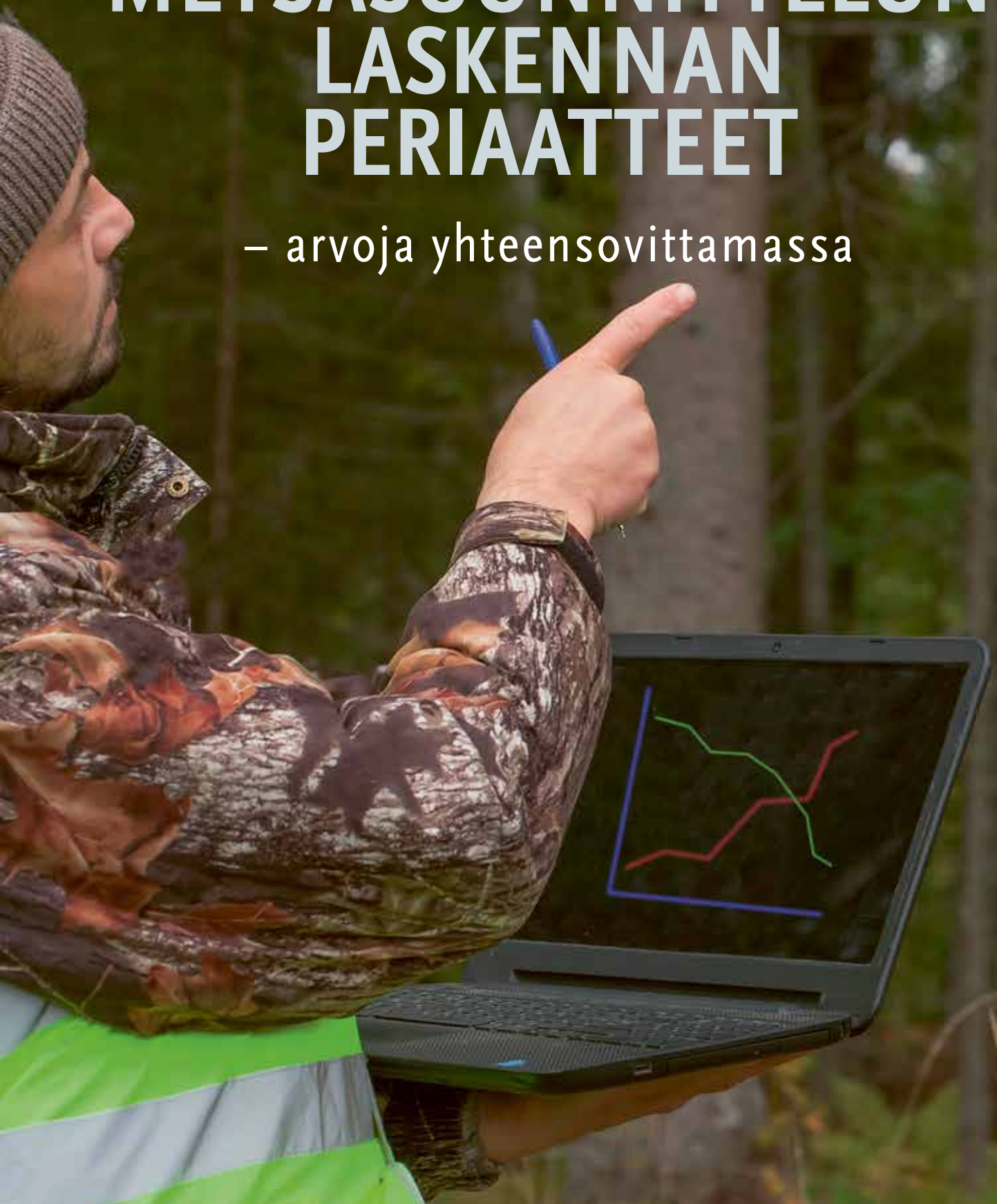


METSÄSUUNNITTELUN LASKENNAN PERIAATTEET

– arvoja yhteensovittamassa



Niemi Mikko, Mäkinen Antti,
Viitala Risto & Lumperoinen Mikko

TAPIO 

Niemi Mikko, Mäkinen Antti,
Viitala Risto & Lumperoinen Mikko

METSÄSUUNNITTELUN LASKENNAN PERIAATTEET

– arvoja yhteensovittamassa

Harjoitustehtävien lisämateriaalit löytyvät verkkosivulta
www.tapio.fi/metsasuunnittelun-laskenta

Marjatta ja Eino Kollin

SÄÄTIÖ

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain (404/61, siihen myöhemmin tehtyine muutoksineen) mukaisesti kielletty ilman nimenomaista lupaa. Lupia teosten osittaiseenkin kopiointiin myöntää tekijöiden ja kustantajien valtuuttamana KOPIOSTO ry. Muuhun käyttöön luvat on kysyttävä suoraan kunkin teoksen oikeudenhaltijoilta.

© Tapio Oy ja tekijät
Mikko Niemi, Tapio
Antti Mäkinen, Simosol
Risto Viitala, Hämeen ammattikorkeakoulu
Mikko Lumperoinen, Tapio

Kannen kuva: Shutterstock
Kansi, ulkoasu ja taitto: Vitale Ay

ISBN 978-952-338-093-6

Paino Otavan Kirjapaino Oy, Keuruu 2020



Sisällys

Alkusanat	7
Käsitteitä	9
1 JOHDANTO	11
2 METSIEN KÄYTÖN SUUNNITTELU JA PÄÄTÖKSENTEKO	17
2.1 Metsien käytön kestävyys	19
2.2 Metsien kasvun dynamiikka	21
2.3 Korkeimman maankoron kiertoaika	25
2.4 Päätöksenteon suhde suunnitteluun	28
<i>Esimerkki: suunnittelulaskelmat Tammen tilan metsienhoito-ohjelman laadinnan tueksi</i>	<i>31</i>
3 METSÄVARATIETO	35
3.1 Metsien inventointi	35
3.2 Metsätietostandardi	38
3.2.1 Luokkamuuttajat	38
3.2.2 Puusto	39
3.2.3 Toimenpiteet	41
4 SIMULOINTIIN JA OPTIMOINTIIN PERUSTUVAT SUUNNITTELULASKENNAT	43
4.1 Simulointi	44
4.1.1 Toimenpidemallit	45
4.1.2 Kasvumallit	47
4.2 Optimointi	50
4.2.1 Lineaarinen optimointi	50
4.2.2 Tavoitefunktio ja rajoitteet suunnittelulaskelmissa	54
4.2.3 Optimointi suunnittelulaskelmissa	55
4.3 Ohjelmistoratkaisut	56

5	STRATEGINEN METSÄSUUNNITTELU	61
5.1	Tasaiset tulot	61
5.2	Suurin kestävä hakkuutaso	63
5.2.1	Lähtötilanteessa paljon nuoria metsiä	64
5.2.2	Lähtötilanteessa paljon uudistuskypsiä metsiä	66
5.3	Jatkuvasti kasvua pienemmät hakkuut.....	70
5.4	Hiilitase metsäsuunnittelussa.....	72
	<i>Esimerkki: uudistushakkuun vaikutus metsän hiilitaseeseen.....</i>	<i>75</i>
6	TAKTINEN METSÄSUUNNITTELU	77
6.1	Spatiaalinen suunnittelu.....	77
6.1.1	Spatiaalisen suunnittelun menetelmiä.....	78
6.2	Dynaamisten käsittelykuvioiden muodostaminen	79
7	SUUNNITTELULASKENTOJEN EPÄVARMUUS JA VIRHELÄHTEET	83
7.1	Metsävaratiedon laatu	83
7.2	Ilmastonmuutos	85
7.3	Muut epävarmuustekijät.....	86
	Lähteet	88
Liite 1:	Kaavat	92
Liite 2:	Harjoitukset	
	A. Excel-harjoituksia.....	94
	B. IPTIM-harjoituksia	97

Alkusanat

Ajatus tämän oppimateriaalin kirjoittamisesta lähti siitä konkreettisesta tarpeesta, että monitavoitteisten metsäsuunnittelulaskentojen opiskeluun ei ole toistaiseksi ollut tarjolla riittävän käytännönläheistä kirjaa, jonka oppeja tulevat metsätalousinsinöörit voisivat sujuvasti hyödyntää tulevissa työtehtävissään. Lisäksi allekirjoittanut on viime vuosien työtehtävissään Tapiossa yrittänyt oikaista sitä metsäalalle juurtunutta käsitystä, että kasvua pienemmät hakkuut olisivat jonkinlainen todiste kestävästä metsätaloudesta. Toivon, että tämän kirjan luettuaan metsäammattilaiset ymmärtävät aiempaa enemmän metsien kasvun dynamiikasta ja osaavat vähintäänkin kyseenalaistaa kasvun ja hakkuupoistuman vertailun metsänhoidon kestävyysindikaattorina.

Lähdimme ideoimaan oppimateriaalia yhdessä **Mikko Lumperaisen** (Tapio), **Antti Mäkisen** (Simosol) sekä **Risto Viitalan** ja **Esa Lientolan** (Hämeen ammattikorkeakoulu) kanssa alkuvuodesta 2019. Meillä Tapiossa on vankkaa kokemusta suunnittelujärjestelmien kehittämisestä sekä pitkä kokemus yhteistyöstä monien eri puolella Suomea toimivien metsäsuunnittelijoiden kanssa. Simosol toi hankkeeseen oman erityisosaamisensa muun muassa kasvun mallinnuksesta sekä simulointiin ja optimointiin perustuvista suunnittelulaskennoista. Hämeen ammattikorkeakoulun panos oli tärkeä, jotta ymmärsimme paremmin millä tasolla metsäsuunnittelua ammattikorkeakouluissa tällä hetkellä opetetaan. Lisäksi kiitän erikseen Esa Lientolaa harjoituksissa ja laskentaesimerkeissä käytettyjen metsävara-aineistojen kokoamisesta Evon opetusmetsien kuviotiedoista.

Tapiossa sain hankkeen loppumetreillä suurta apua metsätietotiimiimme alkuvuodesta 2020 rekrytoidulta metsäekonomian opiskelija **Juho Lammilta**, joka katsoi materiaalia taloustieteen opit tuoreena mielessään. Juho selitti rautalangasta vääntäen esimerkiksi sen, miksi diskonttolaskentojen yhteydessä on tärkeää erottaa reaali- ja nimelliskorko, eikä puhua ainoastaan korkokannasta, kuten allekirjoittanut oli tottunut tekemään. Lisäksi Juhon osaamista on hyödynnetty muun muassa hiilitaselaskentoja koskevan luvun laatimisessa. Tapiolaisista haluan mainita myös **Samuel Heinosen**, joka katsoi tekstejä käytännönläheisestä

näkökulmasta ja kirjoitti hyvän kuvauksen avoimen metsävaratiedon hyödyntämisestä suunnittelijan maastotyössä. Kiitokset myös **Ari Kotiharjulle** metsävaratietoa koskevan osion huolellisesta oikoluvusta ja kommentoinnista.

