintahakkuut, hakkuutähteiden keruu, ei jäkälän kasvunopeuden parannusta

*Ratkaisu 4: Poimintahakkuut, hakkuutähteiden keruu, jäkälän kasvunopeuden parannus

4. Tulokset ja pohdinta

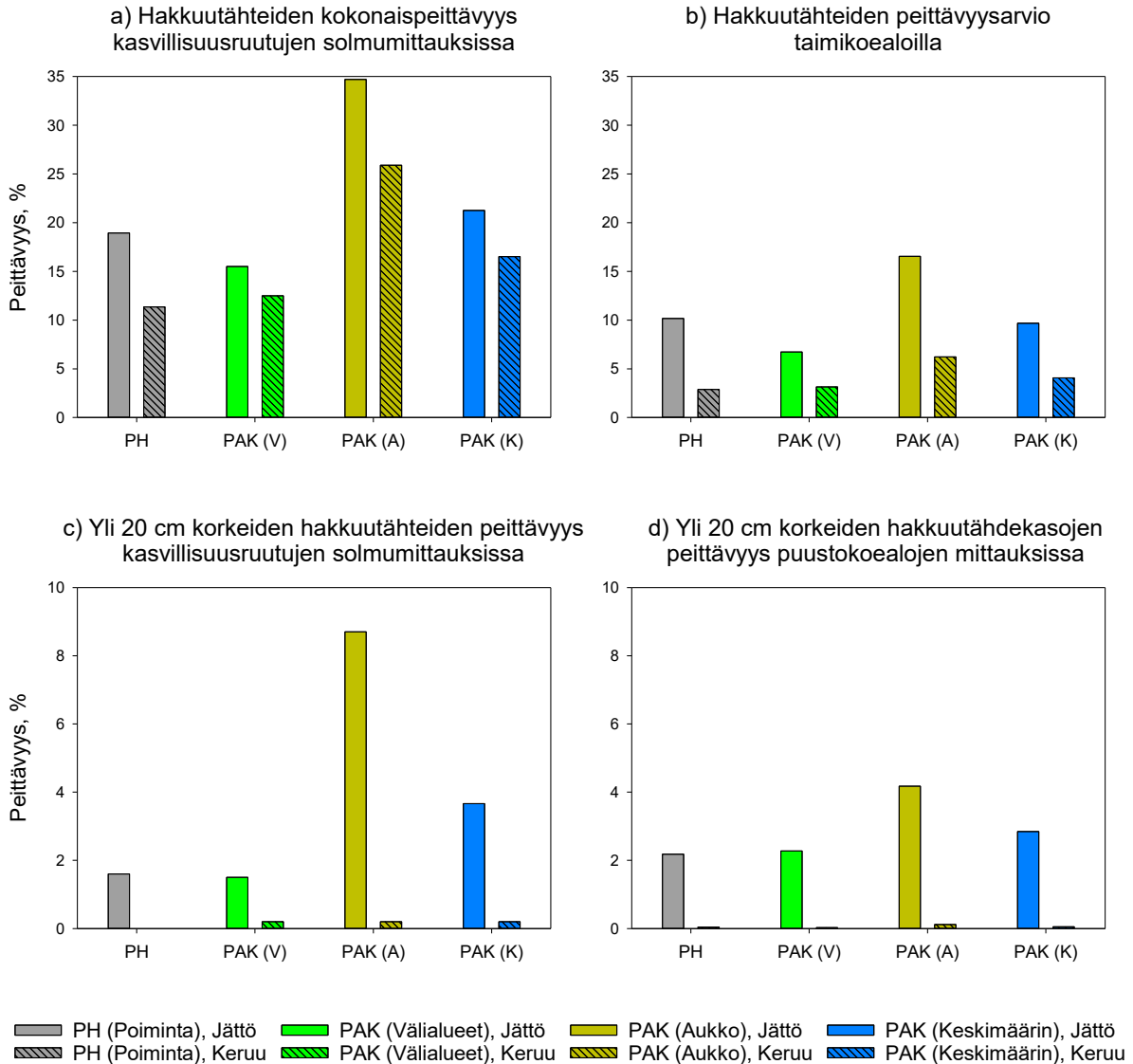
4.1. Hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutukset metsätaloudelle

4.1.1. Hakkuutähteiden keruun onnistuminen

Koealoilta kerättyjen inventointitietojen pohjalta hankkeessa tutkittiin hakkuutähteiden keruun onnistumista. Kuva 6 näyttää hakkuutähteiden keskimääräiset peittävyudet eri arviointimenetelmien mukaisesti laskettuina. Hakkuutähteiden kokonaispeittävyudet laskettiin kasvillisuusruutujen solmumittausaineistosta (Kuva 6 a) sekä arviointiin taimikoealoilta (Kuva 6 b). Kuva 6 c esittää solmumittausaineistosta lasketut yli 20 cm korkeiden hakkuutähteiden keskimääräiset peittävyudet eri metsänkäsittelymenetelmille ja Kuva 6 d suurten (keskikorkeus vähintään 20 cm, peittävyys vähintään 1 m²) hakkuutähdekasojen keskimääräiset peittävyudet koealoilla. Poimintahakkuu (PH) ja Pienalakasvatus (PAK) keskimäärin -pylväät kuvaavat kyseisten metsänkäsittelytapojen jälkeisiä keskimääräisiä hakkuutähteiden kokonaispeittävyyskokoaloilla. Pienalakasvatus (Aukko) -pylväät kuvaavat pienaukon sisäpuolella olevien koealojen mukaisia keskimääräisiä peittävyyskokoaloja, jotka voidaan myös tulkita vastaavan avohakkuun jälkeisiä peittävyyskokoaloja. Pienalakasvatus (Välialueet) kuvaa puolestaan pienaukon ulkopuolisten metsien peittävyyskokoaloja pienalakasvatusruuduilla, jotka harvennettiin kutakuinkin samaan tiheyteen kuin poimintahakkuuna käsitellyt metsät.

Odotusten mukaisesti poimintahakkuissa ja pienalakasvatuksen välialueilla hakkuutähteiden peittävyudet olivat suhteellisen lähellä toisiaan kaikilla eri arviointimenetelmillä tarkasteltuina. Sen sijaan pienalakasvatuksen pienaukon sisällä peittävyudet olivat selvästi korkeammat. Pienaukon sisäisten alueiden korkeammat peittävyudet nostivat pienalakasvatuksen käsittelyruutujen keskimääräiset hakkuutähteiden peittävyudet poimintahakkuiden käsittelyruutujen peittävyyskokoaloiksi korkeammiksi. Erot eivät kuitenkaan olleet suuria, sillä vain 30 % pienalakasvatuksen käsittelyruuduista oli hakattu aukoksi ja loput harvennettu. Täten aukkojen koko ja niiden suhteellinen osuus käsittelyalueesta vaikuttavat merkittävästi hakkuutähteiden keskimääräiseen peittävyyskokoaloissa.

Hakkuutähteiden keruu pienensi hakkuutähteiden keskimääräisiä peittävyyskokoaloja kaikissa eri käsittelyissä ja kaikilla eri arviointimenetelmillä tarkasteluna. Vaikka hakkuutähteiden keruulla oli selvä vaikutus hakkuutähteiden peittävyyskokoaloissa, niin niiden kokonaispeittävyys laski keruun vaikutuksesta kuitenkin vain noin 20–40 % (Kuva 6, Taulukko 6). Silmäämääräisesti arvoituna hakkuutähteen keruun vaikutus koealoilla oli suurempi (Kuva 6 b). Pientä, ensisilmäyksellä huomaamatonta, hakkuutähdettä jäi koealoille hakkuutähteiden keruun jälkeen kuitenkin paljon, mikä näkyy solmumittauksen tuloksissa. Sen sijaan käytännössä lähes kaikki korkeammat (yli 20 cm korkeat) hakkuutähdekasat, joilla on myös todennäköisesti pitkäaikaisimmat vaikutukset porojen laiduntamiseen, saatiin kerättyä pois (Kuvat 6 c ja d sekä Taulukko 6). Vaikka tutkimuksen tekohetkellä ei ollut käytettävissä kaavaa hakkuutähteiden biomassan määrittämiseksi, voidaan mitattujen peittävyyskokoalojen ja korkeuksien pohjalta arvioida, että ero keruu- ja jättöalueille jääneissä hakkuutähteiden biomassoissa on todennäköisesti suurempi kuin mitä pelkästään kokonaispeittävyyskokoalojen eroista voitaisiin päätellä.



Kuva 6. Eri mittauksien ja arvioiden mukaisia hakkuutähteiden peittävyksiä koealoilla. Poimintahakkuu (PH) ja Pienalakasvatus (PAK) Keskimäärin -pylväät kuvaavat kyseisten metsänkäsittelytapojen jälkeisiä keskimääräisiä hakkuutähteiden kokonaispeittävyksiä koealoilla. Pienalakasvatus (Aukko) -pylväät kuvaavat pienaukon sisäpuolella olevien koealojen mukaisia keskimääräisiä peittävyksiä ja Pienalakasvatus (Välialueet) puolestaan hakkuutähteen peittävyksiä pienaukon reuna-alueelle jäävällä osalla käsittelyruutua.

Hakkuutähteiden biomassakaavan puutteen vuoksi, hakkuutähteiden keruun onnistumista päätettiin arvioida hakkuutähteiden peittävyden lisäksi myös laskemalla yksinkertainen hakkuutähdeindeksi. Kasvillisuusruutukohtainen hakkuutähdeindeksi laskettiin summaamalla kasvillisuusruudun kahdenkymmenenviiden solmukohdan hakkuutähteiden korkeudet (niiltä solmukohdilta, joihin hakkuutähteitä osui). Taulukossa 7 esitetään keskimääräiset hakkuutähdeindeksit eri metsänkäsittelyille. Indeksillä huomio sekä hakkuutähteiden peittävyden (osumien solmukohtaan) sekä niiden korkeuden. Indeksien pohjalta arvioituna hakkuutähteitä jäi alueille, joilta hakkuutähteet poistettiin keskimäärin alle puolet siitä määrästä, jota hakkuutähdettä jäi vastaaville alueille, joilta hakkuutähteitä ei poistettu. Tämän pohjalta hakkuutähteiden keruun voidaan arvioida onnistuneen kohtuullisen hyvin.

Taulukko 6. Eri korkuisten hakkuutähteiden keskimääräinen peittävyys eri metsänkäsitelyissä.

Hakkuutapa	Keruu/jätö	Peittävyys (%)			
		HT > 0 cm	HT > 5 cm	HT > 10 cm	HT > 20 cm
Pienala	Jätö	21.3	12.5	6.7	3.7
	Keruu	16.5	8.5	2.4	0.2
	<i>Jätö - Keruu</i>	4.7	4.0	4.3	3.5
	<i>Keruum osuus (%)</i>	22	32	65	95
Poiminta	Jätö	19.0	11.2	5.1	1.6
	Keruu	11.4	6.0	2.0	0.0
	<i>Jätö - Keruu</i>	7.6	5.2	3.2	1.6
	<i>Keruum osuus (%)</i>	40	46	62	100

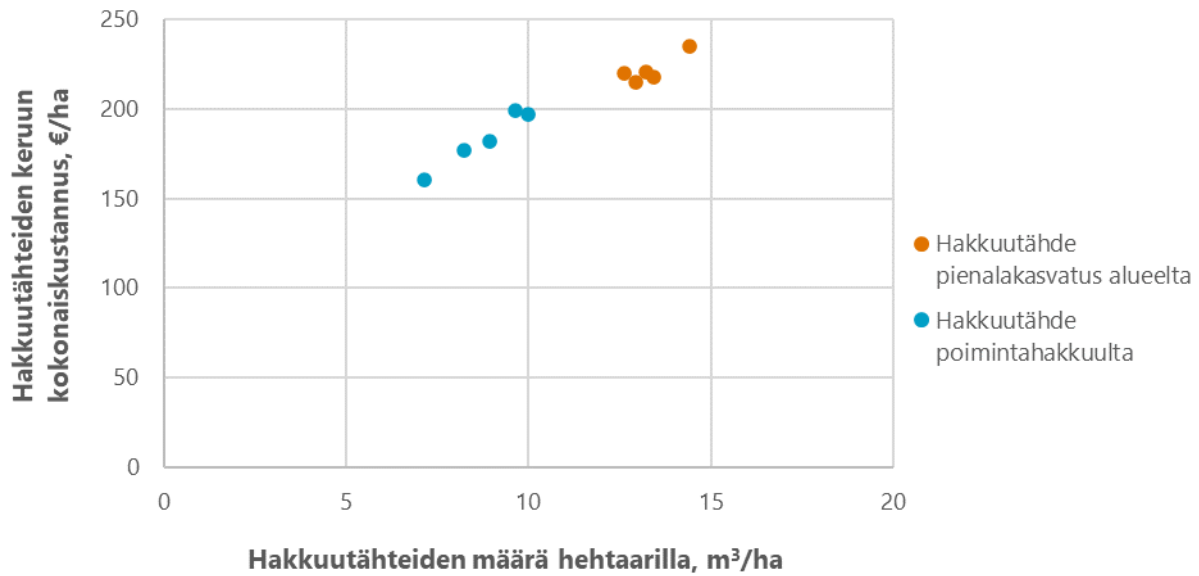
Taulukko 7. Keskimääräiset hakkuutähdeindeksit eri metsänkäsitelyissä. Hakkuutähdeindeksin yksikkönä on cm ja se saatiin laskemalla niiden hakkuutähteiden korkeudet yhteen, jotka osuivat kasvillisuusruudun kahdenkymmenenviiden solmukohdan solmuihin.

Hakkuutapa	Hakkuutähdeindeksi	
Pienala	Jätö	662,9
	Keruu	305,7
	<i>Jätö - Keruu</i>	357,1
	<i>Keruum osuus (%)</i>	54
Poiminta	Jätö	424,4
	Keruu	186,2
	<i>Jätö - Keruu</i>	238,2
	<i>Keruum osuus (%)</i>	56

4.1.2. Hakkuutähteiden keruun kustannukset

Korjuukustannukset

Hakkuutähteiden keruun kustannus (€/ha) koeruujuen mukaisissa korjuuolosuhteissa vaihteli hakkuutähteiden määrän mukaan (Kuva 7). Poimintahakkuilla ainespuun ja hakkuutähteiden kertymä oli pienempi (Taulukko 2) kuin pienalakasvatuksen kohteilla, minkä vuoksi pinta-alaa kohti lasketut keruukustannukset olivat alemmat (Kuva 7). Poimintahakkuulla hakkuutähteen kertymä oli 7,1–10,0 m³/ha ja vastaava keruukustannus oli 160,5–199,0 €/ha (Kuva 7). Hakkuutähteiden kasauksen osuus keruukustannuksista oli 26,1–33,2 €/ha ja metsäkuljetuksen 131,4–165,8 €/ha (Taulukko 8). Pienalakasvatuksen alueilta hakkuutähteen kertymä oli 12,6–14,4 m³/ha ja hakkuutähteiden keruukustannus oli 214,7–234,6 €/ha (Kuva 7). Hakkuutähteiden kasauksen osuus keruukustannuksista pienalakasvatuksen kohteilla oli 29,7–38,5 €/ha ja metsäkuljetuksen 181,3–196,3 €/ha (Taulukko 8).



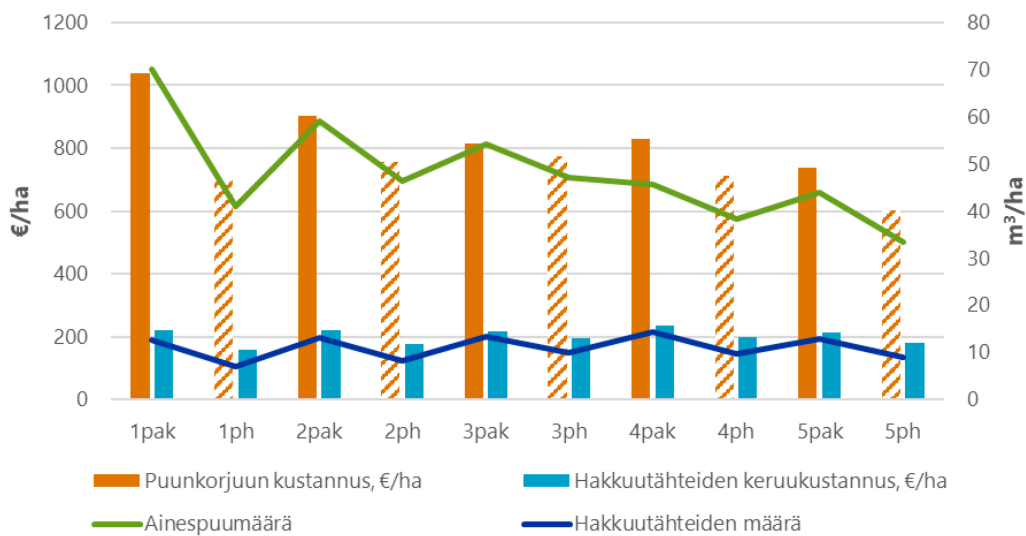
Kuva 7. Hakkuutähteiden keruukustannus (€/ha) hakkuukoeruutujen mukaisissa olosuhteissa hakkuutähteiden määrän mukaan, kun metsäkuljetusmatka on 300 m ja kuormakoko on 5,2 m³.

Taulukko 8. Ainespuun korjuun (hakkuu + metsäkuljetus) sekä hakkuutähteiden kasoille hakkuun ja metsäkuljetuksen kustannukset hakkuukoeruutujen mukaisissa korjuuolosuhteissa. Hakkuutähteiden keruun työvaiheittaiset kustannukset laskettiin pinta-alaa (€/ha) ja kiintokuutiometriä (€/m³) kohden.

