



SUOMEN
LUONTO
PANEELI

METSIEN HOITO JATKUVAPETTEISENÄ: KATSAUS TALOUDELLISEEN TUTKIMUKSEEN

Olli Tahvonen

SUOMEN LUONTOPANEELIN JULKAISUJA 1C/2022
RAPORTTI

Suomen Luontopaneeli on riippumaton asiantuntijaelin, joka tukee luontopolitiikan suunnittelua ja päätöksentekoa. Luontopaneelin kannanotot ja raportit perustuvat tieteelliseen näyttöön ja monialaiseen asiantuntemukseen.



© Suomen Luontopaneeli



Suomen Luontopaneelin julkaisuja 1C/2022
Raportti

Metsien hoito jatkuvapeitteisenä: katsaus taloudelliseen tutkimukseen

Tekijät:

Olli Tahvonen (Helsingin yliopisto)

Katsausta varten on pyydetty keskeisiä aihetta käsitteleviä tutkimuksia Anssi Ahtikoskelta (Luonnonvarakeskus), Jari Hynyseltä (Luonnonvarakeskus), Artti Juutiselta (Luonnonvarakeskus), Yrjö Norokorvelta (Metsäntutkimuslaitos, Metsähallitus), Timo Pukkalalta (Itä-Suomen yliopisto), Jussi Uusivuorelta (Luonnonvarakeskus) ja Sauli Valkoselta (Luonnonvarakeskus). Käsikirjoitusta koskevista kommentteista saa lämpimät kiitokset Jaana Bäck (Helsingin yliopisto, Suomen Luontopaneeli), Timo Pukkala (Itä-Suomen yliopisto) ja Anssi Ahtikoski (Luonnonvarakeskus). Lisäksi olen yksittäisiin kysymyksiin saanut näkemyksiä, Vesa-Pekka Parkatilta (Helsingin yliopisto), Nico Österbergiltä (Helsingin yliopisto) ja Esa-Jussi Viitalalta (Luonnonvarakeskus). Tekstistä ottaa kuitenkin lopulta vastuun vain sen kirjoittaja.

Toimitussihteeri: Sanna Autere

ISSN: 2737-0062


DOI: <https://doi.org/10.17011/jyx/SLJ/2022/1c>

Viittausohje:

Tahvonen, O. 2022. Metsien hoito jatkuvapeitteisenä: katsaus taloudelliseen tutkimukseen. Suomen Luontopaneelin julkaisuja 1C/2022.

Suomen Luontopaneeli on riippumaton asiantuntijaelin, joka tukee luontopolitiikan suunnittelua ja päätöksentekoa. Luontopaneelin kannanotot ja raportit perustuvat tieteelliseen näyttöön ja monialaiseen asiantuntemukseen.

www.luontopaneeli.fi

 @luontopaneeli



1	Johdanto	4
2	Kiertoajan ja harvennusten optimointi jaksollisina hoidetuissa puustoissa	5
2.1	Klassinen kiertoaikamalli	5
2.2	Korkoon ja tavoitteisiin liittyvät laajennukset	6
2.3	Epävarmuuteen liittyvät laajennukset	7
2.4	Harvennuksiin ja mallin ekologiaan liittyvät laajennukset	7
2.5	Hiilivirtojen ja varastojen sisällyttäminen tasaikäisrakenteisiin malleihin	10
3	Metsien hoito jatkuvapeitteisenä	12
3.1	Lauhkean alueen tutkimus	12
3.2	Optimointiin perustuvat ensimmäiset tutkimukset	14
4	Pohjoismainen jatkuvapeitteisiä metsiä koskeva taloudellinen tutkimus	17
4.1	Puuntuotantoa koskevia tutkimuksia	17
4.2	Puuntuotannollisten tutkimusten arviointia	18
4.3	Dynaamiseen optimointiin perustuvat taloudelliset tutkimukset	18
4.4	Luonnon monimuotoisuus ja muut <i>in situ</i> -arvot	34
4.5	Hiilinielut	34
4.6	Suometsät	36
5	Taloudellisten tutkimusten synteesiä	37
5.1	Taloudellisesti johdonmukainen laskentakehikko	37
5.2	Jatkuvapeitteisenä hoidettavan metsän hakkuut	37
5.3	Kannattavuus: jatkuvapeitteinen vs jaksollinen	37
5.4	Puuntuotanto eri vaihtoehdoissa	38
5.5	Luonnon monimuotoisuus, metsien muut <i>in situ</i> -arvot ja hiilinielut	38
5.6	Kasvumallien merkitys	39
5.7	Tutkimuksen puutteita ja epävarmuuksia	41
	Lähteet	42



1 JOHDANTO

Metsänhoidon, puuntuotannon, hiilinielujen ja luonnon monimuotoisuuden kysymyksiä voidaan tarkastella monien tieteenalojen näkökulmasta. Tässä katsauksessa painopiste on taloudellisessa tutkimuksessa, ja tarkemmin luonnonvarojen taloustieteen tutkimuksessa, joka on osa (kansan)taloustiedettä. Taloudellinen tutkimus ei käsittele metsiä pelkästään resurssina, vaan kaikkien metsiin liittyvien *in situ* -arvostusten tulee olla resurssinäkökulmaan nähden lähtökohtaisesti samassa asemassa (Samulson 1976, Dasgupta 2021). Lisäksi erityisesti biologisesti uusiutuvien luonnonvarojen taloudellinen tutkimus on leimallisesti monitieteistä (MacLeod ja Nagatsu 2016).

Luonnonvarojen käytön ja käyttämättä jättämisen valinnat ovat tavoitteellista toimintaa. Tämän seurauksena taloustieteen tutkimus nojaa optimointimalleihin, joiden avulla haetaan tavoitteiden kannalta parasta mahdollista ratkaisua ekologisten ja muiden rajoitteiden puitteissa. Mallien optimiratkaisuja ei pidä tulkita siten, että ne esitettäisiin lopullisina totuuksina tarkasteltavaan kysymykseen. Tämän sijaan ne on tulkittava kuvauksina mallin lähtökohtien (oletusten) seurauksista. Näitä taloudellis-ekologisia lähtökohtia muuttamalla ja yleistämällä saadaan systemaattisesti lisää tietoa tarkasteltavasta kysymyksestä. Optimointimallien vahvuus on, että niiden avulla voidaan sisällyttää tarkasteluun erilaisia tavoitteita ja suuri määrä yksityiskohtia, joiden muodostaman systeemisen kokonaisuuden johdonmukainen hallinta ei muuten olisi mahdollista. Tässä katsauksessa malleja ja niiden tuloksia kuvataan yhtä klassisinta esimerkkiä lukuun ottamatta ilman matemaattista notaatiota.

Katsaus rajautuu voittopuolisesti taloudelliseen tutkimukseen. Valinta taloudellisen ja muun tutkimuksen välillä ei aina ole yksinkertaista, koska suuri määrä tutkimuksia sisältää joitakin taloudellisia elementtejä, mutta kuitenkin ilman talousteoreettisesti selkeää rakennetta. Tässä katsauksessa käsitellään lyhyesti myös joitakin puuntuotannollisia tutkimuksia muun muassa sen selventämiseksi, että metsänhoidon taloudellinen kannattavuusvertailu ei voi perustua pelkästään kuutiotuotokseen. Katsaus on rajoitettu puustotason (metsikkötason) tutkimuksiin sen sijaan, että tarkasteltaisiin tutkimuksia, jotka koskevat laajempia metsäalueita tai markkinatason kysymyksiä. Taloudellisesta näkökulmasta ero puustotason ja aluetason mallien välillä tulee merkitykselliseksi, jos aluetason tarkastelussa olevien puustojen välillä on jokin kytkös. Keskeisin näistä kytköksistä seuraa puun hinnasta (Salo ja Tahvonen 2004). Myös luonnon monimuotoisuustarkasteluiden yhteydessä näitä kytköksiä syntyy, mutta taloustieteellinen tutkimus on jälkimmäisten kytkösten osalta niukkaa.

Tässä katsauksessa käytetään termejä **metsien hoito jatkuvapeitteisenä** tai **jaksollisena**. Ne vastaavat englanninkielisessä tutkimuksessa käytettyjä ”continuous cover forestry” ja ”rotation forestry” -termejä. Kiireinen lukija voi lukea pelkästään luvun 5 Taloudellisten tutkimusten synteesiä, joka alkaa sivulta 37.

2 KIERTOAJAN JA HARVENNUSTEN OPTIMOINTI JAKSOLLISINA HOIDETUISSA PUUSTOISSA

2.1 Klassinen kiertoaikamalli

Taloudellista tutkimusta jatkuvapeitteisenä hoidettaville metsille on perusteltua lähestyä tarkastelemalla aluksi jaksollisina hoidettujen puustojen käyttöä ja taloutta. Näiden kysymysten tutkimuksella on pitkä historia, ja alan perustavaa tyyppiä oleva malli tunnetaan **optimikiertoaikamallina** (Faustmann 1849). Mallin yksinkertaisimmassa versiossa (Samuelson 1976) lähtökohtana on paljas metsämaa (1 hehtaarilla) ja ratkaistavana kysymyksenä on puuston optimaalinen kiertoaika, kun tavoitteena on mahdollisimman suuri metsätaloudesta saatavien nettotulojen nykyarvo (kuva 1).

Olkkoon

r parhaan vaihtoehdoisen sijoituksen korkotuotto

e^{-rt} jatkuva-aikainen diskonttoteleijä

w uudistuskustannukset (€) per ha,

p kantohinta per m^3 , €

$F(t)$ puuston tilavuus $m^3 ha^{-1}$, t puuston ikä, vuosia

$J(t)$ paljaan maan arvo, €, per ha

$$J(t) = -w + e^{-rt} pF(t) + e^{-rt} [-w + e^{-rt} pF(t)] + e^{-2rt} [-w + e^{-rt} pF(t)] + e^{-3rt} \dots \infty \Rightarrow$$

$$J(t) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{-it} [-w + e^{-rt} pF(t)] = [-w + e^{-rt} pF(t)] (1 - e^{-t})^{-1},$$

$$\text{koska } \sum_{i=0}^{\infty} e^{-it} = (1 - e^{-t})^{-1} \quad (r > 0, t > 0)$$

$$\text{Olkkoon, } F(t) = 526(1 - e^{-0.0548t})^{0.175}, \quad p = 40, w = 1500, r = 0.02$$



Kuva 1. Klassinen optimikiertoaikamalli.

Kiertoaika on ajanjakso puuston istutuksesta puuston päätehakkuuseen. Kiertoajan aluksi suoritetaan uudistamistoimenpiteet (kuten maanmuokkaus ja taimien istutus), joista aiheutuu vakiokustannus. Mallin ekologia rajoittuu tyyppillisesti S:n muotoiseen funktioon, joka kuvaa puuston tilavuutta iän funktiona. Päätehakuusta saatavat tulot ovat puuston kaupallinen tilavuus (m^3) kertaa kantohinta per m^3 . Päätehakuutulot diskontataan kiertoajan alkuun soveltamalla korkokantaa, joka kuvaa pääoman tuottoa vaihtoehdoisessa parhaassa sijoituskohteessa. Kun jokainen kiertoaika oletetaan identtisiksi, saadaan äärettömiin ulottuvasta kiertoaikojen ketjusta koituvien nettotulojen nykyarvo jakamalla ensimmäisestä kiertoajasta saatavien tulojen nykyarvo geometrisesta sarjasta seuraavalla termillä. Ääretön aikahorisontti tulkitaan metsänomistajan mahdollisuudeksi myydä metsä sen päätehakkuun sijaan, tai luovuttaa metsä perintönä. Molemmat näistä vaihtoehdoista jatkettuna yli metsänomistajien ketjun tuottavat äärettömän aikahorisontin. Mallin yksinkertaisimmassa versiossa oletetaan, ettei biologisten tai taloudellisten tekijöiden suhteen ole epävarmuutta, ja että hinnat, kustannukset ja metsän kasvu eivät muutu. Ratkaisuna saadaan samanpituisena toistettava optimikiertoaika ja aluksi paljaana olevan metsämaan taloudellinen arvo (paljaan maan arvo). Yksinkertaisilla lisälaskutoimituksilla saadaan tulos, että puuston ikä optimaalisella päätehakkuuhetkellä ei muutu, vaikka alkutila olisi aikaisemmin istutettu kasvava puusto. Vastaavasti saadaan puustoisen metsämaan maksimoitu taloudellinen arvo. Jos malliin liittyvät markkinat toimivat moitteettomasti (esimerkiksi ei ole monopoleja) ja mallin muut yksinkertaistukset ovat voimassa, mallin ratkaisua pidetään puuntuotannollisesti perusteltuna sekä metsänomistajan että koko kansantalouden kannalta.



Optimikiertoaikamallin yhtenä keskeisenä ansiona on mallin kyky havainnollistaa taloudellisen näkökulman ero verrattuna metsätalouteen, jossa pyritään maksimaaliseen kestäväan puuntuotokseen. Jälkimmäisessä tapauksessa puuntuotannosta tulee pelkästään metsän kasvusta seuraava fakta, kun taas optimikiertoaikamallissa ratkaisuun vaikuttavat vähintään myös hinnat, kustannukset ja korko. Optimikiertoaikamallin erikoistapauksina saadaan maksimaalinen kestävan puuntuotoksen ratkaisu (kuva 1) samoin kuin ratkaisu, joka sisältää hinnat ja kustannukset mutta jossa korkokanta on nolla ("metsän koron" kiertoaika). Lisäksi voidaan laskea, kuinka paljon taloudellisten tekijöiden sivuuttaminen alentaa metsätaloudesta saatavaa aitoa tuottoa. Edelleen, malli konkretisoi päätehakkuun jälkeisen uuden puusukupolven perustamistoimenpiteen investointina, ei päätehakkuuseen liittyvänä kustannuksena (Samuelson 1976). Optimikiertoaikamallin yli 300-vuotisen historian aikana (Viitala 2016) on näistä kysymyksistä metsäntutkimuksessa, metsäpolitiikassa ja metsäneuvonnassa esitetty (ja esitetään edelleen) lukuisia eriäviä näkemyksiä, jotka kuitenkin toistaiseksi ovat osoittautuneet väärinymmärryksiksi (Tahvonen ja Viitala 2006), ja voi sanoa, että mallille geneerisen yksinkertaisena kuvauksena jaksollisesta, päätehakkuuseen perustuvasta metsätaloudesta ei ole toistaiseksi esitetty käyviä vaihtoehtoja.

Geneeriset mallit perustuvat kuitenkin lukuisille yksinkertaistuksille. Havainnollisuuden vuoksi näiden yksinkertaistusten laajennuksia käsitellään kolmessa osassa: 1) korkoon ja tavoitteisiin liittyvät laajennukset, 2) epävarmuuteen liittyvät laajennukset ja 3) metsän kasvuun ja käsittelyyn liittyvät laajennukset. Kaikki nämä laajennukset vaikuttavat paitsi tasaikäisenä hoidettavaa metsää koskeviin taloudellisiin tuloksiin, myös metsän hoitoon jatkuvapeitteisinä, vaikka näistä useimpia ei ole jatkuvapeitteisenä hoidettavien metsien yhteydessä vielä ehditty käsittelemään.

2.2 Korkoon ja tavoitteisiin liittyvät laajennukset

Optimikiertoaikamalliin sisältyvä nykyarvon laskenta perustuu parhaan vaihtoehtoisen sijoituskohteen tuottoon (korkoon) ja merkitsee oletusta pääomamarkkinoista, joilla metsäomistaja saa takaisinmaksukykynsä rajallisuuteen nähden minkä tahansa määrän lainaa ja voi sijoittaa annetulla korolla minkä tahansa rahamäärän. Jos metsänomistajaa koskee lainan saantiin liittyviä rajoitteita, muuttuu mallin kuvaus kiertoajan optimoinnista ja metsän arvon muodostumisesta oleellisesti toiseksi (Tahvonen ym. 2001), ja eri puustojen hakkuupäätökset ovat sidoksissa toisiinsa ja esimerkiksi metsänomistajan varallisuuteen.

Edelleen oletetaan, ettei metsiin liity mitään luonnon monimuotoisuus- tai muita *in situ* -arvostuksia. Koska yksinkertaisen kiertoaikamallin biologia rajoittuu yhteen $S:n$ muotoiseen puuston tilavuuden kehitystä kuvaavaan funktioon, ei metsäympäristöä koskevien arvostusten lisäämiselle yksinkertaiseen kiertoaikamalliin ole paljonkaan vaihtoehtoja. Malliin voidaan lisätä vain pystyssä olevan puuston ympäristöarvoa kuvaava funktio, jossa argumenttina on puuston ikä (Hartman 1976). Jos riippuvuus on positiivinen ja ympäristöarvo kasvaa iän funktiona, optimikiertoaika pitenee ja riittävän suuri ympäristöarvostus tuottaa tuloksen, että puustoa ei kannata hakata lainkaan.

In situ -arvostusten seurauksena optimaalinen metsien käyttö kytkeytyy, ei vain puun hintaan, metsien hoidon kustannuksiin, korkoon ja metsän kasvun biologiaan, vaan lisäksi metsänomistajan henkilökohtaiseen talouteen kuten varallisuuteen sekä säästämistä *versus* kulutusta koskeviin preferensseihin. Tämä edellyttää metsänomistajan koko talouden ja kaikkien puustojen huomioimista metsän käyttöä kuvaavassa mallissa (Tahvonen ja Salo 1999)¹. Tästä seuraa, että metsän arvo metsänomistajalle, ja hinta, jolla metsästä ollaan valmiita luopumaan, ovat sidoksissa metsänomistajakohtaisiin tekijöihin. Tällä on välitön merkitys korvauksiin, jotka metsänomistaja kokee riittäviksi esimerkiksi Metson tyyppisissä suojeluohjelmissa. Ero yksinkertaisimpaan optimikiertoaikamalliin, jossa metsän arvo riippuu vain puuston tilavuuden kasvusta, kanto-hinnoista, metsänhoidon kustannuksista ja korosta, on suuri.

¹ Tässä mallissa voidaan tulevaisuuden ympäristöarvostukset huomioida alhaisemmalla korolla verrattuna puunmyyntituloihin, joita diskontataan pääoman parhaan vaihtoehtoisen tuoton korolla.



2.3 Epävarmuuteen liittyvät laajennukset

Metsätalouteen liittyviä epävarmuuksia on tutkittu erityisesti puuston kasvun, äkillisten metsätuho-riskien ja kantohintojen osalta. Puuston kasvuun liittyvän epävarmuuden (stokastisuuden) katsotaan pidentävän kiertoaikaa (Willassen 1998). Äkillisten metsätuhojen riski puolestaan vaikuttaa kiertoaikaa lyhentävästi (Reed 1984). Hintojen stokastisen vaihtelun vaikutus riippuu malliin sisällytettävistä tekijöistä ja stokastisen kantohintaprosessin luonteesta, ja voi pidentää tai lyhentää kiertoaikaa, niin sanotun reservation price -mallin mukaisesti, jossa hakkuu realisoituu, kun stokastisesti kehittyvä hinta ylittää tietyn puuston iän alenevana funktiona muodostuvan reservaatihintatason (Brazeel ja Mendelson 1988). Koron stokastisen vaihtelun kuvaus on osoittautunut matemaattisesti vaikeaksi ja toistaiseksi julkaistut tulokset ovat alustavia. Jos metsänomistajalla on riskien välttämiseen liittyviä preferenssejä, syntyy yhteys metsänomistajakohtaisten tekijöiden, eri puustojen ja niiden hakkuiden välille vastaavasti kuin *in situ* -arvostusten ja lainarajoitteiden tapauksissa. Näiden tekijöiden vallitessa ei metsänomistajasta riippumattomia, yleisiä metsänhoidon ohjeita voi määritellä.

Optimikiertoaikamallin voi tulkita myös hypoteesina siitä, miten metsänomistajat tekevät metsän käyttöön ja puun tarjontaan liittyviä päätöksiä. Tätä kysymystä on käsitelty laajassa empiirisessä tutkimuskokonaisuudessa, jonka yksi varsin kiistattomalla vaikuttava tulos on, että hakkuupäätöksiä selittävät metsänomistajakohtaiset, esimerkiksi varallisuuteen liittyvät tekijät (Kuuluvainen ym. 1996). Tämä tukee yllä kuvatussa teoreettisessa tutkimuksessa käsiteltyä laajempaa mallia, jossa huomioidaan *in situ* -arvostukset ja erilaiset puuntuotantoon liittyvät epävarmuudet.

2.4 Harvennuksiin ja mallin ekologiaan liittyvät laajennukset

Edellä käsitellyssä, ekologiaaltaan yksinkertaisessa kiertoaikamallissa ainoat metsänhoidolliset toimenpiteet ovat päätehakkuu ja hakkuun jälkeen tapahtuva uuden puuston perustaminen. Tämä mallin rakenne, ja erityisesti harvennusten sivuuttaminen, on voimakas yksinkertaistus metsien hoidon ja käytön todellisuudesta esimerkiksi Suomessa ja Ruotsissa, ja ilman harvennuksia kiertoaikamalli tuottaa hyvin lyhyitä kiertoaikoja (kuva 1). Kun taloudelliseen tarkasteluun lisätään harvennusten ja mahdollisesti puuston istutustiheyden optimointi, tarvitaan oleellisesti monipuolisempi kuvaus puuston kasvun biologiasta ja syntyvästä puuntuotoksesta. Tähän tarkoitukseen on käytetty useita erityyppisiä metsäekologia malleja, joita käytetään myös kuvattaessa metsien käyttöä jatkuvapeitteisinä:

1) **Metsikkötason mallit** (englanniksi whole stand models) sisältävät muuttujia puuston iän lisäksi esimerkiksi puiden määrille, sekä puuston tilavuudelle ja pohjapinta-alalle. Mallin avulla voidaan optimoida harvennusten määrä ja intensiteetti, mutta ei harvennusten kohdistamista puuston eri kokoluokkiin (Valsta 1986, Hyytiäinen ja Tahvonen 2002).

2) **Kokoluokkarakenteiset matriisimallit** (englanniksi matrix transition models) perustuvat populaatio-ekologiassa kehitettyihin ja yleisesti käytettyihin ikä- ja kokoluokkarakenteisiin malleihin (Caswell 2000, Hanski ym. 1998). Näissä malleissa puusto ryhmitellään rinnankorkeusläpimitan perusteella 3–5 cm kokoluokkiin. Mallissa määritellyn periodin aikana (tyypillisesti 5 vuotta) osa kunkin kokoluokan puista siirtyy seuraavaan kokoluokkaan, osa pysyy samassa kokoluokassa, osa kuolee biologisten tekijöiden seurauksena ja loput korjataan hakkuissa. Kehittyneemmissä malleissa siirtyvät osuudet määritellään epälineaarina funktiona metsän tiheydestä ja puiden koosta. Lisäksi mallissa voidaan määritellä puuston luonnollinen uudistuminen (kynnyskasvu), eli puiden syntyminen pienimpään kokoluokkaan (läpimitta esimerkiksi 1–5 cm), edelleen funktiona metsän tiheydestä. Kun malliin lisätään kunkin kokoluokan puiden tilavuus, voidaan mallilla osana taloudellista mallikokonaisuutta optimoida kiertoajan lisäksi harvennusten määrä, harvennusten ajankohdat ja harvennusten kohdistuminen puuston eri kokoluokkiin. Tämä mallityyppi on yleisin jatkuvapeitteisiä metsiä koskevassa taloudellisessa tutkimuksessa.

3) **Yksittäisten puiden malleissa** (englanniksi single tree models, individual tree models) yksittäisten puiden tai samassa luokassa olevien identtisten, niin sanottujen kuvauspuiden, erilaisten ominaisuuksien kehittymistä ajassa kuvataan funktiona näistä ominaisuuksista, koko puuston tilaa kuvaavista ominaisuuksista (kilpailuvaikutuksista) ja lisäksi esimerkiksi kasvupaikasta ja ilmastosta. Yksittäisten puiden ominaisuuksia voivat olla rinnankorkeusläpimitta, puiden pituus ja latvussuhde. Lisäksi mallissa on puiden määrää (kuolleisuutta)

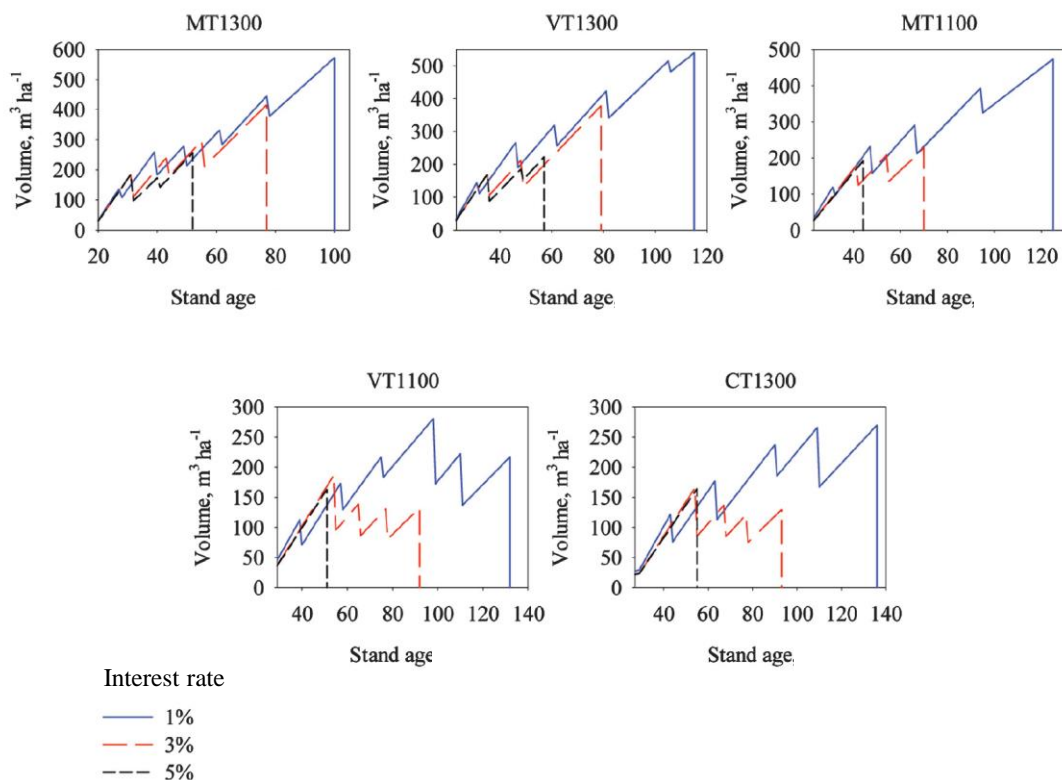


kuvaavat yhtälöt ja mahdollisesti kuvaus luontaisesta uudistumisesta. Kokoluokkarakenteiset matriisimallit voidaan johtaa tietyllä muunnoksella yksinkertaisista yksittäisten puiden malleista. Verrattuna kokoluokkarakenteisiin malleihin, yksittäisten puiden mallit antavat yksityiskohtaisemman ja realistisemmän kuvauksen puuston kasvusta. Yksittäisten puiden mallien suurempi muuttujien määrä tekee näistä malleista kuitenkin laskennallisesti huomattavasti raskaampia taloudellisissa sovelluksissa.

4) **Prosessimalleja** (englanniksi process based models) on kehitetty lukuisiin eri tarkoituksiin. Yhteistä eri malleille on pyrkimys perustaa mallin rakenteet ja yksityiskohdat suoraan biologiaan, ekologiaan ja fysiikkaan nojaviin osamalleihin ja teorioihin puiden rakenteesta, kasvusta ja kilpailusta, fotosynteesistä ja hiilen jakautumisesta puiden eri ositteiden välillä. Joissakin prosessimalleissa on yksittäisten puiden malleja vastaava rakenne, joka helpottaa niiden soveltamista taloudellisissa optimoinnissa. Erona tavanomaisiin yksittäisten puiden malleihin on suurempi puiden ominaisuuksia kuvaavien muuttujien joukko. Prosessimallien eri osamallien parametrit pyritään estimoimaan empiirisistä aineistoista, ja mallien kuvausta koko puuston kasvusta arvioidaan vertaamalla ennusteita puustojen pitkän aikavälin kasvua kuvaaviin aikasarjoihin (Mäkelä 2007).