On aina mukavaa tehdä yhteistyötä sellaisten ihmisten kanssa, jotka aidosti innostuvat tärkeiksi pitämistään asioista ja haluavat auttaa työn edistämisessä. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun (XAMK) metsäsuunnittelun lehtori **Heikki Lehmonen** innostui projektistamme, kyseli säännöllisesti työn etenemisestä, kommentoi tekstejä, löysi käsikirjoitukseen jääneitä asiavirheitä sekä laati mielenkiintoisen tietolaatikon, jossa kerrotaan suunnittelulaskennoista ennen tämän päivän kehittyneitä simulointiin ja optimointiin perustuvia laskentajärjestelmiä. Vuorovaikutuksellaan Heikki teki minulle selväksi sen, että tälle työlle on todellakin selvä tarve metsätalousinsinöörien opetuksessa.

Kiitokset mielenkiintoisten tietolaatikoiden kirjoittamisesta myös **Jouni Kalliovirralle** (Simosol) ja **Timo Pukkalalle** (Itä-Suomen yliopisto). Timo Pukkanen (2007) ensisijaisesti yliopistoille kohdentama oppikirja ”Metsäsuunnittelun menetelmät”, joka on tietääkseni edellinen suomenkielinen tästä aiheesta kirjoitettu oppimateriaali, on toiminut hyödyllisenä käsikirjana opiskellessani aihepiiriä, joten kyseisen teoksen vaikutus näkyy varmasti myös tässä oppimateriaalissa.

Lopuksi lämpimät kiitokset vaimolleni **Annalle**, joka on sparrannut tässä työssä metsäalan ulkopuolisin silmin. Teoksen otsikko löysi muotonsa Annan aloittaman ideoinnin ansiosta, kun hän haastoi minut miettimään menetelmien taustalla olevaa suurempaa tarkoitusta. Koronaviruksen aiheuttaman etätyökaranteenin aikana Anna oli se tuki, jolta saatoin kysyä neuvoa missä tahansa mieltä painavassa tilanteessa.

Viimeisimpänä, mutta ei missään nimessä vähäisimpänä, haluan osoittaa suuret kiitokset **Marjatta ja Eino Kollin Säätiölle**, joka rahoitti kirjoitustyötämme ja mahdollisti tämän oppimateriaalin tekemisen.

Elokuussa 2020

Mikko Niemi

Käsitteitä

Apteeraus tarkoittaa puun rungon katkaisukohtien määrittämistä, missä otetaan huomioon puutavaralle asetetut mitta- ja laatuvaatimukset.

Arvokasvu kuvaa puuston rahallisen arvon nousua [€/vuosi]. Metsässä tapahtuu arvokasvua, kun puuston tilavuus kasvaa ja/tai osa puustosta siirtyy laatuvaatimuksiltaan arvokkaammaksi puutavaralajiksi. Arvokasvu on suurimmillaan, kun aiemmin kuitupuuta tuottaneet rungot järeytyvät arvokkaiksi tukeiksi.

Arvokasvuprosentti kertoo puuston arvon prosentuaalisesta vuosimuutoksesta.
$$\text{Arvokasvuprosentti} = [(\text{puuston ennustettu arvo vuoden päästä} - \text{puuston nykyinen arvo}) / \text{puuston nykyinen arvo}] * 100$$

Deflaatio tarkoittaa hintojen ja palkkojen yleistä laskua. Deflaatio on inflaation vastakohta, minkä takia deflaatiota kutsutaan myös negatiiviseksi inflaatioksi.

Diskonttaus tarkoittaa tulevaisuudessa odotettavissa olevien kassavirtojen arvottamista nykyhetkeen. Kyseessä on rahan aika-arvosta johtuva ilmiö: nykyhetkessä saatavat tulot ovat eriarvoisia kuin tulevaisuudessa saatavat tulot muun muassa pääomamarkkinoiden korkomuutosten takia. Käytännössä diskonttaus on korkoa korolle -laskutoimituksen käänteistoimitus, jossa tulevat kassavirrat kerrotaan korkotekijän käänteisluvulla, jolloin toivotun reaalikorkoprosentin avulla saadaan laskettua tuotannon nykyarvo. Eli ”korkoa korolle takaperin”.

Diskonttokorko on korkokanta, jonka avulla eri ajanhetkillä tulevat kassavirrat saadaan vertailukelpoisiksi. Diskonttokoron suuruuteen vaikuttavat inflaation suuruus sekä sijoituksen riskitaso.

Hakkuuarvo kertoo puuston taloudellisen arvon, jos puusto hakattaisiin välittömästi.

Hakkuukertymä kuvaa hakkuissa poistuneen ainespuun määrää [m³]. Suunnittelulaskentojen yhteydessä puhutaan tavallisesti yhden vuoden aikana hakattavan puutavaran määrästä [m³/vuosi].

Hakkuusuunnite on metsäsuunnitelmaan määritelty vuosittain hakattavan puutavaran määrä [m³]. Hakkuusuunnitetta käytetään sellaisilla metsäomaisuuksilla, joilla tehdään hakkuita joka vuosi ja tavoitellaan tasaista hakkuutuloa.

Inflaatio tarkoittaa rahan ostovoiman heikkenemistä ja siitä seuraavaa hintojen nousua. Inflaation takia eri ajanhetkillä saatava raha on keskenään eri arvoista.

Kiertoaika kuvaa tasaikäisrakenteisessa metsänkasvatuksessa uudistus-hakkuiden väliä, mikä on tyypillisesti Suomen olosuhteissa 60–100 vuotta.

Korko on rahan hinta, tyypillisesti lainanantajalle maksettu korvaus siltä ajalta, kun kyseinen rahamäärä ei ole lainanantajan käytössä.

Korkoa korolle / Koronkorko tarkoittaa kertautuvaa korkoa, eli alkuperäisen sijoituksen lisäksi myös jo kertynyt sijoitustuotto kasvaa korkoa (laskentakaava Kaavat-liitteessä).

Metsänhoidon suositukset ovat kuvaus parhaista käytännöistä, joista metsänomistaja voi valita tavoitteidensa mukaisen tavan hoitaa metsiään. Ne tarjoavat tietoa kestävän metsänhoidon perusteista ja menetelmistä tapauskohtaisesti sovellettavaksi. Suositukset on valmisteltu laajassa yhteistyössä metsä-, ympäristö- ja energia-alan toimijoiden kanssa. Lisätietoa www.metsanhoitosuosituks.fi.

Nettotulojen nykyarvo kertoo tulevaisuudesta diskontattujen tulojen ja menojen välisen erotuksen.

Nimelliskorko on esimerkiksi lainasopimukseen kirjattu korko, josta ei ole vähennetty inflaation vaikutusta.

Prolongaus tarkoittaa samaa kuin korkoa korolle -laskenta, eli rahan nykyiselle arvolle lasketaan sen vastaava arvo tulevaisuudessa. Harjoitustehtävissä puhumme tässä yhteydessä korkoa korolle -laskennoista.

Reaalikorko tarkoittaa korkoa, josta on poistettu inflaation tai deflaation vaikutus. Mikäli taloustilanteessa vallitsee inflaatio, rahan arvo heikkenee ja reaalikorko on nimelliskorkoa pienempi.

Sisäinen korko kuvaa korkokantaa, jolla nettotulojen nykyarvo on nolla. Toisin sanoen sisäinen korko kuvaa investoinnin keskimääräistä kannattavuutta koko aikajaksolla, eli sitä korkokantaa, jolla sijoitus maksaa itsensä takaisin.

Tuottoarvo kuvaa, miten paljon sijoitus tulee jatkossa tuottamaan omistajalleen. Tuottoarvoa voidaan käyttää esimerkiksi metsätilan arvonmäärittämisessä, ja sen laskemisessa optimoidaan nettotulojen nykyarvoa valitulla diskonttokorolla.



Johdanto

Metsäsuunnittelu on työtä, jonka tarkoitus on auttaa metsänomistajaa saamaan metsäomaisuudestaan mahdollisimman paljon hyötyä. Metsästä saadaan monenlaisia aineellisia ja aineettomia hyötyjä, ns. ekosysteemipalveluita, kuten puutavaraa, riistaa, marjoja, sieniä, virkistäviä retkeilykohteita, monimuotoista metsäluontoa, hiilensidontaa ja niin edelleen. Eri päätöksentekijät arvostavat metsän tarjoamia hyötyjä eri tavoin, mutta yhteistä lähes kaikille metsänomistajille on se, että metsästä halutaan saada samaan aikaan useita erilaisia hyötyjä. Metsän tarjoamille hyödyille on tyypillistä se, että niiden välillä vallitsee vaihdantasuhde: metsänomistaja ei voi esimerkiksi samaan aikaan maksimoida sekä puunmyyntituloja että luonnon monimuotoisuuden korkeaa tasoa. Tällaisessa tilanteessa metsänomistajan arvot ja tavoitteet ratkaisevat, miten paljon kumpakin edellä mainittua hyötyä hän haluaa saada. Monitavoitteisen metsäsuunnittelun tehtävänä on auttaa metsänomistajaa tekemään parempia päätöksiä, jotta metsästä saataisiin mahdollisimman paljon erilaisia hyötyjä juuri kyseisen päätöksentekijän arvojen ja tavoitteiden mukaisilla painotuksilla.

Metsäsuunnittelun tarpeet ja menetelmät elävät vahvassa murroksessa, johon metsäammattilaisten tulee pystyä vastaamaan. Kaikki metsänomistukseen vaikuttavat trendit viittaavat siihen, että monitavoitteisen suunnittelun merkitys päätöksenteossa ja valintojen perustelemissa tulee jatkossa kasvamaan. Valinnan vapaus eri metsänhoitomenetelmien soveltamiseen lisääntyi metsälain uudistamisen myötä vuonna 2014, kun jatkuvapeitteinen metsänkasvatus sallittiin. Ilmaston lämmetessä metsätalouden riskienhallinta korostuu, kun sään ääri-ilmiöt lisääntyvät ja tuholaishyönteisten levinneisyys siirtyy koko ajan kohti pohjoista. Ilmastomuutoksen hillinnän näkökulmasta metsien hiilensidonta nousee tärkeäksi metsien tarjoamaksi hyödyksi etenkin julkisyhteisöjen omistamilla metsätiloilla. Väestön muuttaessa kaupunkeihin ihmisten side omaan metsään heikkenee, eikä metsävarallisuutta, saati sen tarjoamia mahdollisuuksia tunneta yhtä hyvin kuin ennen. Samaa aikaan kaupungistuminen, kasvava kiinnostus järjestettyyn luontomatkailuun sekä metsien terveysvaikutusten parempi tunteminen lisäävät