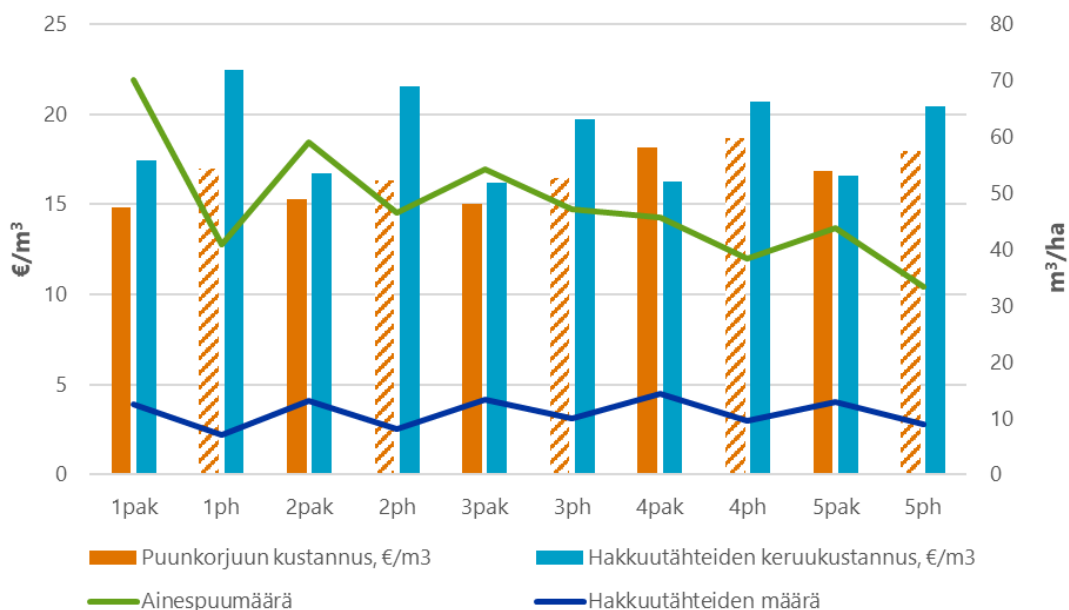
Kohde ja hakkuutapa	Hakkuutähde kasaus, €/ha	Hakkuutähde metsäkuljetus, €/ha	Hakkuutähde kasaus, €/m ³	Hakkuutähde metsäkuljetus, €/m ³	Ainespuun korjuu, €/m ³
1. Pienalakasvatus	38,5	181,3	3,1	14,4	14,8
1. Poimintahakkuu	29,1	131,4	4,1	18,4	17,0
2. Pienalakasvatus	34,4	186,2	2,6	14,1	15,3
2. Poimintahakkuu	30,5	146,4	3,7	17,8	16,3
3. Pienalakasvatus	29,7	188,0	2,2	14,0	15,0
3. Poimintahakkuu	31,6	165,4	3,2	16,5	16,4
4. Pienalakasvatus	38,4	196,3	2,7	13,6	18,1
4. Poimintahakkuu	33,2	165,8	3,5	17,2	18,7
5. Pienalakasvatus	30,8	183,9	2,4	14,2	16,8
5. Poimintahakkuu	26,1	156,0	2,9	17,5	18,0

Kuvissa 8 ja 9 verrataan hakkuutähteiden keruukustannuksia ja kertymiä ainespuun vastaaviin korjuukustannuksiin ja kertymiin pienalakasvatuksessa ja poimintahakkuilla. Kuvassa 8 kustannukset on laskettu pinta-alaa (€/ha) kohden ja kuvassa 9 puolestaan kiintokuutiometriä (€/m³) kohden. Pienalakasvatuksessa ainespuun kertymä oli 43,8–70,0 m³/ha ja poimintahakkuilla 33,4–47,1 m³/ha (Taulukko 2). Vastaavasti hakkuupoistuman keskijäreys oli pienalakasvatuksessa 0,12–0,23 m³ ja poimintahakkuilla 0,12–0,17 m³ (Taulukko 2).

Suuremman hakkuukertymän takia pienalakasvatuksen korjuukustannukset pinta-alaa kohti laskettuna (€/ha) olivat suuremmat kuin poimintahakkuilla (Kuva 8), vaikka pienalakasvatuksen kiintokuutiometriä kohden (€/m³) lasketut puunkorjuun yksikkökustannukset olivatkin alemmat kuin poimintahakkuilla (Taulukko 8 ja Kuva 9). Edellä mainittuihin ainespuun korjuukustannuksiin suhteutettuna hakkuutähteiden keruu tuotti 21–30 % lisäkustannuksen (Kuva 8). Ainespuun korjuun kustannuksiin (€/m³) verrattuna hakkuutähteiden keruun kustannukset (€/m³) ovat pääosin suuremmat (Kuva 9 ja Taulukko 8). Hakkuutähteen keruun yksikkökustannukset olivat 16,2–22,5 €/m³ kun taas vastaavat ainespuun korjuun yksikkökustannukset olivat 14,8–18,7 €/m³ hakkuukoeruutujen mukaisissa olosuhteissa (Kuva 9 ja Taulukko 8).



Kuva 8. Hakkuutähteiden keruukustannus pinta-alaa kohden (€/ha) ja kertymä (m³/ha) verrattuna puunkorjuun kustannuksiin (€/ha) ja ainespuukertymään (m³/ha) hakkuukohteilla 1–5 pienalakasvatuksessa (pak) ja poimintahakkuilla (ph).



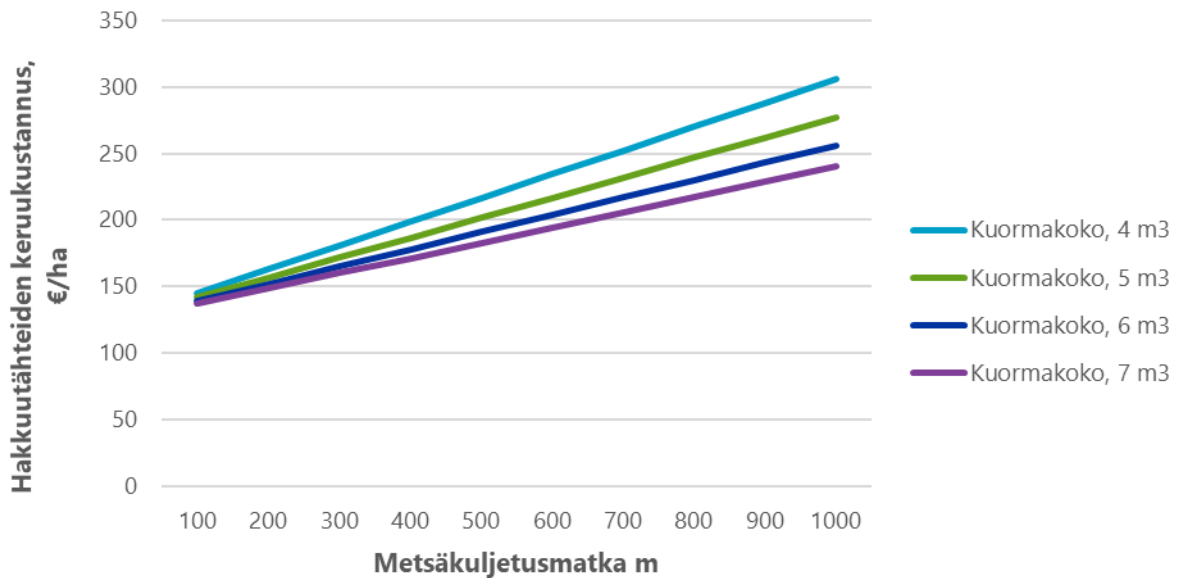
Kuva 9. Hakkuutähteiden keruukustannus poistetun puuston tilavuutta kohden (€/m³) ja kertymä (m³/ha) verrattuna puunkorjuun kustannuksiin (€/m³) ja ainespuukertymään (m³/ha) hakkuukohteilla 1–5 pienalakasvatuksessa (pak) ja poimintahakkuilla (ph).

Korjuukustannuksiin vaikuttavia tekijöitä

Hakkuutähteiden keruun ajanmenekkiin ja kustannuksiin vaikuttavat hakkuutähteiden kertymän ja kasaustyön laadun ohella metsäkuljetusmatka (m) ja kuormakoko (m³). Kuvassa 10 on esitetty metsäkuljetusmatkan (m) ja kuormakoon (m³) vaikutus hakkuutähteiden keruukustannuksiin (€/ha), kun hakkuutähteiden kertymä on 11,0 m³/ha (= ka. kertymä hakkuukoeruu-
duilta). Kuvan 10 perusteella tehokkain tapa tehostaa hakkuutähteiden keruuta on pitää metsäkuljetusmatkat mahdollisimman lyhyinä. Metsäkuljetuksen kuormakoon kasvattaminen on haastavaa, koska jäävä puusto rajoittaa kuormatilan kehystilavuuden kasvattamista, ja kun oletuksena on, että samaa kuormatraktoria käytetään sekä ainespuun että hakkuutähteiden metsäkuljetuksessa. Männyn hakkuutähte on varsin haurasta, minkä vuoksi kuorman tiivistäminen kuormaimella lisää kuormasta tippuvan ja varisevan hakkuutähteen määrää etenkin pakkasella. Pakkanen voi myös pienentää hakkuutähteiden talteen saantoa, kun osa oksabiomassasta jää maastoon puiden kaato- ja karsintavaiheessa tai katkeilee hakkuutähteitä kuormattaessa.

Kuvien 7–9 laskelmissa metsäkuljetusmatka oli 300 m, kuormakoko oli 5,2 m³ ja hakkuutähteen kertymä hakkuukoeruu-
tujen mukaisissa korjuuolosuhteissa vaihteli välillä 7,1–14,4 m³/ha. Edellä kuvatuissa olosuhteissa metsäkuljetusmatkan lyhentäminen 300 metristä 100 metriin pienentäisi hakkuutähteiden keruukustannuksia 19–38 €/ha (ka. 29 €/ha). Vastaavasti metsäkuljetusmatkan kasvattaminen 600 metriin nostaisi hakkuutähteiden keruukustannuksia 28–57 €/ha (ka. 44 €/ha). Metsäkuljetuksen kuormakoon kasvattaminen yhdellä kiintokuutiometrillä (6,2 m³:iin) laskisi puolestaan hakkuutähteiden keruukustannuksia 300 metrin metsäkuljetusmatkalla 4,4–8,2 €/ha (ka 6,3 €/ha). Keruukustannusten pienentämisen näkökulmasta harkinnan arvoinen vaihtoehto joillakin kohteilla voisi olla tyytyä hakkuutähteiden kasaamiseen palstalle hakkuutyön yhteydessä, mikä estäisi hakkuutähteiden poiskuljettamisen yhteydessä tapahtuvaa ravinnehävikkiä (Asikainen ym. 2012) samalla kun kasoille hakkuu pienentäisi hakkuutähteiden peittävyyttä jäkäläkasvuston päällä.

Käytännön puunkorjuussa hakkuutähteiden keruun kytkeminen talvihakkuiden yhteyteen voi aiheuttaa kapasiteettivajeen metsäkuljetuksessa, jos kuormatraktori on sama kuin ainespuunkorjuussa. Talvihakkuilla riski ainespuun ja hakkuutähteiden peittymisestä lumeen kasvaa, jos hakkuun ja metsäkuljetuksen välinen aikaviive kasvaa liian pitkäksi. Hakkuutähteiden ajoon erikoistuneen metsätraktorin vuotuiset käyttötunnit voivat puolestaan jäädä pieniksi, ellei koneelle ole muuta työtä, mikä nostaa koneen kiinteitä kustannuksia (pääoma yms.) ja lisää hakkuutähteiden keruun kustannuksia tässä arvioitua suuremmaksi.



Kuva 10. Metsäkuljetusmatkan (m) ja kuormakoon (m³) vaikutus hakkuutähteiden keruukustannuksiin (€/ha), kun hakkuutähteiden kertymä on 11,0 m³/ha.

Hakkuutähteiden pienen hehtaarikertymän vuoksi korjuukustannukset (€/m³) olivat korkeat, mikä toisaalta laski hakkuutähteiden keruukustannuksia, jotka laskettiin pinta-alaa kohden (€/ha). Korkeiden korjuukustannusten (€/m³) vuoksi hakkuutähteiden hyötykäyttö mahdollisuus energiantuotannossa on hyvin rajallinen. Suuret lämpö- ja voimalaitokset, jotka pystyisivät käyttämään hakkuutähteistä tehtyä metsähaketta polttoaineenaan (Anttila ym. 2018) saavat Lapissa tarvitsemansa puupolttoaineen edullisemmin ja lyhyemmiltä autokuljetusmatkoilta. Hakkuutähdehakkeen palakokojakauma ja kosteus (Hakkila 2004), rajoittavat puolestaan sen käytettävyyttä alueen pienissä lämpölaitoksissa, jotka käyttävät polttoaineenaan pääasiassa runkokuusta tehtyä tasalaatuista ranka- tai kokopuuhaketta. Kattilatyyppille epäsovelia hake laskee energiantuotannon hyötysuhdetta ja lisää päästöjä.

Koska hakkuutähteiden hyötykäyttö nykyisessä metsähakkeen kysyntä- ja tarjontatilanteessa on hyvin rajallinen Lapissa, eikä hakkuutähdehakkeesta saatava kassavirta oletettavasti kata hakkuutähteiden keruun kustannuksia, on kyseessä 21–30 % suuruisen puunkorjuun lisäkustannus. Suomessa Metsähallitus myy teollisuudelle ainespuun toimituskauppana, eli puunjalostuslaitoksille toimitettavista puutavaralajeista (Taulukko 3) saatavan myyntitulon pitää kattaa puunkorjuun ja kaukokuljetuksen kustannusten ohella puuntoimittaja organisaation kustannukset, tiestön kunnossapitokustannukset sekä muut metsätalouden kustannukset ja kantorahatulo tms. mukaan lukien valtiolle tuloutettava osuus (Metsähallitus 2023). Edellä mainittujen syitten takia hakkuutähteiden keruu ja siitä aiheutuvat kustannukset on nähtävä ennen kaikkea yhtenä mahdollisena keinona yhteensovittaa metsätalouden ja porotalouden tarpeita ja tavoitteita ko. alueella.

4.1.3. Vaikutukset metsän uudistumiseen

Hakkuutähteiden vaikutus taimien määrään

Hakkuutähteiden vaikutusta männyntaimien määrään testattiin kahdella mallilla. Ensimmäinen malli rakennettiin hakkuumenetelmä-muuttujan ympärille. Toisessa malliversiossa hakkuumenetelmän sijasta käytettiin hakkuutähteiden määrää. Nämä muuttujat korreloivat voimakkaasti ja on siksi testattava erillisissä malleissa.

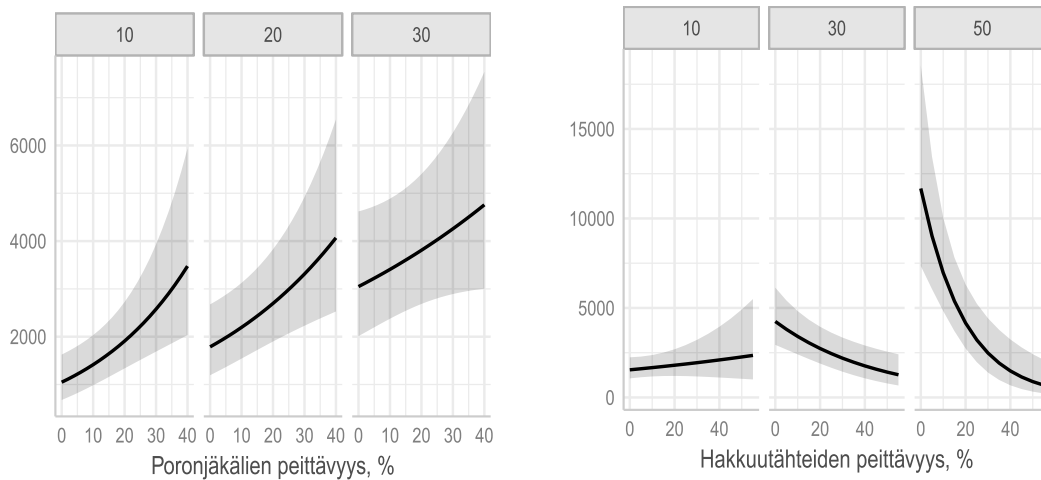
Mallissa, jossa testattiin kovariaattien, kuten taimimäärän ennen hakkuuta, poronjäkälien peittävyden ja poistetun puumäärän (runkoluku, pohjapinta-ala, runkotilavuus), lisäksi hakkuumenetelmää (4-luokkainen), ei hakkuumenetelmä noussut merkitseväksi 5 %:n riskitasolla. Tämän mukaan hakkuun jälkeisissä taimimäärissä ei ollut merkitseviä eroja menetelmien välillä. Myöskään mitkään hakkuumenetelmän parittaiset yhdysvaikutukset yllä mainittujen kovariaattien kanssa eivät olleet merkitseviä 5 % riskitasolla. Hakkuumenetelmä ei ollut merkitsevä myöskään ainoana selittävänä muuttujana mallissa.

Hakkuutähteiden peittävyden ympärille rakennetun mallin selittäviksi muuttujiksi valikoituivat: 1) taimimäärä ennen hakkuuta, 2) poronjäkälien peittävyys ja 3) hakkuutähteiden peittävyys. Lisäksi yhdysvaikutukset: 4) taimimäärä ennen hakkuuta ja poronjäkälien peittävyys ($p = 0.008$) sekä 5) taimimäärä ennen hakkuuta ja hakkuutähteiden peittävyys koealalla ($p = 0.001$) olivat tilastollisesti merkitseviä ja sisällytettiin malliin. Näiden yhdysvaikutusten ennusteitä havainnollistaa kuva 11. Poistetun puuston runkotilavuus ei ollut merkitsevä pää- tai yhdysvaikutuksena. Mallin (pseudo) selitysaste oli 50,4 % (kiinteä osa). Mallin zero-inflated -osan muodosti vakiotermin lisäksi taimimäärä koealalla ennen hakkuuta ($p = 0,001$). Malli laskettiin hakkuun jälkeisille taimimäärille 0–100 tainta koealalla (vastaa 0–20000 tainta hehtaarilla) ja havainnoista poistettiin yksi havainto, jonka kiinteän osan residuaali oli yli 200-kertainen keskimääräiseen, koska ko. havainnon mukanaolo vaikeutti mallin konvergoitumista.

Mikäli taimia oli koealla ennen hakkuuta 2 000 kpl/ha, hakkuun jälkeen taimia oli lähes yhtä paljon. Vastaavasti kun taimia oli 6 000 kpl/ha ennen hakkuuta, hakkuun jälkeen niitä oli hieman alle 3 000 kpl/ha. Edelleen kun taimia oli ennen hakkuuta 10 000 kpl/ha, hakkuun jälkeen niitä oli noin 4 000 kpl/ha (Kuva 11b).

Mallin ennusteiden mukaan poronjäkälien osuuden kasvu vaikutti myönteisesti hakkuun jälkeisten männyntaimien määrään. Vaikutus oli sitä selvempi, mitä vähemmän taimia oli koealalla ennen hakkuuta. Poronjäkälien peittävyden lisääntyminen nolasta neljäänkymmeneen prosenttiin lisäsi taimimäärän piste-estimaattia jopa noin 3,5-kertaiseksi (taimia koealalla 20 kpl, Kuva 11a).

Hakkuutähteiden peittävyys vaikutti hakkuun jälkeisten taimien määrään sitä voimakkaammin, mitä enemmän koealalla oli taimia ennen hakkuuta. Mikäli taimia oli ennen hakkuuta koealla määrä, joka vastaa 2 000 tainta/ha, ei hakkuutähteiden selvää vaikutusta havaittu, mutta vaikutus havaittiin jo, kun taimia oli ennen hakkuuta 6 000 tainta/ha vastaava määrä. Tällöin hakkuutähteiden peittävyden lisääntyminen koealalla nolasta viiteenkymmeneen prosenttiin vähensi taimimäärä ennustetta noin 2 500 tainta/ha. Mikäli taimia oli koealalla ennen hakkuuta määrä, joka vastasi 10 000 tainta/ha, vastaava hakkuutähteiden peittävyden lisäys romahdutti taimimäärän jopa kymmenesosaan alkuperäisestä (Kuva 11b). Ennusteiden melko suuret luottamusvälit kertovat kuitenkin, että piste-estimaatteja voidaan pitää melko suuntaa antavina ja ennusteet kuvaavat ennen kaikkea ilmiöitä.