5) **Spatiaaliset mallit** huomioivat yksittäisten puiden sijoittumisen suhteessa muihin puihin.

Suomalaisessa tutkimuksessa kaikkia edellä mainittuja ekologisia malleja on sovellettu yhdistettynä optimointiin. Erityisesti prosessimalleja sovellettaessa voidaan tarkasteluun sisällyttää suuri määrä yksityiskohtia, esimerkiksi useita (viisi) puun laatukategoriaita, joissa laatuluokitukseen vaikuttaa rungon dimensioiden lisäksi puun oksien koko ja laatu (elävät/kuolleet) ja oksattoman puuaineksen määrä tyvitukissa. Lisäksi malleihin voidaan sisällyttää puiden yksityiskohtainen optimoitu katkenta (apteeraus), empiirisestä aineistosta estimoitu osamalli puunkorjuun kustannuksista sekä puuston alkutiheyden optimointi.

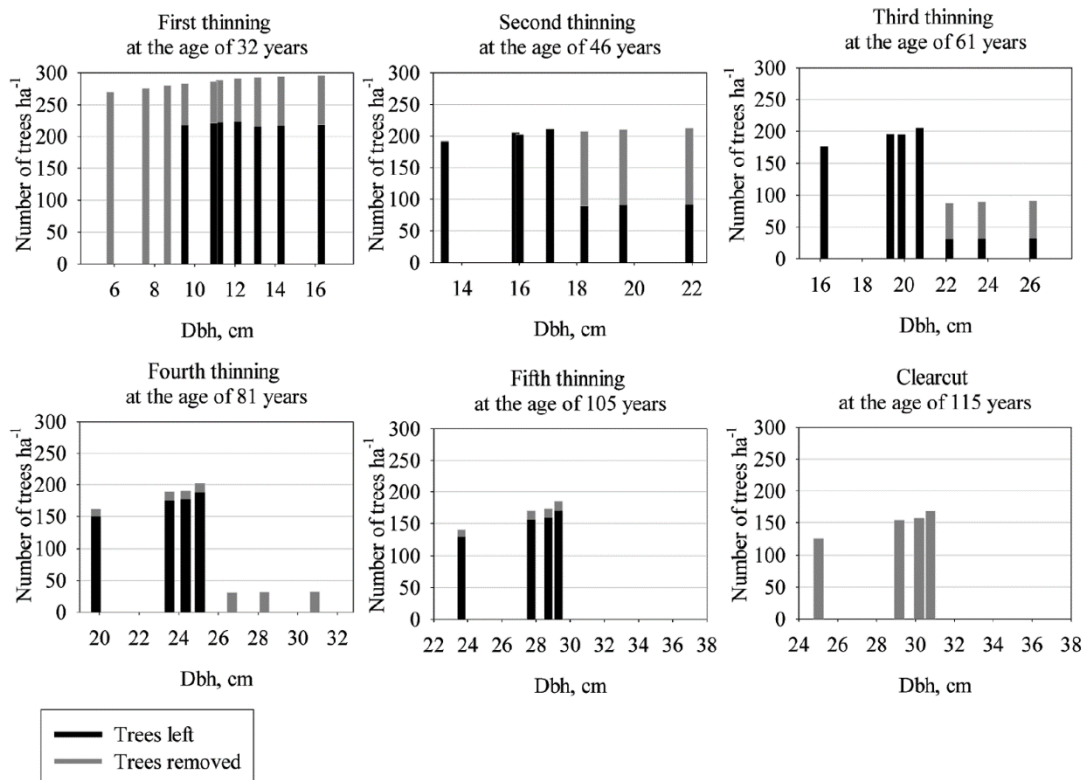


Kuva 2. Prosessimalliin perustuvia optimikiertoaikoja eri korkokannoilla, kasvupaikoilla ja lämpösummakertymillä. Kuvaajissa kuvataan korkokannan muutoksia suhteessa metsikön iän ja puuston tilavuuden muutoksiin. Kasvupaikoista on mallinnettu mustikkatyyppin tuoreita kankaita (MT), puolukkatyyppin kuivahkoja kankaita (VT) ja kuivia kankaita (CT). Lämpösummana mallinnuksessa on käytetty joko arvoa 1 100 tai 1 300. (Kuvan selitteet: interest rate = korkokanta, stand age = metsikön ikä, volume = puuston tilavuus.) Lähde: Tahvonen ym. 2013.



Kuvasta 2 ilmenee koron voimakas vaikutus mäntypuuston optimiratkaisuun eri kasvupaikoilla, kun kuvaus puuston kasvusta perustuu yksityiskohtaiseen prosessimalliin. Esimerkiksi kuivahkon kankaan kasvupaikalla (VT), kun lämpösomma on 1 300 ja korko 3 %, tehdään ensimmäinen harvennus, kun puuston ikä on 35 vuotta, toinen harvennus, kun puuston ikä on 48 vuotta ja päätehakkuu, kun ikä on 79 vuotta. Jos korko on 1 %, on optimikiertoaika 115 vuotta, ja koron ollessa 5 % optimikiertoaika on hyvin lyhyt, 57 vuotta.

Kuvasta 3 ilmenee harvennusten kohdentuminen puuston eri luokkiin, joita tässä yksittäisten puiden prosessimalliin perustuvassa optimoinnissa on kiertoajan alussa 10 kappaletta. Ensimmäisessä harvennuksessa vuonna 32 poistetaan 3 pienintä kokoluokkaa (alaharvennus) ja ajourien synnyn seurauksena noin 20 % muista kokoluokista. Tämän jälkeisissä harvennuksissa harvennetaan puita pääasiallisesti suurimmista kokoluokista eli harvennukset ovat yläharvennuksia. Tämän seurauksena päätehakkuussa poistettavat puut ovat puuluokat 4, 5, 6 ja 7, pienimmästä suurimpaan luokiteltuna. Korkeammilla koroilla kaikki harvennukset ovat tyypillisesti yläharvennuksia, mutta alhaisella korolla ensimmäisessä harvennuksessa saattaa olla optimaalista poistaa pienempiä puita, jotka alisteisessa asemassa kuolisivat ennen päätehakkuuta. Osana optimaalista jaksollista ratkaisua yläharvennukset pidentävät kiertoaikaa 20–30 vuotta, ja ne voidaan tulkita askeleeksi kohti metsien hoitoa jatkuvapeitteisenä.



Kuva 3. Optimoitujen harvennusten kohdistuminen eri puuluokkiin. Harvennukset on tehty puuston ollessa iältään 32, 46, 61, 81 ja 105 vuotta. Avohakkuu on tehty puuston ollessa 115-vuotiaista. Jokaisessa harvennuksessa jätettyjen sekä poistettujen puiden osuus on ilmoitettu kappaalemääränä hehtaaria kohti. Puustoluokat on jaoteltu puun mitatun rinnankorkeusläpimitan (cm) mukaan. Kasvupaikkana on puolukkatyyppin kuivahkot kankaat (VT), lämpösomma on 1 300 ja korko 1 %. (Kuvan selitteet: thinning = harvennus, trees left = jätetyt puut, trees removed = poistetut puut, number of trees = puiden kappaalemäärä, Dbh = rinnankorkeusläpimita.) Lähde: Tahvonen ym. 2013.

Taulukosta 1 ilmenee, että esimerkiksi kasvupaikalla, jossa valtapuuston korkeus on 100 vuoden ikäisenä 30 metriä ($H_{100} = 30$ m), kuutiotuotoksen maksimointi (3 % korolla) alentaa paljaan maan arvon tasolta 2 221 euroa hehtaarilta tasolle 824 euroa hehtaarilta, vaikka puuntuotos on hehtaarilta 2,6 m³ korkeampi. Edelleen



havaitaan, että paljaan maan arvo jää kuutioita maksimoitaessa useissa tapauksissa negatiiviseksi, vaikka nettokantorahatuloloja maksimoitaessa paljaan maan arvo olisi positiivinen. Kun paljaan maan arvo on negatiivinen, ei puuntuotannon nettotulojen nykyarvo riitä kattamaan päätehakkuun jälkeisiä uuden puuston perustamisesta aiheutuvia investointikustannuksia. Mahdollisimman korkean puuntuotoksen tavoittelu alentaa kantohintoja ja on edullinen puun ostajalle, mutta aiheuttaa tappioita kansantaloudelle ja erityisesti metsänomistajille (Hyytiäinen ja Tahvonen 2002)². Edellä esitelty prosessimalliin perustuva taloudellinen optimointimalli oli yhtenä perustana uusittaessa metsänhoidon ohjeita ja metsäasetusta vuonna 2006 (Tapio 2006, Hyytiäinen ym. 2010) erityisesti kiertoaikojen osalta.

Taulukko 1. Paljaan maan arvoja sovellettaessa suurimman kestävän puuntuotoksen mallia (MSY) ja taloudellista optimointia kuusipuustoille. Taulukossa on eritelty puuntuotos ja kiertoaika maksimoitaessa paljaan maan arvoa (BLV) tai kestävää puuntuotosta (MSY) eri korkotasolla. $H_{100}=X$ kuvaa kasvupaikkaa, jossa valtapuuston korkeus on X metriä 100 vuoden ikäisenä. Kestävän puuntuotoksen mallissa harvennuksia on ollut 4 ja taimien alkutiheys on 1 800 taimea hehtaarella. (Taulukon selitteet: MSY (maximum sustainable yield) = suurin kestävä tuotto, BLV (bare land value) = paljaan maan arvo, thinning = harvennus, initial density = alkutiheys, seedling = taimi, site index = kasvupaikkaindeksi, interest rate = korkotaso, yield = puuntuotos, rotation years = kiertoaika.) Lähde: Niinimäki ym. (2012).

Comparison between maximized BLV and MSY/4 thinnings, initial density: 1800 seedlings.

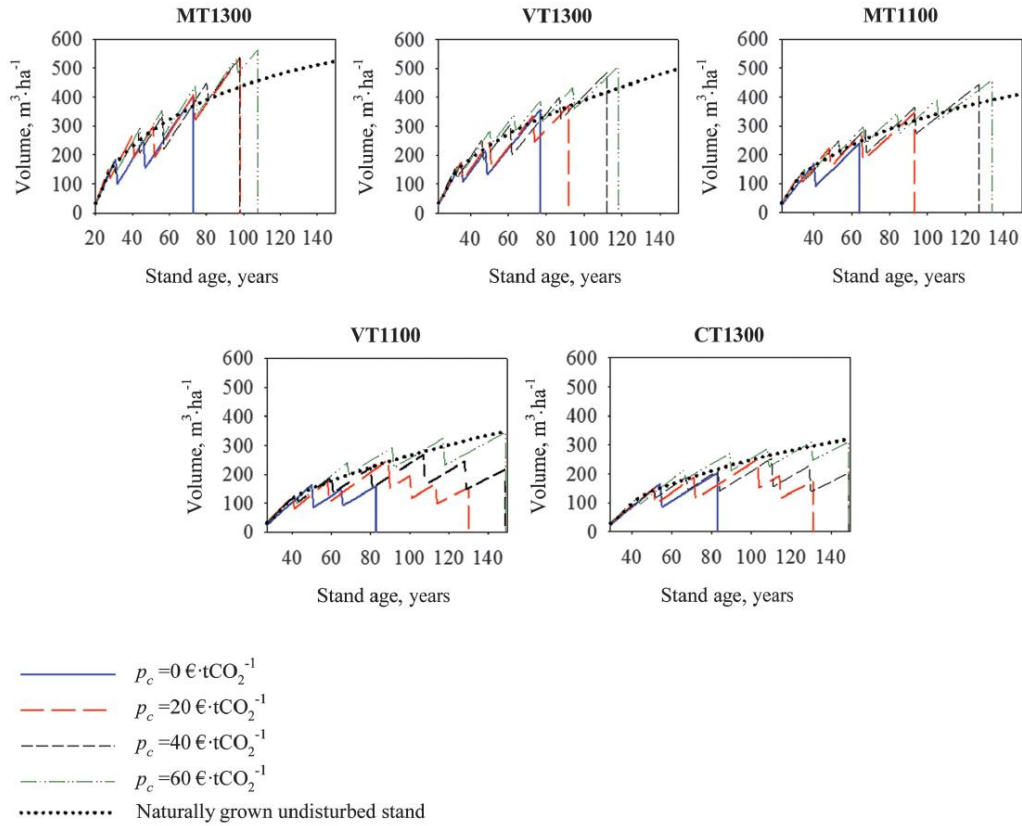
Site Index	$H_{100} = 25m$				$H_{100} = 30m$				$H_{100} = 33m$			
	1%	2%	3%	4%	1%	2%	3%	4%	1%	2%	3%	4%
Max BLV	12,909	3060	653	-183	20,667	6173	2221	678	21,274	6674	2722	986
Yield $m^3 \text{ year}^{-1}$	8.3	7.8	7	6.3	11.3	11	10.3	9.6	11.2	11	10.8	10.8
Rotation years	104	88	72	63	78	72	64	57	83	72	58	58
MSYe	11,233	1519	-388	-844	19,569	4477	824	-337	20,993	5286	1278	-95
Yield $m^3 \text{ year}^{-1}$	8.9	8.9	8.9	8.9	12	12	12	12	12.6	12.6	12.6	12.6
Rotation years	145	145	145	145	112	112	112	112	103	103	103	103

2.5 Hiilivirtojen ja varastojen sisällyttäminen tasaikäisrakenteisiin malleihin

Taloudellisesta näkökulmasta on perusteltua ajatella, että hiilidioksidilla (CO_2) on hinta. Esimerkiksi Euroopan unionin päästäkauppajärjestelmässä hiilidioksiditonin hinta on vaihdellut 3–98 euron välillä. Hiilen yhteiskunnallisen hinnan avulla (englanniksi social price of carbon) voidaan kaikille kiertoaikamallin hiilivirroille asettaa arvo, ja lisätä hiilinelut kerrottuna hiilen hinnalla mallin tavoitteisiin yhteismitallisena eränä nettokantorahatulolojen kanssa. Pihlaisen ym. (2014) tutkimuksessa sovellettiin edellä kuvattua prosessimallipohjaista optimointimallia ja huomioitiin puun eri ositteisiin liittyvät hiilivirrat, kuolleiden puiden ja hakkuutähteiden hitaasti luovuttama hiili sekä erilaisista puutuotteista eri nopeuksilla vapautuva hiili.

Hiilivirtojen lisäämisellä mallin tavoitteisiin on kolmenlaisia vaikutuksia: syntyvässä uudessa optimiratkaisussa pyritään lisäämään hiilen määrää 1) metsässä olevassa elävässä ja kuolleessa biomassassa, 2) puutuotevarannossa ja 3) lisäksi pyritään korvaamaan metsäbiomassalla enemmän hiilidioksidipäästöjä aiheuttavia materiaaleja ja energiareсурseja. Viimeksi mainittu vaikutus sisältyy puustotason malliin implisiittisesti puun hinnan välityksellä. Ensin mainittu vaikutus pidentää kiertoaikaa, kun taas kaksi jälkimmäistä korostaa puuntuotannon merkitystä. Hiilivirtojen lisääminen optimointiin pidentää kiertoaikaa, jos optimaalinen kiertoaika puhtaasti hiilen sidonnan näkökulmasta on pidempi kuin puuntuotannon paljaan maan arvon maksimoiva kiertoaika ja *vice versa*. Kuvan 4 perusteella hiilivirtojen optimoinnin lisääminen mallin toiseksi tavoitteeksi pidentää kiertoaikaa, ja kiertoaikojen voimakas pidentyminen paljastaa, että edullisinta on lisätä elävässä ja metsään jäävässä kuolleessa biomassassa olevaa hiilimäärää. Tämä on seurausta erityisesti siitä, että korjatuissa puissa (ja lopullisissa puutuotteissa) oleva hiili vapautuu nopeasti takaisin ilmakehään.

² Vuoteen 2006 asti metsänhoito-ohjeet perustuivat käsitykseen, että kuutiotuotoksen mahdollisimman suuri taso merkitsee automaattisesti myös hyvää metsätalouden taloudellista tulosta (Tahvonen ym. 2004). Vuonna 2011 korkein hallinto-oikeus kuitenkin erään päätöksen yhteydessä edelleen totesi (vastoin alan taloudellista tutkimusta), että metsälainsäädännön tavoitteena on turvata suuri kuutiotuotos kansantalouden tarpeisiin, ei metsätalouden yksityistaloudellinen kannattavuus.



Kuva 4. Hiilivirtojen ja puuntuotannon yhtäaikainen optimointi. Ratkaisut esitetty mustikkatyyppin tuoreille kankailla (MT), puolukkatyyppin kuivahkoille kankailla (VT) ja kuiville kankailla (CT). Lämpösukka-alue on joko 1 100 tai 1 300. Pysty-akseleilla on puuston tilavuus (volume) ja vaak-akseleilla metsäkuvion ikä (stand age). Hiilidioksiditonin hinnan vaikutus on kuvattu eri värisin viivoin, ja musta pisteiviiva kuvaa käsittelemätöntä metsää (naturally grown undisturbed stand). Lähde: Pihlainen ym. 2014.

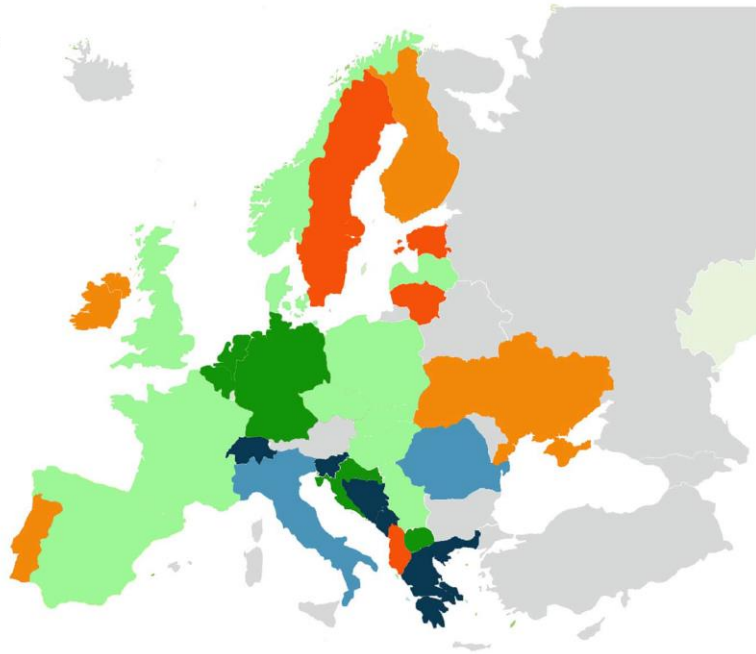


3 METSIEN HOITO JATKUVAPETTEISENÄ

Tuoreessa tutkimuksessa (Mason ym. 2021) on metsävarojen inventointeihin ja asiantuntijakyselyihin perustuen selvitetty eri metsänhoitomuotojen osuuksia Euroopassa (kuva 5). Tutkimuksen arvion mukaan Euroopan metsistä 22–30 % hoidetaan jatkuvapetteisinä painottuen eteläisen Euroopan maihin. Suurimpina ongelmina jatkuvapetteisinä hoidettavien metsien lisäämiselle havaittiin avoimet kysymykset ilmastonmuutoksen vaikutuksesta metsiin, tulevaisuuden sopivasta puulajivalikoimasta, jatkuvapetteisten metsien merkityksestä hiilinieluina, metsänhoidon vaikutuksesta metsien resilienssiin ja sopivuudesta koneelliseen puunkorjukseen. Edelleen ongelmana ovat tiedon puute metsäasiantuntijoiden keskuudessa ja vähäinen ymmärrys menetelmän taloudellisista vaikutuksista. Tiedollisten ja taidollisten puutteiden lisäksi esteinä leviämislle havaittiin vallitsevan metsänhoidon tuottamat yhden puulajin metsät, joiden muuntamista monimuotoisemmiksi pidetään vaikeana muun muassa siksi, että jaksollisena hoidettaville metsille suunnataan julkista tukea.

Percentage of Forest Area CCF

- Classes:
- N / A
 - 0
 - 1 - 5
 - 6 - 25
 - 26 - 50
 - 51 - 75
 - 76 - 100



Kuva 5. Jatkuvapetteisesti hoidettujen metsien osuudet Euroopassa. Prosenttiosuus jatkuvapetteisesti hoidetusta metsäalasta (Percentage of Forest Area CCF) on annettu maittain. Osuus on luokiteltu seitsemään eri luokkaan, jotka on kuvattu eri värein. N/A tarkoittaa, että tietoa osuudesta ei ole ollut saatavissa. Lähde: Mason ym. 2021.

3.1 Lauhkean alueen tutkimus

Yhtenä ensimmäisistä jatkuvapetteista metsänhoitoa koskevista teksteistä pidetään de Liocourtin (1898) kirjoitusta "The management of silver fir forests", jossa tehdyn havainnon mukaan jaettaessa luonnollisessa tilassa olevan metsän puut kokoluokkiin, puiden määrä kokoluokkaa kohti vähenee vakio-osuudella (englanniksi "q-ratio") siirryttäessä pienimmästä kokoluokasta suurimpaan (Kerr 2014). Puiden määrän kuvaaja koon funktiona muodostaa tämän perusteella "käänteisen J-käyrän". Kirjoituksen liian vaativaksi osoittautuneena varsinaisena tavoitteena oli hahmotella periaatteita jatkuvapetteisenä pidettävän metsän optimaaliseksi hakkuiksi.

Tällä tekstillä on sikäli merkitystä, että lukuisissa tutkimuksissa on jatkuvapetteisen metsänhoidon lähtökohdaksi otettu de Liocourtin löytämän puuston luonnollisena pidetyn kokoluokkarakenteen säilyttäminen kohdistamalla hakkuut ideaalina pidettävän q-suhdeluvun säilyttämiseksi. Kuten myöhemmin ilmenee, tällaista hakkuuta eivät optimointiin perustuvat ratkaisut tuota. Jos jatkuvapetteinen metsänhoito



määritellään näiden periaatteiden mukaisesti ja sitä verrataan jollain tavalla määriteltyyn jaksolliseen metsänhoitoon, on vertailu taloudellisen tuloksen suhteen täysin mielivaltaista.

Englanninkielisessä kirjallisuudessa q-suhdelukuun nojaavista hakkuista käytetään termiä "selection cutting" erotuksena termistä "selective cutting". Edellistä saatetaan pitää käypänä metsänhoidollisena menetelmänä, mutta jälkimmäistä taas ei. Syynä on se, että jälkimmäisellä viitataan lyhytnäköiseen metsien käyttöön, jossa metsästä poimitaan taloudellisesti käyttökelpoiset puut lainkaan välittämättä hakkuiden jälkeisen metsän kehityksestä (englanniksi "take the best, leave the worst", "high grading"). Lopputuloksena metsä voi koostua kaupallisesti käyttökelvottomista puulajeista/puuyksilöistä. Tällainen lopputulos on todellinen uhka, erityisesti jos metsällä ei ole tunnustettuja omistusoikeuksia, eikä metsän käyttöön ole syntynyt sosiaalisen kontrollin mekanismeja (vrt. Ostrom 1990), mutta taloudellisesti perustelu metsien käyttö ei tällaista lopputulosta tuota (Parkatti ja Tahvonen 2020).

Saksalaisessa tutkimuksessa on tehty runsaasti vertailuja jaksollisten ja jatkuvapeitteisten ratkaisujen välillä ja Hanewinkelin (2002) mukaan nämä tutkimukset ovat miltei poikkeuksetta tukeneet jatkuvapeitteisen vaihtoehdon parempaa kannattavuutta. Tutkimuksiin tarkemmin perehdyttäessä kuitenkin osoittautuu, että empiirisiin kasvatuskokeisiin perustuviin tutkimuksiin sisältyy paljon puutteita ja virhelähteitä. Tilastollisesti pätevää jaksollisten ja jatkuvapeitteisten metsänhoidon koealojen asetelmaa on ollut mahdotonta toteuttaa. Vertailuissa on saatettu rajoittaa vain yksittäisten osatekijöiden kuten kustannusten tai puuntuotoksen vertailuun, tai on vertailtu poikkeuksellisen onnistunutta jatkuvapeitteisen metsänhoidon tapausta keskimääräiseen jaksolliseen metsänhoitoon.

Toinen mahdollisuus kannattavuusvertailuun on soveltaa empiirisestä metsän kasvudatasta estimoituja malleja ja yhdistää mallit taloudelliseen kuvaukseen metsänhoidosta. Hanewinkelin (2002) mukaan myös tältä osin saksalaiset tutkimukset ovat ongelmassa: tutkimuksissa metsänhoidon vaihtoehdot kuvataan enemmän tai vähemmän mielivaltaisten esimerkkien avulla, jolloin niiltä puuttuu yleistettävyys. Tämän ongelman korjaamiseksi Hanewinkel (2002) korostaa, että vertailtavien metsänhoidon vaihtoehtojen tulisi kuvata taloudellisesti optimaalisia jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon vaihtoehtoja. Kuitenkin myös moniin tällaisiin saksalaisiin tutkimuksiin näyttää jäävän ongelmaksi se, että niissä verrataan kahta erilaista tasapainotilaa (steady-state -ratkaisua), eikä oteta huomioon kustannuksia, jotka aiheutuvat puuston optimaalisen tasapainotilojen saavuttamiseksi. Metsänhoidon vaihtoehtojen taloudellisesti johdonmukainen vertailu edellyttää, että eri vaihtoehtojen kannattavuutta arvioidaan olettaen metsän alkutila eri vaihtoehtoisissa samaksi. Lisäksi asetelmaan sisältyvien epälineaarisuuksien seurauksena kannattavuusjärjestys voi olla sidoksissa metsän alkutilaan. Nämä kysymykset huomioiva johdonmukainen kannattavuustarkastelu edellyttää, että metsänhoidon eri vaihtoehtoihin perustuvat ratkaisut on pystyttävä esittämään dynaamisina ja ajassa etenevinä ratkaisuinä staattisen optimoinnin sijaan. Dynaamiset mallit ja niihin perustuvat kannattavuustarkastelut ovat kuitenkin olleet vähemmistönä niin saksalaisessa kuin metsäekonomisessa tutkimuksessa yleisemminkin (Knoke 2012).