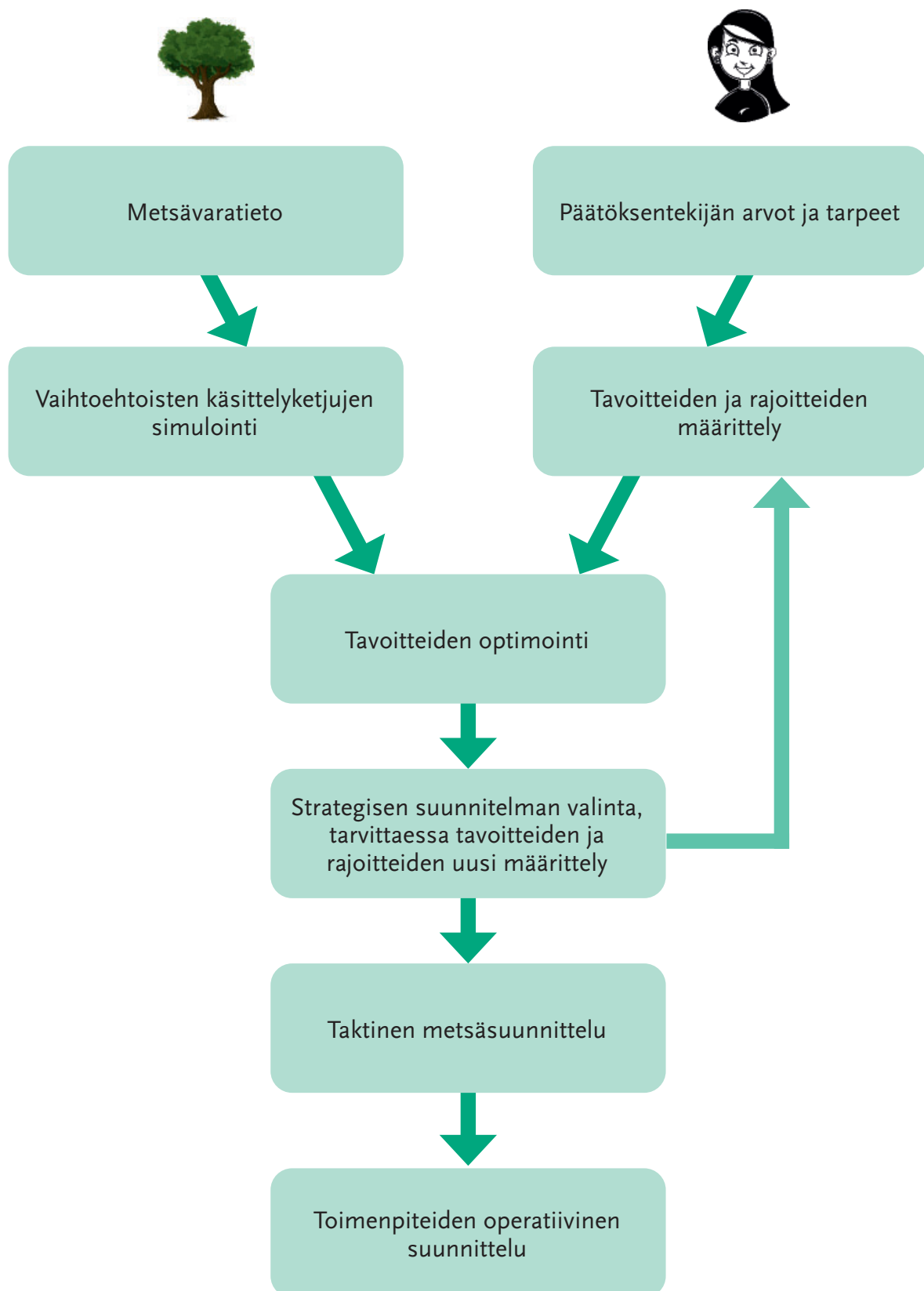
kiinnostusta metsien hyvinvointivaikutusten kaupallistamiseen. Näillä näkymin metsänomistus tulee polarisoitumaan taloudellisin tavoittein toimiviin metsänomistajiin sekä muita kuin metsän puuntuotannollisia arvoja korostaviin metsänomistajiin.

”Metsän tarjoamille hyödyille on tyypillistä se, että niiden välillä vallitsee vaihdantasuhde”

Suunnittelutyön lähtökohtana on aina metsävaratieto, jonka inventointimenetelmät ovat vuosien saatossa muuttuneet, mutta tiedon rakenne ja hyödyntämistavat ovat pysyneet viime vuosikymmenet hyvin samankaltaisina (Luku 3). Tällä hetkellä laserkeilaus on vallitseva luonnonvarojen kaukokartoitusmenetelmä, jolla Suomen metsiä on inventoitu 2010-luvun alkupuolelta alkaen. Metsäsuunnittelun toimenpideyksikkönä käytetään tavallisesti metsikkökuviota, vaikka laserkeilausinventoinnin myötä myös hilan tai mikrokuvion käyttö toimenpidekuvioiden muodostamisessa on mahdollista. Kaukokartoitusmenetelmien kehittyminen ja maastotyön kallistuminen ovat vähentäneet maastossa mitatun inventointitiedon määrää, mikä on menetelmäkehityksestä huolimatta toistaiseksi lisännyt metsävaratiedon epävarmuutta ja tiedon laadussa olevaa vaihtelua erityisesti taimikoissa, nuorissa kasvatusmetsissä sekä latvuserrokseltaan ja puulajistoltaan monimuotoisissa metsissä. Suunnittelutyö vaatii edelleen lähes aina maastoon jalkautumista inventointitiedon tarkentamisen, luontokohteiden määrittelyn ja järkevien leimikkokokonaisuuksien suunnittelun vuoksi.

Metsäsuunnitteluprosessissa lopputulokseen vaikuttavat metsävaratiedon lisäksi päätöksentekijän arvot ja senhetkiset tarpeet (Kuva 1). Vaikka metsävaratieto (esim. Suomen metsäkeskuksen ylläpitämä metsään.fi -aineisto) sisältää useimmiten toimenpide-ehtotuksia ensimmäiselle 10 vuoden jaksolle, niitä ei tule sekoittaa metsäsuunnitteluun, koska toimenpide-ehtotuksissa ei ole huomioitu päätöksentekijän arvoja ja tavoitteita. Avoin metsävaratieto antaa erinomaisen pohjatiedon metsäsuunnitelman laadintaan, mutta laadukkaassa ja monitavoitteisissa suunnittelutyössä metsäammattilaisen tulee aina huomioida päätöksentekijän tavoitteet.

Käytännön metsätaloudessa suunnittelun laajuus ja aikajänne vaihtelevat eri suunnitteluprojektien välillä hyvin paljon. Yksityisten maanomistajien omistamilla pienillä ja keskisuurilla metsätiloilla suunnitelmat laaditaan yleensä 10 vuodeksi.



Kuva 1. Metsäsuunnitteluprosessi.

Monissa tapauksissa suunnittelijat eivät hyödynnä tässä oppimateriaalissa esiteltäviä monitavoitteista päätöksentekoa tukevia optimointimenetelmiä, vaan metsänomistajille esitetyt toimenpide-ehdotukset perustuvat useimmiten ammattilaisen valistuneisiin näkemyksiin. Suunnittelijan ohjenuorana saattaa olla metsätilan ja maanomistajan mukaan esimerkiksi pyrkimys tasaiseen kehitysluokkarakenteseen tai puuston kokonaistilavuuden pitämiseen nykyisellä tasollaan.

Yksi merkittävä syy optimoinnin vähäiselle käytölle yksityismetsien suunnittelussa on metsänhoidon suositusten vahva kulttuurillinen rooli metsätalouden toiminnan ohjaajana, mikä on luonut metsien käytölle hieman kärjistäen vain yhden hyväksytyn tavan (Kurttila ym. 2013). Aiemmissa suunnittelujärjestelmissä ei myöskään ollut varsinaista optimointiosaa, joka olisi ollut aidosti laajan käyttäjäjoukon käytettävissä, koska laskentojen säätäminen oli hyvin työlästä. Käytännössä suunnittelijat joutuivat pääasiassa toteuttamaan metsänhoidon suositusten mukaista ensisijaista käsittelyä, koska muunlaisille valinnoille ei ollut perusteita.

Uusimmissa metsänhoidon suosituksissa metsänomistajien valinnan vapaus eri menetelmien käyttöön on kuitenkin lisääntynyt, ja metsänomistajien erilaisien tavoitteiden huomioimista painotetaan entistä enemmän (Äijälä ym. 2019). Kurttila ym. (2013) toteavatkin seuraavasti: ”Suunnittelukulttuurissa olisi päästävä irti ajatuksesta, että metsänhoitosuosituksien ensisijaisesti tarjoama käsittely samalla maksimoi metsänomistajan metsästään saaman hyödyn.” Lukijoiden motivoimiseksi voimmekin todeta, että metsänomistajan tavoitteiden kannalta järkevän hakkuukertymän määrittämisessä auttaa, kun suunnittelija tuntee metsien kasvun dynamiikkaa ja osaa ohjata hakkuiden avulla puuston kasvua ja ikärakennetta haluttuun suuntaan. Lisäksi monitavoitteinen päätöksenteon tuki on vähitellen tulossa myös metsänomistajille tarkoitettuihin metsäsuunnittelujärjestelmiin (esim. www.etapio.fi/), joten myös ammattilaisten on hyvä osata keskustella monitavoitteisesta suunnittelusta metsänomistajien kanssa.

Isoilla metsätiloilla ja suurilla metsäomaisuuksilla hallinnoivilla toimijoilla suunnittelun vaatimukset ovat sen sijaan aivan toisenlaiset. Suunnitteluprosessi alkaa strategisen metsäsuunnitelman laadinnasta, missä huomioidaan päätöksentekijän erilaiset arvot ja tavoitteet sekä niiden painotukset. Strategisessa suunnitelmassa määritetään mm. vuosittainen hakkuusuunnite ja kassavirta, sekä käytettävät metsänhoitomenetelmät, haluttu suojelupinta-ala, käytönrajoitukset ja muut oleellisesti metsien käsittelyyn liittyvät linjaukset. Strateginen metsäsuunnitelma toimii ohjenuorana, kun toimenpiteitä kohdistetaan eri kuvioille (taktinen suunnittelu) ja laaditaan työohjeet hakkuiden ja metsänhoitotöiden toteuttajille

(operatiivinen suunnittelu). Strategisessa suunnittelussa hyödynnetään jo hyvin yleisesti monitavoitteista päätöksentekoa tukevia optimointimenetelmiä.

”Metsänomistajan tavoitteiden kannalta järkevän hakkuukertymän määrittämisessä auttaa, kun suunnittelija tuntee metsien kasvun dynamiikkaa ja osaa ohjata hakkuiden avulla puuston kasvua ja ikärakennetta haluttuun suuntaan.”

Simulointiin ja optimointiin perustuvissa suunnittelujärjestelmissä metsätilalle generoidaan/simuloidaan metsävaratiedon perusteella suuri joukko vaihtoehtoisia käsittelyketjuja (Luku 4.1). Arkielämässä simulointivaihetta voisi verrata tilanteeseen, jossa ihminen selvittää eri vaihtoehtoja matkustaa Helsingistä Jyväskylään. Tässä tapauksessa matkustaja voi tehdä vertailua junan, linja-auton ja henkilöauton välillä. Kukin vaihtoehto aiheuttaa erilaiset kustannukset, ja vastaavasti matka-aika vaihtelee eri vaihtoehtojen välillä. Matkan ajoitus vaikuttaa myös matka-aikaan etenkin julkisia liikennevälineitä käytettäessä. Simuloinnin tehtävänä on siis tuottaa joukko mahdollisia ratkaisuja tarkasteltavaan ongelmaan. Vastaavasti metsänomistaja voi varioida yksittäisten metsikkökuvioiden tasolla esimerkiksi hakkuutapoja, hakkuiden voimakkuutta ja ajoitusta, jolloin metsästä saatavien hyötyjen määrä on eri vaihtoehdoissa keskenään erilainen.