Kuva 11. Mallin ennusteet koealan hakkuuta edeltävän taimimäärän ja poronjäkälien peittävyuden (a) sekä koealan hakkuuta edeltävän taimimäärän ja hakkuutähteiden peittävyuden (b) vaikutus männyntaimien määrään hehtaarilla. Yksi taimi koealalla vastaa 200 tainta hehtaarilla (koealan koko 50 m²). Piste-estimaattien lisäksi myös 95 %:n luottamusvälit ennusteille.

Raution ym. (2023) mukaan hakkuutähteiden peittävyys vaikutti kielteisesti eri puustoltaan eri tiheyksisten männyn siemenpuualueiden taimimääriin. Mikäli hakkuutähteitä ei ollut lainkaan, taimimäärän estimaatti oli 1 364 tainta/ha, mikäli hakkuutähteiden peittävyys oli 5,3 %, taimia oli 1 278 kpl/ha ja mikäli hakkuutähteiden peittävyys oli 100 %, taimia oli ainoastaan 401 kpl/ha. Kyseissä tutkimuksessa painottuivat hakkuun jälkeisellä vuosikymmenellä syntyneet taimet, koska koealoilta oli poistettu taimista yli 50 cm taimet kokeen alkaessa, joten taimimäärät eivät itsessään ole vertailukelpoisia, mutta ilmiö on.

Hakkuu vaikuttaa vahingoittumattomien ja kasvatuskelpoisten taimien määrää vähentävästi sekä hakkuutähteiden, että poistetun puuston mekaanisen vaurioittamisen kautta. Mekaanista vaurioittamista, jota poistettavan puuston määrä osaltaan kuvaa, ei tässä tutkimuksessa saatu eroteltua. Sitä vastoin Jylhän ym. (2023) tutkimuksessa hakkuussa vioittuneiden taimien osuudesta havaittiin, että poistetun puuston runkotilavuuden noustessa 25–175 m³/ha ja hakkuutähteiden määrän noustessa 0–25 %:iin, vahingoittuneiden taimien osuus noin kolminkertaistui.

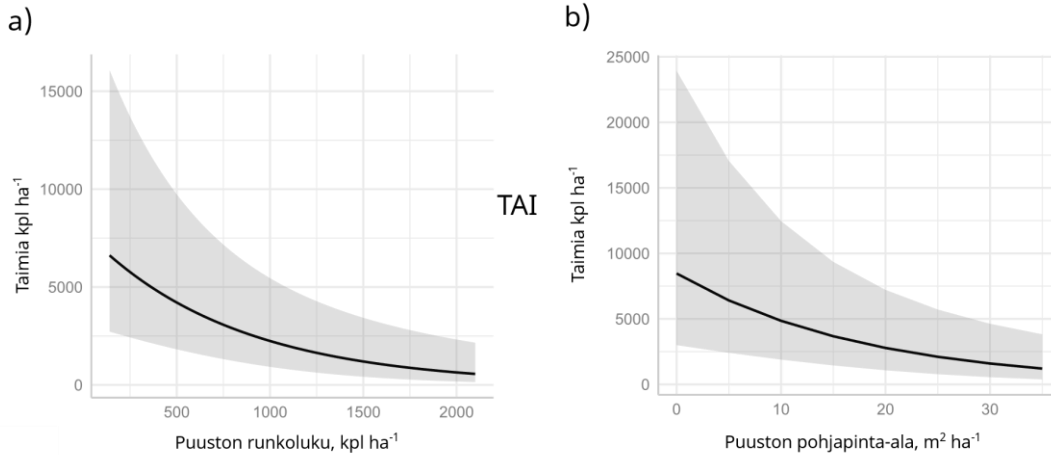
Puuston vaikutus taimien määrään

Kuvasta 12 käy ilmi, että puuston runkoluku vaikutti kielteisesti puuston alle syntyneiden männyntaimien määrään ($p < 0,001$). Vaihtoehtona malliin otettu puuston pohjapinta-ala vaikutti myös kielteisesti taimimäärään, mutta vaikutus oli hieman heikompi kuin runkoluvun vaikutus ($p = 0,001$).

Puuston pohjapinta-alan ollessa noin 10 m²/ha metsikön taimimäärän estimaatti oli noin 5 000 kpl/ha. Vastaava taimimäärän estimaatti saadaan mallista puuston runkoluvulla noin 300 kpl/ha (Kuva 12). Tutkimusalueen metsien taimitiheys on suurempi kuin tuoreessa koko Lapin alueelta tehdyssä kokeellisessa tutkimuksessa puuston tiheyden vaikutuksesta männyn taimien määrään (Rautio ym. 2023). Kyseissä tutkimuksessa kuitenkin kokeen alussa koealoilta oli poistettu yli 50 cm taimet, joten taimettumisaika ei ole täysin verrannollinen HAKEMA-

hankkeen tutkimusasetelmaan. Voitaneen kuitenkin todeta, että HAKEMA-hankealueen metsät taimettuvat puuston allekin verrattain hyvin.

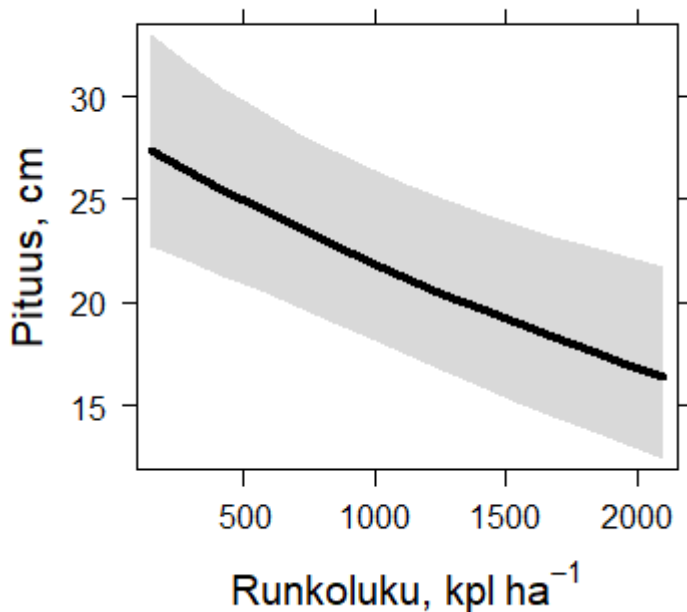
Mallin muuttujien luottamusvälit ovat melko suuret, joka kuvaa osaltaan taimimäärien suurta vaihtelua (Kuva 12). Tämä heijastuu myös mallien kiinteän osan (pseudo) selitysasteissa: pohjapinta-alamallissa $R^2 = 0,060$ ja runkolukumallissa $R^2 = 0,094$.



Kuva 12. Taimitiheyttä selittävien mallien ennusteet ja niiden 95 %:n luottamusvälit: a) puuston runkoluku ja b) puuston pohjapinta-ala. Runkoluku ja pohjapinta-ala ovat eri malleissa.

Taimien pituusmallien tulokset

Taimien pituutta selittävän mallin muuttujiksi valikoituivat taimen ikä ja taimen ikä potenssin 0,4, puuston runkoluku sekä näiden muuttujien yhdysvaikutus ($p = 0,030$). Ikä-muuttujien päävaikutukset taimien pituuteen olivat erittäin merkitseviä ($p < 0,001$), mutta puuston runkoluvun päävaikutus ei ollut merkitsevä ($p = 0,125$), vaikka kerroin olikin negatiivinen. Mikäli malli rakennettiin ilman yhdysvaikutusta, myös puuston runkoluku vaikutti negatiivisesti erittäin merkitsevästi ($p < 0,001$) männyntaimien pituuskehitykseen. Vaikutus taimien pituuden vähenemiseen on noin 10 cm, kun ennuste lasketaan 17-vuotiaille taimille (iän keskiarvo, ks. Kuva 13) päällä olevan puuston tiheyden kasvaessa välillä 150–2100 runkoa/ha (Kuva 13). Taimien pituuskehitys vastaa melko hyvin Raution ym. (2023) havaitsemaa männyntaimien pituuskehitystä lappilaisen mäntymetsän alikasvoksena (käsittelemättömien ”luonnontilaisten” kontrolliruutujen taimien pituuskehitys Raution ym. tutkimuksessa).



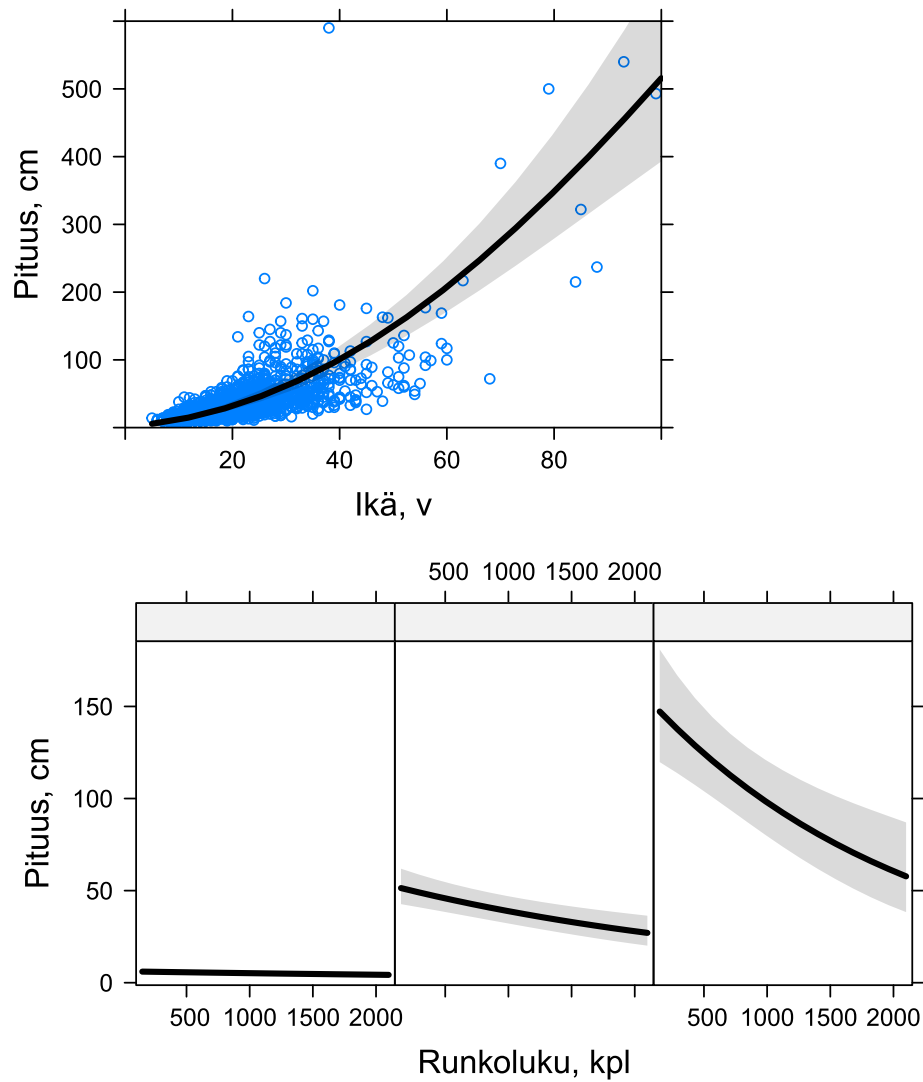
Kuva 13. Puuston runkoluvun vaikutus männyntaimien pituuteen iän ollessa 16,82 vuotta (keskiarvo). Päävaikutusten mallin (Ikä, $\text{Ikä}^{0,4}$ ja Puuston runkoluku) ennusteet ja niiden 95 %:n luottamusväli.

Taimien pituutta selittämään rakennettiin myös malli, jossa taimien iän ja puuston runkoluvun lisäksi malliin sisällytettiin puuston iän ja runkoluvun yhdysvaikutus. Tämän mallin ennusteina laskettiin iän päävaikutuksen ennusteet sekä yhdysvaikutuksen ennusteet taimien pituudelle (Kuva 14).

Taimien iän vaikutuksessa taimien pituuteen oli paljon vaihtelua, erityisesti vanhat taimet (yli 20 vuotta) saattoivat olla hyvinkin eri pituisia (Kuva 14a). Pituuskehitys oli alussa varsin vaatimatonta vastaten Raution ym. (2023) puuston alla (kontrolliruudut) kasvaneiden taimien pituuden kehitystä.

Taimien päällä olevan puuston vaikutus ei näy aivan nuorten taimien pituuden kehityksessä, mutta taimien ikääntyessä pituuden kehitys on sitä hitaampaa, mitä enemmän varjostavaa ja kilpailevaa puustoa on taimien päällä (Kuva 14b).

Yhdysvaikutusmallin, siis mallin, jossa mallissa on mukana puuston runkoluvun ja taimien iän välinen yhdysvaikutus, ks. Kuva 14b) selitysaste (R^2) kiinteällä osalla on 0,660 ja päävaikutusmallin 0,659. Vaikka yhdysvaikutus on varsin selkeä, se ei siis kovin paljon lisännyt mallin selitystasetta.



Kuva 14. Taimien iän (a) sekä iän ja ylispuuston runkotiheyden yhdysvaikutus (b) taimien pituuteen, mallin estimaatit ja 95 %:n luottamusvälit. Puuston tiheys oli keskimäärin 503 kpl/ha, jossa arvossa iän vaikutus on estimoitu.

4.2. Hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutukset porotaloudelle

4.2.1. Vaikutukset poronjäkäliin

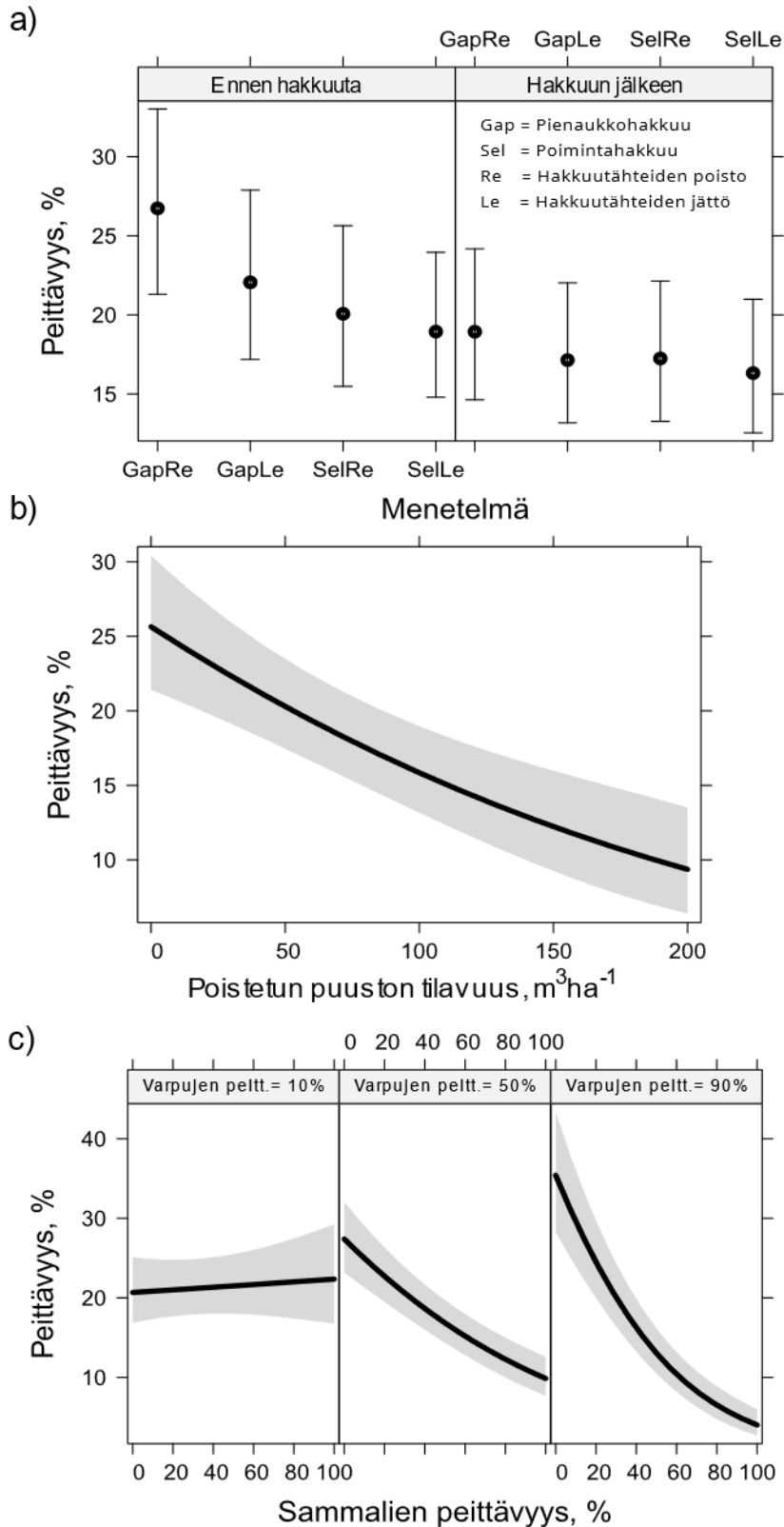
Peittävyysmallin tulokset

Poronjäkälien peittävyys aleni merkitsevästi ($p < 0,001$) hakkuussa, peittävyys alentuessa keskimäärin noin 22:sta 18:ta prosenttiin mallissa, jossa oli myös hakkuumenetelmän ja mittauskerran yhdysvaikutus. Sitä vastoin hakkuumenetelmien välinen ero ($p = 0,130$) tai hakkuumenetelmien ja mittauskerran yhdysvaikutus ($p = 0,182$) eivät olleet merkitseviä 5 %:n riskitasolla.

Jäkälien peittävyys ennen hakkuuta vaihteli huomattavasti ennen hakkuuta arvotuissa eri hakkuutapojen käsittelyryuduissa (Kuva 15a). Hakkuun jälkeen vaihtelu jäkälän peittävyys piste-estimaateissa oli varsin vähäistä. Piste-estimaattien luottamusvälit olivat kohtalaisen laajat.

Mallissa poistetun puuston määrän lisääntyminen alensi voimakkaasti jäkälän peittävyttä ($p < 0,001$), noin 10–15 prosenttiyksikköä verrattuna tilanteeseen, jossa puustoa ei ole poistettu (Kuva 15b). Poistetun puuston määrä indikoi myös puuston määrää ennen hakkuuta ja korreloi tämän kanssa. Yhtäältä suuri puumäärä ennen hakkuuta haittaa jäkälien kasvua (varjostus) ja toisaalta juuri poistetun puuston määrä vaikuttanee myös mekaanisesti jäkälään sen lisäksi, että siitä tulee runsaasti hakkuutähteitä jäkälikköä peittämään.