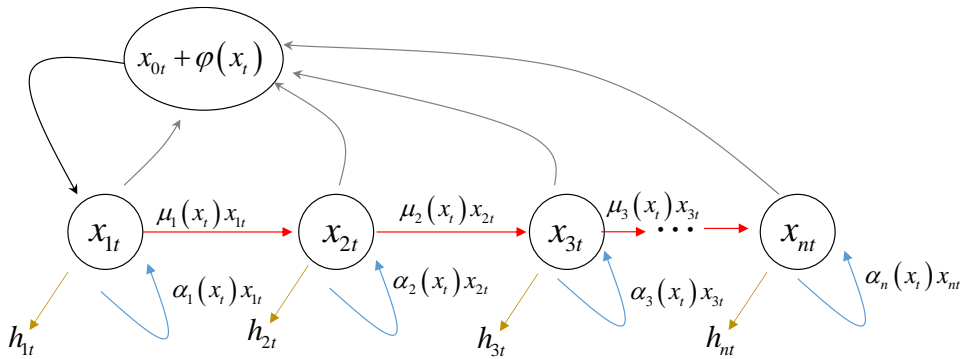
Uudempaa keskieuropalaista lauhkeaa vyöhykettä koskevaa tutkimusta edustaa Knoke ym. (2008) ja Knoke (2012) sekä suuri määrä saman tutkimusryhmän muita julkaisuja. Esimerkiksi Knoke ja Plusczyk (2001) vertaavat jaksollisen ratkaisun tuottamien nettokantorahatulosten nykyarvoa vastaavaan tulokseen silloin, kun hakkuut määritellään tuottamaan siirtymä jatkuvapeitteiseen metsänhoitoon. Tutkimuksessa kuitenkin myönnetään, että siirtymän jälkeen syntynyt jatkuvapeitteisen metsänhoidon ratkaisu on vain yksi lukuisista vaihtoehtoista. Vastaavia tutkimuksia konversiosta jaksollisesta metsänhoidosta jatkuvapeitteiseen ratkaisuun on julkaistu paljon (esimerkiksi Vítková ym. 2021). Näissä tutkimuksissa määritellään a) jokin jaksollisen metsänhoidon tuottama puuston lähtötila, b) jatkuvapeitteisen metsänhoidon mukainen puuston tavoitetilä ja c) ajanjakso, jonka aikana metsän rakenne johdetaan tilasta a) tilaan b). Näiden määrittelyjen jälkeen verrataan taloudellista tulosta jatkuvapeitteisen metsänhoidon tulokseen, joka seuraa siirtymisestä jatkuvapeitteiseen ratkaisuun. Näiden tutkimusten ongelmana on jo edellä esille tuotu jatkuvapeitteisen metsänhoidon ratkaisun määrittely ilman minkäänlaista taloudellista optimointia viittaamalla käänteiseen J-käyrään. Lisäksi siirtymisajanjakson pituus ja metsän käsittely siirtymisen aikana määritellään ilman optimointia. Taloudellisesta näkökulmasta arvioituna tämä ja vastaavat asetelmat eivät anna vastausta kysymykseen, kannattaako siirtyminen jaksollisesta ratkaisusta jatkuvapeitteiseen. Oikea vastaus saataisiin yksinkertaisesti optimoimalla metsien käsittely nettokantorahatulosten maksimoimiseksi annetusta alkutilasta



ja katsomalla, johtaako ratkaisu jaksolliseen vai jatkuvapeitteiseen ratkaisuun. Kaiken kaikkiaan lauhkean vyöhykkeen metsiä koskevasta taloudellisesta tutkimuksesta on vaikeaa löytää taloustieteellisesti hyvin perusteltuja tutkimuksia, joista ilmeni jatkuvapeitteisen metsänhoidon taloudellinen kannattavuus verrattuna jaksolliseen metsänhoitoon. Keskeinen syy tähän on enemmän tai vähemmän taloudellisesti mielivaltaisten vaihtoehtojen vertailu, jonka seurauksena tulokset kuvaavat rajoitettuja yksittäistapauksia. Yhtä kaikki, valtaosassa näistä tutkimuksista saadaan pääosin tuloksia, joiden mukaan jatkuvapeitteisenä hoidettavan metsän taloudellinen kannattavuus on hyvä tai parempi verrattuna jaksollisena hoidettavaan metsään (Vítková ym. 2021).

3.2 Optimointiin perustuvat ensimmäiset tutkimukset

Populaatioekologisissa kokoluokkarakenteisissa matriisimalleissa metsä tai puusto kuvataan systeeminä (Usher 1966, Getz ja Haight 1989, Hanski ym. 1998, s. 514, Caswell 2000, Begon ym. 2020), jossa puut on luokiteltu kokoluokkiin (kuva 6). Mallissa määritellyn aika-askelen kuluessa (tyypillisesti 5 vuotta) kussakin kokoluokassa olevat puut joko pysyvät samassa kokoluokassa, siirtyvät seuraavaan kokoluokkaan tai kuolevat. Pienimpään kokoluokkaan syntyy luontaisesti uusia puita, joiden määrä on sidoksissa metsän tilaan ja tiheyteen. Tämä on vain yksi ekologisessa tutkimuksessa käytössä oleva malli puuston kehityksen kuvaamiseksi, mutta havainnollistaa riittävästi sitä, että puustoa tai metsää on perusteltua kuvata dynaamisena ajassa kehittyvänä systeeminä. Taloudellisena ongelmana on päättää hakkuista ja istutuksista, ja siitä, onko asetettujen tavoitteiden kannalta edullisempaa pitää metsä eri-ikäisrakenteisena ja jatkuvapeitteisenä vai tasaikäisinä toisiaan seuraavina jaksollisina kohortteina (vrt. kuva 1). Dynaamisen kokoluokkarakenteisen systeemin sisällyttämisessä taloudelliseen optimointiin kohdataan monenlaisia matemaattisia ongelmia, jotka eivät ole lainkaan läsnä alkuperäisessä ekologisessa mallissa ja siihen perustuvissa kuvauksissa populaation kehityksestä ajassa sekä kehityksen riippuvuuksista erilaisista mallin yksityiskohdista. Näiden ongelmien välttämiseksi huomattava osa jatkuvapeitteistä metsänhoitoa koskevasta taloudellisesta optimointiin nojaavasta tutkimuksesta on viime vuosiin asti perustunut erilaisiin yksinkertaistuksiin ja staattisiin malleihin (Knoke 2012).



$$\text{Optimointiongelma: } \max_{\{h_{st}, s=1, \dots, n, t=0, 1, \dots\}} \sum_{t=0}^{\infty} U(h_t, x_t, x_{0t}) b^t$$

$x_{st} \geq 0$ puiden määrä eri kokoluokissa periodien t alussa, $s=1, \dots, n$, $x_t = x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{nt}$, tilamuuttujia

$0 \leq \alpha_s(x_t) \leq 1$ osuus puista, joka pysyy kokoluokassa s

$0 \leq \mu_s(x_t) \leq 1$ osuus puista, joka siirtyy kokoluokkaan $s+1$

$1 - \alpha_s(x_t) - \mu_s(x_t)$ osuus puista, joka kuolee kokoluokassa s

φ kynnykskasvu, taimien määrä, funktio puuston tilasta, x_{0t} istutettujen taimien määrä

h_{st} korjatut puut kokoluokasta s periodilla t , $h_t = h_{1t}, h_{2t}, \dots, h_{nt}$, ohjausmuuttujia

U periodikohtainen tavoitefunktio, $b=1/(1+r)$ diskonttaustekijä, $r \geq 0$ korko

Kuva 6. Matriisimalliin perustuva yksinkertaistettu kuvaus puupopulaation kehityksestä ja korjuun optimoinnista (vrt. Caswell 2000).



Staattisessa mallissa (englanniksi investment efficient -model) pyritään ratkaisemaan jatkuvapeitteisenä hoidettavan metsän tasapainotila tai hakkuusykli. Perustelu sykiille, eli sille että puita ei korjata vuosittain vaan esimerkiksi 20 vuoden välein, seuraa hakkuiden kiinteistä kustannuksista (kuten kaluston kuljetus ja hakkuiden suunnittelu). Malli muistuttaa jaksollisena hoidettavan metsän optimikiertoajan ratkaisemista (kuva 1) kuitenkin sillä erotuksella, että hakkuissa jäljelle jäävä puumäärä määrittelee puuston tulevan kasvun. Mallissa jokainen hakkuusykli oletetaan identtiseksi, ja optimoinnissa pyritään ratkaisemaan hakkuusyklin pituus ja hakkuissa jäljelle jätettävän puuston tila (tilavuus). Kustakin hakkuusyklistä saatavien korjuukustannusten jälkeisten nettotulojen lisäksi mallin tavoitefunktiossa huomioidaan ensimmäisessä korjuussa jätettävien puiden arvo, joka tulkitaan jaksollisen metsänhoidon kiertoaikamallin uudistuskustannusta vastaavaksi investoinniksi tulevaan puuntuotantoon. Yksinkertaisessa mallissa puuston tila kuvataan kokonaistilavuutena (Chang 1981, Susaeta 2021), ja yksityiskohtaisemmassa mallissa puiden määrinä eri kokoluokissa (Pukkala ym. 2010). Mallin asetelma ja ratkaistavuus perustuvat lisäksi oletukseen, että puuston alkutila (tilavuus tai puiden määrät eri kokoluokissa) ylittävät korjuussa jätettävät määrät.

Tähän staattiseen malliin sisältyy paljon ongelmia. Haight (1985), Gezt ja Haight (1989, s. 269) ja Tahvonen (2011) osoittavat, että mallin avulla ei saada ratkaistua optimaalista korjuusykliä. Tämä seuraa yksinkertaisesti siitä, että optimaalisen syklin ratkaiseminen edellyttää dynaamisen mallin käyttöä. Lisäksi ensimmäisessä (tai kaikissa) korjuussa jätettävien puiden taloudellisen arvon laskenta perustuen puiden kantohintaan on perusteetonta, koska puita ei niiden pienen koon takia ole taloudellista vielä korjata. Edelleen korjuussa jätettävien puiden arvon sisällyttäminen vaihtoehtokustannuksena mallin maksimoitavaan tavoitefunktioon on vailla teoreettisia perusteita tehty poikkeama normaaleista taloustieteen malleista.

Yrityksissä tutkia jatkuvan metsänhoidon taloutta optimointimalleilla on useita välivaiheita, joista monia, puutteellisiksi osoittautuneitakin, saatetaan edelleen soveltaa. Ongelmana näissä malleissa ovat subjektiiviset valinnat, jotka voivat oleellisesti vaikuttaa saataviin tuloksiin. Tämä pätee myös malleihin, jotka saatetaan esittää dynaamiseen optimointiin perustuvina tarkasteluina. Varhaisissa dynaamisissa optimointimalleissa yritettiin aluksi ratkaista optimaalinen tasapainoratkaisu (hakkuusykli), ja tämän jälkeen optimoida siirtymä tasapainotilan saavuttamiseksi mistä tahansa puuston alkutilasta (Adams ja Ek 1974). Ongelma tässä ja muissa vastaavissa asetelmissä on edelleen se, ettei tasapainoratkaisua voida aidosti optimoida erillisenä siirtymän optimoinnista.

Ensimmäisiä aidosti dynaamisia ratkaisuja jatkuvapeitteisen metsänhoidon optimoimiseksi esittivät Haight ja Monserud (1990a,b). Tutkimuksessa sovellettua yksittäisen puun ekologista kasvumallia (Wykoff ym. 1982), joka kuvaa kalliovuorten havupuustoa, on yksinkertaistettu siten, että mallissa puut jaetaan kahdeksaan kokoluokkaan. Puun korjuu määritellään tehtäväksi 20 vuoden välein ja optimointi 160 vuoden ajanjaksolle, joka kirjoittajien mukaan on riittävän pitkä tuottamaan optimaaliseen tasapainoon hakeutuvan ratkaisun. Mallissa ei ole korjuukustannuksia ja samoja kantohintoja sovelletaan harvennuksissa ja päätehakkuussa. Erikseen lasketaan jaksollisen metsänhoidon optimaalinen harvennus/kiertoaikatarkaisu. Jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon paremmuus ratkaistaan siten, että annetusta metsän alkutilasta optimoidaan hakkuita 20 vuoden välein, ja mallissa otetaan huomioon mahdollisuus tehdä päätehakkuu harvennusten sijaan. Jos optimiratkaisu hakeutuu identtisenä toistuvaan hakkuusykliin, on jatkuvapeitteisen metsänhoidon ratkaisu optimaalinen. Jos sen sijaan päätehakkuu sisältyy optimiratkaisuun, on kannattavinta (mahdollisesti joidenkin harvennusten jälkeen) siirtyä jaksollisen metsänhoidon vaihtoehtoon. Haightin ja Monserudin (1990a,b) tulosten mukaan 4 %:n korko ja heterogeeninen puuston alkutila tuottavat optimiratkaisuna metsän hoidon jatkuvapeitteisenä. Tasapainotilan hakkuissa poistetaan kaikki puut suurimmasta kokoluokasta, ja liiallisen luontaisen uudistumisen seurauksena myös osa pienimmästä kokoluokasta. Jos taloudellisen tuloksen sijaan tavoitteeksi otetaan puuntuotoksen maksimointi, osoittautuvat jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon vaihtoehdot samanarvoisiksi.

Haightin ja Monserudin (1990a,b) tutkimuksissa on kyetty soveltamaan dynaamista optimointia vähentämällä keinotekoisia subjektiivisiin valintoihin perustuvia mallin yksityiskohtia. Tämän seurauksena tutkimukset ovat selkeä edistysaskel jatkuvapeitteisenä hoidettavan puuston taloudellisessa tarkastelussa. Tutkimuksissa sovelletaan yksittäisen puun mallia mutta yksinkertaistettuna siten, että hakkuut optimoidaan kahdeksalle 10 cm:n välein muodostetulle kokoluokalle. Gezt ja Haight (1989, s. 317) vertailevat yksittäisen puun mallia ja kokoluokkarakenteista matriisimallia ja päätyvät siihen, että jälkimmäinen kykenee toistamaan yksittäisen



puun mallin tulokset mutta huomattavasti yksinkertaisemmalla mallirakenteella. Tämä esitetään merkittävänä etuna, kun malleja sovelletaan optimoinnissa. Haightin ja Monserudin (1990a, b) sekä Getzin ja Haightin (1989) tutkimuksissa hakkuut tapahtuvat 20 vuoden välein, eikä hakkuiden ajoitusta optimoida. Tämä on yksinkertaistus ja rajoite, jonka yleistäminen edellyttää yleisemmän optimointikehikon käyttöä. Tutkimuksissa käytettyä optimointialgoritmia (Hooke ja Jeeves 1961) voidaan kritisoida siitä, että sen käyttö ei matemaattisesti takaa lokaalin optimin löytymistä, globaalista optimista puhumattakaan. Samojen kanto-
hintojen käyttö harvennus- ja päätehakkuussa on yksi näiden tutkimusten yksinkertaistus, joka suosii jatkuva-
peitteistä ratkaisua, ja jonka yleistäminen edellyttää korjuukustannusmallien käyttöä.



4 POHJOISMAINEN JATKUVAPEITTEISIÄ METSIÄ KOSKEVA TALOUDELLINEN TUTKIMUS

4.1 Puuntuotantoa koskevia tutkimuksia

Pohjoismaiset tutkimukset sisältävät esimerkkejä kaikista edellä kuvatuista jatkuvapeitteisenä hoidettavia metsiä koskevista tutkimusasetelmista (Juutinen ym. 2020). Koska suomalaisessa keskustelussa metsänhoidon vaihtoehtoista on pelkästään kuutiotuotoksen vertailuilla ollut suuri rooli, käsitellään aluksi näitä tutkimuksia.

Valtaosa suomalaisista ja pohjoismaisista jatkuvapeitteisinä hoidettavia metsiä koskevista tutkimuksista koskee puuntuotantoa, ja niissä tavoitteena on ollut selvittää puuntuotannon taso verrattuna jaksollisena hoidettaviin metsiin. Lähde ym. (2002) tutkivat erilaisten harvennusten vaikutuksia kuusipuustojen kasvuun eri puolella Suomea. Alaharvennusten yhteydessä poistettiin rinnankorkeusläpimitaltaan alle 9 cm puut ja varsinainen harvennus kohdistui alle 15 cm sekä 15–25 cm puihin. Vaihtoehtoisessa harvennuksessa poistettiin pääasiassa rinnankorkeusläpimitaltaan yli 25 cm puut. Tulosten mukaan harvennusten kohdistuminen suurempiin puihin johti puuston suurempaan kasvuun verrattuna alaharvennuksiin. Tulos tukee jatkuvapeitteistä vaihtoehtoa.

Shanin ym. (2016) käyttivät yksityiskohtaista ekosysteemimallia, joka kalibroitiin vastaamaan Etelä-Suomessa olevilta jatkuvapeitteisenä hoidettavilta koelaloilta kerättyä dataa. Mallin simuloinnissa puustojen alkutila oli paljas maa, mutta puustoja hoidettiin ensimmäisten vuosikymmenien jälkeen suurimpien kokoluokkien harvennuksilla vaihtelemalla hakkuiden aikaväliä (10–30 vuotta) ja hakkuiden jälkeistä puuston pohjapinta-alaa (8–16 m²) puuston 90 vuoden ikään asti. Tulosten mukaan ekosysteemin nettomääräinen tuotos samoin kuin puuntuotannon määrä lisääntyi, kun hakkuiden aikaväliä ja hakkuiden jälkeistä pohjapinta-alaa kasvatettiin. Kirjoittajien mukaan tulokset tulisi huomioida metsien hoidossa jatkuvapeitteisinä.

Lundqvist (2017) kokoaa yhteen 100 vuoden ajalta pohjoismaissa tehtyjä empiirisiin kokeisiin perustuvia tutkimuksia jatkuvapeitteisenä hoidettujen metsien kasvusta, puuntuotoksesta ja uudistumisesta. Luontaisen uudistumisen osalta päädytään yhteenvetoon, jonka mukaan 4 cm:n kokoluokkaan voisi kasvaa 15–20 puuta ja 8–10 cm:n kokoluokkaan noin 5–15 puuta hehtaarille vuodessa. Puuston kasvun osalta jatkuvapeitteisenä pidettävissä metsissä kasvu näyttäisi olevan 10–20 % alhaisempi kuin jaksollisena hoidettavien. Näiden tulosten on eri yhteyksissä katsottu osoittavan jaksollisen ratkaisun paremmuuden suhteessa jatkuvapeitteisiin.

Valkosen ym. (2017) tutkimuksessa tehtiin harvennuksia Keski-Suomen alueella kuusikoissa, joissa puuston pohjapinta-ala aleni tasolta 20–35 m² tasolle 7–18 m², ja tilavuus tasolta 224–359 m³ tasolle 57–152 m³. Harvennuksissa poistettiin rinnankorkeusläpimitaltaan yli 21–23 cm puut, ja harvennusten vaikutuksia jäljelle jääneen puuston kasvuun ja puustojen luontaiseen uudistumiseen arvioitiin. Tulosten mukaan puuston kasvu reagoi harvennuksiin ilman pitkää viivettä ja puuston kasvu oli 26–29 vuoden tarkastelujakson aikana keskimäärin 4,9 m³ vuodessa. Tarkasteluperiodin lopussa puustojen tilavuus vaihteli välillä 128–339 m³, ja isoimpien kokoluokkien harvennuksen toistaminen näytti mahdolliselta 20–25 vuotta tutkimuksen alussa suoritettujen harvennusten jälkeen.

Hynynen ym. (2019) käyttivät eri- ja tasaikäisrakenteisina hoidetuista puustoista kerättyä koeladadataa puuston pohjapinta-alan kehitystä kuvaavan mallin estimoimiseksi. Näin saadun mallin avulla arvioitiin erilaisten hakkuvaihtoehtojen vaikutusta puuston tulevan pohjapinta-alan kehitykseen. Tulosten mukaan hakkuiden jälkeinen puuston tiheyden kasvattaminen lisäsi jäljelle jätetyn puuston kasvua. Eri-ikäisrakenteisen metsänhoidon harvennusten seurauksena kasvu oli 20 % alhaisempi verrattuna tasaikäisrakenteiseen alaharvennettuun puustoon. Lisäksi harvennuksen jälkeinen kasvureaktio oli selvästi alhaisempi jatkuvapeitteisenä hoidetuissa puustoissa verrattuna alaharvennettuihin. Selityksenä tulokselle esitetään varjostuksesta kärsineiden ja harvennuksessa vapautettujen puiden heikko kyky hyötyä lisääntyneestä tilasta ja valosta. Kirjoittajien mukaan tulokset vastaavat Lundqvistin (2017) tuloksia, ja paljastavat metsänhoidon vaihtoehtojen vaikutukset metsänomistajille, jotka painottavat puuntuotannon määrää metsänhoidon tavoitteena.

Valkonen ym. (2020) tutkivat puiden luonnollista kuolevuutta eri-ikäisrakenteisissa kuusikoissa Etelä-Suomessa viidellä koelalueella. Tulokset vastasivat Bollandsåsin ym. (2008) mallin luonnollista kuolevuutta,



mutta kuolevuus oli oleellisesti suurempaa kuin Pukkalan ym. (2013) ja Tahvosen ym. (2010) malleissa. Luonnollinen kuolevuus oli suurinta kokoluokissa 5–10 cm ja 10–20 cm. Eroja kuolleisuudesta eri- ja tasikäisten metsien välillä ei ollut mahdollista päätellä.

Bianchi ym. (2020) käyttivät samoilta koealoilta kerättyä dataa kuin Hynynen (2019), mutta vertasivat jaksollisten ja jatkuvapeitteisten ratkaisujen eroa arvioimalla eroja puutason kasvussa. Tulosten mukaan jatkuvapeitteisissä kohteissa puutason kasvu jäi jaksollisia kohteita alhaisemmaksi tarkastellulla ajanjaksolla, joka ei kuitenkaan vastannut koko kiertoaikaa. Tässä tutkimuksessa ei havaittu, että jatkuvapeitteisen metsän harvennuksen seurauksena jäljelle jäävien puiden kasvureaktio olisi hitaampi kuin alaharvennuksissa, toisin kuin Hynynen (2019) tutkimuksessa. Kasvueroon jaksollisten kohteiden eduksi arveltiin johtuvan siitä, että jatkuvapeitteisissä kohteissa jäljelle jääneiden puiden koko ja siten myös kasvu oli pienempi.

Useissa edellä kuvatuissa puuntuotostutkimuksissa päädytään tulokseen, että jatkuvapeitteisten metsien harvennukset johtavat alhaisempaan metsän kasvuun kuin alaharvennukset. Koska metsien hoito jatkuvapeitteisinä ei voi perustua alaharvennuksiin, tästä näyttäisi seuraavan, että jatkuvapeitteinen ratkaisu väistämättä alentaa metsän kasvua verrattuna alaharvennuksiin ja jaksolliseen ratkaisuun.

4.2 Puuntuotannollisten tutkimusten arviointia

Yllämainittujen tutkimusten rasitteena ovat vastaavat ongelmat kuin vastaavissa lauhkean vyöhykkeen tutkimuksissa: vertailun kohteena olevia metsänhoidon vaihtoehtoja ei ole optimoitu (Hanewinkel (2002), minkä seurauksena vertailtaviin vaihtoehtoihin voi sisältyä mielivaltaisuutta. Hynynen ym. (2019) ja Bianchin ym. (2020) tutkimuksissa arvioidaan ainoastaan harvennusten vaikutusta puiden kasvuun, ja sivuutetaan päätehakkuun jälkeinen ajanjakso, jolloin varsinaisia puuntuotannollisia hakkuita ei vuosikymmeniin lainkaan tehdä. Lundqvist (2017) myöntää vastaavat asetelmat referoimiensa tutkimusten ongelmaksi. Yksi mahdollisuus arvioida tätä kysymystä on käyttää kaikkein yksityiskohtaisimpia metsän kasvua kuvaavia prosessimalleja (Mäkelä ja Valentine 2020) ja tutkia, millaiset hakkuut maksimoivat puuntuotannon. Tällaisen tarkastelun perusteella, alkutilan ollessa paljas maa, ensimmäisessä harvennuksissa poistetaan alisteisessa asemassa olevia heikkokasvuisia pieniä puita, jos alkupuusto on riittävän tiheä. Myöhemmät harvennukset kohdistuvat suuriin kokoluokkiin. Tämä seuraa siitä, että sovelletun prosessimallin mukaan suurten puiden harvennuksessa aiheutuva kasvutappio on pienempi kuin varjostuksen vähenemisen aiheuttama kasvun lisäys metsään jäävissä puissa (Niinimäki ym. 2012, Tahvonen ym. 2013). Prosessimalli kykenee huomioimaan esimerkiksi alisteisessa asemassa olleen puun alhaisemman latvussuhteen, joka vaikuttaa harvennusten aikaansaamaan kasvureaktioon (vrt. Hynynen ym. 2019). Mallit, jotka sopivat jatkuvapeitteisten ratkaisujen optimointiin eivät ole yhtä yksityiskohtaisia, mutta tuottavat saman tuloksen: puuntuotoksen maksimoivat harvennukset kohdistuvat suurimpiin kokoluokkiin (Tahvonen ym. 2010, Tahvonen 2011), vaikka riittävän suuri taimimäärä keinollisen uudistamisen seurauksena aiheuttaa sen, että yläharvennuksia seuraa kuitenkin lopulta päätehakkuu. Koska optimointituloksissa suuriin kokoluokkiin kohdistuvat harvennukset eivät laadullisesti eroa sen mukaan, tehdäänkö myöhemmin päätehakkuu vai hoidetaanko puustoa jatkuvapeitteisenä, käytetään seuraavassa termiä **yläharvennus** sekä jaksollisten että jatkuvien ratkaisujen yhteydessä sen sijaan, että jälkimmäisessä tapauksessa käytettäisiin termiä **poimintahakkuu**.

Edellä referoiduissa tutkimuksissa näyttää unohtuvan, ettei metsänhoidon kannattavuutta voida arvioida pelkästään puuntuotannon perusteella. Lisäksi sovellettuihin koeasetelmiin sisältyy ristiriitaisuuksia. Kuitenkin esimerkiksi Valkosen ym. (2017) tutkimus vastaa hakkuiden sisällön osalta jossain määrin hakkuita, jotka näyttävät perustelluilta useissa taloudellisissa tutkimuksissa.

4.3 Dynaamiseen optimointiin perustuvat taloudelliset tutkimukset

Huolimatta Haightin ja Monserudin (1990) tutkimuksissa otetuista edistysaskeleista jo kolmekymmentä vuotta sitten, on uudemmassa tutkimuksessa (pohjoismaista tutkimusta lukuun ottamatta) varsin niukasti esimerkkejä vastaavan optimointikehikon sovelluksista, puhumattakaan esitettyyn mallikehikkoon tehdystä jatkokehityksestä. Yksi poikkeuksista on Wikström (2000), jossa sovelletaan yksittäisen puun mallia kuuselle. Luontainen uudistuminen oletetaan vakioiksi (10 puuta kokoluokkaan 5 cm vuodessa hehtaaria kohti), puut luokitellaan hakkuisissa 6 cm:n kokoluokkiin ja puuston tilavuudelle asetetaan 150 m³ minimitaso.



Jatkuvapeitteisen metsänhoidon ratkaisua lasketaan 41 viiden vuoden jaksoa, jonka aikana hakkuiden ajoitus optimoidaan. Lasketun ratkaisun kuvauksesta päätellen optimointi ei tuota selkeää kehitystä kohti samana toistuvaa hakkuusykliä. Jaksollisen ja jatkuvapeitteisen ratkaisun kannattavuusvertailu tuottaa tuloksen jaksollisen eduksi. Tutkimuksen ongelmina ovat kuitenkin vakioksi oletettu luontainen uusiutuminen ja ruotsalaiseen metsälainsäädäntöön liittyvä puuston tilavuuden alarajarajoite (tilavuus > 150 m³), joka myöhemmän pohjoismaisen tutkimuksen valossa on jatkuvapeitteisen metsänhoidon ratkaisua voimakkaasti rajoittava.