Vaihtoehtojen simuloinnista siirrytään toimenpiteiden optimointiin, kun päätöksentekijä alkaa verrata eri vaihtoehtojen matkustusaikoja ja kustannuksia toisiinsa (Luku 4.2). Yhdelle ihmiselle tärkein päätöksentekokriteeri on matkustusajan lyhyys, toiselle matkan hinta, ja kolmas ihminen saattaa arvottaa eniten käyttämässä matkustustavan ekologisuutta. Vastaavasti metsänomistajien arvot ja päätöksentekokriteerit poikkeavat toisistaan. Monitavoitteisessa suunnittelussa ammatilaisen tulisi sisällyttää metsänomistajan tavoitteet ja päätöksentekokriteerit suunnittelulaskennan määrittelyyn, minkä jälkeen eniten metsänomistajalle hyötyä tuottava ratkaisuvaihtoehto voidaan optimoida useiden mahdollisten ratkaisujen joukosta. Lineaarista optimointia hyödyntävissä metsäsuunnittelulaskennoista päätöksentekokriteerit kirjataan tavoitefunktion ja rajoitteiden muotoon.

Monitavoitteisen metsäsuunnittelun viimeinen vaihe ennen taktiseen ja operatiiviseen suunnitteluun siirtymistä on valitun ratkaisun vaikutusten raportointi päätöksentekijälle. Yksityisen metsänomistajan osalta tuotos on tavallisesti perinteinen metsäsuunnitelma joko paperilla tai sähköisesti, mutta isommilla metsä-

tiloilla puhutaan usein hakkuusuunnitteesta, ja kaupungeissa vastaava raportti voi kulkea esimerkiksi metsänhoidon toimintamallin nimellä. Saamiensa tulosten perusteella päätöksentekijä arvioi, soveltuuko laskettu strateginen metsäsuunnitelma hänen käyttöönsä, vai tuleeko suunnitelmaa vielä tarkentaa. Tarvittaessa laskentaan asetetut tavoitteet ja rajoitteet määritellään uudelleen, jotta suunnitelmasta saadaan hyväksyttävä.

Taktisessa metsäsuunnittelussa päätetään, mille kuvioille hakkuut ja metsänhoitotyöt milloinkin kohdistetaan, jotta strategisessa suunnitelmassa määritetyt metsänhoidon suuremmat linjat toteutuvat ja metsänomistaja saa muun muassa haluamansa puunmyyntitulot. Kaupungin/kunnan metsätalousinsinöörit suunnittelevat leimikoita tyypillisesti sen verran, että tietty vuotuinen hakkuusuunnite täyttyy, mikä takaa omistajalle tasaisen ja ennustettavan kassavirran sekä työntekijöille ja paikallisille metsäpalveluyrittäjille vakaan työmäärän. Isoilla organisaatioilla, kuten Metsähallituksella, taktisessa metsäsuunnittelussa korostuu toimenpiteiden spatiaalinen optimointi, mikä tuo kustannussäästöjä omille puunkorjuuketjuille (Luku 6.1). Hila- tai puutason inventointitiedon sekä nykypäivän tietojärjestelmien avulla taktista suunnittelua voidaan tehdä myös hilatasolla, jolloin toimenpidekuviot muodostetaan hilan soluja yhdistelemällä (Luku 6.2).

Taktista suunnittelua seuraa varsinaisten operaatioiden, esimerkiksi leimikoiden ja metsän uudistamiseen tähtäävien toimenpiteiden yksityiskohtainen suunnittelu ja työvaiheiden ohjaus. Operatiivisen suunnittelun tarkoitus on auttaa töiden toteuttajia toimimaan taktisen suunnitelman sekä esimerkiksi metsäsertiointiin ja ympäristönsuojeluun liittyvien ohjeiden ja vaatimusten mukaisesti. Mikäli taktinen metsäsuunnitelma perustuu huolelliseen maastotyöhön, jossa operaatioiden kannalta tärkeät asiat on jo huomioitu, ei erillistä operatiivista maastossa tehtävää suunnittelua enää tarvita. Operatiivista suunnittelua ja työn ohjausta ei käsitellä tässä suunnittelulaskentoihin painottuvassa oppimateriaalissa tämän enempää.

Oppimateriaalin lopussa (Luku 7) käsittelemme lyhyesti metsäsuunnitteluun liittyviä virhelähteitä ja laskentatulosten luotettavuutta, sillä käytännön työssään metsäsuunnittelija joutuu aina tulemaan toimeen jonkinasteisen epävarmuuden kanssa. Tässä yhteydessä on hyvä pysähtyä miettimään, millä tarkkuudella ja ajantasaisuudella metsävaratietoa tulee kerätä, jotta inventoinnin kustannus maksaa itsensä takaisin taloudellisesti parempien toimenpidepäätösten kautta. Spekuloimme myös lyhyesti sitä, millaisia muutoksia ja riskejä ilmastonmuutos tuo toimintaympäristöömme tulevana vuosikymmeninä, ja miten näihin muutoksiin voitaisiin varautua metsätaloudessa.



Metsien käytön suunnittelu ja päätöksenteko

Metsäsuunnittelu on keskeinen metsätalouden päätöstukimenetelmä. Suunnittelun tarkoituksena on koordinoida metsätilalla olevat resurssit tuottamaan omistajalleen mahdollisimman paljon hyötyä. Suunnittelussa kartoitetaan tulevaisuuden toimintavaihtoehtoja, luodaan erilaisia mahdollisia skenaarioita tulevaisuudesta ja suositellaan päätöksentekijälle toimintatapoja tavoitteisiin pääsemiseksi. Suunnittelun avulla tuetaan päätöksentekoa, mutta varsinainen päätöksenteko ei kuulu suunnitteluun. Suunnittelun on kuitenkin tuotettava lisäarvoa päätöksentekijälle, jotta suunnittelutyöhön kannattaa investoida. Jos päätökset olisivat itsestään selviä, ei suunnittelua kannattaisi tehdä.

Tässä luvussa käsittelemme metsäsuunnitteluun ja päätöksentekoon vaikuttavia tekijöitä sekä luonnon asettamia lainalaisuuksia metsänkasvatukselle. Aloitamme luvun tarkastelemalla metsien käytön kestävyyttä alan yleisen käytännön mukaisesti kolmen osa-alueen kautta: ekologinen, sosiaalinen ja taloudellinen kestävyys. Nykyisillä suunnittelujärjestelmillä tehtävät laskelmat antavat eniten tietoa puuntuotannon taloudellisesta kestävyydestä, mutta tulevaisuudessa myös muiden metsien ekosysteemipalveluiden huomiointi ja arvottaminen ovat tulossa merkittäväksi osaksi metsäsuunnittelijoiden työtä. ”Metsien eri käyttömuotojen hyötyjä ja kustannuksia on punnittava, kun tehdään päätöksiä metsien käytöstä” (Juutinen 2015).

”Suunnittelijan tehtävä on tuottaa päätöksentekoa varten lisätietoa vaihtoehtoisista metsänkäsitteilytavoista sekä niiden seurauksista, hyödyistä ja kustannuksista, minkä jälkeen varsinainen päätöksenteko on suunnittelua seuraava erillinen vaihe.”

Metsäsuunnittelun kustannus-hyötyanalyysi

Metsäsuunnittelun lähtökohta on aina, että suunnittelun seurauksena tehtävien päätösten pitää olla niin paljon parempia, eli päätöksentekijän preferenssien näkökulmasta optimaalisempia, että ne kattavat suunnittelun kustannukset. Vääristä, eli epäoptimaalisista päätöksistä aiheutuu epäoptimaalisuustappioita, joita useimmiten mitataan rahassa. Periaatteessa epäoptimaalisuustappioita voitaisiin laskea vaikkapa metsälön hiilitaseen epäoptimaalisesta järjestämisestä tai luonnon monimuotoisuuden köyhtymisestä.

Metsäsuunnittelua voidaan tehdä hyvin ylimalkaisesti tai erittäin tarkasti. Tarkkuutta voidaan lisätä niin metsää koskevan inventointitiedon hankinnassa, päätöksentekijän tavoitteiden selvittämisessä, mallintamisessa, laskennassa ja raportoinnissa. Tarkemmin tehty työ on yleensä kalliimpaa, joten siitä täytyy olla jotain hyötyä päätöksentekijän näkökulmasta. Suunnittelijan on syytä miettiä, miten tarkasti metsäsuunnittelua kannattaa tehdä, jotta työn tarkkuus on päätöstilanteen ja päätöksentekijän näkökulmasta sopivalla tasolla. Linjaus, että metsäsuunnittelua ja erityisesti suunnittelun pohjaksi tarvittavaa metsän inventointia tehdään kaikkiin päätöstilanteisiin samalla kaavamaisella tavalla, ei ole suunnittelun näkökulmasta perusteltua.

Eri tutkimuksissa on selvitetty vuosikymmenten aikana metsäsuunnittelun eri virhelähteiden vaikutuksia päätöksenteon optimaalisuuteen. Esimerkiksi Pietilä ym. (2010) tutkivat miten kauan metsäsuunnitelmaa kannattaa ylläpitää kasvumallien avulla. Mäkinen ym. (2012) jatkoivat tutkimusta selvittämällä, miten suurta hyötyä saataisiin kasvumallien kuviokohtaisella kalibroinnilla menneen kasvun avulla. Tulokset viittaavat siihen, että eri virhelähteitä kannattaa pyrkiä pienentämään, jos se voidaan tehdä kohtuullisen kustannuksin.

Käytännön kokemus on osoittanut, että jos päätöksentekijän tavoitteena on saada metsästä pääasiassa taloudellista hyötyä, kannattaa suunnittelun kustannukset pitää kohtuullisena. Metsä on systeeminä siinä määrin joustava, että lähes samat hyödyt metsästä voidaan saavuttaa hyvin erilaisin keinoin. Muutaman vuoden virhe hakkuun ajoituksessa ei metsätaloudessa yleensä johda merkittäviin epäoptimaalisuustappioihin. Sen sijaan pienessä taimikossa ajoitusvirhe voi olla kohtalokas ja aiheuttaa kiertoajan aikana merkittäviä epäoptimaalisuustappiota. Suunnittelua kannattaakin suunnata sinne, missä virheen mahdollisuus on suurin.

Metsäsuunnittelun hyötyjä on verrattu eri tutkimuksissa muihin metsätalouden investointeihin, kuten vaikkapa metsälannoitukseen, ojitukseen ja metsänjalostukseen. Yleinen johtopäätös on ollut, että tilakohtainen metsäsuunnittelu esimerkiksi 10 vuoden välein on 2020-luvun alun kustannuksilla niin edullista, että se kannattaa valita ensimmäiseksi keinoksi mietittäessä metsätalouden kannattavuuden parantamista. Investoinnille metsänomistajan tavoitteiden mukaiseen metsäsuunnitteluun saa siis usein erittäin hyvän koron.

Luvussa 2.2 käsitellään metsien kasvun ja hakkuiden välistä riippuvuutta. Puuston kehitystä ja arvokasvua tarkastellaan iän funktiona sisältäen metsikön kasvulle tyypilliset kolme vaihetta: kasvun kiihtyminen, kulminoituminen ja taantuminen. Metsien sigmoidinen kasvukäyrä johtaa siihen, että puuntuotannon kannalta optimaalinen uudistamisajankohta löytyy aina kasvun taantumisvaiheesta, kun metsikön senhetkinen kasvu alittaa kiertoajan keskimääräisen kasvun. Taloudellisesti optimaalisen kiertoajan määrittämiseen perehdytään Martin Faustmannin (1849) laatiman kiertoaikamallin pohjalta luvussa 2.3.