Varpujen ja sammalien peittävyys yhdysvaikutus jäkälien peittävyteen on hyvin merkitsevä ($p < 0,001$). Mikäli varpujen peittävyys on pieni, sammalien peittävyys lisääntyminen vaikuttaa vähän jäkälien peittävyteen, sen ollessa noin 20 %:n tasolla. Mikäli varpujen peittävyys on suuri, lisääntyvä sammalien peittävyys ennustaa voimakkaasti vähenevää jäkälien peittävyttä (Kuva 15c). Mallin selitysaste $R^2 = 0,310$. Edellinen tulos viittaa siihen, että varpujen määrän lisääntyminen ja siihen liittyvä sammalten runsastuminen erityisesti kuivahkoilla ja kuivilla kankailla heikentää jäkälän kasvuolosuhteita ja peittävyttä merkittävästi. Tämä kuivempien kankaiden tuoreutumisen aiheutuva varpujen ja sammalten määrän lisääntyminen ja siihen liittyvä jäkälän määrää väheneminen on havaittu myös Tonteri ym. (2022) tekemässä tutkimuksessa.

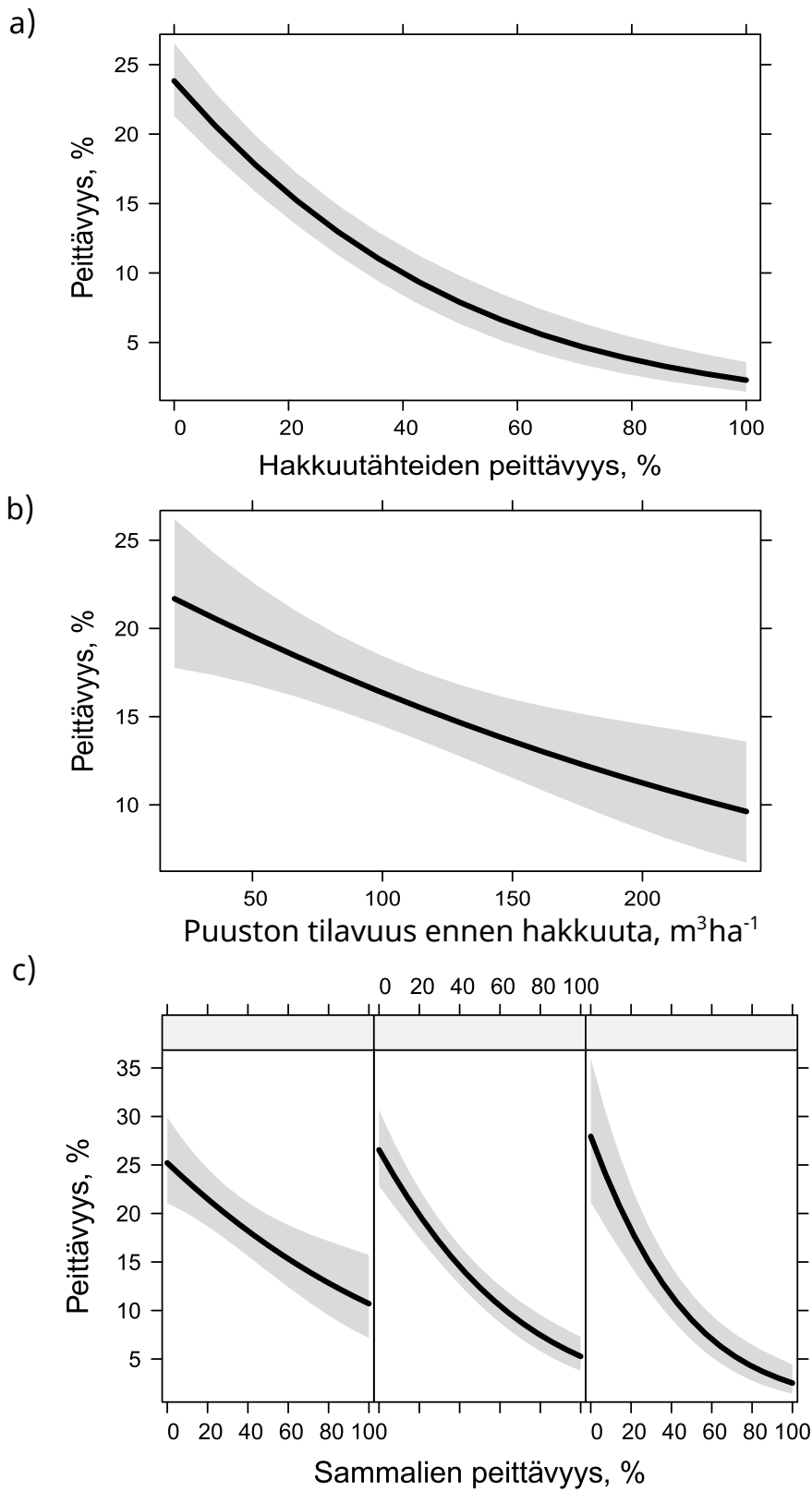


Kuva 15. Hakkuumenetelmään ja mittausajankohtaan perustuvan poronjäkälien peittävyysmallin estimaatit ja niiden 95 %:n luottamusvälit: hakkuumenetelmän ja mittauskerran (ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen) yhdysvaikutus (a), hakkuussa poistetun puuston runkotilavuus (b) sekä sammalien ja varpujen peittävyysyden yhdysvaikutus (c).

Mallissa, jossa testattiin hakkuutähteiden peittävyysvaikutusta poronjäkälien peittävyteen havaittiin, että hakkuutähteiden peittävyydellä oli erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) negatiivinen vaikutus poronjäkälien peittävyteen. Myös hakkuuta edeltävän puuston määrä runkotilavuudella ilmaistuna vaikutti negatiivisesti hakkuun jälkeiseenkin jäkälän peittävyteen ($p = 0,001$). Lisäksi sammalien ja varpujen yhdysvaikutus jäkälän peittävyteen oli mallissa merkitsevä ja negatiivinen ($p = 0,002$).

Hakkuutähteiden peittävyden saavuttaessa 100 %, lähenee jäkälien peittävyys nolaa ollen ennen hakkuutähteiden ilmaantumista keskimäärin runsaat 20 % (Kuva 16a). Myös hakkuuta edeltävän puuston määrä pienensi jäkälien peittävyttä noin 20 prosenttiyksikköä puuston tilavuuden muuttuessa noin 20–240 m³/ha (Kuva 16b).

Sammalien ja varpujen peittävyysvaikutus jäkälien peittävyteen oli suurilla varpujen peittävyksillä melko samanlainen kuin hakkuumenetelmien ja mittauskertojen mallissa (Kuva 15c), mutta hakkuutähteiden peittävyteen perustuvassa mallissa lisääntyvä sammalien peittävyys vaikutti negatiivisesti jäkälien peittävyteen myös pienemmillä varpujen peittävyksillä (Kuva 16c). Mallin selitysaste $R^2 = 0,362$.



Kuva 16. Hakkuutähteiden peittävyteen perustuvan poronjäkälien peittävyysmallin estimaatit ja niiden 95 %:n luottamusvälit: hakkuutähteiden peittävyys (a), hakkuuta edeltävän puuston runkotilavuus (b) sekä sammalien ja varpujen peittävyden yhdysvaikutus (c).

Poronjäkälien biomassamallien ennusteet

Jäkälän biomassamallissa, joka rakentui hakkuumenetelmän ja mittauskerran ja näiden yhdysvaikutusten varaan, oli selittävinä muuttujina samat muuttujat kuin vastaavassa jäkälien peittävyysmallissa. Mittausajankohtien, ennen ja jälkeen hakkuun, välinen ero jäkälän biomassassa oli tilastollisesti merkitsevä ($p = 0,002$). Ero ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen poronjäkälien biomassoissa oli noin 100 kg mallissa, joissa myös hakkuumenetelmien ja mittauskerran yhdysvaikutus oli mallissa mukana. Hakkuumenetelmien väliset erot ennen hakkuuta ja sen jälkeen eivät olleet tilastollisesti merkitseviä (hakkuumenetelmän ja mittauskerran yhdysvaikutuksen $p = 0,231$, hakkuumenetelmien päävaikutusten $p = 0,482$). Jäkälän biomassan piste-estimaattien ero ennen hakkuuta oli suurempi kuin niiden ero hakkuun jälkeen eri hakkuumenetelmien välillä (Kuva 17a).

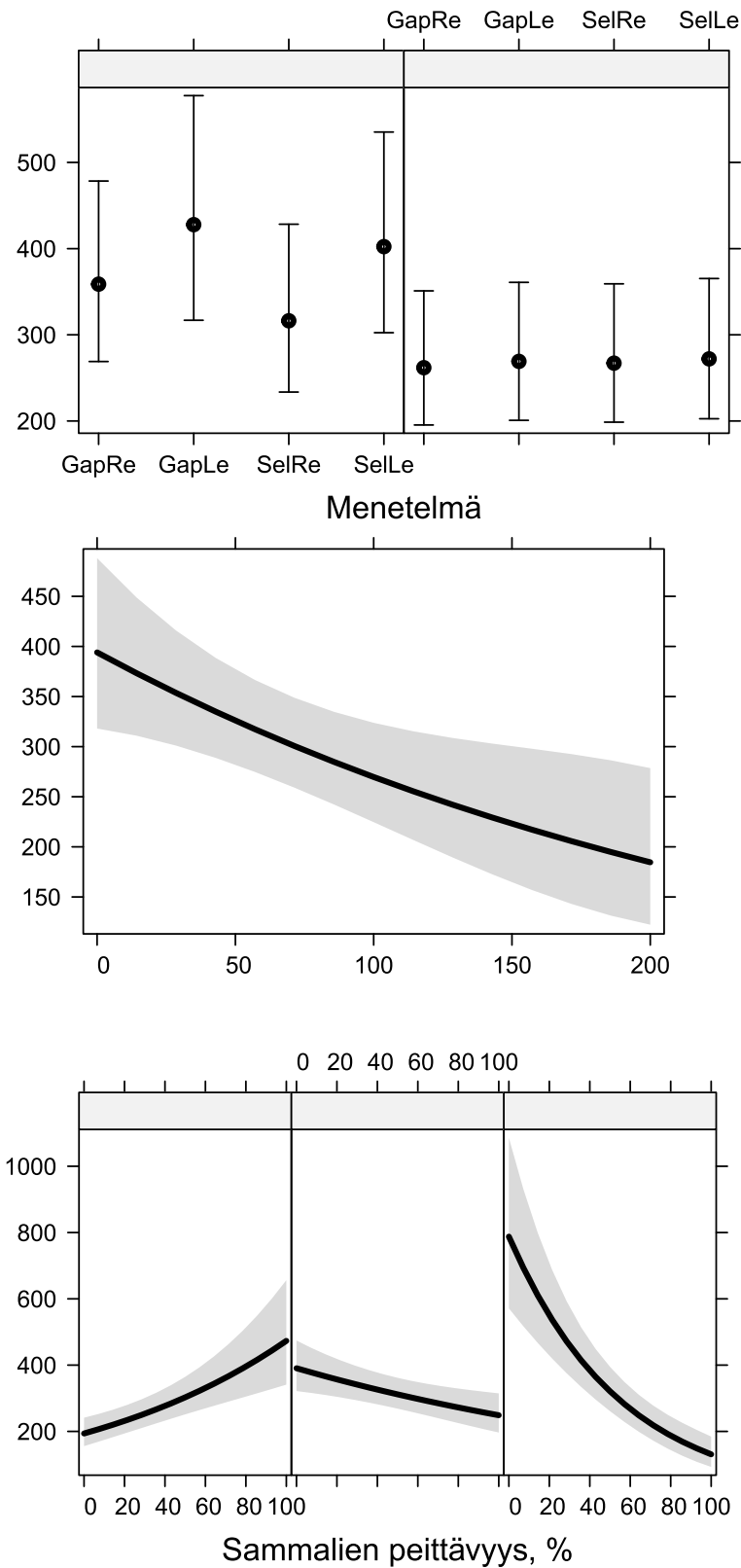
Vaikka menetelmien välinen ero ei olekaan tilastollisesti merkitsevä, oli jäkälien biomassan piste-estimaattien ero ennen ja jälkeen hakkuun menetelmittäin varsin erilainen: pienalakasvatuksessa, jossa hakkuutähteet poistettiin (GapRe) ero oli 97 kg/ha, pienalakasvatuksessa, jossa hakkuutähteet jäivät tutkimusalalle (GapLe), ero oli 159 kg/ha, poimintahakkuussa, jossa hakkuutähteet poistettiin (SelRe), ero oli 49 kg/ha ja poimintahakkuussa, jossa hakkuutähteet jätettiin (SelLe), ero oli 130 kg/ha. Tämä tarkoittaa, että pienalakasvatuksessa jäkälien biomassan piste-estimaattien ero ennen hakkuuta ja sen jälkeen oli 1,64-kertainen ja poimintahakkuussa 2,65-kertainen riippuen hakkuumenetelmästä ja siitä, poistettiinkö hakkuutähteet vai jätettiin ne alalle. Myös tämä viittaa selvästi siihen, että hakkuun jälkeen tehtävällä hakkuutähteen keruulla voidaan merkittävästi vähentää jäkälän vähenemistä hakkuualueilla.

Poistetun puuston tilavuus kuvaa osaltaan jäkälän kasvuolosuhteita ennen hakkuuta, sillä tiheä puusto ja suuri puumäärä eivät suosi jäkälän kasvua (Tonteri ym. 2022). Toisaalta suuri poistetun puuston määrä tarkoittaa myös suurta hakkuutähteen määrää ja kasvillisuudelle aiheutettuja mekaanisia vaurioita. Tämä vaikutus näkyy myös mallissa, jossa poistetun puuston määrän lisääntyminen vaikuttaa voimakkaasti kielteisesti, aiheuttaen jopa 200 kg/ha pudotuksen jäkälän biomassaan lähtötilanteen ollessa 400 kg/ha (Kuva 17b).

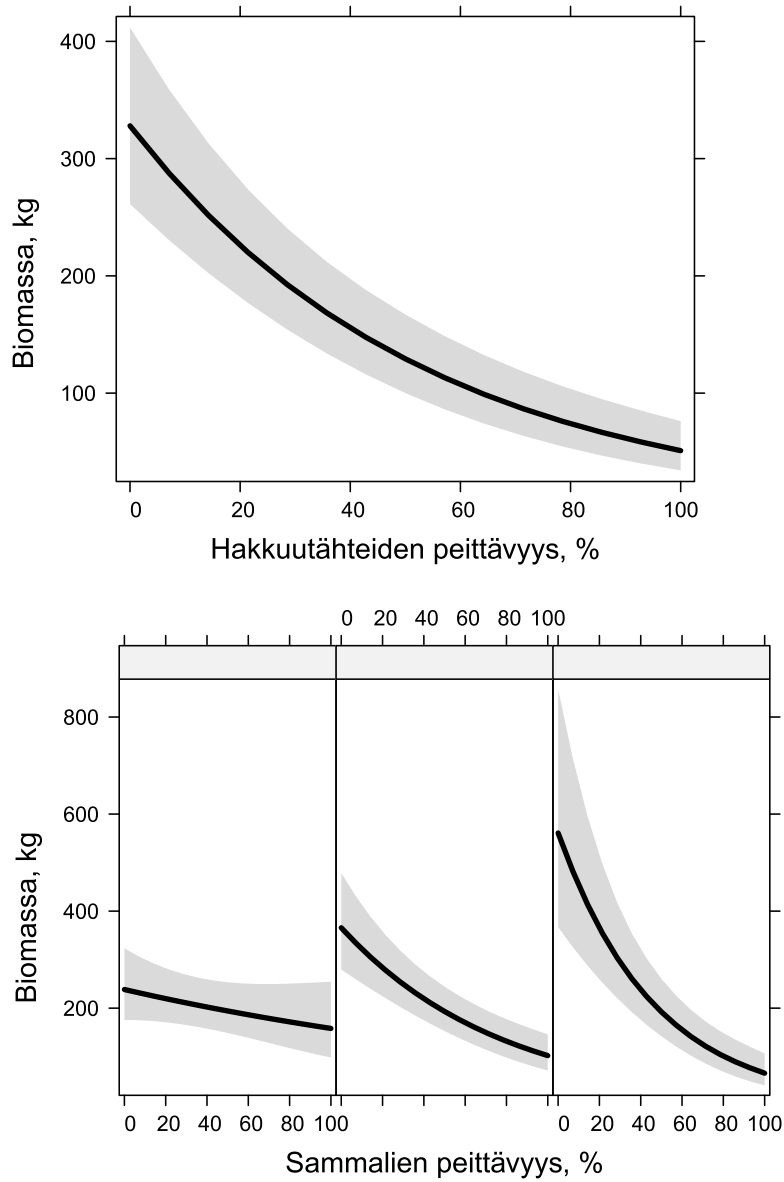
Sammalien ja varpujen peittävyysvaikutus jäkälän biomassaan on varsin samankaltainen kuin jäkälän peittävyysvaikutus osalta. Suurin ero on se, että varpujen peittävyysvaikutus on pieni, myös jäkälän biomassassa lisääntyy sammalien peittävyysvaikutus lisääntyessä (Kuva 17c). Peittävyysmallin selitysaste on melko alhainen, $R^2 = 0,181$.

Mallissa, jossa hakkuumenetelmä ja mittauskerta on korvattu hakkuutähteen kasvillisuusruuduilta mitatulla peittävyydellä, hakkuutähteen peittävyysvaikutus jäkälän biomassaan osoittautui voimakkaaksi ($p < 0,001$) kuten jäkälän peittävyysmallissakin. Hakkuutähteen peittäessä jäkälikön kokonaan, jäljelle jääneen jäkälän biomassan ennuste on noin 64 kg/ha (Kuva 18a).

Sammalien ja varpujen peittävyysvaikutus jäkälien biomassaan oli melko samanlainen kuin peittävyysmallissakin, mutta pienillä varpujen peittävyyksillä sammalien peittävyysvaikutus lisääntyminen vaikutti jäkälien biomassaan vain vähän, jos lainkaan (Kuva 18b). On merkille pantavaa, että hakkuutähteen peittävyysvaikutus perustuvassa poronjäkälien biomassamallissa ei alkupuuston vaikutus ollut tilastollisesti merkitsevä toisin kuin vastaavassa peittävyysmallissa. Tämä voi selittyä sillä, että jäkälän biomassaan vaikuttaa peittävyysvaikutuksen ohella myös jäkälän korkeus. Mallin selitysaste oli parempi kuin hakkuumenetelmään ja mittauskertaan perustuvassa biomassamallissa, $R^2 = 0,302$.