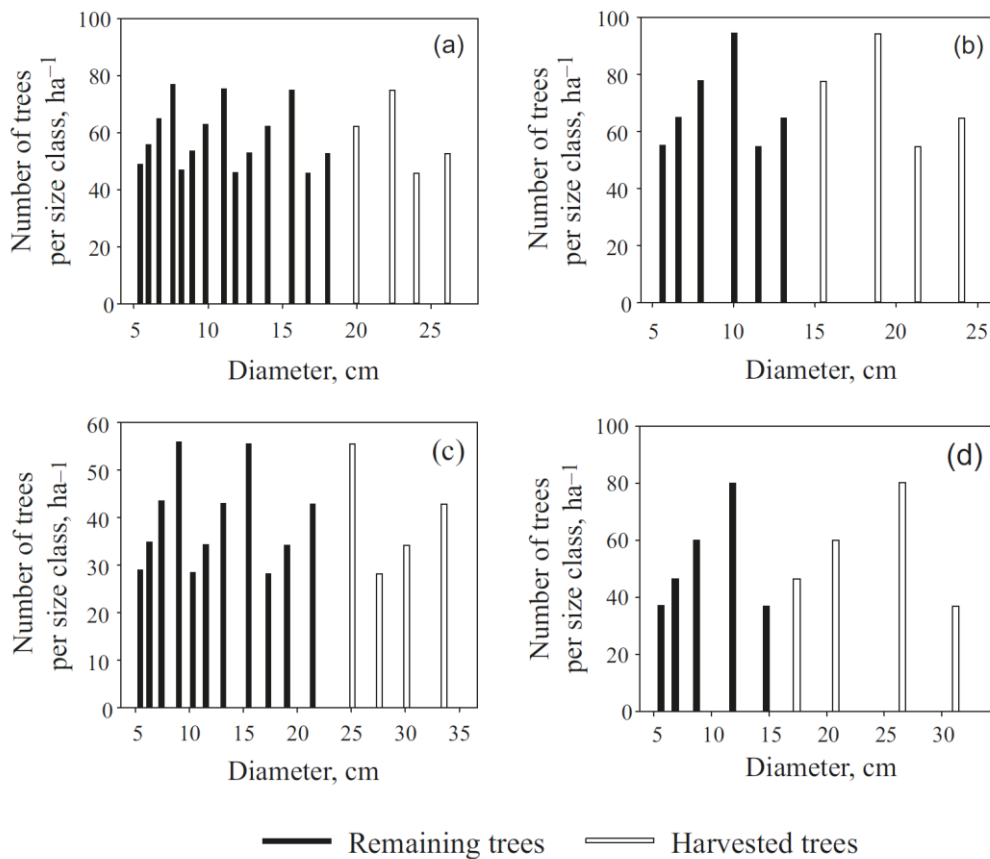
Tahvosen tutkimuksissa (2007, 2009) kehitetään metsätalouden optimointimallia siten, että mallin optimi-ratkaisusta voitaisiin suoraan päätellä taloudellisesti optimaalinen valinta jatkuvapeitteisen ja jaksollisen metsänhoidon välillä. Tämä toteutetaan soveltamalla kokoluokkarakenteista matriisimallia ja yksinkertaisesti maksimoimalla nettokantorahatulojen nykyarvoa yli niin pitkän aikavälin, että havaitaan ratkaisun mahdollinen kehittyminen ajassa kohti optimaalista tasapainoratkaisua tai sykliä. Näin saatu ratkaisu kuvaa teoreettisesti oikeaa äärettömän aikavälin ratkaisua ilman keinotekoisia rajoituksia (vrt. Haight ja Monserud 1990a,b)³. Teoreettisten, numeerisesti ratkaistavien esimerkkien avulla osoittautuu, että optimi-ratkaisu on puuston hoito jaksollisena, jos taimien syntymisen ja kasvun edellytyksenä on hyvin alhainen puuston tiheys ja *vice versa*. Lisäksi käy ilmi, että korkea korko ja korkeat uudistuskustannukset lisäävät jatkuvapeitteisen ratkaisun kannattavuutta suhteessa jaksolliseen, kun taas puun hinnan vaikutus on päinvastainen. Teoreettisen tarkastelun lisäksi tutkimuksessa sovelletaan Pukkalan ja Kolströmin (1988) ja Kolströmin (1993) estimoimaa kokoluokkarakenteista mallia kuuselle. Tahvonen (2007, 2009) esittää alustavana tuloksen, jonka mukaan jatkuvapeitteinen ratkaisu voi olla jaksollista kannattavampi. Tulos on päinvastainen verrattuna Pukkalan ja Kolströmin (1988) johtopäätöksiin, jotka perustuvat pelkän kuutiotuotoksen vertailuun (ks. myös Hanski ym. 1998). Laskennan yksinkertaistuksina ovat samat kantohinnat molemmille metsänhoidon vaihtoehdoille ja hakkuiden toistuminen jokaisena periodina.

Tahvonen ym. (2010) estimoiivat kokoluokkarakenteisen matriisimallin jatkuvapeitteisen metsänhoidon koealoilta kerätystä aineistosta. Tässä tutkimuksessa Tahvosen (2009) mallia täydennetään Kuitto ym. (1994) korjuukustannusmallilla ja huomioidaan harvennuskustannusten korkeampi taso verrattuna uudistushakkuihin. Tulosten mukaan kuutiotuotos maksimoituu jaksollisella metsänhoidolla ja yläharvennuksilla, mutta maksimoitaessa tukkituotosta ratkaisu kallistuu kohti jatkuvapeitteistä metsänhoitoa. Molemmissa tapauksissa harvennusten rajoittaminen alaharvennuksiin vähentää tuotosta oleellisesti. Taloudellisesti optimaalisessa, nettokantorahatulot maksimoivan optimoinnin tasapainoratkaisussa korjattujen puiden läpimitta on 23–39 cm, puuntuotos vuosittain 4,6–5,1 m³ hehtaarilla, nettovuosituotot 178–210 euroa hehtaarilla, ja korjuukustannukset 8,6–11 euroa kuutiometriltä. Arviot jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon keskinäisestä edullisuudesta toteutetaan vastaavasti kuin Haightin ja Monserudin (1990a,b) tutkimuksissa, eli sisällytetään mahdollisuus siirtyä päätehakkuun seurauksena puuston hoitoon jaksollisena. Jaksolliseen ratkaisuun siirtymisen optimaalisuus riippui keskeisesti päätehakkuun jälkeisestä paljaan maan arvosta. Tutkimuksessa laskettiin paljaan maan arvo, jonka seurauksena jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon ratkaisujen kannattavuus on sama. Näitä ”break-even” -paljaan maan arvoja verrattiin eri tutkimuksissa esitettyihin ja samassa tutkimuksessa sovelletulla mallilla laskettuihin paljaan maan arvoihin. Tulosten mukaan jatkuvapeitteinen ratkaisu osoittautuu optimaaliseksi lukuun ottamatta sellaista puuston alkutilaa, jossa on vain suurimman kokoluokan puita. Lisäksi alhainen korko (alle 1 %) lisää jaksollisen metsänhoidon kannattavuutta suhteessa jatkuvapeitteiseen. Tuloksista seuraa, että vaikka lähtötila, jossa puita on vain suurimmissa kokoluokissa johtaa päätehakkuuseen, on alhaisen koron tapauksia lukuun ottamatta optimaalinen pitkän aikavälin ratkaisu kuitenkin jatkuvapeitteinen metsänhoito. Keskeisenä yksinkertaistuksena tässä tutkimuksessa on optimoitu, mutta vakiona pysyvä hakkuiden aikaväli (12–15 vuotta).

Edellä kuvatuissa tutkimuksissa puuston kehitys kuvataan kokoluokkarakenteisella matriisimallilla. Tämä malli voidaan ymmärtää yksinkertaistuksena yksittäisen puun mallista (Liang ja Picard 2012). Tahvonen (2011) arvioi jatkuvapeitteisen metsänhoidon taloutta soveltamalla Pukkalan ym. (2009) yksittäisten puiden kasvumallia ilman yksinkertaistuksia mustikkatyyppin (MT) kasvupaikan kuusipuustoille lämpösumma-alueilla 900–1 300 d.d. (englanniksi degree days). Tulosten mukaan puuntuotoksen maksimointi johtaa jaksolliseen ratkaisuun

³ Optimoinnissa käytettiin epälineaariseen optimoinnin sisäpistealgoritmejä (Artelys 2021).

jatkuva-peitteisen sijaan. Taloudelliseen tavoitteeseen perustuva optimointi tuotti jatkuvapeitteisen ratkaisun ja kehityskulun kohti tasapainoratkaisua, jossa yläharvennukset tuottavat 20 vuoden välein 76–105 m³ tuotoksen, joka on suurin, kun korko on alhainen (1 %) ja lämpösomma korkein (1 300 d.d.). Korjattavien puiden koon alaraja on 15–25 cm riippuen lämpösomma-alueesta ja korosta (kuva 7). Puunkorjuun kustannukset ovat 7,4–8,7 euroa kuutiometriltä. Hakkuiden jälkeinen puuston pohjapinta-ala osoittautui hyvin alhaiseksi: korkeimmillaan 8,7 m² hehtaarilla ja alhaisimmillaan 2,2 m² hehtaarilla. Alhainen pohjapinta-ala johtuu ainakin osittain sovelletusta 20 vuoden hakkuusyklistä. Taloudellisissa optimiratkaisuissa luontainen uudistuminen (kynnyskasvu) oli 7–12 puuta vuodessa, joka alittaa Lundqvistin ym. (2007) referoimassa empiirisessä tutkimuksessa havaitun luontaisen uudistumisen tason. Tämän perusteella esitetyt optimiratkaisut näyttävät perustuvan realistisiin luontaisen uudistumisen tasoihin. Tahvosen (2011) mukaan siirtyminen jaksolliseen ratkaisuun on kannattavaa vain, jos korko on alhainen (alle 1 %) ja kasvupaikan lämpösomma on korkea (1 200–1 300 d.d.). Lisäksi arvioitiin dynaamiseen optimointiin perustuvien kannattavuusarvioiden eroa suhteessa staattiseen optimointiin perustuviin tuloksiin (Pukkala ym. 2010) ja saatiin tulos, jonka mukaan jälkimmäinen johtaa jatkuvapeitteisen ratkaisun kannattavuuden yliarviointiin.

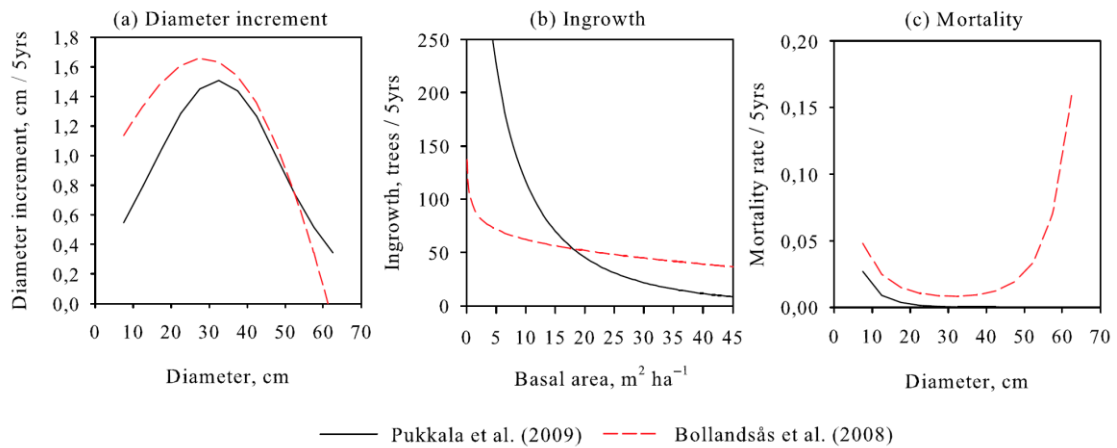


Kuva 7. Optimaalisia puuston rakenteita tasapainoratkaisuissa. Kuvaajassa a) lämpösomma on 900 d.d. ja korko 1 %, b) lämpösomma on 900 d.d. ja korko 4 %, c) lämpösomma on 1 300 d.d. ja korko 1 %, d) lämpösomma on 1 300 d.d. ja korko 4 %. Pystyakselilla on puiden lukumäärä kokoluokassa hehtaarilla (Number of trees per size class). Vaaka-akselilla on puiden läpimitta (Diameter) senttimetreinä. Musta väri kuvaa hakkaamatta jätettyjä puita (Remaining trees) ja valkoinen väri hakattuja puita (Harvested trees). Lähde: Tahvonen 2011.

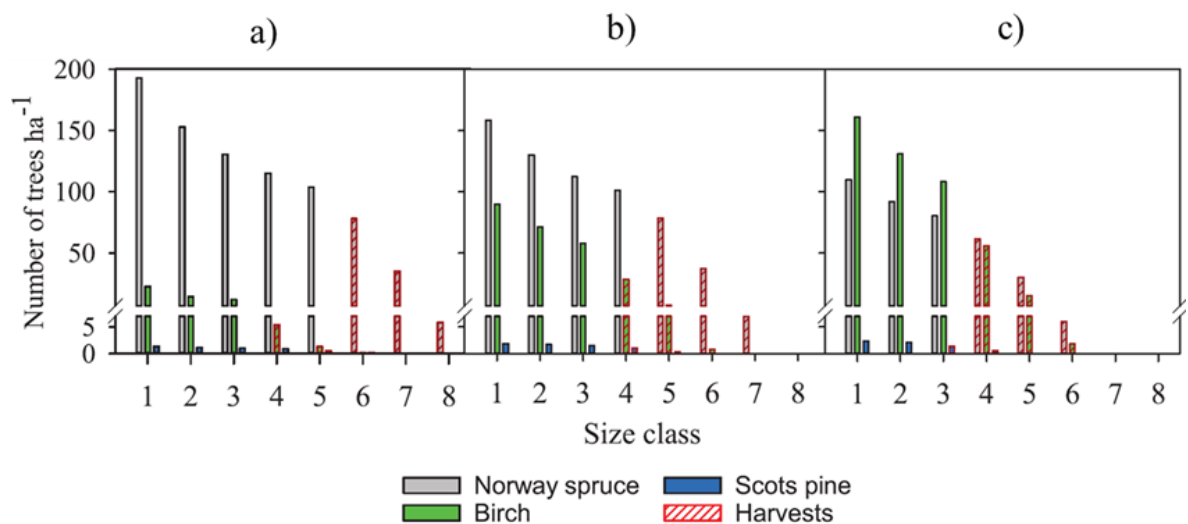
Pukkalan (2014) tutkimuksessa optimoitiin kahden ensimmäisen harvennuksen ajoitusta ja harvennustyyppiä, ja huomioidaan toisen hakkuun jälkeisen metsän arvo Pukkalan (2005) tutkimuksessa esitetyllä jaksollisen metsänhoidon mallilla. Puuston kehitystä kuvataan Pukkalan ym. (2013) kasvumallilla, korjuukustannuksia Valstan (1992) mallilla ja optimointimetodina käytetään Hooken ja Jeevesin (1961) algoritmia. Lisäksi

huomioidaan yläharvennusten aiheuttamat korjuuvauriot luontaisesti uudistuneille taimille. Laskentakehikkoa sovelletaan suureen määrään jaksollisena hoidettuja lähtötiloiltaan poikkeavia kuusipuustoja Keski- ja Pohjois-Suomessa. Keskeisten tulosten mukaan puustoja oli optimaalista harventaa yläharvennuksilla 97–99 % tapauksista. Lainsäädännössä asetettu hakkuun jälkeinen vähimmäispohjapinta-alan alarajoite vähentää metsätalouden ja erityisesti jatkuvapeitteisen metsätalouden kannattavuutta 12–16 %. Vähimmäispohjapinta-alarajoitteen seurauksena ratkaisuksi tulee useissa tapauksissa päätehakkuu, vaikka oli pääteltävissä, että ilman rajoitusta kannattavinta olisi ollut hoitaa puustoja jatkuvapeitteisinä.

Rämö ja Tahvonen (2014, 2015) soveltavat Bollandsåsin ym. (2008) laajasta norjalaisesta aineistosta estimoimaa kasvumallia. Ero Pukkalan ym. (2009) malliin on suuri erityisesti luontaisen uudistumisen ja puiden kuolleisuuden osalta (kuva 8).



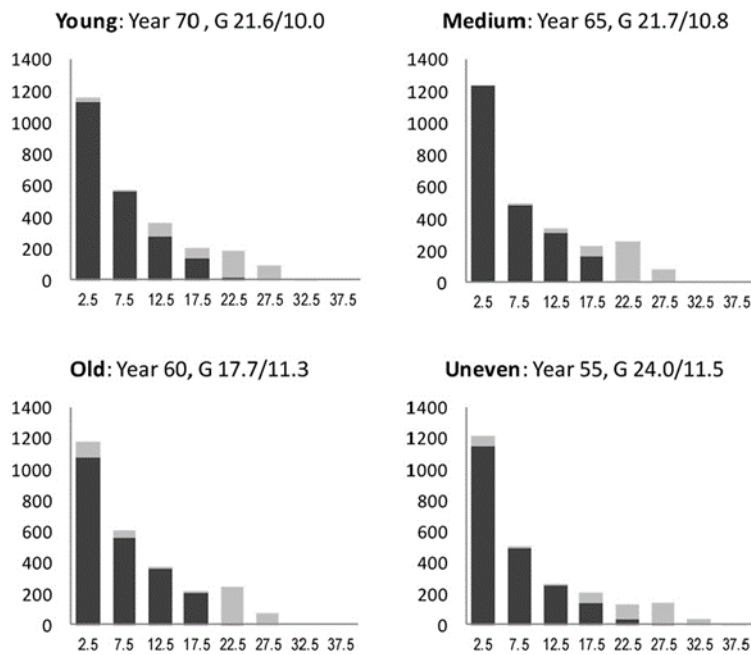
Kuva 8. Kuusen läpimitan kasvu, kynnykasvu ja kuolleisuus eri mallien mukaan. Musta viiva kuvaa Pukkalan ym. (2009) ja punainen katkoviiva Bollandsåsin ym. (2008) mallin mukaista a) läpimitan kasvua (Diameter increment), b) kynnykasvua (Ingrowth) ja c) kuolleisuutta (Mortality) silloin, kun metsän tila on $x = 300, 180, 120, 80, 50, 30, 18, 10, 2$ (puumäärät kokoluokissa 7,5 cm, 12,5 cm, ..., 47,5 cm) kuvissa a) ja c). Lähde: Rämö ja Tahvonen 2014.



Kuva 9. Sekapuuston rakenteita optimaalisissa tasapainotiloissa kasvupaikalla, jossa 100-vuotiaan valtuuston korkeus on 27 m. Kuvaajassa a) korko on 1 %, b) korko on 3 % ja c) korko on 5 %. Pystyakselilla on puiden lukumäärä (Number of trees) ja vaak-akselilla kokoluokat 1 = 7,5 cm, 2 = 12,5 cm, ... , 8 = 42,5 cm. Puulajit on kuvattu eri värein: kuusi (Norway spruce) harmaalla, mänty (Scots pine) sinisellä ja koivu (Birch) vihreällä. Hakattavat puut (Harvests) on kuvattu punaisella kenoviivalla. Lähde: Rämö ja Tahvonen 2015.



Rämö ja Tahvonen (2015) sisällyttivät optimointimalliin useita eri puulajeja: kuusen, männyn, koivun ja muut lehtipuut. Bollandsåsin ym. (2008) kasvumallin mukaan mainitut puulajit sisältävä sekametsä kehitty ilman häiriöitä pohjapinta-alaltaan noin 40 m² kuusivaltaiseksi puustoksi, jossa muiden puulajien luontainen uudistuminen ja osuudet ovat pieniä. Puun korjuun optimointi jatkuvapeitteisenä hoidettavassa metsässä kuitenkin edellyttää huomattavasti alhaisempaa puuston tiheyttä, joka Bollandsåsin ym. (2008) mallin mukaan tekee mahdolliseksi erityisesti koivun uudistumisen. Tämä vaikutus korostuu, kun korko on suurempi tai yhtä suuri kuin 3 % (kuva 9b, c). Sekapuustossa puuntuotoksen havaittiin tasapainosyklissä olevan hieman suurempi verrattuna pelkästään kuusikkona hoidettuihin puustoihin.



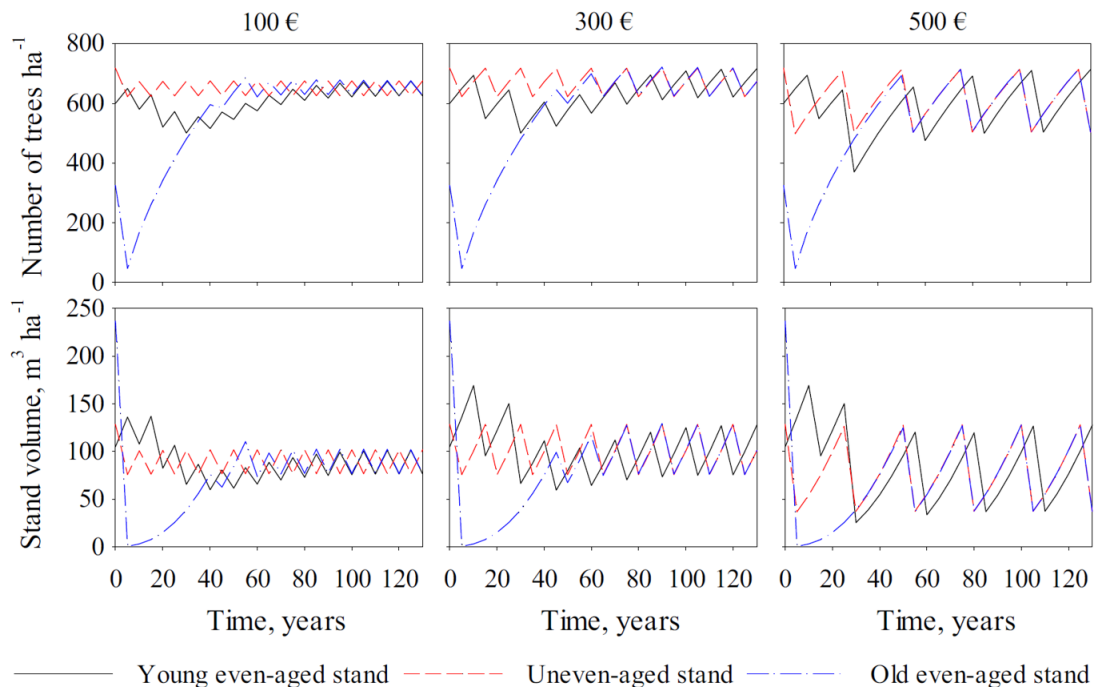
Kuva 10. Optimaaliset puuston rakenteet ennen ja jälkeen tasapainossa toteutettavien hakkuiden. Hakattavat puut on merkitty harmaalla ja jäävät puut mustalla. X-akselilla on kaadettavien puiden läpimitta. Vuosi on ajanjakso hakkuiden alkamisesta ja G pohjapinta-ala ennen/jälkeen hakkuiden (m²). Nuori (young), keskimääräinen (medium), vanha (old) ja eri-ikäisrakenteinen (uneven) viittaavat puuston alkutilaan. Lähde Pukkala (2016).

Pukkalan (2016) tutkimuksessa verrataan jaksollista metsänhoitoa kahteen jatkuvapeitteisen metsänhoidon vaihtoehtoon, joista toisessa edellytetään vakiona toistuvan puuston rakenteen toteutuminen 2–7 harvennuksen jälkeen, kun taas toisessa vastaavaa vaatimusta ei sovelleta. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa puuston arvo optimoitavien harvennusten jälkeen huomioidaan Pukkalan (2014) tutkimuksessa esitetyllä laskentamenetelmällä. Puustojen kasvua mustikkatyyppin (MT) kuusikoissa kuvataan Pukkalan (2013) mallilla, kasvupaikkana on Keski-Suomi. Puuston alkutilalle määriteltiin neljä eri vaihtoehtoa, joista kolme poikkesivat kuitu/tukkiosuuksien suhteen ja neljäs oli kokoluokkarakenteeltaan mahdollisimman heterogeeninen eri-ikäisrakenteinen puusto. Lisäksi huomioitiin mahdollisuus, että uudistushakkuun jälkeen istutetut (jalostetut) taimet kasvavat 20 % enemmän verrattuna luontaisesti syntyneisiin taimiin, samoin kuin harvennushakkuiden suuremmat kustannukset verrattuna uudistushakkuihin. Tulosten mukaan uudistushakkuu osoittautuu kannattavimmaksi vain silloin, kun puuston alkutila koostui pelkästään tukkikokoisista puista ja istutettujen taimien oletettiin kasvavan 20 % nopeammin kuin luontaisesti syntyneiden. Muissa tapauksissa kannattavimmaksi ratkaisuksi osoittautuu jatkuvapeitteinen metsänhoito ilman vaatimusta saavuttaa vakiona toistuva puuston rakenne. Metsän jatkuvapeitteisenä säilyttävissä hakkuissa korjattiin tyypillisesti yli 20 cm läpimitaltaan olevat puut (1,3 metrin korkeudelta mitattuna), hakkuu toistettiin 15 vuoden välein ja hakkuiden jälkeinen puuston pohjapinta-ala on 9–14 m² (kuva 10).



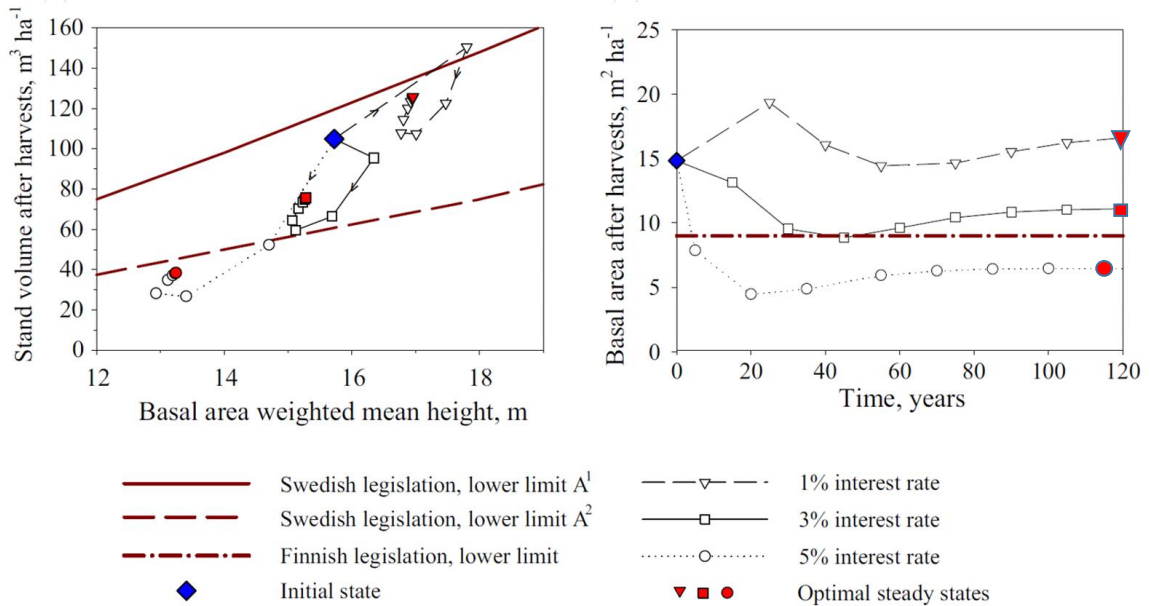
Rämö ja Tahvonen (2015) ja Sinha ym. (2016) kehittävät jatkuvapeitteisen metsänhoidon optimointia kattamaan harvennusten optimaalisen ajoituksen ilman vaatimusta vakiona pysyvistä hakkuuvälistä. Vakiona pidettävä hakkuuväli on erityisen rajoittava, kun pyritään optimoimaan siirtyminen alun perin jaksollisena hoidettavasta puustosta kohti jatkuvapeitteisenä hoidettavaa puustoa, koska tällöin hakkuuvälin voi olettaa vaihtelevan. Harvennusten ajoituksen ja eri kokoluokista korjattujen puumäärien yhtäaikainen optimointi on sekalukuoptimointiongelma, jonka vaikeusastetta lisäävät suuri tila- ja ohjausmuuttujien määrä, mallin funktioiden epälineaarisuus, usean lokaalin optimin mahdollisuus ja optimointiongelman pitkä (ääretön) aikahorisontti. Edellä kuvatuissa tutkimuksissa nämä ongelmat on ratkaistu erilaisilla yksinkertaistuksilla, joihin aina liittyy mahdollisuus subjektiivisiin, laskennan tuloksiin vaikuttaviin valintoihin. Tutkimuksissa Haight ja Monserund (1990ab), Tahvonen (2007, 2009, 2011) ja Tahvonen ym. (2010) optimointia yksinkertaistetaan olettamalla optimoitava hakkuuväli vakioksi ja rajoittamalla puuston alkutila suhteellisen lähelle pitkän aikavälin tasapainoratkaisua. Pukkala (2014, 2016) yksinkertaistaa ongelmaa rajoittamalla optimoitavien ohjausmuuttujien määrää, mallin aikahorisonttia ja soveltaa puuston *ad hoc* loppuarvostusfunktiota.