Luvussa 2.4 pohditaan suunnittelun ja päätöksenteon välistä suhdetta sekä käsitellään suunnittelun erilaisia tasoja erilaisten metsänomistajien ja vastaavien päätöksentekijöiden metsissä. Kyseisessä luvussa ja sitä seuraavassa esimerkissä kuvataan, miten keskenään ristiriitaisten tavoitteiden yhteensovittamiseen liittyviä suunnitteluongelmia voidaan lähestyä. Painotamme tuleville metsäammattilaisille, kuinka päätöksentekijän arvomaailma tulisi huomioida metsien käytön suunnittelussa, jotta metsäammattilaisten laadukkaat suunnitelmat tulisivat myös toteutettua. Suunnittelijan tehtävä on tuottaa päätöksentekoa varten lisätietoa vaihtoehtoisista metsänkäsittelytavoista sekä niiden seurauksista, hyödyistä ja kustannuksista, minkä jälkeen varsinainen päätöksenteko on suunnitellua seuraava erillinen vaihe.

2.1 Metsien käytön kestävyys

Metsänhoidon kestävyttä on Suomessa tapana arvioida taloudellisin, sosiaalisin ja ekologisoin kriteerein (esim. Äijälä ym. 2019). Tänä päivänä kestävään metsätalouteen kuuluu, että kaikki em. osa-alueet otetaan metsänhoidossa samanaikaisesti huomioon. Muutama vuosikymmen sitten kestävällä metsätaloudella tarkoitettiin vain puuntuotannollisesti kestävää toimintaa, mutta tänä päivänä metsillä on yhä suurempi merkitys ihmisille muutenkin kuin puuntuotannollisesti ajatellen. Sitä paitsi pitkällä ajanjaksolla ekologisen kestävyys-huomioiminen johtaa ihmiskunnan parempaan taloustilanteeseen, koska luonnon köyhtyminen ja siitä johtuvat ongelmat aiheuttaisivat muutoin taloudellista tappiota.

Metsäsuunnittelussa on tyypillistä, että eri päätöksentekokriteerejä painotetaan metsikkökuvioiden välillä eri tavoin. Muun muassa useat kaupungit ja muut julkisyhteisöt ovat jakaneet metsänsä hoitoluokkiin, jolloin hoitoluokan määrittely antaa suuntaviivat alueen metsänhoidolle. Hoitoluokkien hyödyntä-

misestä metsien erilaisten arvojen ja käyttömuotojen yhteensovittamisessa löytyy hyvä esimerkki Jyväskylän kaupungin sivuilta: <https://www.jyvaskyla.fi/ymparisto/metsat/tietoa-kaupungin-metsista/metsien-jakautuminen-hoitoluokkiin>

”Metsien kestävä hoito ja käyttö tarkoittavat metsien ja metsämaiden hoitoa ja käyttöä siten, että säilytetään niiden monimuotoisuus, tuottavuus, uusiutumiskyky, elinvoimaisuus ja mahdollisuus toteuttaa nyt ja tulevaisuudessa merkityksellisiä ekologisia, taloudellisia ja sosiaalisia toimintoja paikallisella, kansallisilla ja maailmanlaajuisilla tasoilla sekä siten, ettei aiheuteta vahinkoa muille ekosysteemeille.”

(Euroopan toinen metsäministerikonferenssi, Helsingissä 1993)

Taloudellisesti kestävä metsien käsittelyyn kuuluu metsien elinvoimaisuuden, uusiutumiskyvyn ja tuottavuuden sekä metsätalouden kannattavuuden säilyttäminen pitkällä aikavälillä. Näin varmistetaan, että metsistä saadaan taloudellista tuottoa, puutavaraa ja keräilytuotteita myös tulevaisuudessa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kullekin kasvupaikalle valitaan sopivat puulajit ja metsänhoitomenetelmät, ajoitetaan toimenpiteet oikein sekä huolehditaan hyvistä korjuuoloista ja metsäteiden kunnosta.

Ekologinen kestävyys toteutuu, kun edistetään metsäluonnon monimuotoisuuden säilymistä ja pidetään vesistöt puhtaina. Tällöin metsätalous ei myöskään lisää luontotyyppien tai lajien uhanalaisuutta. Hyviä käytännön toimia talousmetsien luonnonhoitoon löytyy esimerkiksi Monimetsä-hankkeen selvityksestä Talousmetsien luonnonhoidon tehokkaat ratkaisut (Saaristo ym. 2017).

Sosiaalisesti kestävä metsätalous sekä jokamiehenoikeudet turvaavat metsien ja vesistöjen virkistysmahdollisuudet kansalaisille. Metsät tarjoavat mahdollisuuksia marjastukseen, sienestykseen, metsästyksen ja moneen muuhun luonnossa tapahtuvaan liikuntaan, mikä lisää kansalaisten hyvinvointia. Metsänhoidon vaikutukset näkyvät maisemassa vuosikymmeniä, joten myös maiseman huomioiminen hakkuiden suunnittelussa on osa sosiaalisesti kestävästä metsänhoitoa.

Metsien hakkuut ja niihin perustuva metsäteollisuus antavat puunmyyntituloja yli 630 000 yksityiselle metsänomistajalle ympäri Suomea, sekä työpaikan

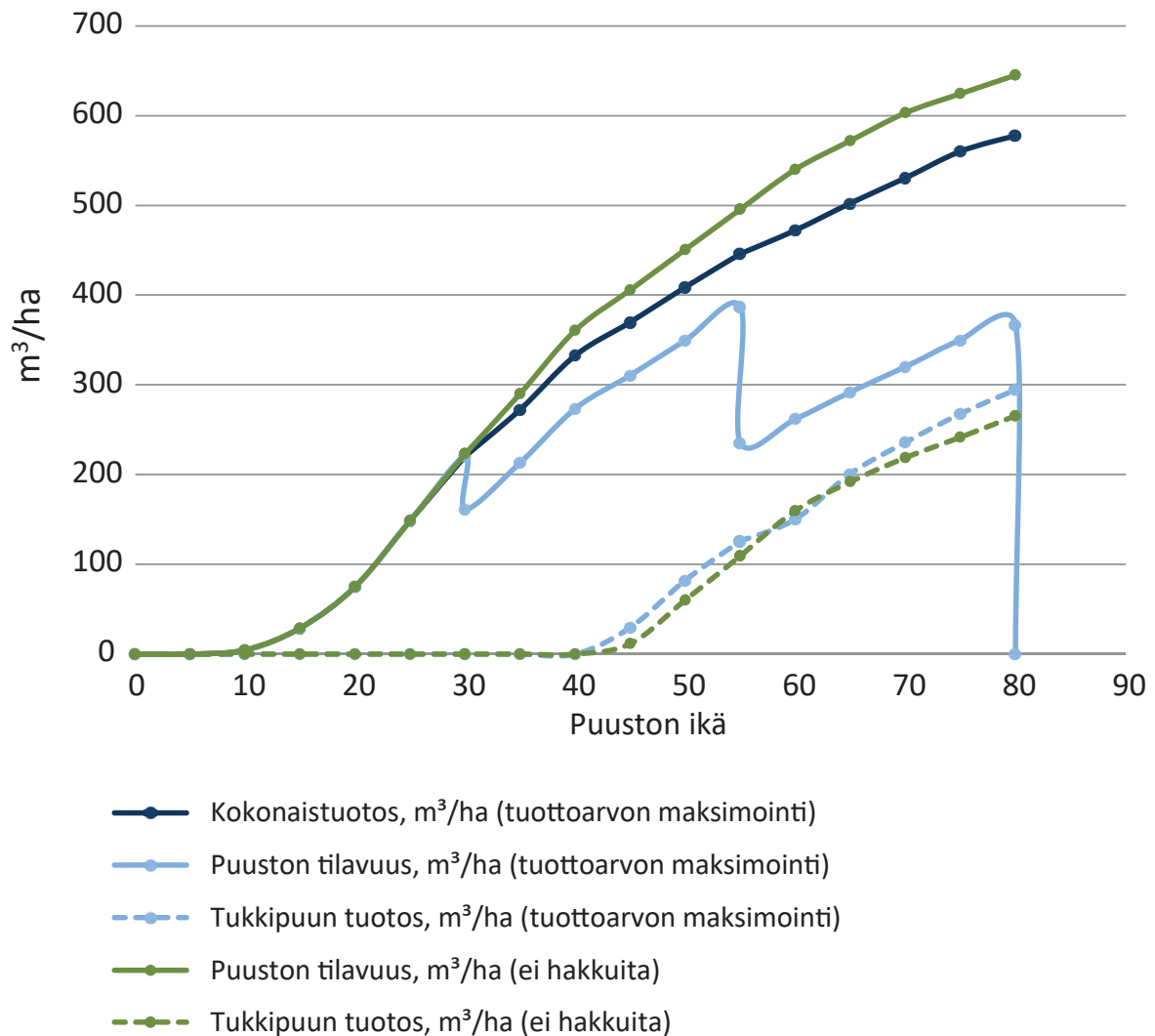
kymmenille tuhansille ihmisille, joten myös toimeliaisuus metsässä on tärkeää metsätalouden sosiaalisen kestävyyden kannalta. Metsätalouden ja metsäteollisuuden suorien verotulojen sekä useiden kerrannaisvaikutusten merkitys Suomen kansantalouteen on erittäin suuri.

2.2 Metsien kasvun dynamiikka

Metsien kasvuun vaikuttavat muun muassa eri puulajeille ominaiset kasvurytmit, puuston ikä, puuston tilavuus, puiden välinen kilpailutilanne sekä ilmaston ja maaperän tarjoavat kasvuolosuhteet. Metsänomistajan näkökulmasta puuston kasvuun voidaan vaikuttaa hakkuiden ja metsänhoitotöiden avulla. Hakkuissa korjataan puuston aiempaa kasvua ja luodaan samalla lisää kasvutilaa kasvamaan jääville puille. Metsänhoitotöiden tarkoituksena on parantaa kasvatettavien puiden kasvuolosuhteita poistamalla kilpailevia puita (varhaisperkaus; taimikonhoito) tai parantamalla maaperän kasvuolosuhteita (lannoitus; kunnostusojitus) sekä edistää metsien terveyttä poistamalla metsätuholaisten infektoimat puut.

Puuston tilavuuskehitys noudattaa sigmoidisen käyrän muotoa, eli kiertoajan alussa puuston kasvu kiihtyy, kiertoajan keskivaiheilla kasvu kulminoituu suurimmilleen ja kiertoajan loppupuolella kasvu taantuu puuston vanhetessa (Lappi 1997). Nämä kasvun lainalaisuudet määrittävät reunaehdot metsien käytölle ja ohjaavat taloudellisin tavoittein toimivia metsänomistajia rajaamaan kiertoajan maantieteestä, kasvupaikasta ja kasvatettavasta puulajista riippuen useimmiten 60–100 vuoteen. Metsänhoidon suosituksissa metsikkö luetaan uudistamiskypsäksi, kun metsänomistaja saa enemmän taloudellista hyötyä puuston uudistamisesta kuin sen edelleen kasvattamisesta. Uudistushakkuu on sadonkorjuun hetki, jonka jälkeen kasvu taantuu lyhyellä aikavälillä uuden metsikön kehittymistä odotellessa, mutta nostaa puuston kokonaiskasvua pitkällä aikavälillä.