Kuva 17. Hakkuumenetelmään ja mittausajankohtaan perustuvan poronjäkälien biomassamallin estimaatit ja niiden 95 %:n luottamusvälit: hakkuumenetelmän ja mittauskerran (ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen) yhdysvaikutus (a), hakkuussa poistetun puuston runkotilavuus (b) sekä sammalien ja varpujen peittävyys (c).

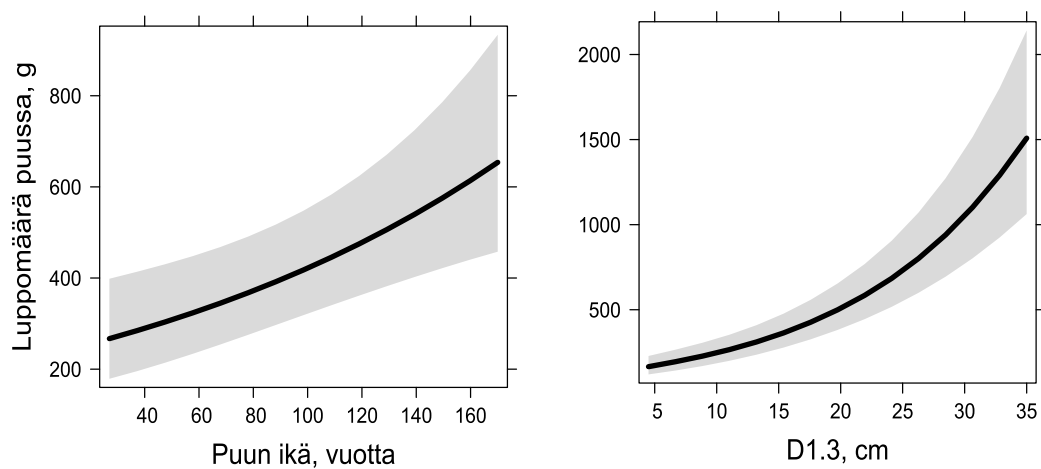


Kuva 18. Hakuutähteiden peittävyyteen perustuvan poronjäkälien biomassamallin estimaatit ja niiden 95 %:n luottamusvälit: hakuutähteiden peittävyys (a) sekä sammalien ja varpujen peittävyyden yhdysvaikutus (b).

4.2.2. Vaikutukset lupon määrään

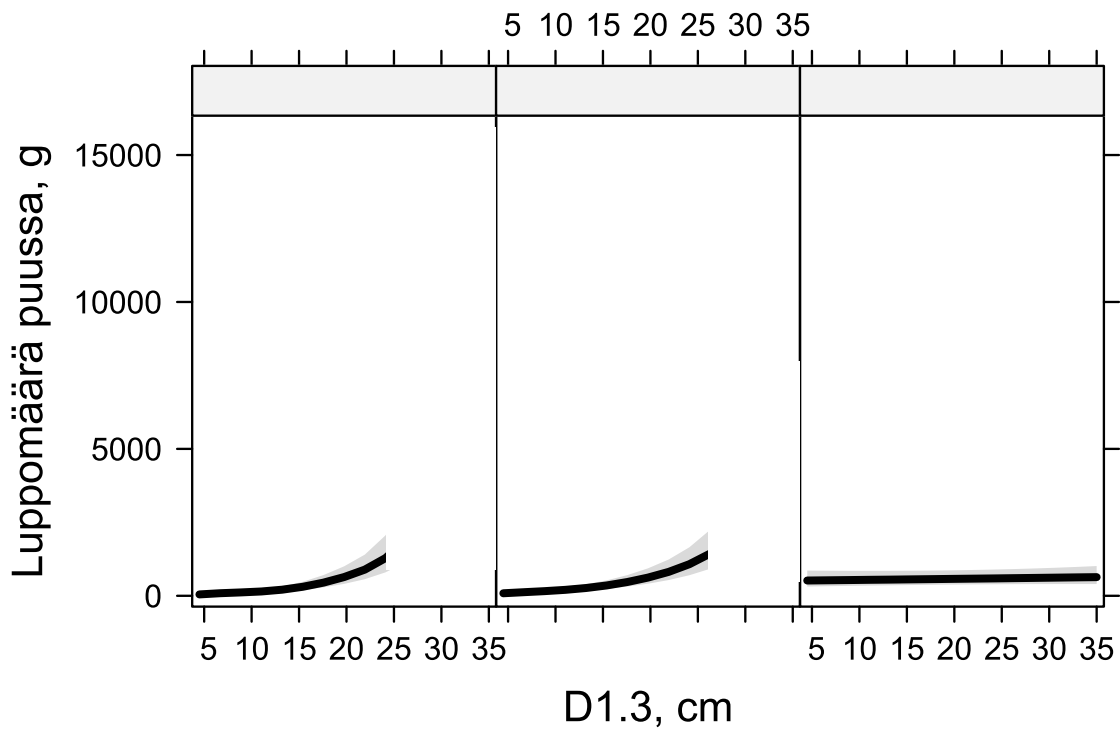
Mallit puun luppobiomassalle

Eri tekijöiden vaikutuksia lupon määrään tarkasteltiin luomalla mallit puun luppobiomassalle. Lupon määrää puussa selittivät puun rinnankorkeusläpimitta ($p = < 0,001$) ja puun ikä ($p = 0,001$, luppomalli 1) sekä näiden muuttujien yhdysvaikutus ($p < 0,001$, luppomalli 2). Nämä muuttujat korreloivat selittävinä muuttujina mallissa vain hyvin heikosti (VIF molemmilla 1,44). Selitysaste (R^2) päävaikutusten mallissa (luppomalli 1) oli 0,310 ja yhdysvaikutusmallissa (luppomalli 2) 0,353. Sekä puun ikä että rinnankorkeusläpimitta lisäsivät puun luppobiomassaa, mutta rinnankorkeusläpimitta enemmän kuin ikä (Kuva 19).



Kuva 19. Puussa olevan lupon biomassaa luppomallissa 1 selittävät muuttujat: puun ikä (a) ja puun läpimitta rinnan tasalta (b). Harmaa alue kuvaa ennusteen 95 %:n luottamusväliä.

Luppobiomassamallin versiossa 2, missä mukana oli luppomallin 1 muuttujien yhdysvaikutus nähdään, että nuorilla ja nuorehkoilla puilla läpimitan lisäys yli 20 cm:n kasvattaa luppobiomassaa enemmän kuin vanhahkoilla puilla (ikä 150 vuotta, Kuva 20). Vaikka tämä lupon määrän lisääntyminen havaittiin tässä aineistossa vain nuorissa puissa, sen yleistettävyyden epävarmuus on suuri. Puiden luppobiomassojen laskennassa käytettiin mallia 1, koska sitä pidettiin yleistettävämpänä ja vaara ennustaa puukohtainen luppomäärä harhaisesti oli pienempi.

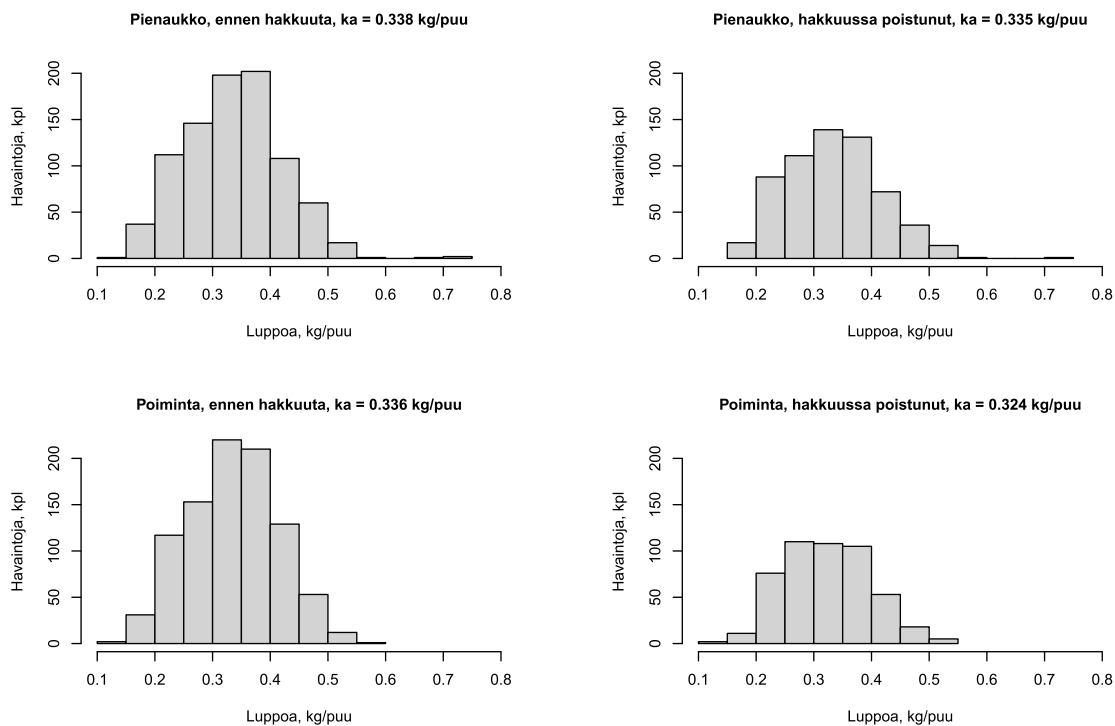


Kuva 20. Puukohtaisen rinnankorkeusläpimitan ja iän yhdysvaikutus puukohtaiseen loppubiomassaan (g/puu) loppubiomassamallin versiossa 2. Harmaa alue kuvaa ennusteen 95 %:n luottamusväliä. Ennusteet on laskettu havaituille selittäjän (rinnankorkeusläpimitta) arvoille.

Loppubiomassat koealojen puissa

Luppomallilla 1 lasketut loppubiomassan ennusteet ympyräkoealojen puille olivat jakaantuneet melko normaalisti. Ne laskettiin erikseen pienalakasvatuksen ja poimintahakkuun puustoille ennen hakkuuta sekä koealoilta poistuneelle puustolle.

Luppoa oli sekä ennen hakkuuta olleessa puustossa että hakkuussa poistetussa puustossa suunnilleen saman verran hakkuumenetelmästä riippumatta, eli keskimäärin 0,2–0,4 kg/puu. Poimintahakkuussakin, jossa lähtökohtaisesti poistetaan enimmäkseen suuria puita, poistuneen puuston loppubiomassa on keskimäärin lähellä lähtöpuuston loppubiomassaa. Kerätyn aineiston perusteella näyttää siltä, että hakkuissa on jopa poistettu hieman keskimääräistä vähäluppoisempia puita. Tämä kuvanee sitä, että poimintahakkuukohteidenkin puusto on melko homogeenista, eikä puiden runkolukujakauma painotu pieniläpimittaiseen puustoon.



Kuva 21. Ennen hakkuuta pienalakasvatus(pienaukko)- ja poimintahakkuukoalojen puille loppomallilla 1 laskettujen loppubiomassojen jakaumat (a, c) sekä pienalakasvatus- ja poimintahakkuun koaloilta hakkuussa poistuneiden puiden vastaavat loppubiomassojen jakaumat (b, d). Lyhenne ka tarkoittaa jakauman keskiarvoa puukohtaisille loppubiomassoille.

Hehtaarikohtaiset loppomäärät ja poistumat pienalakasvatus- ja poimintahakkuussa

Kun puiden keskimääräiset loppubiomassat hakkuumenetelmittäin kerrotaan hehtaarikohtaisilla runkoluvuilla sekä toisaalta poistetun puuston hehtaarikohtaisilla runkoluvuilla, saadaan karkeat arviot eri käsittelyryutujen loppomäärille ennen hakkuuta sekä poistetun puuston mukana poistuneelle loppomäärälle. Ennen hakkuuta pienalakasvatuskohteilla oli loppoa 190 kg/ha ja poimintahakkuukohteilla 196 kg/ha. Hakkuussa poistuneet loppomäärät olivat vastaavasti 119 kg/ha ja 103 kg/ha.

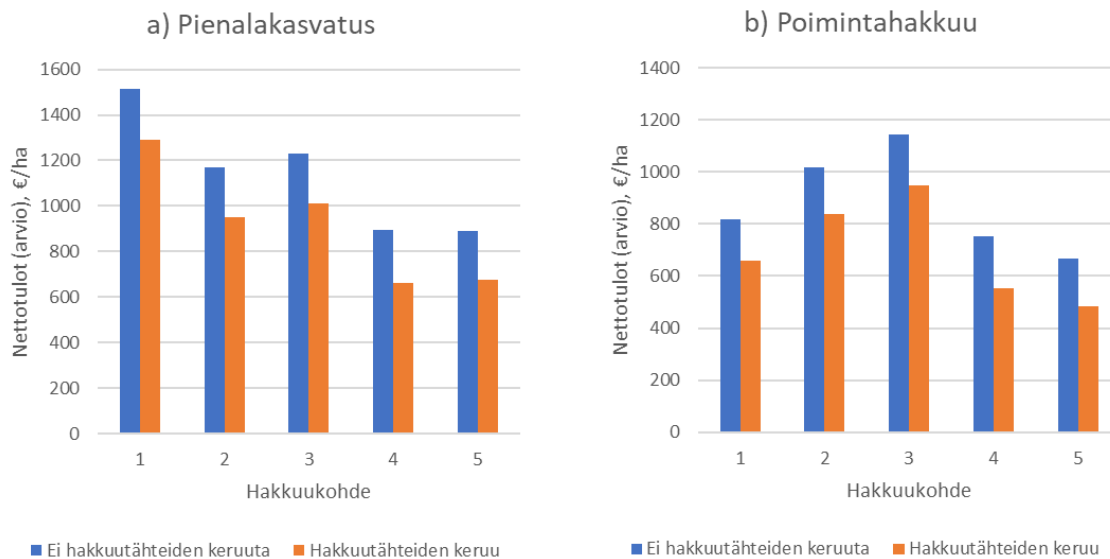
Metsien loppomäärä, noin 200 kg/ha ennen hakkuuta, vastanee korkeintaan keskiarvoista tai jopa keskimääräistä pienempää loppubiomassaa varsinaisilla loppolaitumilla. Parhailla loppolaitumilla loppoa voi olla jopa lähes 600 kg/ha. Hakatuilla metsäalueilla, jossa puustoa on yli 100 runkoa/ha, loppoa on hieman alle 50 kg/ha (Sipilä ym. 2000). Inarin alueella yli 200 vuotiaista kuivahkoilla kankailla kaadetuista männyistä kerätyn lupon määrät vaihtelivat välillä 0,7–2,5 kg/puu (RKTL/Nieminen 2005, julkaisematon). Nämä Inarissa mitatut runsasluppoisen vanhan männikön puukohtaiset loppomäärät ovat yli viisinkertaiset verrattuna koaloille arviotuihin puukohtaisiin keskimääräisiin loppomääriin. Myös tämä kertoo koalojen edustavan keskimääräistä vähäluppoisempia laidunmetsiä. Tulokset osoittavat kuitenkin selvästi sen, että nyt toteutetut melko varovaisetkin hakkuut vähenivät lupon määriä laidunmetsissä yli puolella alkuperäisestä määrästä.

4.3. Arvio taloudellisista vaikutuksista poro- ja metsätaloudelle

4.3.1. Arvio metsätalouden nettotuloista

Metsätalouden nettotulot arvioitiin laskemalla hakkuista saatavat kantorahatulot ja vähentämällä niistä tutkimuskysymyksessä 1 lasketut hakkuutähteiden keruun kustannukset. Kuva 22 esittää arviot metsätalouden nettotuloista eri hakkuukohteilla (hakkuukohteet 1–5, Kuva 2) ja eri hakkuumenetelmillä hakkuutähteiden keruulla ja ilman hakkuutähteiden keruuta. Nettotulot ilman hakkuutähteiden keruuta laskettiin käyttämällä Taulukon 3. hehtaarikohtaisia ainespuun kertymiä sekä vuoden 2022 keskimääräisiä puutavaralajikohtaisia harvennushakkuiden kantorahatuloja Lapin maakunnassa, jotka olivat männyn osalta 53,36 €/m³ tukista, 23,34 €/m³ pikkutukista ja 17,53 €/m³ kuitupuusta sekä 15,88 €/m³ koivun kuitupuusta (Luke, Tilastotietokanta 2022).

Metsätalouden nettotulot hakkuutähteiden keruun kanssa laskettiin muutoin samoin, mutta kantorahatuloista vähennettiin Taulukossa 4 ilmoitetut hehtaarikohtaiset kustannukset hakkuutähteiden kasaamisesta ja metsäkuljetuksesta. Koealojen keskimääräiset arvioidut nettotulot pienalakasvatuksessa olivat 1 138 €/ha ilman hakkuutähteiden keruuta ja 917 €/ha hakkuutähteiden keruun kanssa. Poimintahakkuun osalta keskimääräiset nettotulot olivat 879 €/ha ilman hakkuutähteiden keruuta ja 696 €/ha hakkuutähteiden keruun kanssa. Koealojen keskimääräiset hakkuutähteiden korjuukustannukset olivat 222 €/ha pienalakasvatuksessa ja 183 €/ha poimintahakkuissa.



Kuva 22. Arvio metsätalouden nettotuloista hakkuukohteilla (hakkuukohteet 1–5), eri hakkuumenetelmillä sekä hakkuutähteiden keruulla ja ilman hakkuutähteiden keruuta.

4.3.2. Arvio porotalouden nettotuloista

Porotalouden nettotulot arvioitiin Luken ja Helsingin yliopiston yhdessä kehittämällä taloudellis-ekologisella poronhoidon systeemimallilla (Tahvonen ym. 2014, Pekkarinen ym. 2015, Pekkarinen 2018). Arviot porotalouden tuloista laskettiin kolmelle eri esimerkkiskenaariolle. Ensimmäisessä skenaariossa (Ei luppoa, ei ruokintaa) keskityttiin ainoastaan kaivettavaan ravintoon. Toisessa skenaariossa (Luppo, ei ruokintaa) huomioitiin molemmat luontaiset talviajan ravintolähteet (kaivettava ravinto ja luppo). Viimeisessä skenaariossa (Luppo, lisäruokinta) huomioitiin sekä luontaiset ravintolähteet että laitumille viety maltillinen maastoruokinta. Jokaiselle kolmelle eri skenaariolle laskettiin neljä eri ratkaisua, jotka kuvaavat eri metsänkäsittelyjen vaikutuksia porotaloudelle.

Kuva 23 esittää eri skenaarioiden mukaiset ratkaisut ensimmäisten kahdenkymmenenviiden vuoden ajalta. Kuvissa musta pisteviiva kuvaa ratkaisua ilman hakkuita, jolloin systeemi pysyy alkutilanteen mukaisessa tasapainotilassa. Punainen pistekatkoviiva kuvaa poimintahakkuuratkaisua, jossa hakkuutähteet jätetään ja sininen katkoviiva ratkaisua, jossa hakkuutähteet kerätään, mutta jäkälän kasvunopeus ei parannu. Vihreä yhtenäinen viiva kuvaa ratkaisua, jossa hakkuutähteet kerätään ja jäkälän kasvunopeus nousee hakkuiden ansiosta parantuneiden kasvo-olojen myötä.