Rämö ja Tahvonen (2015) toteuttavat sekalukuoptimoinnin soveltamalla kaksitasoista optimointikehikkoa, jossa harvennusten ajoituksen 0–1 muuttujat ratkaistaan hill climbing -algoritmeilla ja jatkuvina muuttujina ilmaistavat harvennettavat puumäärät epälineaarisen optimoinnin sisäpistealgoritmeilla. Optimointiongelman aikahorisontti asetetaan niin pitkäksi, että ratkaisut tuottavat aikauran kohti tasapainoratkaisua. Useiden lokaalien optimiratkaisujen mahdollisuus pyritään eliminoimaan ratkaisemalla optimointitehtävät käyttäen suurta määrää optimoitavien muuttujien alkuarvoja (>100). Sinha ym. (2016) soveltaa vastaavaa kaksitasoista optimointikehikkoa, mutta ratkaisee harvennuksen ajoitukseen liittyvät 0–1 kokonaisluvut evoluutioprosessia muistuttavalla geneettisellä algoritmilla. Näiden metodien soveltaminen lisää tulosten luotettavuutta erityisesti silloin, kun puuston alkutila poikkeaa paljon pitkän aikavälin tasapainoratkaisusta, eli kun tarkastellaan siirtymää jaksollisesta kohti jatkuvapeitteistä ratkaisua.



Kuva 11. Puiden määrät ja puuston tilavuudet erilaisista alkupuustoista optimoiduissa ratkaisuissa. Korko on 3 %, puulajina on kuusi, hakkuiden kiinteät kustannukset ovat 100, 300 ja 500 euroa hehtaarilta. Pystyakselilla on puiden lukumäärä (number of trees) tai puuston tilavuus (stand volume) ja vaak-akselilla on aika vuosina (time, years). (Kuvan selitteet: young even-aged stand = nuori tasaikäisrakenteinen kuvio, uneven-aged stand = eri-ikäisrakenteinen kuvio, old even-aged stand = vanha tasaikäisrakenteinen kuvio.) Lähde: Rämö ja Tahvonen 2015.

Hakkuista aiheutuu sekä muuttuvia, hakattavan puumäärän koosta ja määrästä riippuvia kustannuksia, että kiinteitä, hakkuukaluston ja hakkuuiden suunnittelusta aiheutuvia kustannuksia. Kiinteiden kustannusten seurauksena hakkuista ei ole kannattavaa toteuttaa liian usein, ja kuvasta 11 ilmenee, että korkeammat kiinteät kustannukset johtavat harvemmin toteutettaviin hakkuisiin (hakkuuvälit tasapainossa 10, 15 ja 25 vuotta). Lisäksi ilmenee, että puuston alkurakenteen ollessa valmiiksi heterogeeninen ja lähellä optimaalista tasapainoa, ovat hakkuuvälit muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta samanpituisia. Tästä poiketen hakkuuvälit vaihtelevat ratkaisun edetessä, jos puuston alkutila vastaa tasaikäistä nuorta tai vanhempaa puustoa.



Kuva 12. Optimiratkaisut verrattuna metsälainsäädännön rajoitteisiin Ruotsissa (vasen kuva) ja Suomessa (oikea kuva). Kiinteät korjuukustannukset ovat 300 euroa. Rajoitetta A¹ ei saa alittaa ilman erityislupaa, rajoitteen A² alittamisesta seuraa velvollisuus uudistaa metsä keinollisesti. Vasemmassa kuvassa pystyakselilla on puuston tilavuus kuutiolina hakkuun jälkeen (Stand volume after harvests) ja vaak akselilla puuston pohjapinta-alalla painotettu keskikorkeus metreinä (Basal area weighted mean height). Oikeassa kuvassa pystyakselilla on puuston pohjapinta-ala hakkuun jälkeen (Basal area after harvests) ja vaak akselilla aika vuosina (Time, years). (Kuvan selitteet: legislation = lainsäädäntö, lower limit = alaraja, initial state = alkutila, interest rate = korko, optimal steady states = optimaaliset tasapainotilat.) Lähde: Rämö ja Tahvonen 2015.

Rämö ja Tahvonen (2015) totesivat (kuva 12), että myös Bollandsåsin ym. (2008) kasvumalliin perustuva optimointi voi johtaa ratkaisuihin, jotka rikkovat metsälainsäädännössä (2014) puuston minimitiheydelle asetettuja rajoitteita, erityisesti jos korko on suurempi kuin 3 % (vrt. Pukkala 2014). Kuvan 11 ratkaisuissa puuston alkutila on suhteellisen lähellä tasapainoratkaisua. Tästä huolimatta ristiriita optimiratkaisun ja lainsäädännön välillä realisoituu erityisesti Ruotsissa. Kuvasta voidaan päätellä, että ristiriita on huomattavasti suurempi, jos kiinteät kustannukset ovat korkeampia ja hakkuuväli on pidempi, tai jos alkutila on tasaikäinen hakkuukypsä puusto.

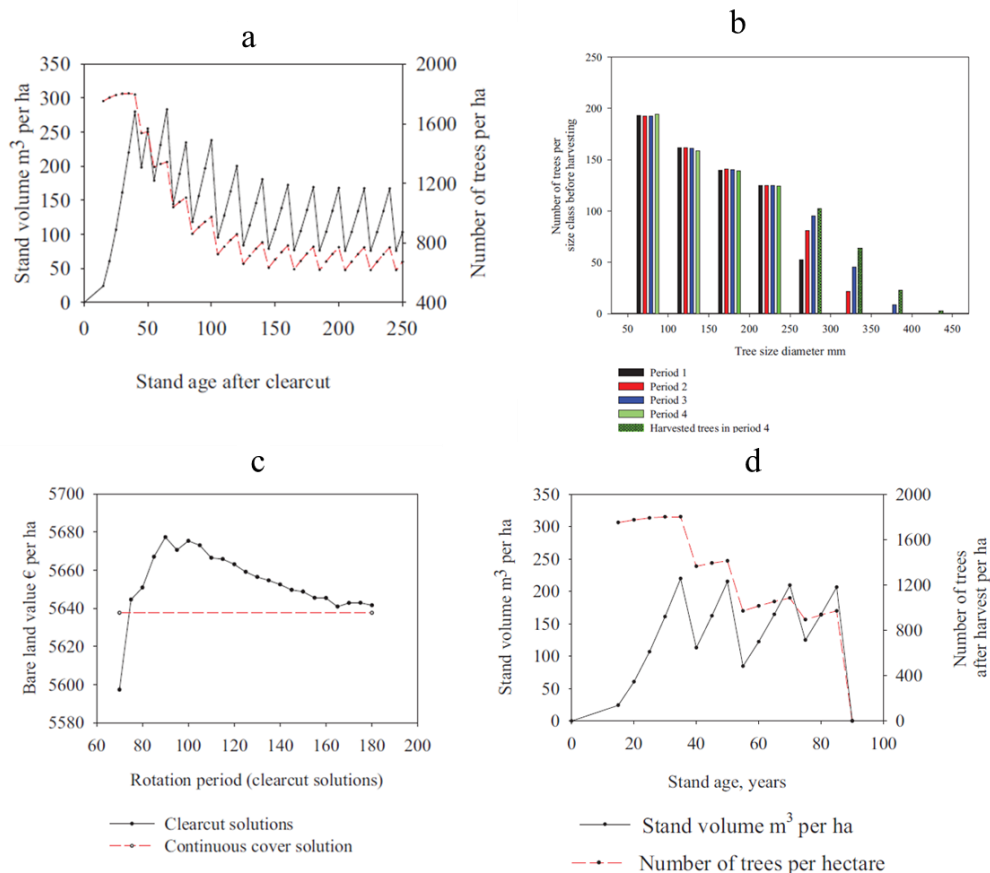
Edellä kuvatuissa tutkimuksissa, joissa verrataan jatkuvapeitteisen ja jaksollisen metsänhoidon kannattavuutta, on puuston alkutila tyypillisesti ikä- ja kokoluokkarakenteeltaan heterogeeninen. Teoreettisen tutkimuksen (Tahvonen 2015) perusteella jaksollisen metsänhoidon äärellisten kiertoaikojen ketjuun (esimerkiksi 80 vuotta) perustuvaa optimiratkaisua ei teoreettisesti/matemaattisesti ole olemassa silloin kun optimiratkaisu (paljas maa alkutilana) on metsän hoito jatkuvapeitteisenä. Tämä seuraa siitä, että jatkuvapeitteisen metsänhoidon ratkaisu on itse asiassa jaksollisen metsänhoidon ratkaisu, mutta kuitenkin siten, että kiertoajan optimaalinen pituus on ääretön eli päätehakkuu ei koskaan toteudu, ja puuta korjataan ainoastaan (ylä-) harvennuksilla. Kuitenkin tutkimukset, joissa optimoidaan valinta metsänhoidon vaihtoehtojen välillä, perustuvat mahdollisuuteen tehdä päätehakkuu harvennuksen sijaan, ja jatkaa tämän jälkeen



metsänhoitoa jaksollisena (esim. Haight ja Monserud 1990a,b). Tämä mallirakenne on ristiriitainen, koska jaksollisen metsänhoidon ratkaisua ei välttämättä ole olemassa, jolloin optimiratkaisu paljas maa alkutilana onkin jatkuvapeitteisen metsänhoidon ratkaisu. Ongelma on ratkaistavissa siten, että lasketaan ensin optimiratkaisu alkutilana paljas maa ja optimoidaan tätä ratkaisua käyttäen hakkuut mistä tahansa alkutilasta. Näin tulee ristiriidattomasti huomioiduksi, että saattaa olla mahdollista tehdä yksi päätehakkuu, vaikka optimiratkaisu tämän jälkeen olisikin metsän hoito jatkuvapeitteisenä. Edelleen teoreettisen tutkimuksen nojalla jaksollinen ratkaisu voi olla optimaalinen, jos alkutila on paljas maa, vaikka heterogeenisestä alkutilasta optimoitu ratkaisu olisikin jatkuvapeitteinen metsänhoito. Tämän seurauksena Haightin ja Monserudin (1990a, b) asetelmaan perustuvat kannattavuustarkastelut (joita on edellä sovellettu suomalaisissa tutkimuksissa) voivat kahdessa mielessä aliarvioida päätehakkua ja keinollisen uudistamisen kannattavuutta ja yliarvioida jatkuvapeitteisen ratkaisun kannattavuutta.

Edellä kuvattuun perustuen Tahvonen ja Rämö (2016) pyrkivät aiempaa systemaattisemmin tarkastelemaan jatkuvapeitteisen ja jaksollisen metsänhoidon keskinäistä kannattavuutta. Tutkimus perustuu kuusimetsään ja Bollandsås ym. (2008) kasvumalliin ja tulokset lasketaan kolmelle eri kasvupaikalle. Puuston lähtötilaksi otetaan paljas maa ja huomioidaan mahdollisuus että optimikiertoaika voi olla äärettömän pitkä, jolloin puuta korjataan ainoastaan harvennuksin, säilyttäen jatkuvapeitteisyys. Tämä asetelma on teoreettisesti johdonmukainen ja ratkaisee edellä esitetyn aikaisempien tutkimusten epäjohdonmukaisuuden. Kun puuston alkutila on paljas maa, voidaan optimiratkaisu laskea soveltaen (Rämö ja Tahvonen 2015, Sinha ym. 2017) algoritmeja puunkorjuun optimaaliselle ajoitukselle ilman vaatimusta tasavälein suoritettavista hakkuista.

Kun korko vaihtelee välillä 1–4 %, optimimaalisissa jatkuvapeitteisissä ratkaisuisissa ensimmäinen harvennus tehdään puuston iän ollessa 40–45 vuotta, tasapainossa hakkuuväli on 15–25 vuotta ja korjattujen puiden koko on 275–375 mm (Tahvonen ja Rämö 2016). Kun korko on 2 % ja kasvupaikka määritellään siten, että puuston valtapituus on 17 m puuston iän ollessa 40 vuotta ($H_{40}=17\text{m}$) (kuva 13a,b), tasapainossa hakkuut tehdään 20 vuoden välein, nettotulot ovat 5 900 euroa, tuotos on 127 m^3 , tuotos per vuosi on $6,3 \text{ m}^3$, 91 % tuotoksesta on tukkipuuta ja korjuukustannukset ovat $9,5 \text{ euroa/m}^3$.



Kuva 13. Optimaalinen jatkuvapeitteinen ratkaisu. Kuvaajassa a) optimiratkaisu kun kasvupaikka on $H_{40}=17\text{m}$, korko 2 % ja keinollisen uudistamisen kustannukset ovat 1 500 euroa hehtaarilta, b) puuston rakenne tasapainosyklin eri vaiheissa, c) paljaan maan arvo kiertoajan funktiona, jos keinollisen uudistamisen kustannukset olisivat nolla (korko 3 %), d) vastaava jaksollinen optimiratkaisu. (Kuvan selitteet: stand volume = puuston yhteistilavuus metsikkötasolla, stand age = metsikön ikä, clearcut = avohakkuu, number of trees = puiden kappalemäärä, size class = kokoluokka, harvesting = hakkuu, tree size diameter = puun koko läpimittana, period = ajanjakso, harvested trees = kerätty puusto, bare land value = paljaan maan arvo, rotation period = kiertoaika, clearcut solutions = jaksolliset ratkaisut, continuous cover solution = jatkuvapeitteinen ratkaisu, .) Lähde: Tahvonon ja Rämö 2016.

Jaksolliset ratkaisut osoittautuvat optimaalisiksi kaikilla koroilla 1–4 %, jos keinollinen uudistaminen oletetaan epärealistisesti ilmaiseksi ja kasvupaikka on hyvä ($H_{40}=17\text{m}$). Kun korko on 3 %, optimikiertoaika on 90 vuotta ja kiertoajan kuluessa tehdään kolme harvennusta. Jaksollisissa ratkaisuisa tuotoksesta on tukkipuuta vähemmän kuin jatkuvapeitteisessä ratkaisussa eli 85–76 %, koska päätehakkuussa korjataan myös pieniläpimittaisia puita. Tämän seurauksena korjuukustannukset päätehakkuussa ovat 8,7 euroa/ m^3 eli vain 0,8 euroa/ m^3 alhaisemmat kuin jatkuvapeitteisissä ratkaisuisa.

Kun Tahvonon ja Rämö (2016) vertaavat jaksollisen ja jatkuvapeitteisten ratkaisujen kannattavuutta (taulukko 2), osoittautuu, että keskimääräinen tai heikohko kasvupaikka ($H_{40}=15$, $H_{40}=11$), yli 2 % korko ja realistiset keinollisen uudistamisen kustannukset (1 000–2 000 euroa hehtaarilta) vaikuttavat siten, että jatkuvapeitteisen metsänhoidon ratkaisu on jaksollista kannattavampi ja *vice versa*.



Taulukko 2. Jatkuvapeitteisten ja jaksollisten ratkaisujen välinen kannattavuusvertailu kolmella kasvupaikalla 1–4 % koroilla ja 0–2 000 euron uudistuskustannuksilla hehtaaria kohti. Kannattavuustiedot on taulukossa annettu: jaksollinen (CC) /jatkuvapeitteinen (CCF). Jos jaksolliselle ratkaisulle ei ole annettu arvoa, ei jaksollisen ratkaisua ei ole. Punaisen viivan yläpuolella jatkuvapeitteinen ratkaisu on optimaalinen ja viivan alapuolella jaksollinen ratkaisu on optimaalinen. *-merkillä merkityissä vaihtoehdoissa uudistaminen (artificial regeneration) ei ole optimaalista. (Kuvan selitteet: interest rate = korko, site index = kasvupaikkaindeksi, cost of artificial regeneration = uudistamiskustannus.) Lähde: Tahvonon ja Rämö 2016.

Interest rate	Cost of artificial regeneration				
	€0	€500	€1000	€1500	€2000
Site index = 11 m					
4%	—/1 066	—/566	—/189*	—/189*	—/189*
3%	—/2 126	—/1 626	—/1 126	—/626	—/126
2%	4 730/4 723	—/4 223	—/3 723	—/3 223	—/1 723
1%	14 042/13 795	13 492/13 295	12 816/12 795	—/12 295	—/11 795
Site index = 15 m					
4%	—/2 250	—/1 750	—/1 250	—/750	—/250
3%	—/4 148	—/3 641	—/3 141	—/2 641	—/2 141
2%	8 661/8 623	8 129/8 123	—/7 623	—/7 123	—/6 623
1%	24 510/23 646	23 808/23 146	23 129/22 646	22 495/22 146	22 510/21 646
Site index = 18 m					
4%	3 238/3 233	2 733/2 733	—/1 731	—/1 731	—/1 231
3%	5 677/5 638	5 150/5 138	—/4 638	—/4 138	—/3 638
2%	11 374/11 189	10 817/10 689	10 266/10 189	9 715/9 689	9 192/9 189
1%	30 650/28 902	29 878/28 402	29 118/27 902	28 390/27 402	27 687/26 902

Note: All values (€·ha⁻¹) are given as CC/CCF; if there is no value for CC, then the CC solution does not exist. Above (below) the dividing line CCF (CC) is optimal.

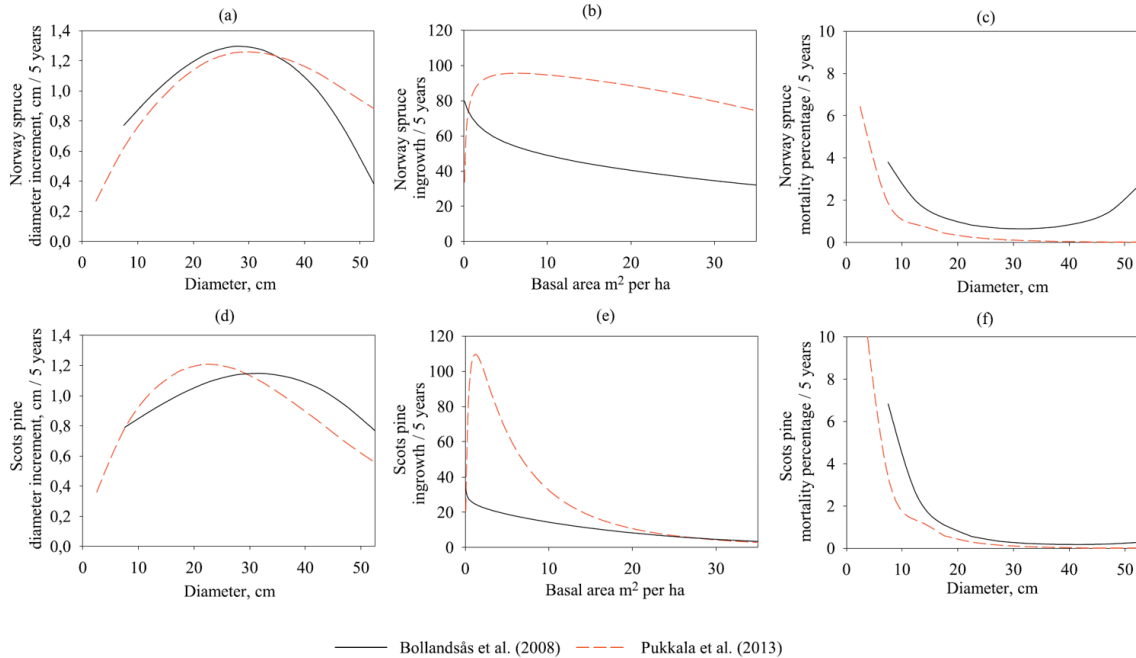
*Artificial regeneration not optimal.

Taulukon 2 tuloksia laskettaessa on 15–25 vuoden ikäisen puuston taimikonhoidon jälkeinen puiden määrä 1 750 puuta hehtaarilla kokoluokassa 7,5 cm. Tämä vastaa Tapion metsänhoidon ohjeita (2006) ja Niinimäen ym. (2013) tutkimusta, jossa puiden määrää taimikonhoidon jälkeen on optimoitu. Puiden määrän optimointi taimikonhoidon jälkeen, kun puuston kasvumalli perustuu Bollandsásin ym. (2008) malliin, tuottaisi tuloksen, jossa puiden määrä ja puuston jatkokehitys tulevat epärealistisen suuriksi. Tämä johtuu ilmeisesti siitä, että Bollandsás ym. (2008) mallin taustalla olevassa aineistossa ei ole ollut riittävästi vaihtelua, jotta malli pystyisi realistisesti kuvaamaan puuston alkuvaiheen kehitystä ja puuston itseharvenemista, jos puiden määrä aluksi on suuri. Kun puiden määräksi taimikonhoidon jälkeen oletettiin 2 250 puuta hehtaarilla, parani jaksollisen ratkaisun kannattavuus huomattavasti verrattuna jatkuvapeitteiseen, ollen kannattavin kaikilla koroilla ja uudistamiskustannusten tasoilla parhaalla kasvupaikalla ($H_{40}=17m$) ja keskimääräisellä ja huonoimmalla kun korko on alle 2–3 % (uudistamiskustannukset 1 000–2 000 euroa hehtaarilta)⁴. Näissä jaksollisissa ratkaisuisa optimoidut harvennukset ovat yläharvennuksia samoin kuin jatkuvapeitteisissä ratkaisuisa, ja luontaisesti syntyneitä taimia hyödynnetään samoin kuin istutettuja. Tämä ei vastaa sellaista vakiintunutta metsänhoidon ratkaisua, joka perustuu alaharvennuksiin ja luontaisesti syntyneiden taimien raivaukseen ennen jokaista hakkuuta. Alaharvennukset alentavat metsänhoidon taloudellista tulosta voimakkaasti mutta tätä ei Tahvonon ja Rämö (2016) tutkimuksessa tarkasteltu. Sen sijaan ilmeni, että jos luontaisesti syntyvät taimet poistetaan ns. ennakkoraivauksena ennen jokaista puunkorjuuta (ilman kustannuksia), on 2 250 istutettuun taimeen hehtaaria kohti perustuva jaksollinen ratkaisu jatkuvapeitteistä kannattavampi ainoastaan parhaalla kasvupaikalla, jos lisäksi korkokanta on alle 1 % ja uudistamiskustannukset ovat alle 1 500 euroa hehtaarilta.

Lisäksi tutkimuksessa (Tahvonon ja Rämö 2016) ilmenee, että vaikka jaksollinen ratkaisu olisi optimaalinen, kun alkutilana on paljas maa, voi olla optimaalista hoitaa metsää jatkuvapeitteisenä, jos alkutila on heterogeeninen. Edelleen numeeriset esimerkit osoittavat, että vaikka jatkuvapeitteinen ratkaisu olisi optimaalinen kun alkutila

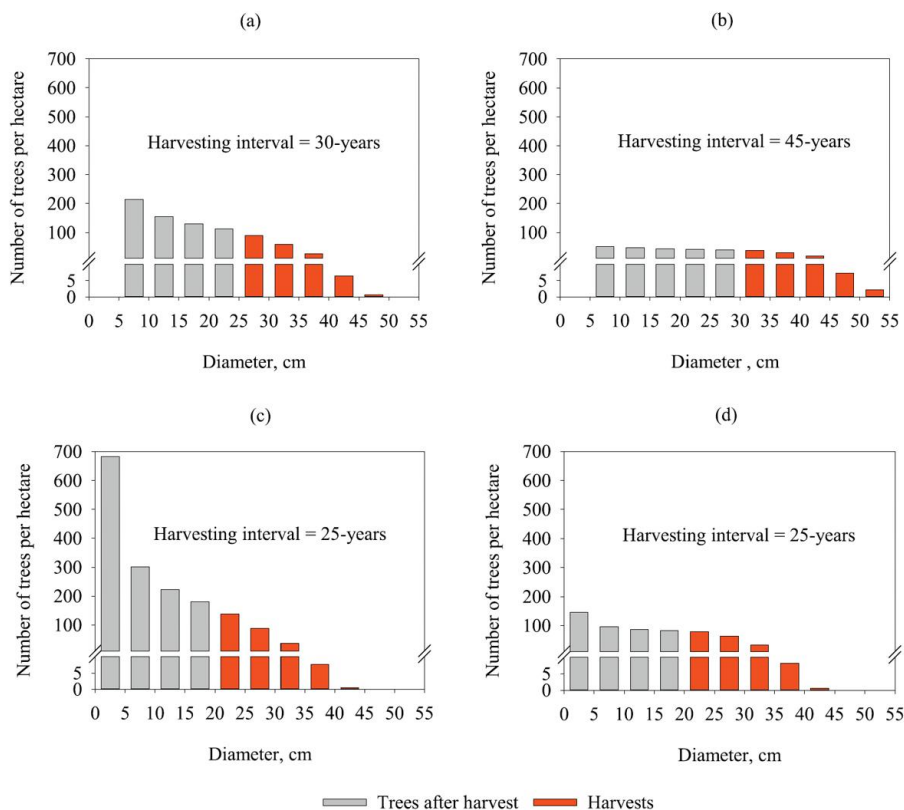
⁴ Suuremman taimimäärän suurempia istutuskustannuksia ei kuitenkaan huomioitu.

on paljas maa, voi päätehakkuu olla aluksi kannattava, jos puiden kokoluokkajakauma on painottunut kookkaisiin puihin ja puita ei ole pienissä kokoluokissa.



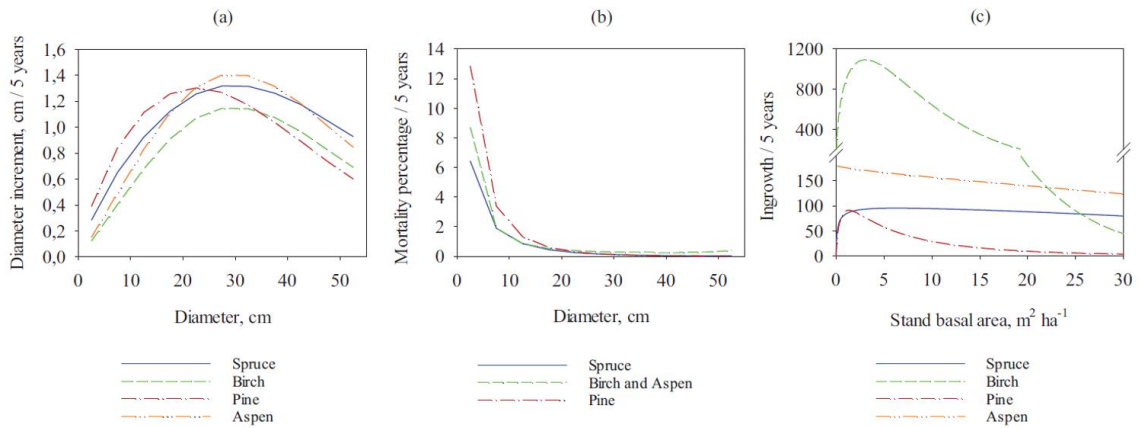
Kuva 14. Kasvumalleja optimoidun metsänhoidon selvittämiseksi. Kuvaajissa a) ja d) läpimitan kasvu, b) ja e) kynnyskasvu, c) ja f) kuolleisuus kuuselle ja männylle Bollandssin ym. (2008) ja Pukkalan ym. (2013) mallien mukaan. Kasvupaikalla valtuuston korkeus on 11 metriä kun puuston ikä on 40 vuotta. (Kuvan selitteet: Norway spruce = metsäkuusi, Scots pine = metsämänty, diameter increment = läpimitan kasvu, ingrowth = kynnyskasvu, mortality percentage = kuolleisuus prosentteina, diameter = läpimitta, basal area = pohjapinta-ala.) Lähde: Parkatti ym. (2019).