Skenaarion 1 (Ei luppoa, ei ruokintaa) poimintahakkuuratkaisuisissa 2 ja 3 jäkäläbiomassa lähtee hyvin hitaasti palautumaan kohti alkuperäistä 400 kg/ha arvoa. Palautumisen hitaus johtuu siitä, että laskennassa oletetaan, ettei paliskunta reagoi hakkuisiin vähentämällä poromäärää. Skenaarioissa 2 (Luppo, ei ruokintaa) ja skenaariossa 3 (Luppo, ruokinta) ei jäkäläbiomassa lähde kuitenkaan palautumaan vastaavissa ratkaisuisissa 2 ja 3 (punainen pistekatkoviiva ja sininen katkoviiva). Tämä johtuu siitä, että poromäärä on sovitettu vastaamaan alkutilanetta, jossa porot saavat luonnonravintoa sekä kaivettavasta ravinnosta että luposta. Kun hakkuiden myötä sekä lupon määrä että maajäkälän määrä putoaa, ei saatavilla oleva ravinto riitä tukemaan poromäärää vaan porot entisestään kuluttavat heikentyneitä laitumia. Näin olleen hakkuit voivat siirtää systeemin uuteen tilaan, jossa aikaisemmin tasapainossa olleen poro-laidunsystemin jatkuva heikentyminen voidaan ehkäistä ainoastaan poromäärää alentamalla tai maastoruokintaa lisäämällä.

Toisaalta kaikkien skenaarioiden ratkaisuisissa 4 (Hakkuutähteiden keruu, kasvun parannus), palautuu jäkäläbiomassa alkuperäiselle tasolle jo alle kymmenessä vuodessa. Nopea palautuminen johtuu oletuksesta, jonka mukaan, jäkälän kasvunopeus nousee hakkuiden jälkeisten parantuneiden valoisuusolosuhteiden vuoksi hakkuita edeltävää korkeammalle tasolle. Tässä tilanteessa myös porotalouden vuotuiset nettotulot nousevat hakkuita edeltäviä nettotuloja korkeammalle tasolle noin kuusivuotta hakkuiden jälkeen. Todellisuudessa kehityksessä menee todennäköisesti hieman pidempään, sillä ratkaisuisissa 4 kasvun oletetaan parantuvan heti hakkuiden jälkeen. Todennäköisesti mahdollinen kasvun parannus tapahtuisi pienellä viiveellä hakkuiden jälkeen. Toisaalta todellinen kasvun parannus voi olla skenaariossa tehtyä oletusta suurempi tai pienempi.

Mallin oletusten mukaiset arviot porotalouden nettotuloista ennen hakkuita skenaarioissa 1 ja 2 ovat noin 12 ja 16 € per vuosi hehtaarilta talvijäkälälaidunta (Kuva 23 musta pisteviiva). Hakkuiden jälkeen ilman hakkuutähteiden keruuta, nettotulot putoavat noin 65–75 %. Tämän jälkeen porotalouden nettotulot lähtevät skenaariossa 1 hitaasti nousemaan samalla kun jäkälän biomassa palautuu kohti alkuperäistä tasoa. Skenaariossa 2 nettotulot sen sijaan jatkavat putoamista jäkälälaidunten heiketessä, mikäli poromäärää ei vähennetä. Tapauksissa, joissa

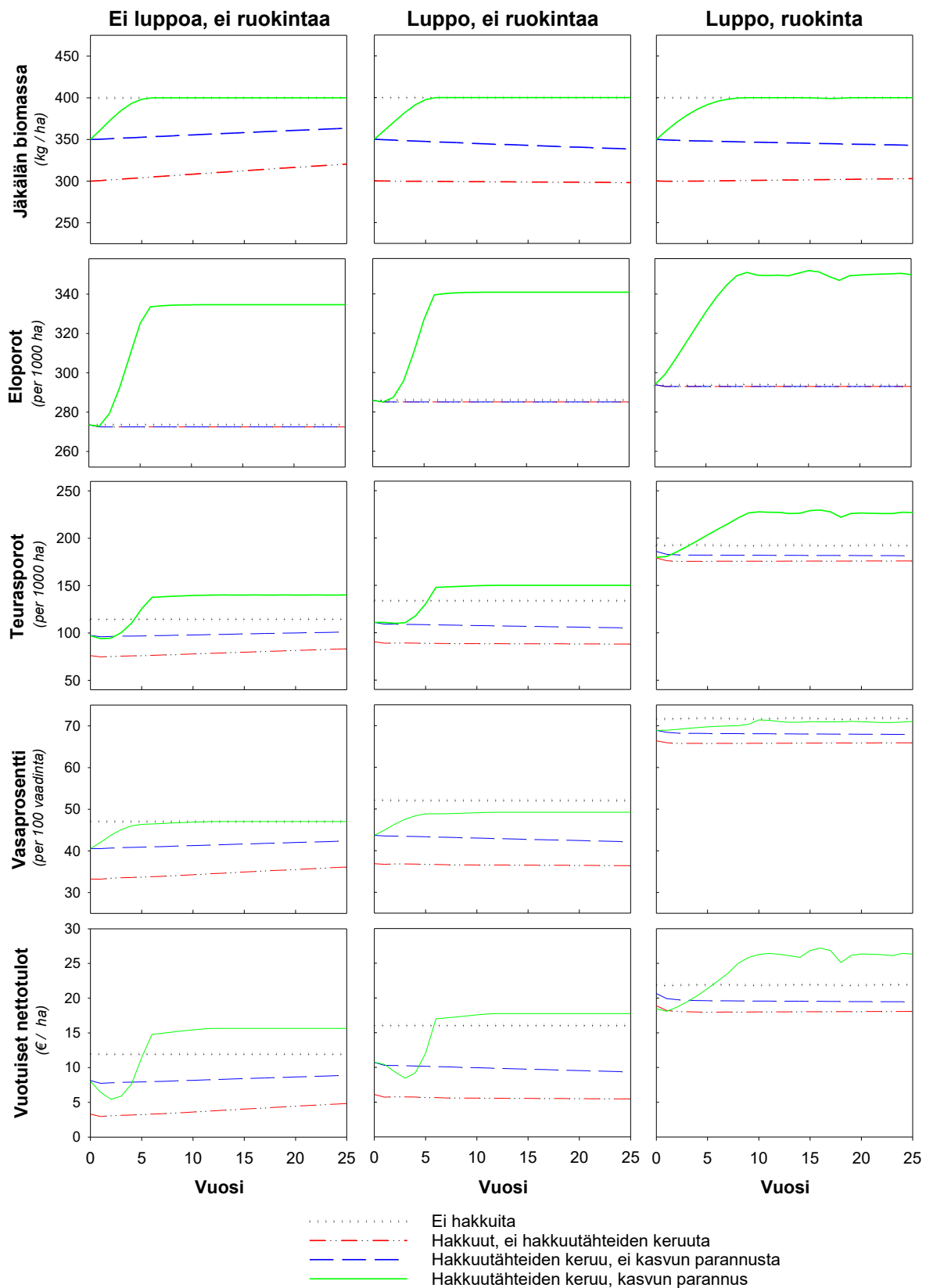
hakkuutähteet kerätään (ratkaisut 3 ja 4) hakkuiden jälkeiset nettotulot putoavat selvästi vähemmän, mutta tästä huolimatta nettotulot vähenevät yli 30 % suhteessa tilanteeseen ennen hakkuuta.

Skenaariossa 3 (Luppo, ruokinta) hakkuiden vaikutukset porotalouden tuottavuudelle pysyvät kohtuullisen vähäisinä, sillä tässä skenaariossa porotalous nojaa luonnonlaidunten lisäksi maastoruokintaan. Lisäruokinta pitää vasaprocentin ja teurasporojen määrän korkealla tasolla, vaikka jäkäläbiomassa ja lupon saatavuus putoavat hakkuiden seurauksena. Tästä huolimatta porotalouden vuotuiset nettotulot putoavat noin 10–20 %. Ainoastaan tapauksissa, joissa jäkälän kasvunopeus nousee hakkuiden jälkeisten parantuneiden valoisuusolosuhteiden vuoksi hakkuuta edeltävää korkeammalle tasolle (Kuva 23 vihreä viiva) nousevat porotalouden vuotuiset nettotulot kohtuullisessa ajassa hakkuuta edeltävien nettotulojen tasolle ja jopa korkeammalle.

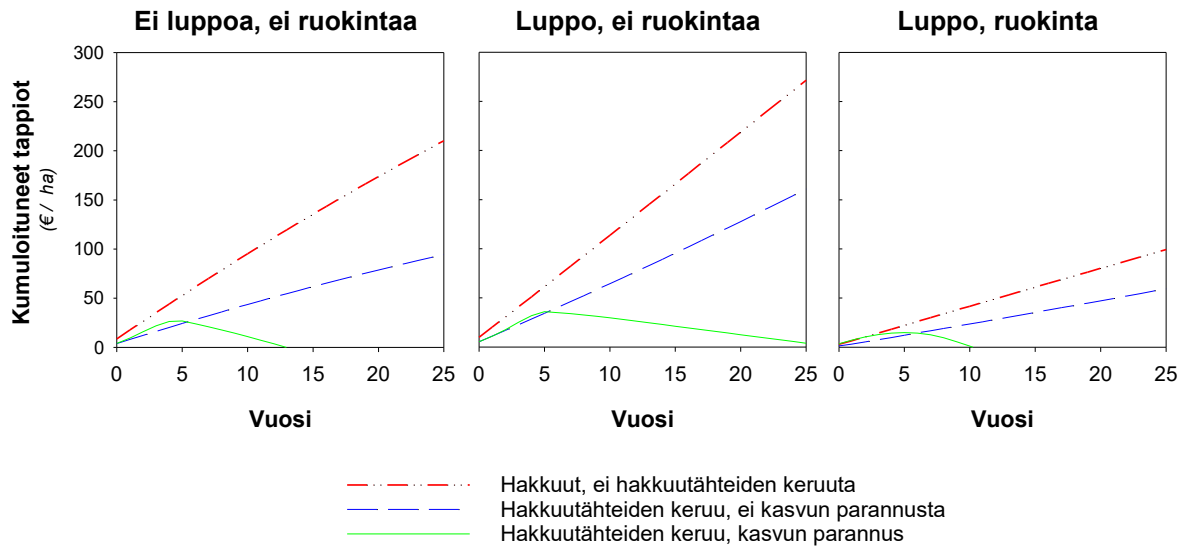
Kuva 24 esittää porotalouden kumuloituneet tappiot eri skenaarioiden mukaisilla oletuksilla. Kumuloituneet tappiot nousevat nopeimmin ratkaisuisissa, joissa hakkuutähteitä ei kerätä (punaiset pistekatkoviivat). Tappiot ovat merkittäviä myös ratkaisuisissa, joissa hakkuutähteet kerätään, mutta jossa jäkälän kasvu ei parannu (siniset katkoviivat). Ratkaisuisissa, joissa hakkuutähteet kerätään ja jäkälän kasvu parantuu (vihreät viivat) nousevat kumuloituneet tappiot ensimmäisten vuosien ajan, mutta kääntyvät sitten laskuun. Hakkuiden aiheuttamat kumuloituneet tappiot nollaantuvat noin 10–18 vuoden kuluessa hakkuista, jonka jälkeen porotalouden kumuloituneet nettotulot ovat suuremmat kuin ilman hakkuuta ja hakkuutähteiden keruuta.

Skenaarioiden 1–3 lisäksi mallin optimiratkaisut laskettiin myös ilman Taulukossa 5 kuvattuja rajoitteita. Optimiratkaisut laskettiin sekä ilman poromäärän rajoitetta että rajoittaen poropopulaation minimikoko hakkuuta edeltävälle optimaaliselle poropopulaation tasolle (260 eloporoa per 1 000 ha jäkälälaidunta). Ratkaisuisissa huomioitiin sekä luppolaitumet että kaivettava ravinto. Myös lisäruokinta mahdollistettiin, mutta 0 % korkotasolla lisäruokinta ei tule kannattavaksi optimaalisessa tasapainotilassa (Pekkarinen ym. 2015). Kuva 25 esittää mallin optimiratkaisut. Ratkaisuisissa jäkäläbiomassan oletettiin putoavan hakkuiden vuoksi 30 % mikäli hakkuutähteitä ei kerätä (punainen pistekatkoviiva) ja 15 % mikäli hakkuutähteet kerätään (sininen katkoviiva ja vihreä yhtenäinen viiva). Mikäli hakkuutähteitä ei kerätä tai hakkuutähteiden keruu ei johda jäkälän kasvun parantumiseen (sininen katkoviiva), on optimaalista pudottaa poromäärää, jolloin jäkälän biomassa palautuu hieman aikaisempaa korkeammalle tasolle noin kahdenkymmenen vuoden päästä hakkuista. Optimaalinen jäkäläbiomassa on alkuperäistä biomassaa korkeampi, sillä on taloudellisesti kannattavinta korvata hakkuissa menetetyt lupon energia lisäämällä jäkälästä saatavaa energiaa.

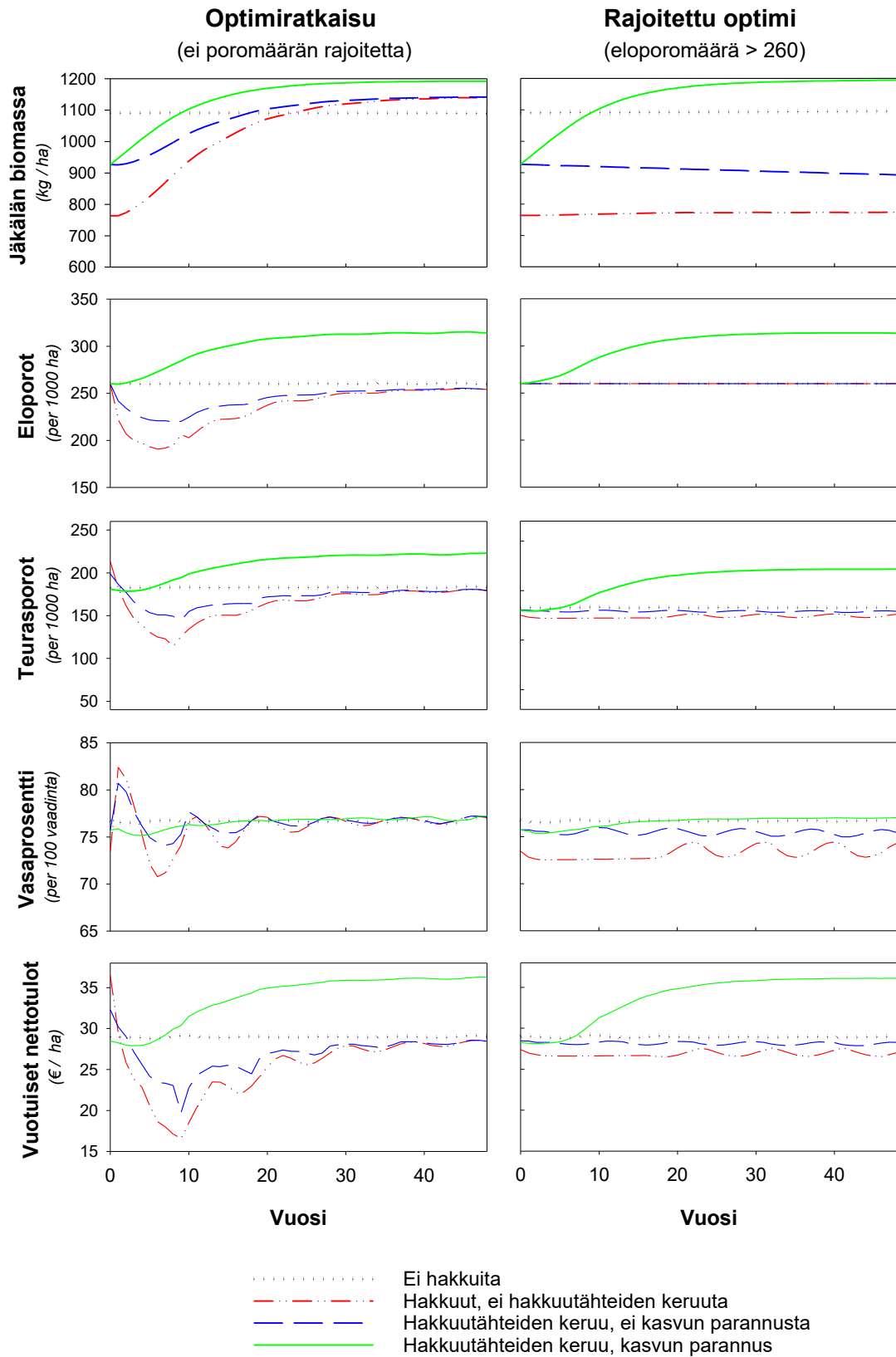
Tarkastelemalla optimiratkaisua, jossa eloporomäärän minimitaso on rajoitettu hakkuuta edeltävälle tasolle, havaitaan sama ilmiö kuin aikaisemmin skenaariossa 2. Mikäli poromäärä pidetään aikaisemmalla optimitasolla myös hakkuiden jälkeen, lähtee jäkäläbiomassa hitaasti laskemaan, mikäli hakkuutähteitä ei kerätä. Mallin tulosten perusteella porotalous ei kykene pitämään samaa poromäärää ilman laitumien heikentymistä, mikäli luppolaitumet metsätalouden myötä vähenevät. Lopulta mikäli luppo ja jäkälälaitumet heikentyvät porotaloudesta riippumattomista syistä, ainoa tapa pitää poromäärä tasolla, joka aikaisemmin oli taloudellisesti ja ekologisesti kestävä optimitaso, on aloittaa intensiivinen lisäruokinta. Tämä ei kuitenkaan riittävässä määrin suojaa laitumia kulutukselta vaan lopulta jäkälälaitumet kuluvat voimakkaasti, kun niiden kasvu ei riitä kompensoimaan porojen aiheuttamaan kulutusta.



Kuva 23. Taloudellis-ekologisen mallin ratkaisut ensimmäisille 25 vuodelle eri skenaarioissa. Musta pisteviiva kuvaa tasapainotilaa ilman hakkuita. Punainen pistekatkoviiva kuvaa poimintahakkuuratkaisua, jossa hakuut tähteet jätetään. Sininen ja vihreä viiva kuvaavat ratkaisuja, joissa hakuutähteet kerätään (vihreässä jäkälän kasvu myös parantuu hakkuiden myötä).



Kuva 24. Taloudellis-ekologisen porotalousmallin ratkaisujen mukaiset porotalouden kumuloidut tappiot eri skenaarioiden oletuksilla ensimmäisille kahdellekymmenelle viidelle vuodelle. Punainen pistekatkoviiva kuvaa poimintahakkuuratkaisua, jossa hakkuutähteet jätetään. Sininen ja vihreä viiva kuvaavat poimintahakkuuratkaisuja, joissa hakkuutähteet kerätään. Vihreän viivan mukaisissa ratkaisuissa oletetaan lisäksi, että jäkälän kasvu parantuu hakkuiden myötä lisääntyneen valoisuuden vuoksi.



Kuva 25. Taloudellis-ekologisen porotalousmallin optimiratkaisut ilman skenaarioiden 1–3 mukaisia rajoitteita.

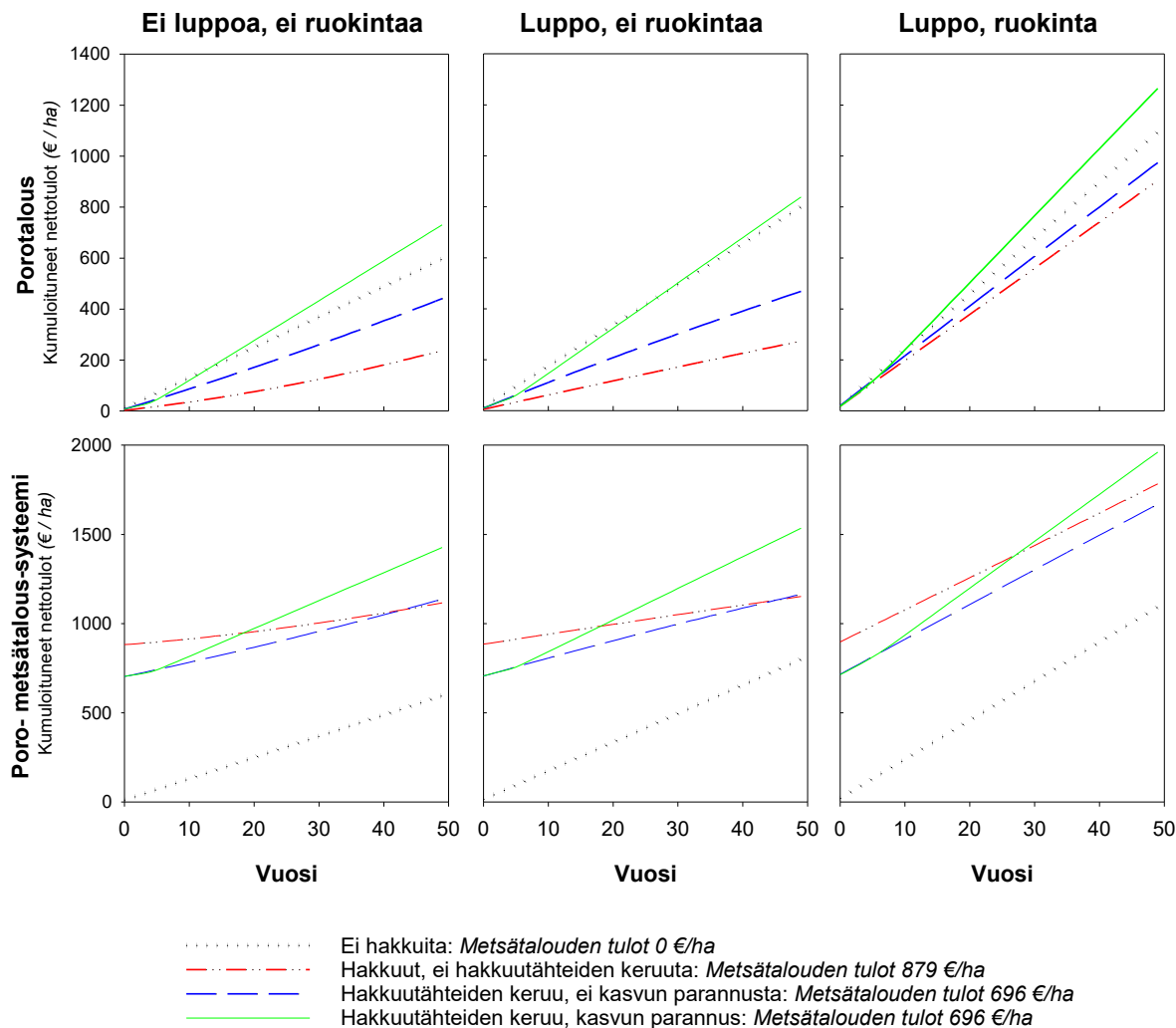
4.3.3. Arvio poro- ja metsätalouden kokonaistuloista

Lopuksi arviot metsätalouden ja porotalouden nettotuloista yhdistettiin, jotta systeemin kokonaiskustannuksia ja -tuloja pystyttiin suuntaa antavasti arvioimaan. Metsätalouden osalta poimintahakkuiden keskimääräisinä nettotuloina käytettiin 879 €/ha ilman hakkuutähteiden keruuta ja 696 €/ha hakkuutähteiden keruun kanssa. Nämä nettotulot oletetaan realisoituvan metsätaloudelle jokaisen poimintahakkuukerran yhteydessä. Se kuinka usein hakkuut pystytään samalla alueella toistamaan, riippuu alueen taimettumisesta ja puuston kasvusta. Lisäksi oletetaan, ettei metsätaloudelle synny alueesta kustannuksia tai tuloja hakkuusyklin muissa vaiheissa hakkuuhetkeä lukuun ottamatta. Porotalouden nettotuloiksi oletetaan edellä esitellyt taloudellis-ekologisella mallilla arvioidut nettotulot eri skenaarioissa. Edellä esitettyjen oletusten pohjalta lasketut porotalouden ja poro-metsätalous-systeemin kumuloituneet kokonaisnettotulot esitetään Kuvassa 26.

Tehdyn arvion perusteella metsä- ja porotalouden yhdistetty taloudellinen kokonaistuotto on heikoin ratkaisussa, jossa hakkuuta ei tehdä ollenkaan (musta pisteviiva). Siinä tapauksessa porotalouden nettotulot pysyvät korkealla tasolla, mutta metsätaloudesta ei saada tuloja, joten systeemin kokonaistaloudellinen tulos jää alhaiseksi. Ratkaisu, jossa tehdään poimintahakkuu eikä hakkuutähteitä kerätä (punainen pistekatkoviiva) on ensimmäisinä vuosikymmeninä kokonaistaloudellisesti kannattavin. Siinä tapauksessa porotalouden nettotulot tippuvat hyvin alhaisiksi varsinkin ilman lisäruokintaa, mutta metsätalouden ensimmäisen vuoden suuret nettotulot pitävät poro- ja metsätalouden yhteenlasketut kumuloituneet tulot pitkään korkeampina kuin muissa ratkaisuisissa.

Mikäli poimintahakkuiden hakkuusykli on riittävän pitkä, voi hakkuutähteiden keruu muodostua kokonaistaloudellisesti kannattavimmaksi ratkaisuksi. Mikäli hakkuutähteiden keruu ei paranna jäkälien kasvuoloja, tarvitaan vähintään noin neljäkymmenenviiden vuoden hakkuusykli siihen, että hakkuutähteiden keruu tulisi kokonaistaloudellisesti kannattavimmaksi. Siinä tapauksessa porotalouden nettotulot ovat alemmat kuin ilman hakkuuta ja myös metsätalouden nettotulot ovat alemmat kuin ilman hakkuutähteiden keruuta. Elinkeinojen yhteenlasketut kumuloituneet tulot nousevat kuitenkin korkeammiksi noin neljäkymmenenviiden vuoden mittaisilla ja sitä pidemmällä hakkuusykleillä. Näissä laskuissa kumuloituneet nettotulot on laskettu ilman korkokannan huomioimista. Mikäli vuotuisten nettotulojen nykyarvo lasketaan positiivisella korkokannalla, niin hakkuusyklin tulee olla pidempi, jotta hakkuutähteiden keruu tulisi kokonaistaloudellisesti kannattavaksi.

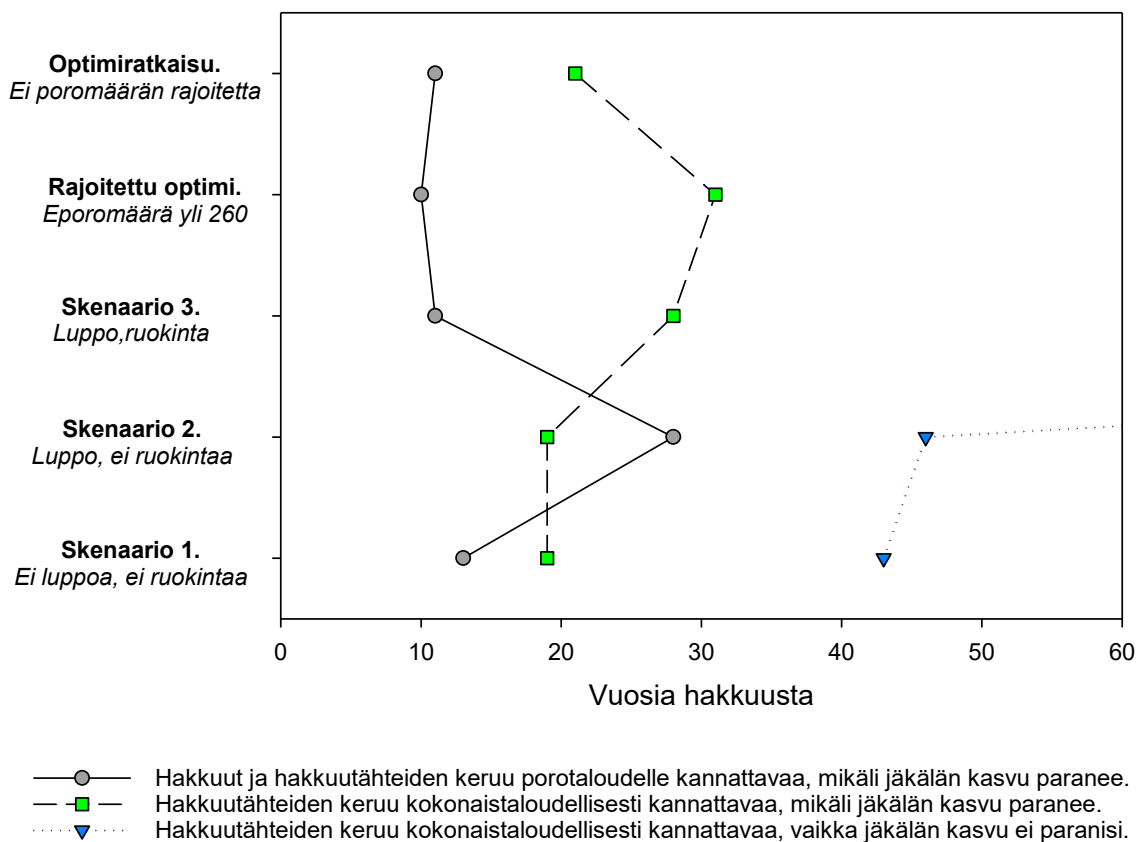
Mikäli hakkuutähteet kerätään ja jäkälän kasvunopeus paranee, tulee hakkuutähteiden keruu kokonaistaloudellisesti kannattavaksi jo noin 15–25 vuoden hakkuusyklillä (Kuva 26 vihreän viivan ja punaisen pistekatkoviivan leikkauspiste). Tässä tapauksessa hakkuut eivät pitkällä aikavälillä pienennä porotalouden tuloja, mutta metsätalouden tulot jäävät hakkuutähteiden keruun kustannusten takia alemmalle tasolle kuin ilman hakkuutähteiden keräämistä. Systeemin kokonaistuottavuuden kannalta hakkuutähteiden keruu poimintahakkuiden yhteydessä tulee kuitenkin taloudellisesti kannattavimmaksi ratkaisuksi huomioiden käytetyt oletukset.



Kuva 26. Porotalouden ja poro-metsätalous-systeemin kumuloituneet nettotulot eri skenaarioissa. Metsätalouden nettotulot syntyvät hakkuiden yhteydessä vuonna $t=0$, jonka jälkeen metsätaloudelle ei synny tuloja tai menoja ennen seuraavia poimintahakkuuta.

Kuva 27 esittää yhteenvedon tuloksista hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun kannattavuudesta porotaloudelle sekä hakkuutähteiden keruun kannattavuudesta poro-metsätalous-systeemille. Kuvassa pisteet kuvaavat sitä hakkuista kulunutta aikaa, jolloin hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun kumuloituneet kustannukset ovat 0 €. Lyhyemmillä ajoilla kustannukset ovat suuremmat ja pidemmällä ajoilla hyödyt suuremmat. Porotalouden kannalta hakkuutähteiden keruu pienentää hakkuiden kustannuksia kaikissa skenaarioissa, mutta hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun yhteisvaikutus voi olla porotalouden kannalta positiivinen ainoastaan, mikäli sen myötä jäkälän kasvu lisääntyy (Kuva 27 harmaat ympyrät). Metsätalouden kannalta kaikissa skenaarioissa hakkuut tuottavat nettohyötyjä ja hakkuutähteiden keruu aiheuttaa kustannuksia. Kokonaistaloudellisesti hakkuutähteiden keruu tulee kannattavaksi, mikäli hakkuusykli on vähintään 20–30 vuotta ja hakkuiden sekä hakkuutähteiden keruun myötä jäkälän kasvunopeus lisääntyy (Kuva 27 vihreät neliöt). Vaikka jäkälän kasvunopeus ei lisääntyisi, voi hakkuutähteiden keruu tulla kokonaistaloudellisesti kannattavaksi, mikäli alueen porotalous nojaa vahvasti luonnonlaitumiin ja hakkuut kohdistuvat porotalouden kannalta kriittisiin laitumiin tavalla, joka merkittävästi heikentää porojen ravinnon saantia alueelta (Kuva 27 siniset kolmiot). Tällöin hakkuusyklin on kuitenkin oltava vähintään noin 45 vuotta.

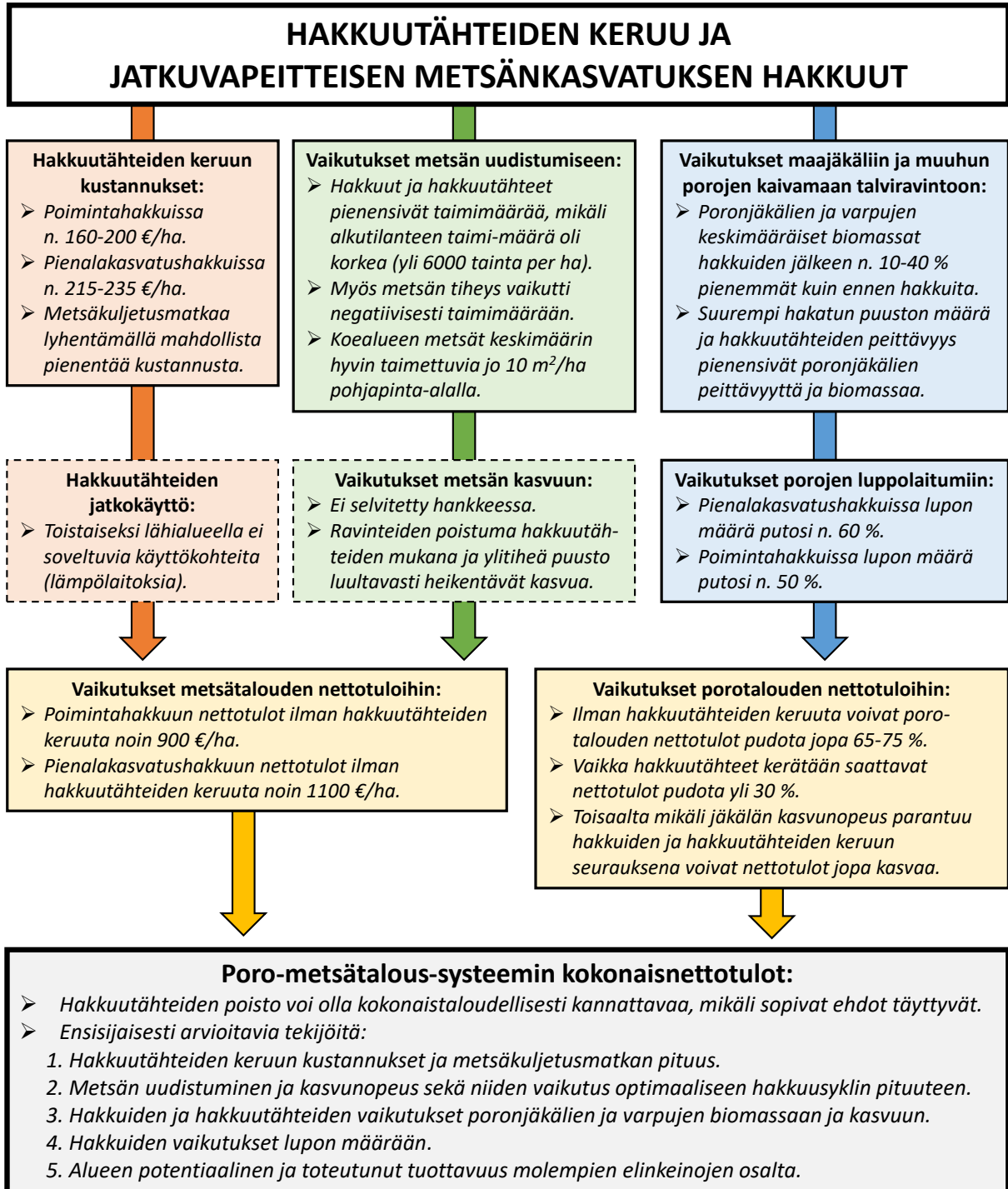
Hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun kannattavuus



Kuva 27. Yhteenveto tuloksista hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun kannattavuudesta porotaloudelle sekä hakkuutähteiden keruun kannattavuudesta poro-metsätalous-systeemille. Pistteet kuvaavat sitä hakkuista kulunutta aikaa, jolloin hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun kumuloituneet kustannukset ovat 0 €. Lyhyemmillä ajoilla kustannukset ovat suuremmat ja pidemmällä ajoilla hyödyt suuremmat.

4.4. Yhteenveto kokonaisvaikutuksista poro- ja metsätaloudelle

Kuva 28 esittää yhteenvetona hankkeen päätuloksista sekä hankkeessa tehdyt pääarviot hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutuksista poro- ja metsätaloudelle. Kaikki kuvassa esitetyt hankkeessa lasketut numeeriset tulokset kuvaavat ensisijaisesti hankkeen koaloja ja toimivat täten korkeintaan suuntaa antavina arvioina, kun jatkuvapeitteisen metsänhoidon hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun vaikutuksia pyritään arvioimaan muille alueille. Kaavio kuitenkin samalla kuvaa niitä tärkeimpiä vaikutussuhteita, jotka tulisi huomioida, kun pyritään arvioimaan miten hakkuut ja hakkuutähteiden keruun vaikuttavat poro- ja metsätalouteen. Vaikka eri vaikutustekijöiden suuruudet vaihtelevat alueittain ja olosuhteittain, pyrkivät hankkeen tulokset kuitenkin tarjoamaan mahdollisia suuruusluokkia eri tekijöiden vaikutusten voimakkuudesta. Metsätalouden kannalta merkittävimmät huomioonotettavat tekijät puunkorjuun nettotulojen lisäksi ovat hakkuutähteiden keruun suorat kustannukset sekä metsän uudistumis- ja kasvuolot. Porotalouden kannalta tulee huomioida hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutukset porojen ravintokasveihin erityisesti poronjäkäliin ja luppoon. Lisäksi on tärkeää pyrkiä arvioimaan mahdolliset muutokset jäkälän kasvuoloissa hakkuiden jälkeen sekä alueen potentiaalinen tuottavuus molempien elinkeinojen kannalta.