Parkatti ym. (2019) vertaavat Bollandssin ym. (2008) ja Pukkalan (2013) kasvumalleilla optimoitua metsänhoitoa sekä männylle että kuuselle. Näillä kasvumalleilla on huomattavia eroja erityisesti luontaisen uudistumisen ja kuolevuuden välillä (kuva 14), vaikka voisi odottaa, että puuston kasvuolosuhteet Norjassa vastaavat varsin hyvin suomalaisia. Tutkimuksen taloudellinen malli ja optimoinnin asetelma ovat samoja kuin tutkimuksessa Tahvonen ja Rämö (2016). Sekä Bollandssin ym. (2008) että Pukkalan ym. (2013) malleihin perustuvan optimoinnin mukaan kuutiotuotos maksimoituu jaksollisella ratkaisulla lukuun ottamatta kuivahkon kankaan kuusipuustoa, jossa Pukkalan ym. (2013) malliin perustuva optimointi tuottaa jatkuvapeitteisen ratkaisun. Kun tavoitteeksi asetetaan nettokantorahatulojen maksimointi, Pukkalan ym. (2013) malliin perustuva optimointi tuottaa kuuselle jatkuvapeitteisen ratkaisun kaikilla kasvupaikoilla korosta riippumatta, vaikka keinollinen uudistaminen olisi ilmaista. Tämä Bollandssin ym. (2008) malliin perustuvasta optimoinnista poikkeava tulos (taulukko 2) on seurausta korkeammasta luontaisen uudistumisen tasosta (kuva 13). Pukkalan ym. (2013) malliin perustuvissa ratkaisuissa puiden määrä on suuri, puiden koko pieni ja hakkuiden väli lyhyt verrattuna Bollandssin ym. (2008) malliin perustuvaan optimointiin (kuva 15). Bollandssin ym. (2008) mallin perusteella jatkuvapeitteiset ratkaisut sopivat männylle oleellisesti huonommin kuin kuuselle. Tästä poiketen Pukkalan ym. (2013) mallia sovellettaessa jatkuvapeitteinen ratkaisu on kannattavin myös männylle esimerkiksi, kun korko on 3 %, vaikka uudistamiskustannuksia ei olisi (VT eli kuivahko kangas). Tässä ratkaisussa puuston tilavuus on tasapainotilassa kuitenkin epärealistisen alhainen (noin 10–70 m³). Vastaavasti kuin kuusen kohdalla, ero selittyy pääasiassa Pukkalan ym. (2013) mallin suuremmalla luontaisella uudistumisella.



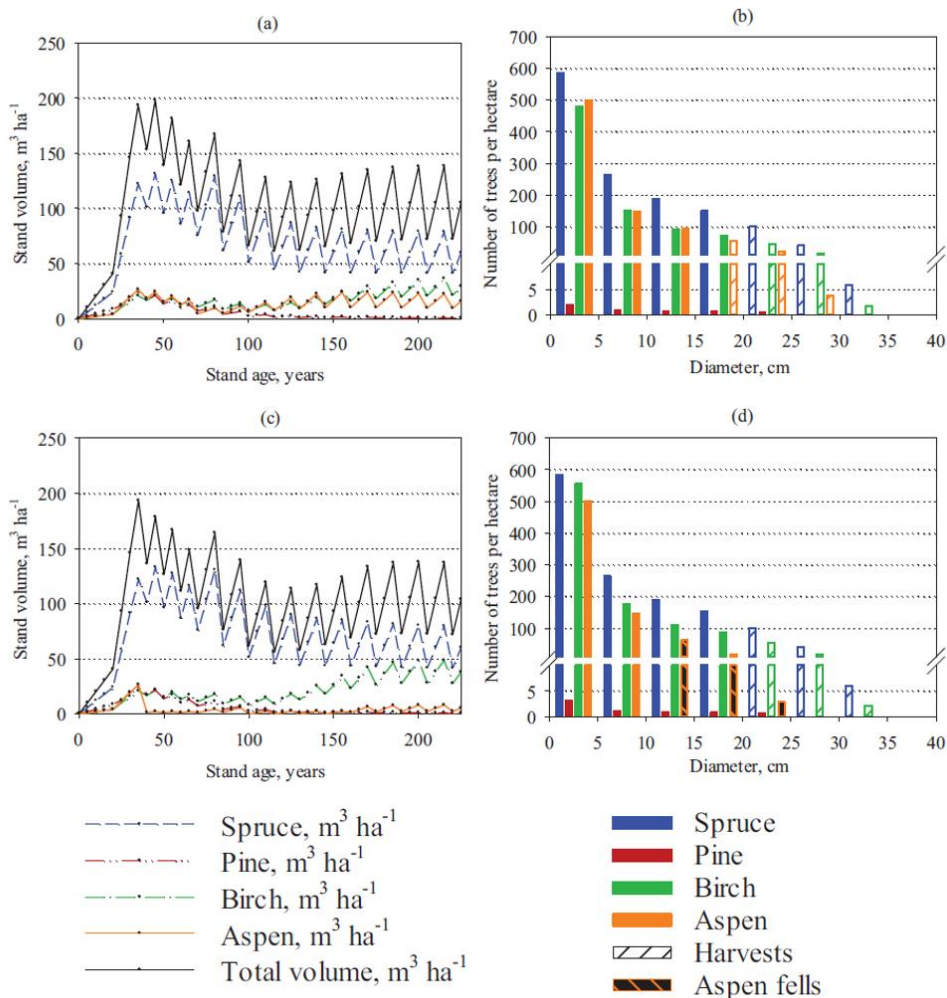
Kuva 15. Optimaalinen puuston rakenne tasapainoratkaisussa 1 %:n korolla. Kuvaajassa a) kuuselle ja b) männylle laskettuna Bollandsåsin ym. (2008) mallilla ja c) kuuselle ja d) männylle laskettuna Pukkalan ym. (2013) mallilla. Pystyakselilla on puiden lukumäärä hehtaarilla (number of trees per hectare) ja vaaka-akselilla on läpimitta (diameter), (Kuvan selitteet: harvesting interval = hakkuiden ajallinen tiheys, trees after harvests = hakkaamatta jätetyt puut, harvests = hakatut puut.) Lähde: Parkatti ym. 2019.

Parkatti ja Tahvonen (2020) tarkastelevat kuusta, mäntyä, koivua ja haapaa sisältävää sekametsää, jonka kehitys perustetaan Pukkalan ym. (2013) kasvumalliin. Optimointiin sisällytetään harvennusten ajoitus, harvennusten intensiteetti, niiden kohdistuminen eri kokoluokkiin ja puulajeihin sekä lisäksi optimaalinen valinta jaksollisen ja jatkuvapeitteisen ratkaisun välillä. Rungon läpimitan kasvu, kuolleisuus ja erityisesti kynnyskasvu vaihtelevat puulajeittain (kuva 16).



Kuva 16. Sekametsän kehitys Pukkalan ym. (2013) kasvumallin mukaan. Kuvaajassa a) läpimitan kasvu (diameter increment), b) kuolleisuus (mortality percentage), c) kynnyskasvu (ingrowth) eri puulajeille Pukkalan ym. (2013) ja Pukkalan (2011) (koivu) mukaan. (Kuvan selitteet: diameter = läpimitta, stand basal area = puuston pohjapinta-ala, spruce = kuusi, birch = koivu, pine = mänty, aspen = haapa.) Lähde: Parkatti ja Tahvonon (2020).

Tutkimuksessa kasvupaikaksi valitaan mustikkatyyppin metsä (MT) Keski-Suomessa (lämpöarvo 1 100 d.d.), joka uudistetaan kuuselle. Keinollisen uudistamisen lisäksi oletetaan ensimmäisen 20 vuoden aikana luontaisen uudistumisen seurauksena olevan mahdollista taimikonhoidon yhteydessä eliminoida luontaisesti syntyneet puulajit (koivu, mänty, haapa) tai vaihtoehtoisesti jättää jokin kombinaatio näistä lajeista jäljelle (250 puuta hehtaarilla puulajia kohti) istutettujen kuusten lisäksi (1 750 puuta hehtaarilla). Pukkalan ym. (2013) mallin mukaan luontaisesti kehittyvä, edellä kuvatut puulajit sisältävä sekametsä päättyy aina kuusivaltaiseksi puustoksi, jossa muiden puulajien määrä on pieni. Puuntuotannon optimointi muuttaa tätä kehitystä merkittävästi, koska luontaisen uudistamisen ylläpitämiseksi puuston tiheys pidetään alhaisempana, jonka seurauksena myös muut puulajit pystyvät uudistumaan. Tutkimuksessa tarkastellaan 12 puulajikombinaatiota, ja jatkuvapeitteinen ratkaisu osoittautuu optimaaliseksi lukuun ottamatta 1 % korkoa ja keinollisen uudistuskustannusten epärealistisen alhaista tasoa (< 300 euroa hehtaarilta). Kuusi/koivu-kombinaatiossa koivun osuus tasapainoratkaisussa on 40 % ja kuusen osuus kaikki puulajit sisältävän kombinaation ratkaisussa 58 %. Vastaavasti männyn osuus on heikon luontaisen uudistumisen seurauksena häviävän pieni (kuva 17). Kaikissa usean puulajin kombinaatioissa puuston hakkuiden jälkeinen pohjapinta-ala ylittää lainsäädännön minimivaatimuksen 9 m². Puuston pitäminen yksilajisena kuusikkona ei osoittaudu taloudellisesti perustelluksi, vaikka luontaisesti syntyvien puiden poistolle ei laskettu kustannuksia. Korkeimmat tasapainoratkaisun nettotulot syntyvät kuusi/koivu- ja kuusi/mänty/koivu-sekapuustoilla.



Kuva 17. Puustojen tilavuuksien optimoitu kehitys. Kuvaajissa a) ja b) puuston rakenteen tasapainoratkaisu, kun haavalla on kaupallinen arvo ja c) sekä d) kun haavalla ei ole kaupallista arvoa. Korko on 3 %. Pystyakselilla on kuvissa a) ja c) puuston tilavuus hehtaarilla (stand volume), ja kuvissa b) ja d) puiden lukumäärä hehtaarilla (number of trees per hectare). Vaakakselilla on kuvissa a) ja c) puuston ikä, ja kuvissa b) ja d) läpimitta senttimetreinä. (Kuvan selitteet: spruce = kuusi, pine = mänty, birch = koivu, aspen = haapa, total volume = kokonaistilavuus, harvests = hakatatut puut, aspen fells = kaadetut haavat.) Lähde: Parkatti ja Tahvonen 2020.

Hakkuissa kaadetaan rinnankorkeuslähimitaltaan yli 20 cm puut 15 vuoden välein (Parkatti ja Tahvonen 2020). Tämä seuraa siitä, että tämä puun läpimitta riittää tukkikokoisen puun tuotokseen. Ongelmana tässä on, ettei Pukkala ym. (2013) malli huomioi puiden koon vaikutusta luontaiseen uudistumiseen. Kuitenkin siemen- tuotannon ja puiden koon välillä saattaa olla positiivinen riippuvuus (Nygren ym. 2017). Kun optimointiin lisättiin vaatimus yli 20 cm lähimitaltaan olevien kuusten säilyttämisestä hakkuissa, voitiin todeta, että 15 puun säilyttäminen hehtaaria kohti alensi tasapainoratkaisun nettotuottoja 3 532 eurosta 3 511 euroon ja 60 puun säilyttäminen 3 467 euroon, eli kustannukset hehtaarilta ovat varsin alhaisia.

Jos haavalla ei ole kantohintaa (eikä mallissa ole luonnon monimuotoisuustavoitteita), haavat kaadetaan metsään varjostamasta puita, jotka tuottavat kantorahatuloja (kuva 17). Jatkuvapuiteisyyteen perustuvaa metsänhoitoa on perinteisesti kritisoitu "take the best, leave the worst" -puunkorjuuksi, jonka seurauksena metsän valtaavat kaupallisesti vähäarvoiset puuyksilöt ja puulajit. Tämän selventämiseksi tutkimuksessa havainnollistettiin, että haapojen jättäminen kokonaan hakkuiden ulkopuolelle, samalla kun muita puulajeja hyödynnettiin optimaalisesti, johti kehitykseen jossa hakkuutulot alenivat kohti nollaa ja haavasta tuli ajan



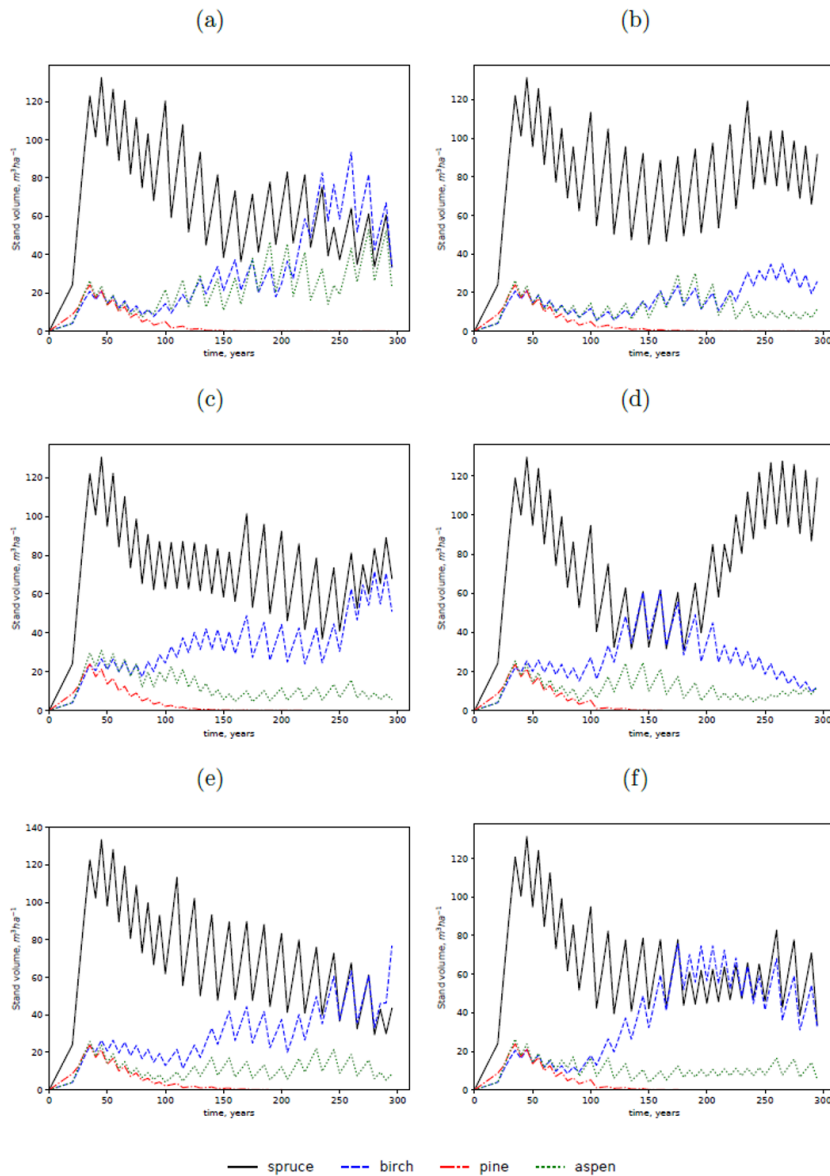
kuluessa valtapuu. Kuvan 17 ratkaisut osoittavat, että puuntuotannon taloudellinen optimointi ei tällaista kehitystä tuota.

Kun Pukkalan ym. (2013) kasvumalliin perustuvia tuloksia verrattiin Bollandsåsin ym. (2008) malliin perustuviin tuloksiin havaittiin, että edellinen korostaa jatkuvapeitteisten ratkaisujen kannattavuutta.

Yksi edellä kuvatuissa tutkimuksissa sovellettuun sekalukuoptimointiin liittyvä epäkohta on optimointialgoritmin hitaus. Neljän puulajin jatkuvapeitteisen ratkaisun laskeminen kestää noin viikon. Toinen epäkohta on, ettei ole täyttä varmuutta raportoidun ratkaisun globaalista optimaalisuudesta. Kolmas mallien epäkohta on, että ne ovat deterministisiä eivätkä huomioi puuston kasvuun ja luontaiseen uudistamiseen liittyvää ennustamatonta ajallista vaihtelua eivätkä äkillisiin metsätuhoihin liittyviä riskejä. On kuitenkin huomattava, että matemaattisesti johdonmukaisia ratkaisuja ei ole kansainvälisessä tutkimuksessa toistaiseksi esitetty harvennukset sisältäville yksityiskohtaisille stokastisille tai äkillisen tuhoriskin sisältäville malleille.

Näitä epäkohtia pyritään ratkaisemaan soveltamalla keinoälyyn ja koneoppimiseen perustuvaa optimointia (Malo ym. 2021). Vahvistusoppimiseen perustuvat menetelmät (englanniksi reinforcement learning, Sutton ja Barto 2018) hyödyntävät optimiohjausteoriaa (dynaamista optimointia), tilastotiedettä ja neurotieteitä. Vahvistusoppimisen historia on eläinten käyttäytymisen tutkimuksessa (Thorndike 1911) ja siihen perustuvia menetelmiä on sovellettu menestyksellisesti esimerkiksi robotiikassa, peleissä (shakki ja go) ja taloustieteessä, ja ne sopivat erityisesti kun tila- ja ohjausmuuttujien määrä on suuri (paljon puuston kokoluokkia, puulajeja ja hakkuuvaihtoehtoja). Luonnonvarojen käytön luonnonsuojelun sovelluksia ei ole juurikaan vielä julkaistu (Lapeyrolerie ym. 2021).

Malon ym. (2021) lähtökohtana on neljän puulajin optimointimalli (Parkatti ja Tahvonen 2020), johon sisällytettiin stokastinen metsän kasvu ja luontainen uudistuminen (perustuen Pukkalan ym. 2013 mallin estimointituloksiin) sekä äkillinen metsätuho (metsäpalo, myrskytuho, hyönteistuho jne). Deterministisen malliversion laskenta vahvistusoppimisalgoritmilla tuottaa (kuudessa minuutissa) ratkaisun, jossa tavoitefunktion arvo on euron tarkkuudella sama kuin täysin eri optimointimetoodeilla tutkimuksessa Parkatti ja Tahvonen (2020) löydetty ratkaisu. Tämä tukee sitä, että esitetyt ratkaisut ovat oikeita (globaaleja) optimiratkaisuja. Stokastinen puuston kasvu ja luontainen uudistuminen lisäävät puulajivaihtelua (kuva 18), ja kuusen heikompi luontainen uudistuminen voi aiheuttaa koivun runsastumisen väliaikaisesti pääpuulajiksi. Puuston kasvun ja luontaisen uudistumisen stokastisuudelle ei ollut vaikutusta valintaan jatkuvapeitteisten ja jaksollisen ratkaisujen välillä.



Kuva 18. Esimerkkejä optimiratkaisuista, kun metsän kasvu ja luontainen uudistuminen ovat stokastisia. Sekametsä Keski-Suomessa, korko on 3 %. Puulajisuhteiden muutoksia kuvataan suhteessa aikaan (vuosia) ja puuston tilavuuteen hehtaaria kohden. (Kuvan selitteet: stand volume = puuston yhteistilavuus metsikkötasolla, spruce = kuusi, birch = koivu, pine = mänty, aspen = haapa.) Lähde: Malo ym. 2021.

Aikaisemmassa tutkimuksessa äkillisen metsätuhoriskin on osoitettu vaikuttavan optimiratkaisuun yksinkertaisessa mallissa samoin kuin koron kasvattaminen (Reed 1984). Aikaisemmissa malleissa, joissa ei ole ollut mahdollisuutta jatkuvapeitteiseen ratkaisuun, metsätuhoon riski on merkinnyt lyhyempää kiertoaikaa. Yleisemmässä mallissa (Malo ym. 2021), johon sisältyy jatkuvapeitteisen ratkaisun mahdollisuus, korkeampi korko ja metsätuhoon riski lisäävät jatkuvapeitteisen ratkaisun kannattavuutta verrattuna jaksolliseen, sen sijaan että vaikutus olisi optimikiertoajan lyheneminen. Tämän seurauksena metsätuhoriski tuottaa puhtaasti taloudellisen perustelun lisätä jatkuvapeitteisenä hoidettavan metsän pinta-alaa.



4.4 Luonnon monimuotoisuus ja muut *in situ* -arvot

Metsävarojen taloudellisessa tutkimuksessa usein sovelletun oletuksen mukaan puuston *in situ* -arvo ilmaistaan funktiona puuston iästä (Hartman 1976). Yksinkertaisimmassa optimikiertoaikamallissa (kuva 1) tämä on ainoa mahdollisuus, koska puuston ikä tai tilavuus on ainoa metsän tilaa kuvaava muuttuja. Wikström ja Eriksson (2000) pyrkivät etenemään tästä yksinkertaisesta asetelmasta soveltamalla kokoluokkarakenteista mallia ja kuvaamalla luonnon monimuotoisuutta Shannon-monimuotoisuusindeksillä, mutta rajoittuvat yhden kiertoajan päätehakkuumalliin.⁵ Tahvonen ym. (2019) kuvaa puustoa neljän puulajin kokoluokkarakenteisella mallilla (Bollandsås ym. 2008), ja ratkaisee optimointiongelman edellä kuvatussa yleisessä mallikehikossa (Tahvonen ja Rämö 2016). Puuntuotannon lisäksi mallin tavoitteisiin lisättiin ekosysteemipalvelut, joiden tason oletettiin olevan sidoksissa puuston monimuotoisuuteen, jota kuvattiin Simpson-monimuotoisuusindeksillä. Indeksillä saa sitä suuremman arvon, mitä tasaisemmin yksilöt ovat jakautuneet yli mahdollisimman suuren lajimäärän. "Lajeiksi" oletettiin puulajien lisäksi puiden eri kokoluokat, tavoitteena kuvata sekä lajien välistä että lajien sisäistä monimuotoisuutta. Tutkimuksessa ei yritetty arvioida luonnon monimuotoisuuden (ekosysteemipalveluiden) taloudellista arvoa. Tämän sijaan tutkittiin, kuinka ekosysteemipalveluiden eri arvostustasot muuttavat taloudellisesti optimoidun metsänhoidon sisältöä, ja kuinka erilaiset metsänhoidon ratkaisut vaikuttavat Simpson-indeksin arvoon.

Kun tavoitteena oli pelkkä nettokantorahatulojen maksimointi, Simpson-indeksi sai suuremman arvon jatkuva-
peitteisissä ratkaisuissa verrattuna jaksollisiin, koska jälkimmäisissä ratkaisuissa keinollisen uudistamisen jälkeinen ajanjakso on lajien sisäisen vaihtelun kannalta niukka, ja tämä vaihe puuttuu jatkuvapeitteisistä ratkaisuista. Tämän seurauksena ekosysteemipalveluiden lisääminen tavoitteisiin lisäsi jatkuvapeitteisen ratkaisun paremmuutta verrattuna jaksolliseen. Ekosysteemipalveluiden sisällyttäminen optimoinnin tavoitteisiin pidentäsi tasapainoratkaisun hakkuuvälin 15 vuodesta 20 vuoteen, kasvatti hakkaamatta jätettävien puuyksilöiden kokoa ja puuston kokonaistilavuutta, ja lisäsi koivun ja muiden lehtipuiden osuutta. Muut lehtipuut poistettiin hakkuissa, jos ekosysteemipalveluille ei annettu arvoa. Koska Bollandsåsin ym. (2008) mallin mukaan puuston luontainen kehitys johtaa kuusen dominoimaan puustoon jossa muiden puulajien osuus on mitätön (ilman ulkoisia häiriöitä), Simpson-indeksi sai suuremman arvon jatkuvapeitteisissä puuntuotannollisissa ratkaisuissa verrattuna koskemattomana kehittyviin, kuusivaltaisiksi muuttuviin metsiin. Kustannukset harvennusten käyttämisestä puulajikoostumuksen ja puulajien sisäisen monimuotoisuuden lisäämiseksi osoittautuivat jatkuvapeitteisissä ratkaisuissa alhaisiksi.

4.5 Hiilinielut

Hiilinielujen ja -varastojen merkitys metsän optimoituun käsittelyyn on monitahoinen kysymys, joka ei selviä vain vetoamalla johonkin osatekijään kuten metsän kasvuun, hiilivarastoon kasvavassa puustossa, hiilivarastoon puutuotteissa tai metsäbiomassan fossiilisten polttoaineiden substituutioon. Yksittäisiin osatekijöihin kohdistuvan tarkastelun sijaan hiilen sidontaa on arvioitava systeemisellä kokonaisuutena. Taloudelliseen optimointiin perustuvia tutkimuksia on tehty tasaikäisenä hoidettaville jaksollisille metsille (kuva 4), mutta tutkimuksia, joissa otetaan huomioon mahdollisuus hoitaa metsää jatkuvapeitteisenä, on hyvin vähän.

Assmuth ja Tahvonen (2018) tarkastelevat kysymystä teoreettisesti mallilla, joka kattaa valinnan jaksollisten ja jatkuvapeitteisten ratkaisujen välillä, ja osoittavat, että hiilivirtojen ja -varastojen sisällyttäminen malliin voi joko lyhentää tai pidentää optimikiertoaikaa, ja joko lisätä tai vähentää jatkuvapeitteisen ratkaisun kannattavuutta suhteessa jaksolliseen. Hiilivirtojen ja -varastojen lisääminen tarkasteluun kuitenkin lisää jatkuvapeitteisenä hoidettavan metsän kannattavuutta suhteessa jaksolliseen, jos hiilen varastoituminen puutuotteisiin on lyhytaikaista.

⁵ Vastaavia tutkimuksia USA:n itäosien metsistä ovat esimerkiksi Rollin ym. (2005) ja Buongiorno ja Zhou (2015, 2017). Näissä tutkimuksissa tarkastelu rajoitetaan pelkästään jatkuvapeitteisiin ratkaisuihin. Metsäsuunnittelututkimuksessa Pukkalan (2016) tulosten mukaan jatkuvapeitteiset ratkaisut tuottivat tehokkaammin ekosysteemipalveluita, ja Pukkalan (2021) mukaan ne olivat tehokkaampia myös metsien taloudellisen, ekologisen, kulttuurisen ja sosiaalisen kestävyuden näkökulmasta.



Assmuth ym. (2018) tutkivat näitä kysymyksiä mallilla (Tahvonen ja Rämö 2016), johon lisättiin hiilivirrat ja varastot elävissä ja kuolleissa puissa, hakkuutähteissä ja puutuotteissa. Metsän kasvua kuvattiin Bollandsåsin ym. (2008) kasvumallilla.

Taulukko 3. Hiilivirtojen lisäämisen vaikutuksia kiertoaikoihin, hakkuuväleihin ja puustotunnuksiin. Vertailua on tehty 2 % ja 4 % korkokannalla. (Taulukon selitteet: interest rate = korko, carbon price = hiilen hinta, rotation age = kiertoaika, timing of first harvest (years from stand regeneration) = ensimmäisen hakkuun ajoitus (vuosia uudistamisesta), harvest interval at steady state (years) = hakkuiden ajallinen väli tasapainotilassa (vuosia), diameter of trees harvested at steady state = hakattujen puiden läpimitta tasapainotilassa, mean stand volume = kuvion keskitilavuus.) Lähde: Assmuth ym. (2018).

Interest rate (%)	Carbon price (€·tCO ₂ ⁻¹)	Rotation age (years)	Timing of first harvest (years from stand regeneration)	Harvest interval at steady state (years)	Diameters of trees harvested at steady state (cm)	Mean stand volume (m ³ ·ha ⁻¹)
2	0	130	45	—	—	138
	10	150	45	—	—	152
	20	170	50	—	—	174
	30	∞	50	25	32.5–52.5	182
	60	∞	50	20	37.5–52.5	224
4	0	∞	40	20	22.5–37.5	68
	10	∞	45	25	22.5–42.5	79
	20	∞	45	20	27.5–42.5	114
	30	∞	50	20	32.5–47.5	169
	60	∞	55	25	37.5–57.5	234

Hiilinielujen ja -varastojen sisällyttäminen optimoinnin tavoitteeksi yhdessä puuntuotannon kanssa toteutettiin vastaavasti kuin tasaikäisrakenteisissa malleissa, eli hiilivirroille asetettiin hinta ja nettomääräisen hiilensidonnän nykyarvo sisällytettiin optimoinnin tavoitteisiin (Assmuth ym. 2018). Tulokset laskettiin puhtaalle mustikkatyyppin (MT) kuusikolle Keski-Suomessa, ja niiden mukaan hiilen positiivinen hinta pidensi kiertoaikaa. Riittävän korkea hiilen hinta tuotti jatkuvapeitteisen ratkaisun, vaikka ratkaisu ilman hiilitavoitteiden huomiointia oli jaksollinen (taulukko 3). Jos ratkaisu oli jatkuvapeitteinen jo ilman hiilen sidonnän tavoitteita, hiilen lisääminen harvensi optimaalisen tasapainon hakkuuta, siirsi hakkuut suurempiin puiden kokoluokkiin ja kasvatti sidotun hiilen määrää elävässä puustossa sekä jossain määrin myös puutuotteissa. Korkeampi hiilen hinta kasvatti puuntuotoksen tukki/kuitu-suhdetta, ja alhaisen koron tapauksessa (1 %) kokonaistuotos per vuosi aleni. Kun korko oli korkeampi (4 %), kokonaistuotos aluksi kasvoi ja korkeammalla hiilen hinnalla aleni. Hiilen keskimääräinen varasto elävissä puissa hehtaaria kohti kasvoi tasolta 207 tCO₂ tasolle 335 tCO₂ kun hiilen hintaa nostettiin tasolta 0 tasolle 60 euroa/tCO₂ (korko 2 %), ja kun korko oli 4 %, varasto kasvoi tasolta 101 tCO₂ tasolle 349 tCO₂. Taulukosta 4 ilmenee, että vaikka hiilen korkeampi hinta aina kasvattaa hiilen määrää elävissä puissa, voi hiilen määrä alentua kuolleessa biomassassa ja puutuotteissa. Tämä on seurausta siitä, että korjuutähteiden ja puuntuotoksen määrä voi olla alhaisempi, kun hiilen hinta on korkea. On huomattava, että tutkimuksessa ei kuolleiden puiden ja korjuutähteiden hajoamista laskettu koko maaperän hiilivarastoa kuvaavan mallin avulla, eikä malliin sisällynyt karikesadanta tai juurien kautta tapahtuva maaperän hiilivarannon kasvu, vaikka nämä vaikuttavat hiilen kiertoön metsäekosysteemissä. Tutkimuksen jälkeen tehtyjen arvioiden mukaan näiden tekijöiden lisääminen näyttää pidentävän hakkuuvälejä ja kasvattavan korjattavien puiden kokoa.⁶

⁶ Vesa-Pekka Parkatti, henkilökohtainen tiedonanto 22.5.2021.



Taulukko 4. Hiilinielujen vaikutuksia tuotukseen ja hiilivarastoihin. Erilaisia vaikutuksia on kuvattu 2 % sekä 4 % korkokannalla. Hiilivarastojen ja tuotoksen lisäksi on näkyvissä hiilen hinta euroina hiilidioksiditonnia (tCO₂) kohti, sekä kiertoaika. (Taulukon selitteet: interest rate = korko, carbon price = hiilen hinta, rotation age = kiertoaika, mean annual sawlog/total yield = keskimääräinen vuotuinen tukki-/kokonaiskertymä, mean CO₂ storage = keskimääräinen CO₂-varasto, living trees = elävät puut, dead tree matter = lahoppuu, timber products = puutuotteet, discounted CO₂ sequestration = diskontattu CO₂-sidonta.) Lähde: Assmuth ym. 2018.

Interest rate (%)	Carbon price (€·tCO ₂ ⁻¹)	Rotation age (years)	Mean annual sawlog/total yield (m ³ ·ha ⁻¹ ·annum ⁻¹)	Mean CO ₂ storage in living trees (tCO ₂ ·ha ⁻¹)	Mean CO ₂ storage in dead tree matter (tCO ₂ ·ha ⁻¹)	Mean CO ₂ storage in timber products (tCO ₂ ·ha ⁻¹)	Discounted CO ₂ sequestration (tCO ₂ ·ha ⁻¹)
2	0	130	6.3/7.6	207	53	80	198
	10	150	6.5/7.6	227	53	81	213
	20	170	6.7/7.6	260	54	83	232
	30	∞	5.7/6.0	271	43	69	244
	60	∞	5.7/6.0	335	44	70	269
	4	0	∞	3.8/4.5	101	30	48
10		∞	4.0/4.7	118	32	51	115
20		∞	5.0/5.6	170	38	62	123
30		∞	5.7/6.1	252	43	70	133
60		∞	5.6/5.8	349	43	67	144

Assmuth ym. (2021) lisäsivät aiempaan puuntuotannon, hiilinielut ja -varastot sisältävään malliin puulajeina männyn, koivun ja ”muut lehtipuut”. Keskeisen tuloksen mukaan ”muut lehtipuut” oli optimaalista säilyttää osana elävien puiden hiilivarastoa, vaikka niille ei oletettu kantohintaa, ja vaikka ilman hiilitalvotteita ne poistettiin hakkuiden yhteydessä. Tämän perusteella systemaattinen hiilinielujen ja -varastojen kasvattaminen voi tukea myös puulajikoostumuksen monimuotoisuutta.

Parkatti ja Tahvonen (2021) sovelsivat Assmuthin ym. (2018) mallia Ylä-Lapin olosuhteisiin ja mäntypuustoihin. Malliin sisällytettiin myös arvio uudistushakkuiden (tässä siemenpuuhakkuut) vaikutuksesta metsän arvolla porolaitumena, perustuen tutkimuksiin Tahvonen ym. (2015) ja Pekkarinen ym. (2017). Lapin metsien hakkuiden taloudellisesta kannattavuudesta ei ole aikaisemmin julkaistu taloudellisia tutkimuksia, ja ongelmana on edelleen luotettavien metsän kasvua kuvaavien mallien saatavuus. Tutkimuksessa sovellettiin Bollandssåsin ym. (2008) mallia, joka kalibroitiin vastaamaan Luonnonvarakeskuksessa kehitetyn Motti-mallin ennusteita. Jaksollinen ratkaisu osoittautui optimaaliseksi, kun korko oli 1 % (kiertoaika >215 vuotta) ja jatkuvapeitteinen kun korko oli 3 %. Porotaloudelle aiheutuvien haittojen huomioimisen seurauksena jatkuvapeitteinen ratkaisu tuli optimaaliseksi myös, kun korko oli 1 %. Jäkälälaidunten tilaa koskevien tutkimusten perusteella männikön pohjapinta-alana noin 14 m² hehtaarella näyttäisi optimaaliselta porotalouden kannalta. Jaksollisten ratkaisujen ongelmana on, että siemenpuuhakkuiden jälkeen metsän tiheys on liian alhainen ja taimikon kasvuvaiheessa tiheys on liian korkea. Jatkuvapeitteinen ratkaisu voi ratkaista nämä ongelmat, ja metsän tiheys vastaa porotaloudelle edullista tilaa erityisesti ratkaisuisissa, joissa hiilen hinta on 20–40 euroa/tCO₂.

Tutkimuksessa arvioitiin myös Metsähallituksen ohjeiden mukaisten hakkuiden kannattavuutta ja vaikutuksia (Parkatti ja Tahvonen 2021). Tulosten perusteella ohjeisiin perustuva puunkorjuu tuottaa positiivisen nettotuloksen, jos alkutilana on hakkuukypsä puusto (esim. luontaisesti syntynyt vanha metsä). Ensimmäisen hakkuun jälkeinen puuntuotanto osoittautui kuitenkin kannattamattomaksi ja hakkuukypsä vanha metsä oli taloudellisesti perusteltua säilyttää koskemattomana ja pelkästään hiilivarastona ja porolaitumena, jos hiilen hinta oli yli 29 euroa/tCO₂ (korko 1 %) tai yli 14 euroa/tCO₂ (korko 3 %).

4.6 Suometsät

Mahdollisuudet soveltaa jatkuvapeitteisiä ratkaisuja suometsissä ovat herättäneet runsaasti mielenkiintoa, koska puuston ylläpito voi auttaa säilyttämään sekä puun kasvun että ilmastovaikutusten kannalta sopivan vedenkorkeuden ilman kallista suo-ojitusta. Optimointiin perustuvia taloudellisia tutkimuksia näistä kysymyksistä ei kuitenkaan ole ilmeisesti julkaistu. Juutinen ym. (2021) tutkivat eri vaihtoehtojen kannattavuutta soveltaen yksityiskohtaista prosessimallia, mutta ilman optimointia. Tulosten mukaan jatkuvapeitteiset ratkaisut havaittiin kannattavimmiksi, ja lisäksi ne näyttäisivät säilyttävän vedenkorkeuden toivotulla tasolla.



5 TALOUDELLISTEN TUTKIMUSTEN SYNTEESIÄ

5.1 Taloudellisesti johdonmukainen laskentakehikko

Yksinkertaisimmillaan taloudelliseksi esitetyissä tutkimuksissa vertaillaan kahta tai useampaa metsänhoidon vaihtoehtoa. Ennalta määriteltyjen vaihtoehtojen vertailu jättää kuitenkin avoimeksi sen, edustavatko vaihtoehdot parhaita esimerkkejä jatkuvapeitteisistä ja jaksollisista ratkaisuista. Yleisyyttä tavoittelevassa ja subjektiivisia valintoja (oletuksia) välttävässä asetelmassa vaihtoehtojen joukkoa ei etukäteen rajata ja optimiratkaisuja haetaan matemaattisilla optimointialgoritmeilla.

Puusto tai metsä on väistämättä ajassa kehittyvä systeemi (kuva 6), jonka käytön ja hoidon seurauksia ja optimointia on kuvattava dynaamisen optimoinnin menetelmin, välttämällä metsän kehitystä kuvaavaan ekologiseen malliin tehtyjä yksinkertaistuksia. Mahdollisimman yleisen dynaamisen optimointikehikon kehittämiseen on sisällytetty useita välivaiheita, joissa olleilla yksinkertaistuksilla on suuri vaikutus tuloksiin. Yleisimmässä optimointikehikossa puuston alkutila voidaan asettaa vapaasti, optimoinnin kohteena on jokaisen hakkuun ajoitus, intensiteetti, kohdistuminen puuston eri kokoluokkiin ja puulajeihin ja mahdollisuus hoitaa metsää jatkuvapeitteisenä tai jaksollisena ilman, että tarkastelulla on ajallista takarajaa. Tälle yleisyytasolle on jatkuvapeitteisenä hoidettavan puustojen kuvauksessa päästy vasta viimeisen vajaan vuosikymmenen aikana. Toistaiseksi yleisin mahdollinen optimointimetodi näyttäisi olevan koneoppimis-metodeihin kuuluva vahvistusoppiminen, jonka avulla voidaan ratkaista hyvin yksityiskohtaisia malleja, joissa lisäksi puiden kasvu, luontainen uudistuminen ja puun hinta ovat stokastisia ja malliin sisältyy äkillisen metsätuhon riski.

5.2 Jatkuvapeitteisenä hoidettavan metsän hakkuut

Optimiratkaisu on sidoksissa puuston alkutilaan, mutta poikkeuksetta ratkaisu etenee kohti identtisenä toistuvaa sykliä (tasapainotilaa), jossa hakkuut toistuvat tasaisin 10–30 vuoden väliajoin (kuvat 11, 13a ja 17a,c). Tyypillisesti hakkuissa korjataan puut, joiden läpimitta on vähintään 20–25 cm mitattaessa 130 cm korkeudelta. Lisäksi, jos tavoitteena on vain kantorahatulot, eliminoidaan puut, joilla ei ole kaupallista arvoa (kuvat 17c,d). Korjattavien puiden koon yläraja on sitä suurempi mitä pidempi on hakkuuväli, joka puolestaan on sidoksissa puiden kasvunopeuteen, korjuukustannuksiin ja korkokantaan. Kun tätä ratkaisua verrataan puiden kasvua koskeviin estimointituloksiin (kuvat 8a, 14a ja 16a), havaitaan, että huomattava osa puista korjataan ennen niiden kasvun suurinta tasoa. Tämä johtuu korosta ja puuston tiheyden negatiivisesta vaikutuksesta luontaiseen uudistumiseen ja jäljelle jäävien puiden kasvuun. 15 vuoden välein toistuvissa hakkuissa korjattava puumäärä vaihtelee välillä 70–90 m³ hehtaarilla ja nettokantorahatulot välillä 3 000–3 500 euroa hehtaarilta. Korjuukustannukset kuutiota kohden ovat korkeammat kuin jaksollisissa ratkaisuissa, mutta eroa pienentää se, että jatkuvapeitteisissä ratkaisuissa korjattavien puiden keskikoko on suurempi (Parkatti ja Tahvonen 2020).

5.3 Kannattavuus: jatkuvapeitteinen vs jaksollinen

Taloudellinen tutkimus ei tue käsitystä, että joko jatkuvapeitteiset tai jaksolliset ratkaisut johtaisivat aina parhaimpaan taloudelliseen tulokseen. Yleispätevimmässä kannattavuusvertailussa ratkaistaan aluksi optimaaliset hakkuut silloin kun alkutilana on paljas maa, jolloin keinollisen uudistamisen kustannukset ja korko lisäävät jatkuvapeitteisen ratkaisun kannattavuutta suhteessa jaksolliseen. Puun hinnan ja kasvupaikan puuntuottokyvyn vaikutus on päinvastainen. Nämä tulokset seuraavat siitä, että jatkuvapeitteisessä ratkaisussa hyödynnetään ilmaista luontaista uudistumista, verrattuna jaksollisen ratkaisun investointikustannuksia aiheuttavaan keinolliseen uudistamiseen. Realistisella uudistamiskustannusten tasolla 1 400–2 000 euroa hehtaarilta, koron taso 2–3 % tuottaa jatkuvapeitteiselle ratkaisulle paremman kannattavuuden verrattuna jaksolliseen. Etelä-Suomen rehevimmillä kasvupaikoilla jaksollisen ratkaisun suhteellinen kannattavuus kuitenkin paranee (taulukko 2). Nämä tulokset pätevät erityisesti kuuselle, mutta myös kuusivaltaisille sekametsille (Tahvonen ja Rämö 2016). Pukkala ym. (2013) ja Bollandsås ym. (2008) malleihin perustuva taloudellinen optimointi korostaa selvästi jaksollisen ratkaisun kannattavuutta kuusipuustoissa verrattuna mäntyihin.



Kun alkutila on puustoinen, on mahdollista korjata puita säilyttäen jatkuvapeitteisyys, tai tehdä päätehakkuu ja jatkaa joko jaksollisella tai jatkuvapeitteisellä ratkaisulla, riippuen kannattavuudesta. Vaikka jatkuva-peitteinen ratkaisu olisi optimaalinen silloin kun alkutila on paljas maa, voi silti olla kannattavinta tehdä aluksi yksi päätehakkuu. Tämä ratkaisu realisoituu, jos puuston alkutilassa on runsaasti kookkaita puita ja taimia ei ole. Korkea korko voi lisätä alussa tehtävän päätehakkuun kannattavuutta, vaikka se päätehakkuun jälkeen lisää jatkuvapeitteisen suhteellista kannattavuutta (Tahvonen ym. 2010, Pukkala 2016, Malo ym. 2021). Myös pitkän aikavälin optimaalinen valinta jaksollisen ja jatkuvapeitteisen ratkaisun välillä voi olla sidoksissa puuston alkutilaan: vaikka jaksollinen olisi optimaalinen, kun alkutilana on paljas maa, voi olla kannattavinta jatkaa metsän hoitoa jatkuvapeitteisenä, kun puusto on aluksi heterogeeninen (Tahvonen ja Rämö 2016).

Edellä kuvatussa kannattavuusvertailussa myös jaksollisen ratkaisun harvennukset ovat yläharvennuksia, ja luontaisesti syntyneitä taimia käytetään täysimääräisesti hyväksi, koska nämä tulevat väistämättä osaksi optimaalista ratkaisua. Metsänhoidon käytännöissä jaksollisessa ratkaisussa sovelletaan kuitenkin usein alaharvennuksia. Kun kannattavuusvertailu perustuu jaksolliseen ratkaisuun, jossa harvennukset olisivat alaharvennuksia, alenee jaksollisen ratkaisun kannattavuusarvio oleellisesti (Tahvonen ym. 2010).

5.4 Puuntuotanto eri vaihtoehdoissa

Optimointiin perustuvan tutkimuksen yhteydessä voidaan kysyä minkälainen puuntuotannollinen ratkaisu maksimoi puuntuotannon. Ne tutkimukset, joissa tätä kysymystä on tarkasteltu tuottavat tuloksen, jonka mukaan puuntuotanto maksimoituu yläharvennuksilla ja niitä seuraavalla päätehakkuulla ja keinollisella uudistamisella ainakin silloin, jos keinollinen uudistaminen tuottaa riittävän tiheän taimikon (Tahvonen ym. 2010, Tahvonen 2011). Kun maksimoidaan vain puuntuotantoa, ei optimoinnissa ole kustannuksia, hintoja tai korkoa. Tämän seurauksena ratkaisussa tehdään yläharvennuksia jokaisena periodina ("metsuri asuu metsässä"), eli systemaattinen kuutioiden maksimointi johtaa todellisuudelle vieraaseen ratkaisuun. Toinen vaihtoehto kuutiotuotoksen vertailuun on mahdollinen, kun jaksollinen ratkaisu on jatkuvapeitteistä ratkaisua kannattavampi. Näissä tapauksissa jaksollinen ratkaisu näyttää tuottavan suuremman kuutiotuotoksen kuin jatkuvapeitteinen (Tahvonen ja Rämö 2016).⁷

5.5 Luonnon monimuotoisuus, metsien muut *in situ* -arvot ja hiilinielut

Kun jatkuvapeitteinen ratkaisu optimoidaan tavoitteena mahdollisimman suuri nettokantorahatulojen nykyarvo, ei ole *a priori* takeita siitä, että ratkaisu olisi luonnon monimuotoisuuden ja metsien muiden *in situ* -arvojen kannalta parempi kuin jaksollinen. Kuitenkin, jos luonnon monimuotoisuutta arvioidaan monimuotoisuusindeksillä, näyttää selvältä, että jatkuvapeitteinen ratkaisu tuottaa metsikkötasolla suuremman monimuotoisuusindeksin arvon kuin jaksollinen (Tahvonen ym. 2019). Lisäksi luonnon monimuotoisuuden ottaminen osaksi metsänhoidon tavoitteita lisää jatkuvapeitteisen ratkaisun kilpailukykyä verrattuna jaksolliseen, koska monimuotoisuusindeksi saa alhaisia arvoja päätehakkuun jälkeisessä taimikkovaiheessa, jossa puulajien sisäinen monimuotoisuus on niukkaa.

Jatkuvapeitteisissä ratkaisuissa puuston tilavuus pidetään alhaisena (pohjapinta-ala alle 25 m²) luontaisen uudistumisen lisäämiseksi. Kuvista 8, 14, ja 16 voidaan päätellä, että tämän seurauksena luonnon monimuotoisuuden kannalta tärkeitä kuolleita puita ei ole riittävästi. Rämö ym. (2019) mukaan lahoppuuta voidaan lisätä hyödyntämällä kaupallisesti vähemmän arvokkaita lehtipuita. Jos halutaan säilyttää vähintään 40 m³ (20 m³) kuollutta puuainesta hehtaarilla, arvioi Rämö ym. (2019) tasapainossa saatavien kantorahatulojen alenavan 30 % (17 %). On epäselvää, voidaanko vastaava lahoppuun jatkumo säilyttää jaksollisissa avohakkuissa ja mikä olisi tämän vaikutus kannattavuuteen.

Luonnon monimuotoisuuden sekä metsien esteettisten ja muiden arvojen kannalta voi olla merkityksellistä säilyttää rinnankorkeuslähimitaltaan kookkaita puita, jotka pelkästään kantorahatuloja tavoittelevissa

⁷ Päinvastaisessa tapauksessa täsmällistä vertailua ei voi tehdä, koska paljaan maan arvo kasvaa kiertoajan funktiona ja optimaalista jaksollisen ratkaisun kiertoaikaa ei voi määrittellä (Tahvonen ja Rämö 2016).



ratkaisuissa yläharvennettaisiin. Parkatin ja Tahvosen (2019) mukaan 15–60 kookkaan puun säästämällä hehtaaria kohti on hakkuissa varsin pieni vaikutus puuston kasvuun ja nettokantorahatuloihin.⁸

Hiilinielujen ja -varastojen merkitys metsän optimoituun käsittelyyn on monitahoinen kysymys, joka ei selviä vain vetoamalla yksittäisiin osatekijöihin kuten metsän kasvuun, hiilivarastoon kasvavassa puustossa, hiilivarastoon puutuotteissa tai metsäbiomassan fossiilisten polttoaineiden substituutioon. Yksittäisiin osatekijöihin kohdistuvan tarkastelun sijaan hiilen sidontaa on arvioitava systeemisellä kokonaisuutena soveltamalla tällaiseen tarkasteluun sopivia metodeja⁹. Hiilinielut voidaan sisällyttää hakkuiden optimointiin olettamalla hiilidioksidipäästöille ja nieluille hinta (englanniksi social price of carbon), jonka voidaan tulkita kuvaavan päästöjen vähentämisen (raja)kustannuksia muilla talouden sektoreilla tai nettonieluille suunnattua tukea. Tähän lähtökohtaan perustuvia taloudellisia tutkimuksia on tehty runsaasti jaksollisena hoidettaville puustoille. Näiden tulosten mukaan hiilivirtojen sisällyttäminen optimointiin (puuntuotannon tavoitteiden lisäksi) pidentää kiertoaikaa ja lisää hiilen määrää metsässä sen sijaan, että pääpaino olisi fossiilisten polttoaineiden korvaamisessa biomassasta saatavalla energialla ja hiilivaraston kasvattamisella puutuotevarantoon (Pohjola ja Valsta 2007, Niinimäki ym., 2013, Pihlainen ym. 2014). Edelleen näyttää selvältä, että jos tavoitteena olisi pelkästään hiilinielujen maksimointi, olisi kustannustehokkainta luopua hakkuista kokonaan. Tästä seuraa, että mallissa, jossa voidaan optimoida valintaa jatkuvapeitteisten ja jaksollisten ratkaisujen välillä, hiilen hinnan kasvattaminen pidentää kiertoaikaa, lisää jatkuvapeitteisen ratkaisun kannattavuutta, ja jos hinta on riittävän korkea, puuntuotannosta puustotason mallissa¹⁰ luovutaan kokonaan (Parkatti ja Tahvonen 2021, Assmuth ym. 2018).

5.6 Kasvumallien merkitys

Lukuun ottamatta teoreettista tutkimusta, puuston kasvua koskevilla empiirisellä aineistolla estimoiduilla metsäekologisilla malleilla on suuri vaikutus taloudellisiin tuloksiin optimaalisista hakkuista ja kannattavuudesta. Jaksollisena hoidettavien metsien taloudellisessa tutkimuksessa on sovellettu kaikkia optimointiin soveltuvia metsäekologisia mallityyppejä, mukaan luettuna hyvin yksityiskohtaiset prosessimallit. Sopivien mallien puute on kuitenkin hidastanut jatkuvapeitteisten metsien monitieteistä tutkimusta.¹¹ Syynä tähän on ollut metsänhoidollisen tutkimuksen voimakas painottuminen koskemaan yhden puulajin metsiä, uudistushakkuita ja keinollista uudistamista. Jatkuvapeitteisenä hoidettavien metsien tutkimukseen sopivia, monipuolisia puustotason malleja on kuitenkin viime aikoina tullut lisää (Bollandsås ym. 2008, Pukkala ym. 2009, Tahvonen ym. 2010, Pukkala ym. 2011, 2013, Pukkala ym. 2021).

Kuvista 8, 14 ja 16 käy ilmi, että kasvumalleissa on suuria eroja, jotka näkyvät myös optimointituloksissa (Parkatti ym. 2019). Suurin epävarmuus on luontaisessa uudistumisessa. Käytetty kynnykasvumalli ilmaisee pienimpään puukokoluokkaan tulevien puiden määrän funktiona puuston tiheydestä (joissain tapauksissa myös puiden määrästä). Sen lisäksi, että kynnykasvu eroaa eri tutkimusten välillä, malli itsessään on ilmeisen voimakas yksinkertaistus, koska esimerkiksi luontainen uudistuminen saattaa olla sidoksissa myös puiden kokoon (Nygren ym. 2017).

Uusi Pukkalan ym. (2021) kasvumalli näyttää eroavan huomattavasti Bollandsåsin ym. (2008) ja Pukkalan ym. (2013) mallista, erityisesti läpimitan kasvun ja kynnykasvun osalta (kuva 19). Pukkalan¹² mukaan puun kasvussa olevat erot johtuvat eroista estimoinnissa käytetyn datan ajankohdissa. Uusimmassa mallissa näkyy ilmastonmuutoksen ja tyyppilaskeuman nopeuttama puiden kasvu. Malliin pohjautuvia taloudellisia tuloksia ei vielä ole ehditty julkaista, mutta käynnissä olevan tutkimuksen perusteella¹³ mäntypuustojen hoitaminen jatkuvapeitteisenä näyttää tulevan aikaisemmissa tutkimuksissa esitettyä kannattavammaksi, kun taas kuusen kohdalla ero on päinvastainen. Yleisemmin jatkuvapeitteinen ratkaisu näyttää edelleen kuusikolle

⁸ Metsäsuunnittelun tutkimuksessa Pukkala (2016, 2021) esittää tuloksia metsänhoidon vaihtoehtojen vaikutuksista monille metsien ei-puuntuotannollisille arvoille, jotka näyttävät toteutuvan jatkuvapeitteisissä paremmin kuin jaksollisissa vaihtoehtoissa.

⁹ Metsäsuunnittelututkimuksessa vastaavia kysymyksiä on tutkinut Pukkala (2014).

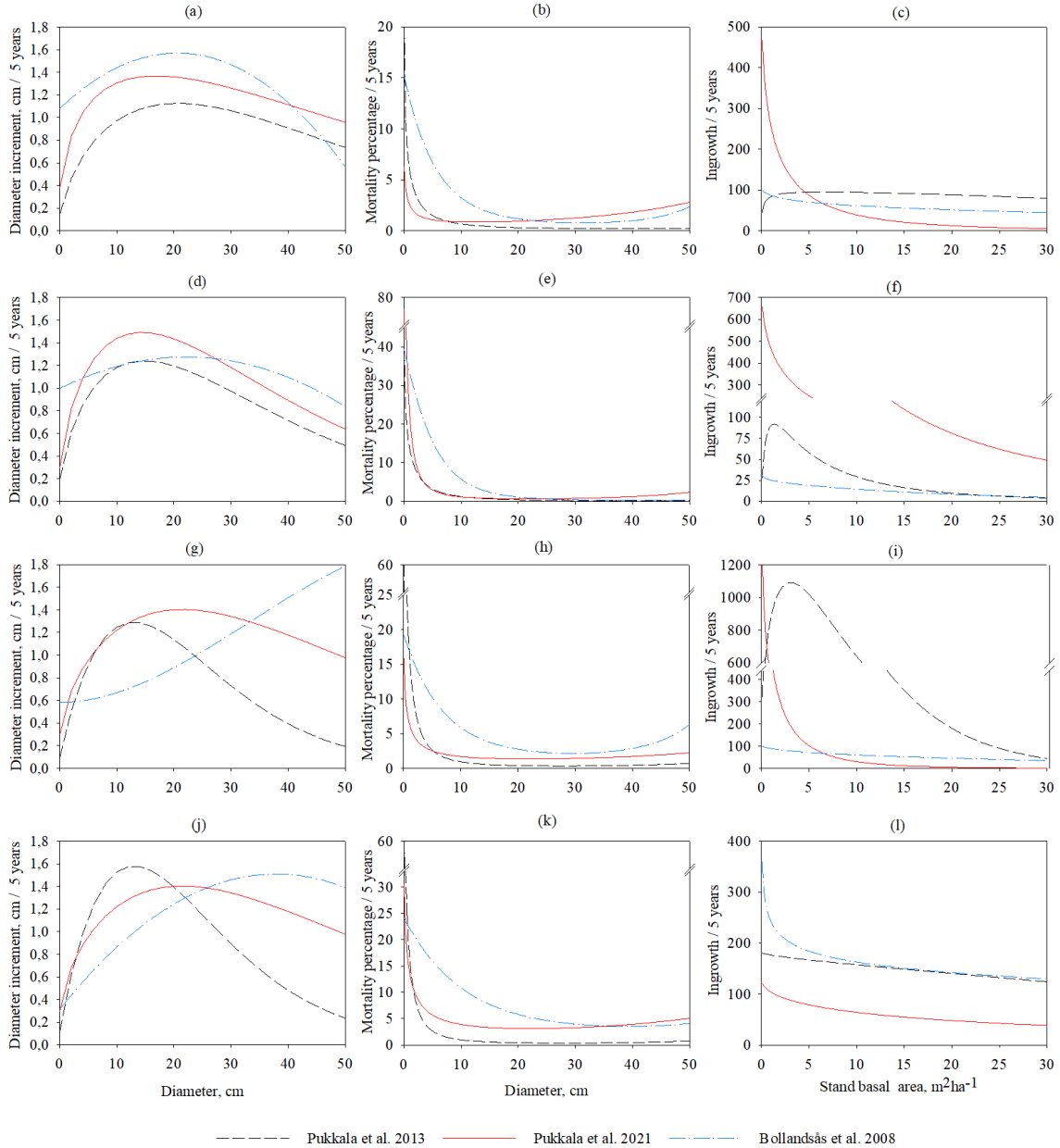
¹⁰ Markkinatason mallissa korkeasta hiilen hinnasta seuraa puun hinnan nousu ja vain osa metsämaasta siirtyy puuntuotannon ulkopuolelle pelkäsi hiilivarastoksi (Tahvonen ja Rautiainen 2017).

¹¹ Poikkeus luontaisen uudistumisen sisältävästä varhaisemmasta mallista on Kolström (1993).

¹² Timo Pukkala, henkilökohtainen tiedonanto 14.6.2021.

¹³ Nico Österberg, henkilökohtainen tiedonanto 8.6.2021.

kannattavimmalta, kun korko on yli 1–2 % ja kasvupaikkana on mustikkatyyppin (MT) metsä Keski-Suomessa, ja Etelä-Suomessa, kun korko on 3 % tai yli.



Kuva 19. Lämpimän kasvun, kuolleisuuden ja kynnykasvun vertailua kolmessa mallissa. Mallit ovat Pukkala ym. (2013), Pukkala ym. (2021) ja Bollandsås ym. (2008). Kuvaajissa a)–c) puulajina on kuusi, d)–f) mänty, g)–i) koivu ja j)–l) haapa. Puuston tila kasvu- ja kuolleisuusmalleissa: pohjapinta-ala on 25 m² ja suurempien puiden pohjapinta-ala 10 m². Lämpösusma on 1 100 d.d., kasvupaikkana mustikkatyyppi (MT) ja puulajin osuus 100 %. (Kuvan selitteet: diameter increment = läpimitan kasvu, mortality percentage = kuolleisuuden osuus, ingrowth = kynnykasvu, diameter = läpimitta, stand basal area = pohjapinta-ala.) Lähde: Österberg, 27.10.2021.

Lukuun ottamatta tutkimuksia Tahvonon ym. (2010), Pukkala ym. (2014) ja Pukkala (2016), yksittäisten puiden malli on taloudellisissa tutkimuksissa muunnettu kokoluokkarakenteiseksi matriisimalliksi metsäekologiassa hyvin tunnetulla muunnoksella (Bollandsås ym. 2008, Liang ja Picard, 2011, Picard ja Liang 2014). Muunnosta on sovellettu, koska nykyiset optimointialgoritmit eivät ole kyenneet ratkaisemaan yksittäisiin puihin



perustuvaa optimointimallia sen taloudellisesti yleisimmässä ja johdonmukaisessa muodossa. Getzin ja Haightin (1989) mukaan tällä muunnoksella ei ole oleellista vaikutusta tuloksiin. Kuitenkin Tahvosen (2011) ja Rämön ja Tahvosen (2014) tutkimusten mukaan muunnos näyttää liioittelevan puuston kasvua ja puuntuotannon taloudellista tulosta metsänhoidon vaihtoehdoista riippumatta. Tämä havainto saa vahvistusta käynnissä olevasta, vielä julkaisemattomasta vahvistusoppimisalgoritmiin perustuvasta laskennasta (vrt. Malo ym. 2021), jossa muunnosta ei tarvitse tehdä. Yksittäisiin puihin perustuvan mallin käyttö optimoinnissa näyttää jonkin verran parantavan jatkuvapeitteisten ratkaisujen kannattavuutta suhteessa jaksollisiin.

5.7 Tutkimuksen puutteita ja epävarmuuksia

Jatkuvapeitteisten puustojen suomalaisen aineistoon perustuvaa taloudellista tutkimusta on julkaistu noin vuosikymmenen ajan, mutta muuta pohjoismaista tutkimusta Suomen ulkopuolella on niukasti. Yhden keskeisen tuloksen mukaan klassinen taloudellinen kiertoaikamalli (kuva 1) on rajoittunut; yleisemmässä mallissa optimoidaan myös valinta jaksollisen ja jatkuvapeitteisen ratkaisun välillä. Tutkimuksen ongelmina on ollut sopivien ekologisten kasvumallien puute, niihin liittyvä epävarmuus, yksityiskohtaisten optimointimallien ratkaisemiseen liittyvät ongelmat ja monitieteisen tutkimuksen hidasteet. Empiirisistä koejärjestelyistä ja empiirisestä datasta estimoitujen mallien ominaisuuksien välillä saattaa olla ristiriitaisuuksia, joita ei ole pystytty tyhjentävästi selittämään (Hynynen 2019, Bianchi ym. 2020 vs. Bollandsås ym. 2008, Pukkala ym. 2013, 2021). Keskustelussa on lisäksi tullut esille kysymyksiä, jotka useimmissa malleissa ja tutkimuksissa on toistaiseksi sivuutettu. Yläharvennusten on esitetty aiheuttavan alaharvennuksia enemmän korjuuvaurioita, jotka vähentäisivät jatkuvapeitteisten ratkaisujen suhteellista kannattavuutta. On huomattava, että mahdollisimman kannattavat jaksolliset ratkaisut perustuvat kuitenkin myös yläharvennuksiin, ja näiden ratkaisujen rajoittaminen alaharvennuksiin alentaisi oleellisesti jaksollisten ratkaisujen kannattavuusarvioita. Tämä pitäisi myös ottaa huomioon keskusteltaessa korjuuvaurioiden vaikutuksista jatkuvapeitteisten ratkaisujen kannattavuuteen. Lisäksi eri tutkimukset korjuuvaurioiden tasosta vaihtelevat voimakkaasti (Jäghagen ja Lageson 1996, Modig ym. 2012, Pukkala ym. 2014, Siren ym. 2015, Nevalainen 2017). Tyvilahon ongelman merkityksestä käydään aktiivista keskustelua (Piri ja Valkonen 2013, Nevalainen 2017), mutta on epäselvää, onko ongelma lopulta suurempi jatkuvapeitteisissä metsissä kuin jaksollisesti kasvatetuissa metsissä.

Pukkala (2016) tarkastelee jaksollisissa ratkaisuissa käytettävissä olevien nopeakasvuisempien taimien vaikutusta jaksollisten ja jatkuvapeitteisten ratkaisujen keskinäiseen kannattavuuteen, ja saa tuloksen, jonka mukaan jalostettujen taimien 20 % nopeampi kasvu ei riitä muuttamaan kannattavuustuloksia jaksollisten ratkaisujen hyväksi muutoin kuin poikkeustapauksissa. Epäilemättä korjuuvaurioiden, tyvilahon ja jalostettujen taimien merkityksen selvittäminen edellyttää lisää tutkimusta.

Myös taloustieteellisestä näkökulmasta tutkimuksista puuttuu useita tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa vaihtoehtojen keskinäiseen kannattavuuteen. Jatkuvapeitteiset ratkaisut lisäävät tukkipuun ja vähentävät kuitupuun tuotantoa. Puustotason malleissa ei tästä seuraavia markkinatason vaikutuksia käsitellä ja hintojen reaktiot vaikuttavat siihen kuinka suuri osa puuntuotannosta voisi markkinatasapainossa lopulta olla peräisin eri vaihtoehdoista. Metsätalouteen liittyy hintoihin, korkoon, metsän kasvuun ja metsätuhoihin liittyviä riskejä, joista monet voivat korostua ilmastonmuutoksen edetessä. Kaikkia näitä ei ole vielä ehditty tutkia jatkuvapeitteisten ratkaisujen yhteydessä, mutta joidenkin jaksollisiin ratkaisuihin liittyvien riskinhajautustutkimusten perusteella riskien kaihtaminen lisää pienemmissä erissä suoritettujen hakkuiden kannattavuutta suhteessa uudistus-hakkuihin (Tahvonen ja Kallio 2006, Knoke ja Wurm 2006).

Tulonjakovaikutusten osalta on selvää, että puunostajien kannalta maksimaalinen kestävä hakkuutaso tuottaa suurimman puuntarjonnan ja alhaisimman mahdollisen puun hinnan, ja on siten teollisuudelle edullisinta metsien käytön politiikkaa. Alaharvennukset tuottavat lisäksi halpaa kuitupuuta. Metsänomistajien tulonmuodostuksen kannalta maksimaalisen kuutiotuotoksen tavoite yhdistettynä alaharvennuksiin ei ole edullinen, ja lisäksi se sulkee pois metsien hoidon jatkuvapeitteisinä. Kansantaloudellinen kannattavuus, jossa puun tuottajien ja ostajien yhteenlaskettu taloudellinen tulos saa suurimman mahdollisen arvon jää niin ikään toteutumatta. Jatkuvapeitteisenä hoidettavien metsien yleistymisen voi myös lisätä puun tarjontaa niiden metsänomistajien taholta, jotka eivät eri syistä ole halukkaita päätehakkuihin.



LÄHTEET

- Adams, D. M., & Ek, A. R. (1974). Optimizing the management of uneven-aged forest stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 4(3), 274–287.
- Artelys. (2021). <https://www.artelys.com/>
- Assmuth, A., & Tahvonen, O. (2018). Optimal carbon storage in even-and uneven-aged forestry. *Forest Policy and Economics*, 87, 93–100.
- Assmuth, A., Rämö, J., & Tahvonen, O. (2018). Economics of size-structured forestry with carbon storage. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(1), 11–22.
- Assmuth, A., Rämö, J., & Tahvonen, O. (2021). Optimal Carbon Storage in Mixed-Species Size-Structured Forests. *Environmental and Resource Economics*, 1–27.
- Begon, M., & Townsend, C. R. (2020). *Ecology: from individuals to ecosystems*. John Wiley & Sons.
- Bianchi, S., Huuskonen, S., Siipilehto, J., & Hynynen, J. (2020). Differences in tree growth of Norway spruce under rotation forestry and continuous cover forestry. *Forest Ecology and Management*, 458, 117689.
- Bollandsås, M., O., Buongiorno, J., & Gobakken, T. (2008). Predicting the growth of stands of trees of mixed species and size: A matrix model for Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(2), 167–178.
- Brazee, R. and Mendelson, R. (1988) Timber harvesting with fluctuating prices. *Forest Science*, 34 (2), 359–372.
- Buongiorno, J., & Zhou, M. (2015). Adaptive economic and ecological forest management under risk. *Forest Ecosystems*, 2(1), 1–15.
- Buongiorno, J., & Zhou, M. (2017). Multicriteria forest decisionmaking under risk with goal-programming Markov decision process models. *Forest Science*, 63(5), 474–484.
- Caswell, H. (2000). *Matrix population models* (Vol. 1). Sunderland, MA, USA: Sinauer.
- Chang, S. J. (1981). Determination of the optimal growing stock and cutting cycle for an uneven-aged stand. *Forest science*, 27(4), 739–744.
- Dasgupta, P. (2021). *The Economics of Biodiversity: the Dasgupta Review*. <https://www.gov.uk/government/publications/final-report-the-economics-of-biodiversity-the-dasgupta-review>.
- de Liocourt, F. 1898 De l'amenagement des sapinie`res. *Bulletin Trimestriel, Socie´te´ Forestie`re de Franche-Comte´ et Belfort*, Julliet. pp. 396–409.
- Faustmann, M. (1849). Berechnung des Werthes, welchen Waldboden, sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirthschaft besitzen [Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry]. *Allgemeine Fotst-und Jagd-Zeitung*, 25, 441–455.
- Getz, W. M., & Haight, R. G. (2020). *Population Harvesting (MPB-27), Volume 27: Demographic Models of Fish, Forest, and Animal Resources. (MPB-27) (Vol. 105)*. Princeton university press.
- Haight, R. G. (1985). A comparison of dynamic and static economic models of uneven-aged stand management. *Forest Science*, 31(4), 957–974.
- Haight, R. G., & Monserud, R. A. (1990a) Optimizing any-aged management of mixed-species stands: II. Effects of decision criteria. *Forest science*, 36(1), 125–144.
- Haight, R. G., & Monserud, R. A. (1990b). Optimizing any-aged management of mixed-species stands. I. Performance of a coordinate-search process. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(1), 15–25.
- Hanski, I., Lindström, J., Niemelä, J., Pietiäinen, H., & Ranta, E. (1998). *Ekologia*. Wsoy, Juva, 244–323.



- Hanewinkel, M. (2002). Comparative economic investigations of even-aged and uneven-aged silvicultural systems: a critical analysis of different methods. *Forestry*, 75(4), 473–481.
- Hartman, R. (1976). The harvesting decision when a standing forest has value. *Econ. Inquiry*, 14: 52–58.
- Hooke, R., & Jeeves, T. A. (1961). "Direct Search" Solution of Numerical and Statistical Problems. *Journal of the ACM (JACM)*, 8(2), 212–229.
- Hynynen, J., Eerikäinen, K., Mäkinen, H., & Valkonen, S. (2019). Growth response to cuttings in Norway spruce stands under even-aged and uneven-aged management. *Forest Ecology and Management*, 437, 314–323.
- Hyytiäinen, K., & Tahvonen, O. (2002). Economics of forest thinnings and rotation periods for Finnish conifer cultures. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17(3), 274–288.
- Hyytiäinen, K., Tahvonen, O., & Valsta, L. (2010). Taloudellisesti optimaalisista harvennuksista ja kiertoajoista männylle ja kuuselle. *Metlan työraportteja* 143.
- Juutinen, A., Ahtikoski, A., Rämö, J. 2020. Puuntuotannon kannattavuuteen vaikuttavat tekijät jatkuvapeitteisessä metsänkasvatuksessa. *Metsätieteen aikakauskirja: artikkeli* id 10313.
- Juutinen, A., Shanin, V., Ahtikoski, A., Rämö, J., Mäkipää, R., Laiho, R., Sarkkola, S., Lauren, A., Penttilä, T., Hökkä, H., & Saarinen, M. 2021. Profitability of continuous cover forestry in Norway spruce-dominated peatland forest and the role of water table. *Canadian Journal of Forest Research* 51(6), (in press)
- Jäghagen, K., & Lageson, H. (1996). Timber quality after thinning from above and below in stands of *Pinus sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 11(1–4), 336–342.
- Kerr, G. (2014). The management of silver fir forests: de Liocourt (1898) revisited. *Forestry*, 87(1), 29–38.
- Knoke, T. (2012). The economics of continuous cover forestry. *Teksessa Continuous cover forestry*, Pukkala, T ja von Ganov, K. (toim.), Springer, Dordrecht Heidelberg London New York.
- Knoke, T., & Wurm, J. (2006). Mixed forests and a flexible harvest policy: a problem for conventional risk analysis? *European Journal of Forest Research*, 125(3), 303–315.
- Knoke, T., & Plusczyk, N. (2001). On economic consequences of transformation of a spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) dominated stand from regular into irregular age structure. *Forest ecology and management*, 151(1–3), 163–179.
- Knoke, T., Ammer, C., Stimm, B., & Mosandl, R. (2008). Admixing broadleaved to coniferous tree species: a review on yield, ecological stability and economics. *European journal of forest research*, 127(2), 89–101.
- Kolström, T. (1993). Modelling the development of an uneven-aged stand of *Picea abies*. *Scandinavian journal of forest research*, 8(1-4), 373–383.
- Kuitto, J.-P., Keskinen, S., Lindroos, J., Ojala, T., Räsänen, T., & Terävä, J., 1994. Mechanized cutting and forest haulage. *Metsäteho. Report 410. Painovalmiste KY, Helsinki, Finland.*
- Kuuluvainen, J., Karppinen, H. ja Ovaskainen, V. 1996. Landowner objectives and nonindustrial private timber supply. *Forest Science* 42, 300–309.
- Lähde, E., Laiho, O., Norokorpi, Y., & Saksa, T. (2002). Development of Norway spruce dominated stands after single-tree selection and low thinning. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(9), 1577–1584.
- Lapeyrolerie, M., Chapman, M.S, Norman, K.E.A, Boettiger, C, 2021. Deep reinforcement learning for conservation decisions. *arXiv.2106.0827v1 [cs.LG]* 15 Jun 2021.
- Liang, J., & Picard, N. (2013). Matrix model of forest dynamics: An overview and outlook. *Forest Science*, 59(3), 359–378.
- Lundqvist, L. (2017). Tamm Review: Selection system reduces long-term volume growth in Fennoscandic uneven-aged Norway spruce forests. *Forest ecology and management*, 391, 362–375.



- MacLeod, M., & Nagatsu, M. (2016). Model coupling in resource economics: conditions for effective interdisciplinary collaboration. *Philosophy of science*, 83(3), 412–433.
- Malo, P., Tahvonen, O., Suominen, A., Back, P., & Viitasaari, L. (2021). Reinforcement learning in optimizing forest management. *Canadian Journal of Forest Research*, <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0447>.
- Mason, W.L., Diaci, J., Carvalho, J. & Valkonen, S. (2021) Continuous cover forestry in Europe: usage and the knowledge gaps and challenges to wider adaptation. *Forestry: An International Journal of Forest Research*: 1–12.
- Modig E., Magnusson B., Valinger E., Cedergren J., Lundqvist L. (2012). Damage to residual stand caused by mechanized selection harvest in uneven-aged *Picea abies* dominated stands. *Silva Fennica* 46(2): 267–274.
- Mäkelä, A. (2007). Mallien käytöstä metsän kasvun ennustamiseen ja käsittelyjen suunnitteluun. *Metsätieteen aikakauskirja* 071: 55–61.
- Mäkelä, A., & Valentine, H.T. *Models of Tree and Stand Dynamics*. Springer International Publishing, 2020.
- Nevalainen, S. (2017). Comparison of damage risks in even-and uneven-aged forestry in Finland. *Silva Fennica* 51/3: article id 1741.
- Niinimäki, S., Tahvonen, O., & Mäkelä, A. (2012). Applying a process-based model in Norway spruce management. *Forest ecology and management*, 265, 102–115.
- Nygren, M., Rissanen, K., Eerikäinen, K., Saksa, T., & Valkonen, S. (2017). Norway spruce cone crops in uneven-aged stands in southern Finland: a case study. *Forest Ecology and Management*, 390, 68–72.
- Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge university press.
- Parkatti, V. P., Assmuth, A., Rämö, J., & Tahvonen, O. (2019). Economics of boreal conifer species in continuous cover and rotation forestry. *Forest policy and Economics*, 100, 55–67.
- Parkatti, V. P., & Tahvonen, O. (2020). Optimizing continuous cover and rotation forestry in mixed-species boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(11), 1138–1151.
- Parkatti, V. P., & Tahvonen, O. (2021). Economics of multifunctional forestry in the Sámi people homeland region. *Journal of environmental economics and management* 110, 102542.
- Pihlainen, S., Tahvonen, O., & Niinimäki, S. (2014). The economics of timber and bioenergy production and carbon storage in Scots pine stands. *Canadian journal of forest research*, 44(9), 1091–1102.
- Pohjola, J., and Valsta, L. 2007. Carbon credits and management of Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Forest Policy Econ.* 9(7): 789–798.
- Pukkala T. 2005. Metsikön tuottoarvon ennustemallit kivennäismaan männiköille, kuusikoille ja rauduskoivikoille. *Metsätieteen aikakauskirja*, 3/2005: 311–322.
- Pukkala, T., & Kolström, T. (1988). Simulation of the development of Norway spruce stands using a transition matrix. *Forest Ecology and Management*, 25(3-4), 255–267.
- Pukkala, T., Lähde, E., & Laiho, O. (2009). Growth and yield models for uneven-sized forest stands in Finland. *Forest Ecology and Management*, 258(3), 207–216.
- Pukkala, T., Lähde, E. & Laiho, O. (2010). Optimizing the structure and management of uneven-sized stands of Finland. *Forestry*, 83(2), 129–142.
- Pukkala, T., Lähde, E., & Laiho, O. (2013). Species interactions in the dynamics of even-and uneven-aged boreal forests. *Journal of sustainable forestry*, 32(4), 371–403.
- Pukkala, T. (2014). Does biofuel harvesting and continuous cover management increase carbon sequestration? *Forest Policy and Economics*, 43, 41–50.



- Pukkala, T., Lähde, E., & Laiho, O. (2014). Optimizing any-aged management of mixed boreal forest under residual basal area constraints. *Journal of Forestry Research*, 25(3), 627–636.
- Pukkala, T. (2016). Plenterwald, Dauerwald, or clearcut?. *Forest Policy and Economics*, 62, 125–134.
- Pukkala, T. (2016). Which type of forest management provides most ecosystem services? *Forest Ecosystems*, 3(1), 1–16.
- Pukkala, T. (2021). Measuring the social performance of forest management. *Journal of Forestry Research*, 1–16.
- Pukkala, T., Vauhkonen, J., Korhonen, K. T., & Packalen, T. (2021). Self-learning growth simulator for modelling forest stand dynamics in changing conditions. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94(3), 333–346.
- Reed, W. J. (1984). The effects of the risk of fire on the optimal rotation of a forest. *Journal of environmental economics and management*, 11(2), 180–190.
- Rollin, F., Buongiorno, J., Zhou, M., & Peyron, J. L. (2005). Management of mixed-species, uneven-aged forests in the French Jura: from stochastic growth and price models to decision tables. *Forest Science*, 51(1), 64–75.
- Rämö, J., & Tahvonen, O. (2014). Economics of harvesting uneven-aged forest stands in Fennoscandia. *Scandinavian journal of forest research*, 29(8), 777–792.
- Rämö, J., & Tahvonen, O. (2015). Economics of harvesting boreal uneven-aged mixed-species forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(8), 1102–1112.
- Rämö, J., & Tahvonen, O. (2017). Optimizing the harvest timing in continuous cover forestry. *Environmental and resource economics*, 67(4), 853–868.
- Rämö, J., Assmuth, A., & Tahvonen, O. (2020). Optimal Continuous Cover Forest Management with a Lower Bound Constraint on Dead Wood. *Forest Science*, 66(2), 202–209.
- Salo, S., & Tahvonen, O. (2003). On the economics of forest vintages. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 27(8), 1411–1435.
- Samuelson, P. A. (1976). Economics of forestry in an evolving society. *Economic inquiry*, 14(4), 466–492.
- Shanin, V., Valkonen, S., Grabarnik, P., & Mäkipää, R. (2016). Using forest ecosystem simulation model EFIMOD in planning uneven-aged forest management. *Forest Ecology and Management*, 378, 193–205.
- Sinha, A., Rämö, J., Malo, P., Kallio, M., & Tahvonen, O. (2017). Optimal management of naturally regenerating uneven-aged forests. *European Journal of Operational Research*, 256(3), 886–900.
- Susaeta, A., Klizentyte, K., Sharma, A., & Adams, D. C. (2021). Can uneven-aged management improve the economic performance of longleaf pine?. *Canadian Journal of Forest Research*, painossa.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). Reinforcement learning: An introduction. MIT press.
- Tahvonen, O., & Salo, S. (1999). Optimal forest rotation within SituPreferences. *Journal of Environmental Economics and Management*, 37(1), 106–128.
- Tahvonen, O., Salo, S., & Kuuluvainen, J. (2001). Optimal forest rotation and land values under a borrowing constraint. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 25(10), 1595–1627.
- Tahvonen, O., Leppänen, T., Hyytiäinen, K., Laakso, T., Määttä, K., & Viitala, E. J. (2004). Puuntuotannolliset ja taloudelliset tavoitteet Suomen metsälainsäädännössä. Joensuun yliopiston oikeustieteellisiä julkaisuja 12.
- Tahvonen, O., & Kallio, M. (2006). Optimal harvesting of forest age classes under price uncertainty and risk aversion. *Natural Resource Modeling*, 19(4), 557–585.
- Tahvonen, O., 2007. Optimal choice between even and uneven-aged forest management systems. Finnish Forest Research Institute, Working Papers 60.



- Tahvonen, O. (2009). Optimal choice between even- and uneven-aged forestry. *Natural Resource Modeling*, 22(2), 289–321.
- Tahvonen, O., Pukkala, T., Laiho, O., Lähde, E., & Niinimäki, S. (2010). Optimal management of uneven-aged Norway spruce stands. *Forest ecology and management*, 260(1), 106–115.
- Tahvonen, O. (2011). Optimal structure and development of uneven-aged Norway spruce forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(12), 2389–2402.
- Tahvonen, O., Pihlainen, S., & Niinimäki, S. (2013). On the economics of optimal timber production in boreal Scots pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(8), 719–730.
- Tahvonen, O. (2015). Economics of naturally regenerating, heterogeneous forests. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2(2), 309–337.
- Tahvonen, O., & Rämö, J. (2016). Optimality of continuous cover vs. clear-cut regimes in managing forest resources. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(7), 891–901.
- Tahvonen, O., & Rautiainen, A. (2017). Economics of forest carbon storage and the additionality principle. *Resource and Energy Economics*, 50, 124–134.
- Tahvonen, O., Rämö, J., & Mönkkönen, M. (2019). Economics of mixed-species forestry with ecosystem services. *Canadian Journal of Forest Research*, 49(10), 1219–1232.
- Tahvonen, O., & Viitala, E. J. (2006). Does Faustmann rotation apply to fully regulated forests?. *Forest Science*, 52(1), 23–30.
- Tapio (2006). Hyvän metsänhoidon suositukset. Metsäkustannus OY, Helsinki.
- Thorndike, E. L. (1911). *Animal intelligence*. New York: The Macmillan Company.
- Usher, M. B. (1966). A matrix approach to the management of renewable resources, with special reference to selection forests. *Journal of Applied Ecology*, 355–367.
- Valkonen, S., Giacosa, L. A., & Heikkinen, J. (2020). Tree mortality in the dynamics and management of uneven-aged Norway spruce stands in southern Finland. *European Journal of Forest Research*, 139(6), 989–998.
- Valkonen, S., Lappalainen, S., Lähde, E., Laiho, O., & Saksa, T. (2017). Tree and stand recovery after heavy diameter-limit cutting in Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management*, 389, 68–75.
- Valsta, L.T. (1986). Mänty-rauduskoivusekametsikön hakkuuohjelman optimointi. *Folia Forestalia* 666. 23 p.
- Valsta L. (1992). A scenario approach to stochastic anticipatory optimization in stand management. *Forest Science*, 38(2): 430–447.
- Viitala, E.-J. (2016). The emergence and early development of forest resource economic thought: From land and forest valuation to marginal analysis and vintage capital models. [Väitöskirja], <https://doi.org/10.14214/df.212>.
- Vítková, L., Saladin, D., & Hanewinkel, M. (2021). Financial viability of a fully simulated transformation from even-aged to uneven-aged stand structure in forests of different ages. *Forestry: An International Journal of Forest Research*.
- Wikström, P. (2000). A solution method for uneven-aged management applied to Norway spruce. *Forest Science*, 46(3), 452–463.
- Wikström, P., & Eriksson, L. O. (2000). Solving the stand management problem under biodiversity-related considerations. *Forest Ecology and Management*, 126(3), 361–376.
- Willassen, Y. (1998). The stochastic rotation problem: A generalization of Faustmann's formula to stochastic forest growth. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 22(4), 573–596.



Wykoff, R. 1986. Supplement to the user's guide for the Stand Prognosis Model-Version 5.0. USDA For. Sen. Gen. Tech. Rep. INT-208.