Kuva 28. Yhteenveto hankkeen päätuloksista ja arviot hakkuiden ja hakkuutähteiden vaikutuksista poro- ja metsätaloudelle (vrt. Kuvassa 1 esitetyt tutkimuskysymykset). Kaikki esitetyt tulokset kuvaavat ensisijaisesti hankkeen koealoja ja toimivat täten ainoastaan suuntaa antavana arvioina, kun jatkuvapeitteisen metsänhoidon hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun vaikutuksia pyritään arvioimaan muille alueille.

5. Johtopäätökset

HAKEMA-hankkeessa pilotoitiin hakkuutähteiden keräämistä jäkäläkankailta puunkorjuun yhteydessä ja tuotettiin kokonaiskuvaus hakkuiden ja hakkuutähteiden keruun vaikutuksista poro- ja metsätaloudelle. Niiltä osin, kuin on ollut mahdollista, kokonaiskuvaus pohjaa hankkeen aikana saatuihin tuloksiin. Luonnonprosessit pohjoisessa ovat kuitenkin hyvin hitaita, joten monet hakkuutähteiden keruun aiheuttamat vaikutukset näkyvät vasta vuosien ja jopa vuosikymmenten päästä. Tämän vuoksi hankkeessa perustettiin 25 hehtaaria pysyviä koealoja, joilla tullaan seuraamaan hakkuutähteiden ja niiden keruun, käytettyjen metsänkäsittelymenetelmien sekä poron laidunnuksen vaikutuksia porojen ravintokasveihin ja metsän uudistumiseen sekä kasvuun. Nämä pitkäaikaisen seurannan tulokset sekä muut tutkimusyhteisön tuottamat tulokset ja havainnot tarkentavat hankkeessa tehtyjä arvioita hakkuutähteiden keruun pitkäaikaisista kokonaisvaikutuksista. Tuloksia sovellettaessa paikallisiin olosuhteisiin tarvitaan lisäksi käytännön tietoa ja ymmärrystä alueen luonnonoloista ja elinkeinoista.

Hankkeessa tutkittiin hakkuutähteiden keräämisen ja jatkuvapeitteisen metsänkäsittelyn kustannuksia ja hyötyjä metsä- ja porotaloudelle. Tämän mahdollistamiseksi Kemin-Sompion palikunnan alueelle Metsähallituksen hallinnoimiin metsiin perustettiin koealat, joiden lähtötilanne inventointiin syksyllä 2022. Koealoilla suoritettiin jatkuvapeitteisen metsänkäsittelyn mukaiset hakkuut maaliskuussa 2023, minkä jälkeen ne inventoitiin uudestaan syksyllä 2023. Koealoilta ja niillä suoritetuista hakkuista saatujen tietojen pohjalta arvioitiin hakkuutähteiden keruun kustannuksia, keruun onnistumista, metsän uudistumispotentiaalia sekä hakkuiden ja hakkuutähteiden välittömiä vaikutuksia koealojen jäkälä- ja luppomääriin. Näiden analyysien ja taloudellis-ekologisen poronhoidon systeemimallin tulosten pohjalta, hankkeessa tehtiin lopuksi kokonaisarvio hakkuutähteiden keruun vaikutuksista poro- ja metsä-taloudelle.

Hakkuutähteiden korjuu hakkuiden yhteydessä selvästi pienensi hakkuutähteiden määrää sekä vähensi hakkuutähteiden haitallisia vaikutuksia porojen laidunkasvillisuudelle. Toisaalta keruu aiheuttaa metsätaloudelle lisäkustannuksia, sillä hakkuutähteitä ei ole ainakaan toistaiseksi taloudellisesti kannattavaa hyödyntää paikallisessa energiantuotannossa. Tulosten perusteella hakkuutähteiden keruun kustannukset olivat keskimäärin noin 200 € per ha ja tehokkain tapa alentaa keruun kustannuksia, olisi pitää metsäkuljetusmatkat lyhyinä.

Porojen tärkeimmille talviravintokasveille hakkuilla ja hakkuutähteillä havaittiin selvät vaikutukset. Suurempi hakkuumäärä sekä hakkuutähteen peittävyys alensivat selvästi hakkuiden jälkeisiä jäkälän ja varpujen biomassoja. Hakkuiden jälkeen biomassat olivat noin 20–40 % pienemmät, kuin hakkuita edeltäneenä kesänä. Poistetun puuston määrän lisääntyminen puolestaan aiheutti noin 100–200 kg/ha pudotuksen jäkälän biomassaan lähtötilanteen ollessa 400 kg/ha. Vaikka koealoilla käytettiin melko varovaisia hakkuutapoja, ne pudottivat lupon määrää puustossa keskimäärin alle puoleen siitä, mitä se oli ennen hakkuita.

Kokonaisuudessaan hankkeen tulokset viittaavat siihen, että tietyissä tilanteissa hakkuutähteiden keruu poimintahakkuiden yhteydessä jäkäläkankailta on taloudellisesti kannattavaa, kun huomioidaan sen pidempiaikaiset vaikutukset yhtä aikaa sekä poro- että metsätaloudelle. Se, missä tapauksessa hakkuutähteiden keruu on kokonaistaloudellisesti kannattavaa, riippuu muun muassa hakkuusyklin pituudesta, hakkuutavan ja hakkuutähteiden vaikutusten voimakkuudesta jäkälän biomassaan ja kasvuun, hakkuutähteiden korjuun kustannuksista sekä alueen laidunarvosta porotaloudelle. Näitä asioita tullaan selvittämään tarkemmin nyt perustettujen koealojen jatkoseurannoissa.

Viitteet

- Akujärvi, A., Hallikainen, V., Hyppönen, M., Mattila, E., Mikkola, K. & Rautio, P. 2014. Effects of reindeer grazing and forestry on ground lichens in Finnish Lapland. *Silva Fennica* 48(3).
- Anttila, P., Nivala, V., Salminen, O., Hurskainen, M., Kärki, J., Lindroos, T.J. & Asikainen, A. 2018. Regional balance of forest chip supply and demand in Finland in 2030. *Silva Fennica* 52(2): 9902.
- Artelys 2024. Artelys Knitro User's Manual. Saatavilla: <https://www.artelys.com/web/-/app/docs/knitro/>
- Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E. & Muhonen, T. (toim.) 2012. Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Metlan työraportteja 240. Helsinki. 211 s.
- Asikainen, A., Ranta, T., Laitila, J. & Hämäläinen, J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavaisen hankinnan logistiikka. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, Tiedonantoja 131. 107 s.
- Brooks, M.E., Kristensen, K., van Benthem, K.J., Magnusson, A., Berg, C.W., Nielsen, A., Skaug, H.J., Maechler, M. & Bolker, B.M. 2017. glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal*, 9(2): 378–400.
- Bråkenhielm, S. & Liu, Q. 1998. Long-term effects of clear-felling on vegetation dynamics and species diversity in a boreal pine forest. *Biodiversity and Conservation* 7(2): 207–220.
- Euroopan komissio 2021. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle: Uusi EU:n metsästrategia 2030. Bryssel 16.7.2021. 30 s. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/-PDF/?uri=CELEX:52021DC0572&from=EN>
- Finlex 1990. Poronhoitolaki (14.9.1990/848). Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1990/19900848>
- Fox, J. & Weisberg, S. 2019. *An R Companion to Applied Regression*, 3rd Edition. Thousand Oaks, CA, <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/index.html>.
- Hakkila, P. 2004. Developing Technology for Large-Scale Production of Forest Chips. Wood Energy Technology Programme 1999–2003. Technology Programme Report 6/2004. National Technology Agency. 98 p.
- Heggberget, T.M., Gaare, E. & Ball, J.P. 2002. Reindeer and climate change: Importance of winter forage. *Rangifer* 22(1): 13–31.
- Heikurainen, M., Paavilainen, L., Rintala, P., Palokangas, J., Saarentaus, T., Immonen, K., Sirviö, J., Jaakkola, S., Palojärvi, K., Laiho, J. & Hongisto, T. 2018. Hakkuukoneen mittauksen ylläpito. Puutavaranmittauksen neuvottelukunta. Suositus. 12.9.2018. 5 s. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2018092836899>

- Heikurainen, M., Paavilainen, L., Rintala, P., Palokangas, J., Saarentaus, T., Immonen, K., Sirviö, J., Jaakkola, S., Palojärvi, K., Laiho, J. & Hongisto, T. 2019. Vaakojen mittaustarkkuuden ylläpito puutavaranmittauksessa. Puutavaranmittauksen neuvottelukunta. Suositus 25.4.2019. 5 s. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019043013781>
- Heikurainen, M., Routa, J., Rintala, P., Mäkelä, M., Saarentaus, T., Immonen, K., Sirviö, J., Jaakkola, S., Palojärvi, K., Laiho, J. & Hongisto, T. 2020. Energiapuun mittaaminen. Puutavaranmittauksen neuvottelukunta. Suositus. 10.3.2020. 30 s. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe-2020040110009>
- Hyppönen, M. & Salminen, S. 2013. Metsänuudistaminen pohjoisen erityisolosuhteissa. Metlan työraportteja 442. 92 s.
- Hyppönen, M., Hallikainen, V., Rautio P. & Niemelä, J. 2014. Pintakasvillisuuden vaikutus männyn luontaiseen uudistamiseen Koillis-Lapissa. Metsätieteen aikakauskirja 3/2014: 197–199.
- IPCC 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, ... & T. Waterfield (eds.)].
- Jaakkola, L.M., Helle, T.P., Soppela, J., Kuitunen, M.T. & Yrjönen, M.J. 2006. Effects of forest characteristics on the abundance of alectoroid lichens in Northern Finland. Canadian Journal of Forest Research 36: 2955–2965.
- Jokinen, M. 2019. Lapin ympäristökiistojen kulttuuriset tekijät. Dissertationes Forestales 281. 90 s.
- Jylhä, P., Jounela, P., Koistinen, M. & Korpunen, H. 2019. Koneellinen hakkuu. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 55 s.
- Jylhä P., Laitila J., Hallikainen V., Aatsinki P., Kukkonen M., Hilli A., Huhta E., Valkonen S., Karvonen L. & Rautio P. 2023. Seedling damage caused by wood harvesting and soil scarification in rotation and continuous cover forestry in Scots-pine-dominated boreal forests. Scandinavian Journal of Forest Research 39(1): 44–58.
- Knuuttila, M. (toim.) 2021. Poroihin liittyvät aluetalouden vaikutukset: Laskentamenetelmän kehittäminen. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 30/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 75 s.
- Kumpula, J. 2003. Metsänkäsittelyjen vaikutukset porolaitumiin. Kala- ja riistaraportteja nro 286. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos, Kaamanen, 60 s.
- Kumpula, J., Colpaert, A., Tanskanen, A., Anttonen, M., Törmänen, H. & Siitari, J. 2006. Porolaidunten inventoinnin kehittäminen – Keski-Lapin paliskuntien laiduninventointi vuosina 2005–2006. Kala- ja riistaraportteja nro 397. Riistan- ja kalantutkimus. Helsinki. 42 s., 14 karttaa ja 14 liitettä.

- Kumpula, J., Colpaert, A. & Anttonen, M. 2007. Does forest harvesting and linear infrastructure change the usability value of pastureland for semi-domesticated reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*). *Annales Zoologici Fennici* 44: 161–178.
- Kumpula, J. & Oinonen, K. 2018. Metsätalous ja poronhoito – Ristipaineista metsien monikäytön tehostamiseen. *Poromies* 6/2018.
- Kumpula, J., Kurkilahti, M., Helle, T. & Colpaert, A. 2014. Both reindeer management and several other land use factors explain the reduction in ground lichens (*Cladonia* spp.) in pastures grazed by semi-domesticated reindeer in Finland. *Regional Environmental Change* 14: 541–559.
- Kumpula, J., Siitari, J., Siitari, S., Kurkilahti, M., Heikkinen, J. & Oinonen, K. 2019. Poronhoitoalueen talvilaitumet vuosien 2016–2018 laiduninventoinnissa: Talvilaidunten tilan muutokset ja muutosten syyt. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 33/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 86 s.
- Laitila, J. & Repola, J. 2023. Korjuukustannukset Lapin poimintahakkuukohteissa. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 45/2023. Helsinki. 57 s.
- Liu, C., Ilvesniemi, H. & Westman, C.J. 2000. Biomass of arboreal lichens and its vertical distribution in a boreal coniferous forest in Central Finland. *Lichenologist* 32(5): 495–504.
- Luke Tilastotietokanta 2022. Kantohinnat vuosittain maakunnittain saatavilla osoitteesta: https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_04%20Metsa_04%20Talous_02%20Teollisuuspuun%20kauppa_04%20Vuositilastot/02_Kantohinnat_v_makunnittain.px/
- Metsähallitus 2023. Metsähallitus vuosi- ja vastuullisuusraportti 2022 - Kohti hiilineutraalia, ekologisesti kestävä ja yhdenvertaista yhteiskuntaa. Vantaa. 148 s.
- Miina J., Tolvanen A., Kumpula J. & Tyrväinen L. 2020. Metsien luonnontuotteet, virkistyskäyttö ja porolaitumet jatkuvapeitteisessä ja jaksollisessa kasvatuksessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 2020–10345. Katsaus. 18 s.
- Niemistö, P. 1992. Runkolukuun perustuvat harvennusmallit. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 432. 18 s.
- Nurminen, T., Korpunen, H. & Uusitalo, J. 2006. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. *Silva Fennica* 40(2): 335–363.
- Pape, R. & Löffler, J. 2012. Climate change, land use conflicts, predation and ecological degradation as challenges for reindeer husbandry in northern Europe: what do we really know after half a century of research? *Ambio* 41(5): 421–434.
- Pekkarinen, A.-J. 2018. Ecology and economics of reindeer herding systems. *Dissertationes Forestales* 249. 37 p.
- Pekkarinen, A.-J., Kumpula, J. & Tahvonen, O. 2015. Reindeer management and winter pastures in the presence of supplementary feeding and government subsidies. *Ecological Modelling* 312: 256–271.

- Pekkarinen, A.-J., Kumpula, J. & Tahvonen, O. 2020. Bioekonominen analyysi poronhoidon ja talvilaidunten tilan taloudellisesta kestävydestä Suomessa. Julkaisussa: Kumpula, J. & Siitari, S. (toim.). Kestävä biotalous porolaitumilla -hankkeen osaraportit, johtopäätökset ja toimenpide-ehdotukset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 29/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 6–27.
- Pekkarinen, A.-J., Kumpula, J. & Tahvonen, O. 2021 What Drives the Number of Semi-domesticated Reindeer? Pasture Dynamics and Economic Incentives in Fennoscandian Reindeer Husbandry. In: Nord D.C. (eds) Nordic Perspectives on the Responsible Development of the Arctic: Pathways to Action. Springer Polar Sciences. Springer, Cham.
- Pinheiro, J.C. & Bates, D.M. 2000. Mixed-Effects Models in S and S-PLUS. Springer, New York, 528 p.
- Pinheiro, J.C., Bates, D.M. & R Core Team. 2023. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1–162. <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- Rautio, P., Hallikainen, V., Valkonen, S., Karjalainen, J., Puttonen, P., Bergsten, U., Winsa, H. & Hyppönen, M. 2023. Manipulating overstorey density and mineral soil exposure for optimal natural regeneration of Scots pine. *Forest Ecology and Management* 539: 120996.
- Roturier, S. & Bergsten, U. 2006. Influence of soil scarification on reindeer foraging and damage to planted *Pinus sylvestris* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 21(3): 209–220.
- Saarela 2003. Selvitys Ylä-Lapin metsä- ja porotalouden yhteensovittamisesta. Työryhmämuisio MMM 2003:15. Helsinki. 55 s.
- Sandström, P., Cory, N., Svensson, J., Hedenås, H., Jougda, L. & Borchert, N. 2016. On the decline of ground lichen forests in the Swedish boreal landscape: implications for reindeer husbandry and sustainable forest management. *Ambio* 45: 415–429.
- Sipilä, P., Magga, H. & Aikio P. 2000. Luppoa etsimässä. Lapin paliskunnan alueen loppolaidunten inventointi 1999–2000. Lapin paliskunta, Oulun painotuote, Oulu. 24 s. ISBN 952-91-2697-2.
- Snowdon, P. 1991. A ratio estimator for bias correction in logarithmic regression. *Canadian Journal of Forest Research* 21: 720–724.
- Stekhoven, D.J. & Buehlmann, P. 2012. MissForest - non-parametric missing value imputation for mixed-type data. *Bioinformatics* 28(1): 112–118.
- Stekhoven, D.J. 2022. missForest: Nonparametric Missing Value Imputation using Random Forest. R package version 1.5.
- Sundman, M., Hasa, J., Juntunen, H., Karvonen, L., Kiiskinen, A., Kuusisto, L., Miettinen, O., Pirttilä, L., Salmi, J., Satta, J., Tolonen, S. & Vasama, A. 2019. Luonnonvarasuunnitelma Lapin maa- ja vesialueille (pois lukien saamelaiden kotiseutualue). Metsähallitus. Helsinki. 136 s.

- Tahvonen, O., Kumpula, J. & Pekkarinen, A.-J. 2014. Optimal harvesting of an age-structured, two-sex herbivore–plant system. *Ecological Modelling* 272: 348–361.
- Tonteri, T., Hallikainen, V., Merilä, P., Miina, J., Pasi Rautio, P., Salemaa, M. & Tolvanen, A. 2022. Response of ground macrolichens to site factors, co-existing plants and forestry in boreal forests. *Applied Vegetation Science* 2022 25(4): 1–15.
- Turunen, M., Rasmus, S. & Kumpula, J. 2020. Poronhoito ja ilmastonmuutos. Julkaisussa: Kumpula, J. & Siitari, S. (toim.). *Kestävä biotalous porolaitumilla -hankkeen osaraportit, johdopäätökset ja toimenpide-ehdotukset*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 29/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 42–54.
- Venables, W.N. & Ripley, B.D. 2002. *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York, 498 p. ISBN 0-387-95457-0
- Väätäinen, K., Liiri, H., Asikainen, A., Sikanen, L., Jylhä, P., Rieppo, K., Nuutinen, Y. & Ala-Fossi, A. 2007. Korjureiden ja korjuuketjun simulointi ainespuun korjuussa. *Metlan työraportteja* 48. Metsäntutkimuslaitos. Helsinki. 78 s.



**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi