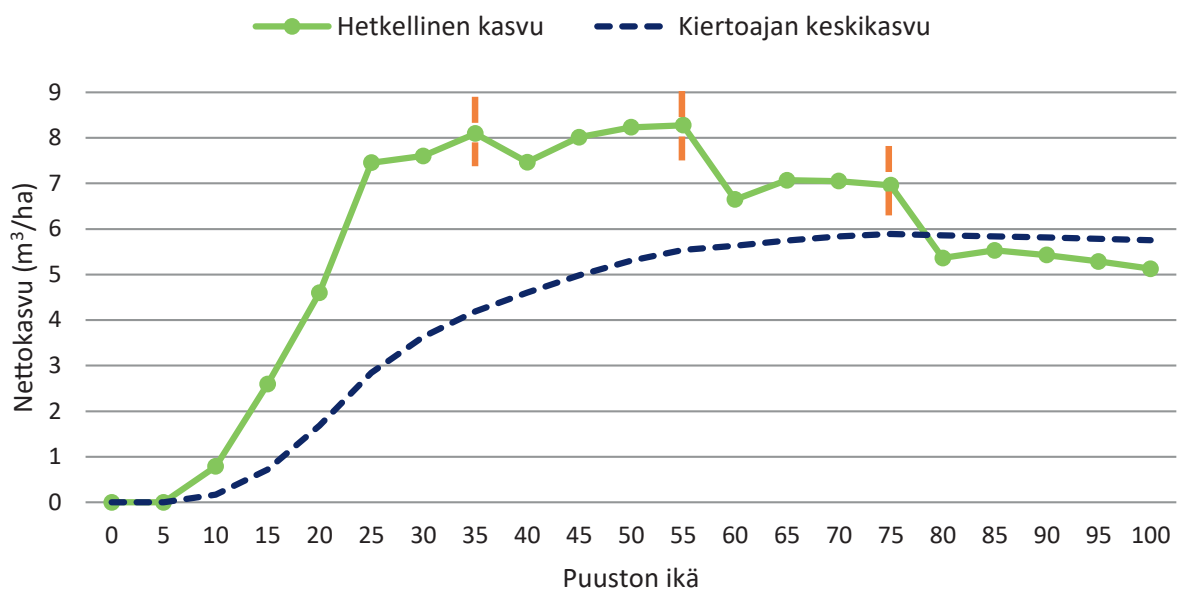
Kuvassa 2 on simuloitu kuuselle istutetun metsikön tilavuuskehitystä 80 vuotta, minkä todettiin olevan 3,5 % diskonttokorolla optimaalinen kiertoaika kyseisissä Pirkanmaan kasvuolosuhteissa. Nettotulojen nykyarvoa maksimoivassa metsänkasvatuksessa harvennukset ajoittuvat 30 ja 55 vuoden ikään. Puuston kokonaistuotoksen kuvaajassa hakkuupoistuma on summattu harvennusten jälkeiseen puuston tilavuuteen, jotta kokonaistuotos olisi vertailukelpoinen ilman hakkuita simuloituun tilavuuskehityksen kuvaajaan. Simuloinnin perusteella puuston



Kuva 2. Vertailu puuston tilavuuskasvusta harvennetussa ja harventamattomassa kuusikossa. Harvennukset on ajoitettu maksimoiden hakkuista saatavien nettotulojen nykyarvoa 3,5 % korkokannalla. Harventamattomassa metsikössä kokonaistuotos on suurempi kuin harvennetussa metsikössä, mutta harvennusten ansiosta arvokasta tukkipuuta syntyy enemmän. MELA2002-kasvumallien mukaan simuloitu kuusikko sijaitsee läntisellä Pirkanmaalla, kasvupaikkana tuore kangas, lämpösumma 1230.

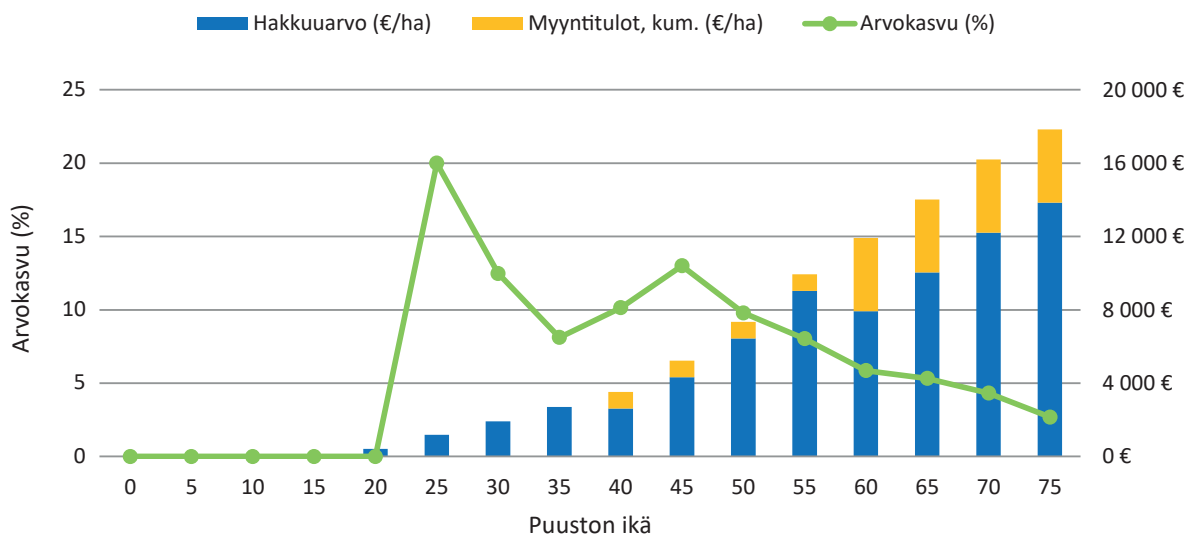
kokonaistuotos on 80 vuoden kiertoajalla hieman suurempi, kun metsää kasvatetaan ilman harvennushakkuita, mutta taloudellisesti arvokkaan tukkipuun tuotos on suurempi kahden harvennushakkuun mallissa. Harvennusten tekemistä puoltaa myös se, että niiden ansiosta metsänomistaja saa osan hakkuutuloista jo kiertoajan aikana.

Mikäli metsien kiertoaikaa haluttaisiin optimoida pelkästään puuntuotannon kannalta, tulisi metsä uudistaa silloin, kun puuston hetkellinen kasvu taantuu alle koko kiertoajan keskikasvun. Kuvassa 3 on verrattu Pirkanmaalla kasvavan tuoreen kankaan kuusikon hetkellistä ja kiertoajan keskimääräistä kasvua metsänhoidon suositusten mukaan ajoitetuilla harvennushakkuilla. Metsien vanhetessa niiden hetkellinen kasvu taantuu alle koko kiertoajan keskimääräisen kasvun. Kyseisten käyrien leikkauspiste on se hetki, jolloin metsä tulisi uudistaa, mikäli metsänhoidon tavoitteena olisi maksimoida puuston kokonaistuotosta pitkällä aikavälillä yli kiertoajkojen. Tosin esimerkissimuloinnissa viimeinen harvennushakkuu kannattaisi jättää tekemättä, mikäli tavoitteena olisi maksimoida puuston kokonaistuotosta, jotta kasvun taantuminen 75 ikävuoden jälkeen ei olisi näin voimakasta. Myöskään taloudellisesti ajatellen harvennushakkuuta ei ole järkevää tehdä juuri ennen uudistushakkuuta, koska uudistushakkuusta maksetaan harvennushakkuuta suurempaa kantohintaa.



Kuva 3. Vertailu puuston hetkellisessä kasvusta ja kiertoajan keskikasvusta eteläsuomalaisessa tuoreen kankaan kuusikossa. Kiertoajan alussa on hitaan kasvun vaihe, minkä jälkeen puuston kasvu kiihtyy suurimmilleen. Metsien vanhetessa puuston kasvu taantuu – metsänhoidon menetelmistä riippumatta. Punaiset poikkiviivat kuvaavat metsänhoidon suositusten mukaisesti ajoitettuja harvennushakkuita. Harvennushakkuu aiheuttaa lyhyellä aikavälillä pienen taantuman puuston kasvussa, ja sen positiiviset vaikutukset puuston kasvussa näkyvät vasta 10–15 vuotta harvennuksen jälkeen.

Koska kaikki metsätalouden toiminnot ovat yhteydessä ympäröivään markkinatalouteen, metsänomistajan kannalta ei ole mielekästä maksimoida puuston kokonaistuotosta, vaan esimerkiksi metsätaloudesta kertyvien nettotulojen nykyarvoa. Puuston arvo kehittyy kiertoajan alussa hitaasti, koska kuitupuun laatuvaatimukset täyttävää puutavaraa alkaa syntyä vasta taimikkovaiheen jälkeen (Kuva 4). Arvokasvu on prosentuaalisesti suurimmillaan silloin, nuoressa kasvatusmetsissä kehittyy kuitupuun laatuvaatimukset täyttävää ainespuuta, ja euromääräisesti suurinta kuitupuuston järeytyessä arvokkaiksi tukeiksi. Harvennusten avulla ylläpidetään puuston nopeaa arvokasvua luomalla lisää kasvutilaa kasvamaan jääville puille. Tasaikäisrakenteisen metsän kasvatuksessa uudistushakkuu tulee eteen, kun puuston arvokasvuprosentti jää alle metsään sijoitetun pääoman tuottovaatimuksen. Talousteoreettisesti tämä tarkoittaa sitä, että metsään sijoitetulle pääomalle saadaan samalla riskillä parempaa tuottoa muista pääomamarkkinoiden tarjoamista sijoitusmahdollisuuksista kuin jatkamalla metsän kasvattamista alenevan arvokasvuprosentin myötä.

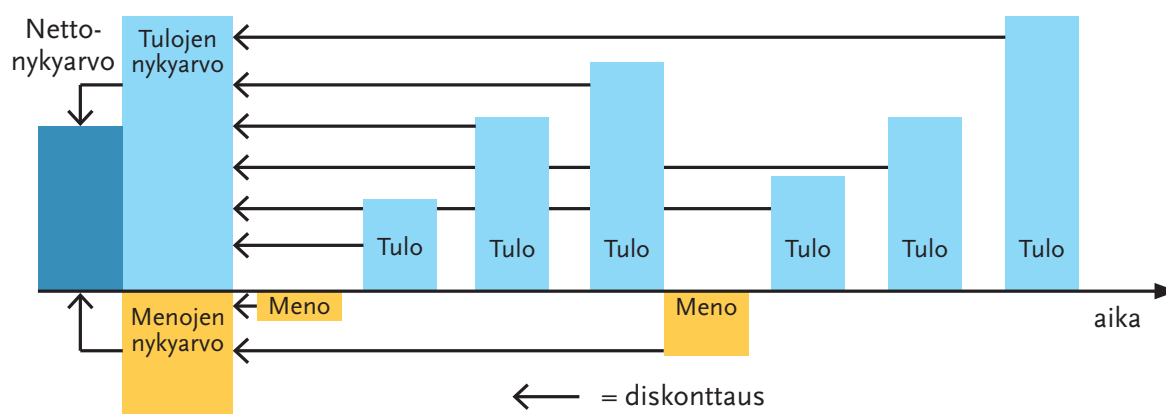


Kuva 4. Puuston arvon ja arvokasvun kehitys kiertoajan aikana kahteen kertaan, 40 ja 60 vuoden iässä harvennettavassa tuoreen kankaan kuusikossa Etelä-Suomessa. Arvokasvuprosentti on suurimmillaan, kun rungot järeytyvät kuitupuun mittoihin. Euromääräinen arvokasvu on kuitenkin suurinta silloin, kun aiemmin ainoastaan kuitupuun laatuvaatimukset täyttäneet rungot järeytyvät tukkipuun kokoluokkaan.

2.3 Korkeimman maankoron kiertoaika

Edellisessä luvussa käsiteltiin puuntuotannon kannalta optimaalisen kiertoajan määrittämistä. Käytännössä puun tilavuuskasvun maksimointi ei kuitenkaan ole relevantti tavoite nykyisessä metsätaloudessa, jossa metsään sijoitetulle pääomalle oletetaan kertyvän myös korkoa. Rahan aika-arvon mukaan euro on tänään arvokkaampi kuin euro huomenna, koska inflaatio heikentää rahan ostovoimaa. Myös ihmiset arvostavat enemmän välittömästi saatavia tuloja kuin pitkällä tulevaisuudessa odottavia tuloja. Näin ollen kaikki tulevaisuudessa ennustetut metsätalouden tulot ja menot pitää diskontata nykyarvoon, jotta eri ajanhetkillä tulevat kassavirrat ovat vertailukelpoisia (Kuva 5).

Mitä suuremmalla korkokannalla metsätalouden tulevaisuuden puunmyyntitulot diskontataan nykyhetkeen, sitä lyhyemmäksi metsänkasvatuksen optimaalinen kiertoaika muuttuu. Kiertoaikaa, joka tuottaa maksimaalisen nettotulojen nykyarvon, kutsutaan korkeimman maankoron kiertoajaksi. Tämän laskemiseen on metsäntutkimuksen eri aloilla hyödynnetty laajasti Faustmannin (1849) kiertoaikamallia, jolla voidaan optimoida suurimman mahdollisen nettotulojen nykyarvon tuottamaa yksittäisen metsikkökuvion uudistamisajankohtaa (esim. Kuuluvainen & Valsta 2009).



Kuva 5. Havainnekuva nettonykyarvon laskennasta kahden kiertoajan tuloilla ja menoilla (Ärölä 2015). Rahan aika-arvon takia nopeasti saatavat tulot arvotetaan suuremmiksi kuin myöhemmin saatavat tulot, joten kaikki eri ajanhetkillä ennustetut kassavirrat pitää diskontata nykyarvoon. Se korkokanta, jolla nettotulojen nykyarvoksi saadaan nolla, kertoo metsänkasvatuksen sisäisen koron kyseisellä kohteella.

Korkeimman maankoron kiertoajan laskemisessa lähtökohtana on paljas maa, joka metsitetään, harvennetaan kasvatushakkuilla ja uudistetaan optimaalisessa iässä. Lisäksi laskennassa oletetaan, että kaikki ensimmäisen kiertoajan aikana syntyvät tulot ja menot toistuvat aina tasaisin väliajoin ikuisuuteen saakka. Kun kaikki tämän päättymättömän jakson aikana ennustetut tulot ja menot diskontataan valitulla korkokannalla simuloinnin alkuhetkeen, saadaan tuloksena paljaan maan tuottoarvo. Se kiertoajan pituus, jolla paljaan maan tuottoarvo on suurin, kertoo korkeimman maankoron kiertoajan (Nyyssönen 1999). Faustmannin mallin avulla saadaan selville myös paljaan maan arvo, joka kertoo, kuinka paljon paljaasta metsämaasta kannattaisi maksaa tietyllä pääoman tuottovaatimuksella.

Eräänlainen Faustmannin kiertoaikamallin sovellus on Suomessa metsän arvonmäärittämisessä yleisesti käytetty summa-arvomenetelmä, jonka aputaulukoihin on laskettu paljaan maan arvo erikseen jokaiselle metsäkeskusalueelle sekä jokaiselle kasvupaikalle (Mäki 2013). Summa-arvon käytössä ideana on se, että paljaan maan arvoa käsitellään metsän arvonmäärittämisessä yhtenä osa-alueena, jonka lisäksi metsän arvo muodostuu taimikoiden arvosta, puuston hakkuuarvosta ja puuston odotusarvostaan (esim. Airaksinen 2008).

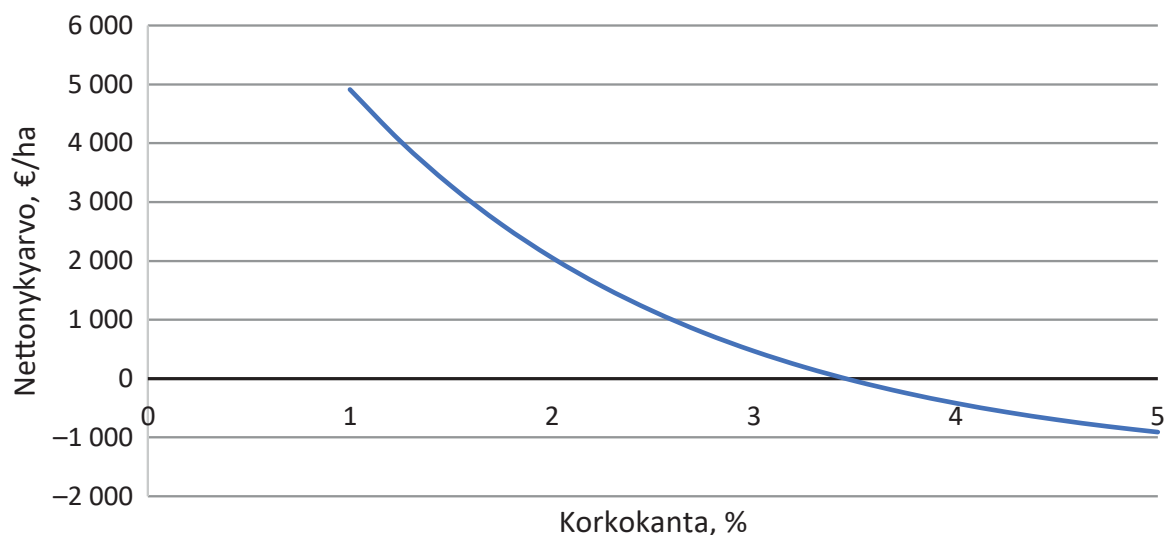
Kun metsätilojen taloudellista arvoa määritetään tuottoarvomenetelmää (esim. Ärölä 2015, s. 14–17) soveltaen, eli laskemalla metsän nettonykyarvo tulevaisuudessa ennustettujen kassavirtojen perusteella, diskonttokoron suuruus vaikuttaa voimakkaasti saataviin tuloksiin. Taloustieteellisesti diskonttokoron valinnan tulee perustua metsään sijoitetun tai sijoitettavan pääoman tuottovaatimukseen. Tuottovaatimuksen määrittelyn haasteena on kuitenkin sen riippuvuus ajanhetkestä – nousukaudella sijoittajat voivat vaatia kohtuullisen vähäriskisestä metsäsijoituksestakin 5–6 % tuottoa, mutta esimerkiksi koronaviruksen riivaamassa laskusuhdanteessa moni sijoittaja olisi tyytyväinen päästessään nollakorkoon. Metsätalouteen tehtävät investoinnit ovat kuitenkin niin pitkän aikavälin sijoituksia, että niiden aikana käydään läpi monta lamaa ja nousukautta, joten diskonttokorkoa ei tässä tapauksessa ole järkevää määrittää pelkästään yhden ajanhetken tilanteen mukaan.

Tavallisesti suomalaisessa metsätaloudessa on käytetty diskonttokorkona 3–5 % reaalikorkoa, mikä vastaa eteläisen ja keskisen Suomen olosuhteissa metsien pitkän ajanjakson reaalityttöä. Pohjois-Suomessa laskentakorko on monesti ollut vielä tätäkin vaihteluväliä pienempi. Tuoreissa summa-arvotaulukoiden kehitys-sarjojen laskennoissa metsänkasvatuksen sisäinen korko asettuu metsänhoidon suositusten mukaisilla toimenpiteillä kasvupaikan rehevyyden mukaan esimerkiksi Lounais-Suomessa 3,1–4,4 %:iin ja Kainuun maakunnassa 2,3–3,3 %:iin.

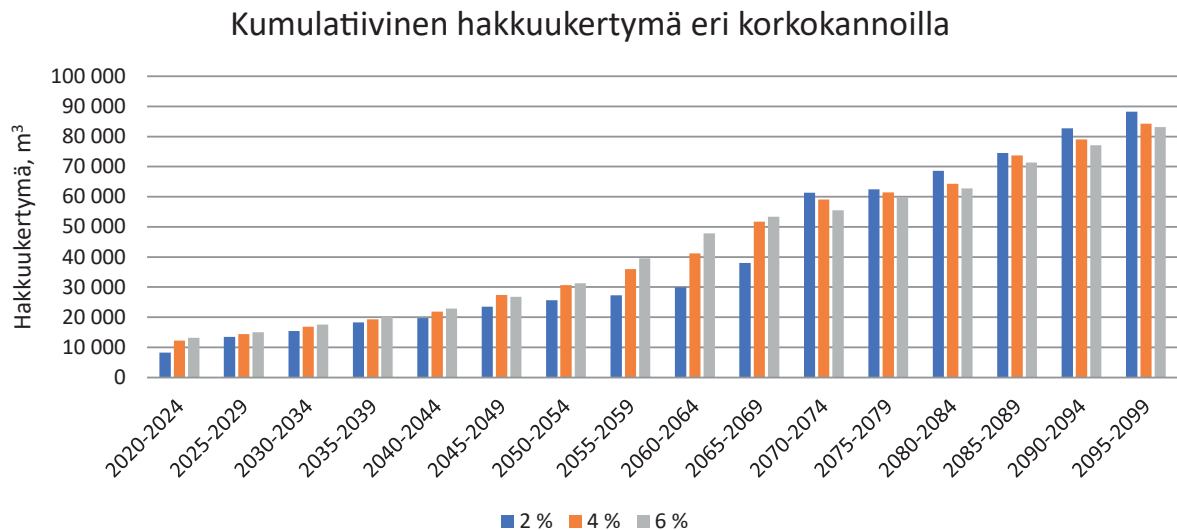
Mikäli nettonykyarvon laskennan taustalla on investoinnin kannattavuuden arviointi, diskonttokoron määrittämisessä voidaan hyödyntää metsänkasvatuksen sisäistä korkoa, eli sitä korkokantaa, jolla nettonykyarvoksi tulee nolla (Kuva 6). Metsätaloudessa sisäisen koron laskenta kertoo, millä korkokannalla taimikon perustamiseen ja hoitoon tehtyt investoinnit tulevat maksamaan itsensä takaisin. Toisin sanoen tällä diskonttokorolla laskettaessa paljaan maan arvoksi saataisiin nolla. Mikäli metsän uudistamiseen ja puuston kasvatukseen tähtäävien toimenpiteiden sisäinen korko olisi esimerkiksi 3,5 %, ei metsään kannattaisi investoida lainkaan, mikäli pääoman tuottovaatimus olisi tätä suurempi.

Korkokannan suuruudella on huomattava vaikutus metsiköiden kiertoaikoihin – mitä suurempi pääoman tuottovaatimus, sitä lyhyemmällä kiertoajalla puustoa kannattaa kasvattaa. Runsaasti nuoria metsiä sisältävässä aineistossa ilmiö tulee hyvin esiin, kun isommalla tuottovaatimuksella suurempi osa hakkuista ajoittuu varhaisemmille vuosille (Kuva 7). Pitkällä aikavälillä puuston kumulatiivinen hakkuukertymä kasvaa kuitenkin sitä suuremmaksi, mitä pienempää diskonttokorkoa käytetään, koska pidempi kiertoaika lisää puuston kokonaistuotosta.

Sisäisen koron määrittäminen graafisesti



Kuva 6. Paljaan maan arvo eri korkokannoilla Äänekoskella sijaitsevassa tuoreen kankaan männikössä (lämpösumma 1155), jota kasvatetaan metsänhoidon suositusten mukaisesti. Korkokanta, jolla nettonykyarvoksi saadaan 0 € (tässä tapauksessa noin 3,5 %), kuvaa metsänkasvatuksen sisäistä korkoa kyseisellä kehityssarjalla.



Kuva 7. Kumulatiivinen hakkuukertymä, kun optimointivaiheessa on maksimoitu nettotulojen nykyarvoa kolmella eri korkokannalla: 2 %, 4 % ja 6 %. Laskenta-aineistona on käytetty harjoitusliitteessä kuvattua aineistoa A, jossa suuri osa kuvioista on joko taimikoita tai nuoria kasvatusmetsiä.

2.4 Päätöksenteon suhde suunnitteluun

Jokainen meistä tekee päivittäin lukuisia arkisia tilanteita koskevia päätöksiä perustuen sekä varovaiseen harkintaan että intuitioon. Kaupan lihatiskillä päätöksenteon kriteereinä ovat tyypillisesti tuotteen hinta, terveellisyys, kuluttajan mielikuva tuotteen laadusta sekä kuluttajan mukaan mahdolliset eettiset tai ruoan alkuperään liittyvät valintakriteerit. Ostoskorissa koskevat valinnat tehdään tavallisesti varsin lyhyen harkinnan jälkeen ilman päätöksenteon tukena käytettäviä apuvälineitä.

Olemme päätöksentekotilanteessa aina silloin, kun meillä on vähintään kaksi vaihtoehtoa, joista valita. Tällöin pyrimme punnitsemaan eri vaihtoehtoista saatavia hyötyjä, haittoja sekä valintojen seurauksia. Shakkipelissä pelaajalla on aina omalla vuorollaan lukuisia joukko erilaisia siirtovaihtoehtoja, joiden joukosta pelaaja tekee valintansa. Tällöin pelaaja joutuu samalla arvioimaan, mitä siirtovaihtoehtoja vastustajalla on hänen ensimmäisen siirtonsa jälkeen, mitä pelaaja itse voi tehdä seuraavalla siirrollaan, miten vastustaja voi reagoida tähän, ja niin edelleen. Shakissa mahdollisten siirtoyhdistelmien määrä kasvaa eksponentiaalisesti ja voimme ainoastaan pyrkiä arvioimaan siirtojen mahdollisia seurauksia parhaan osaamisemme mukaan. Tällöin päätöksenteko perustuu sekä eri vaihto-

ehtojen konkreettiseen laskemiseen että pelaajan intuitioon. Mitä monimutkaisempi pelitilanne on kyseessä, sen tärkeämpää on konkreettisesti laskea erilaisia vaihtoehtoja. Kokemuksen myötä kehittyvä intuitio kuitenkin auttaa pelaajia rajamaan realististen vaihtoehtojen määrää ja keskittymään parhaisiin siirtovaihtoehtoihin.

Metsien käyttöä koskevat päätöksentekotilanteet ovat samankaltaisia kuin edellä esitetyssä shakkipelissä. Metsänomistajalla on lukuisa joukko vaihtoehtoja esimerkiksi hakkuutapoihin ja niiden ajoitukseen liittyen, ja samalla eri toimenpidevaihtoehtojen seuraukset ovat enemmän tai vähemmän epävarmoja. Tässäkin tapauksessa päätöksentekijän kokemus auttaa hahmottamaan eri vaihtoehtojen seurauksia ja niihin liittyviä riskejä. Shakissa pelaajan tavoitteena on yksinkertaisesti pelin voittaminen, mutta metsänomistajien valintoihin liittyy tyypillisesti useampia, keskenään ristiriitaisia päätöksentekokriteereitä. Metsänomistaja saattaa haluta samaan aikaan sekä tuloja metsästään että edistää luonnon monimuotoisuuden säilymistä. Tällöin päätöksentekijän arvojen ja tavoitteiden kannalta optimaalisen ratkaisun löytäminen edellyttää eri vaihtoehtojen tarkempaa analysointia ja keskenään ristiriitaisten päätöksentekokriteerien arvottamista päätöksenteon tueksi.

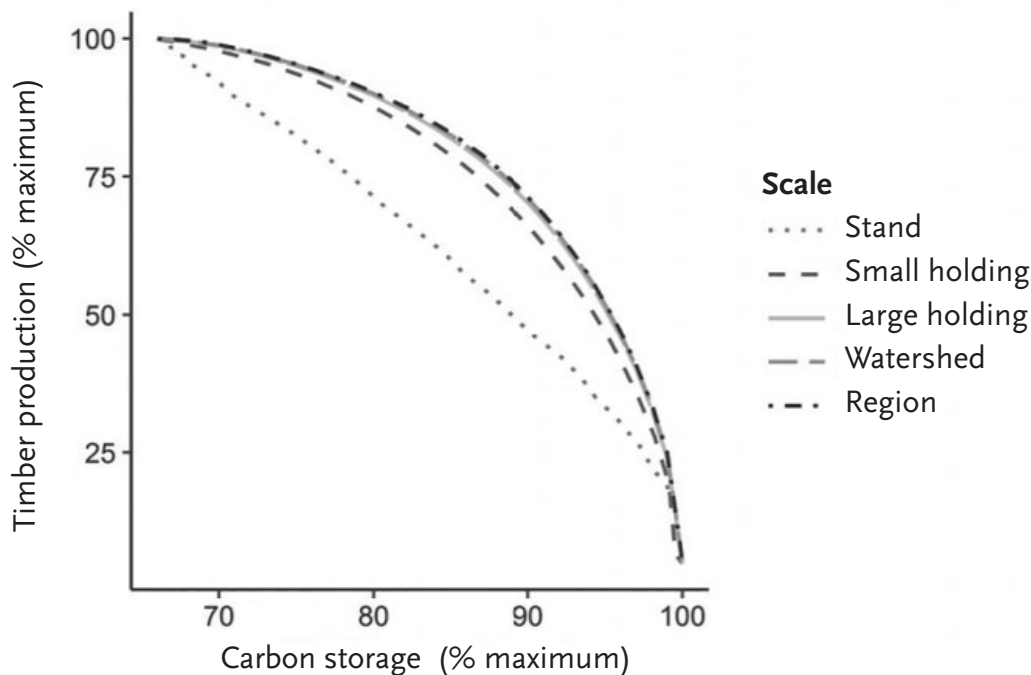
”Rationaalisen käyttäytymisen oletuksella metsien käytön tavoitteena on niistä saatavan hyödyn maksimointi.”

(Salminen 1999)

Yksityisten metsänomistajien metsätiloilla päätöksenteko perustuu tavallisesti joko metsänomistajan omaan näkemykseen tai metsäammattilaisen suosituksiin. Ammattilaisen suosituksiin, valistuneeseen harkintaan ja intuitioon perustuvat päätökset toteuttavat useimpien pieniä ja keskisuuria metsätiloja omistavien ihmisten tarpeet ja tavoitteet yleensä riittävän hyvin, eikä tarkempia päätöksenteon tueksi tehtäviä laskentoja koeta investoinnin arvoiseksi. Tarkempi päätöksenteko vie aina aikaa ja rahaa, eikä investointia optimaalisen ratkaisun analysoimiseksi nähdä pienillä ja keskisuurilla tiloilla kannattavaksi. Yksityisten maanomistajien ei myöskään tarvitse perustella ja vakuutella tekemiään valintoja kenellekään, ellei tilalla voimassa oleva metsäsertifiointi edellytä metsänomistajalta esimerkiksi voimassa olevaa metsäsuunnitelmaa, tiettyjen metsänkasvatustapojen soveltamista tai tiettyjen luontokohteiden suojelua.

Monimutkaisimmat metsätalouden päätöksentekotilanteet liittyvät julkisyhteisöjen, kuten kuntien, kaupunkien ja valtion omistamiin metsiin. Tällöin päätöksentekijöiden joukossa on keskenään eri tavoin ajattelevia ihmisiä, jotka yrittävät löytää metsänhoitoon yhteistä kompromissiratkaisua. Useamman päätöksentekijän tapauksessa eri henkilöiden arvojen ja tavoitteiden huomioisessa voidaan käyttää osallistamis- ja äänestysmenetelmiä, joita esimerkiksi Kangas ym. (2015) käsittelevät englanninkielisessä oppikirjassaan.

Käytännön työssä toimivaksi todettu ja hyvin konkreettinen tapa helpottaa päätöksentekoprosessia on eri tavoitteiden arvottaminen rahaksi. Metsäsuunnittelujärjestelmien avulla on mahdollista laskea, kuinka suuret nettotulot metsätaloudesta voitaisiin saada, mikäli metsien käsittelyä optimoitaisiin pelkästään taloudellisin perustein. Mikäli metsien käytön halutaan täyttävän myös tiettyjä ekologisia tai sosiaalisia tavoitteita, taloudellisen optimiratkaisun rinnalle voidaan simuloida vaihtoehtoisia skenaarioita, joiden avulla selvitetään ekologisten ja sosiaalisten tavoitteiden aiheuttama hakkuutulojen menetys (kts. luvun lopussa oleva esimerkki).



Kuva 8. Esimerkki tuotantomahdollisuuksien käyrästä hakkuutulojen (Timber production) ja metsän hiilivaraston (Carbon storage) välillä. Mitä suuremmalla pinta-alalla puuntuotantoa ja hiilensidontaa optimoidaan, sitä paremmin kyseiset tavoitteet voidaan sovittaa yhteen. Kuvassa esitetyt mittakaavat pienimmästä suurimpaan: kuvio (keskikoko 1,5 ha), pieni metsätila (17 ha), iso metsätila (193 ha), valuma-alue (27 km²), suuralue (440 km²) (Pohjanmies 2018).

Toinen käytännönläheinen vaihtoehto päätöksenteon tukemiseksi on kuvata esimerkiksi hakkuutulojen ja metsän hiilensidonnan vaihtosuhdetta tuotantomahdollisuuksien käyrällä, joka esittää vaihtoehdot, miten paljon kumpaan hyödykettä voidaan saavuttaa samaan aikaan (Pohjanmies 2018; Kuva 8). Kyseinen käyrä kuvaa maksimitasoa, minkä verran näitä hyötyjä voidaan saada samaan aikaan, kun toimenpiteet suunnitellaan ja toteutetaan kyseisiä hyötyjä optimoiden. Mitä suuremmalla pinta-alalla suunnittelua tehdään, sen paremmin eri tavoitteet voidaan yhteensovittaa.

ESIMERKKI: SUUNNITTELULASKELMAT TAMMEN TILAN METSIENHOITO-OHJELMAN LAADINNAN TUEKSI

Tässä yhteydessä esittelemme lyhyesti Porin kaupungin omistaman Tammen tilan metsienhoito-ohjelman laadintaa varten tehdyt strategiset, päätöksentekoa tukevat metsäsuunnittelulaskelmat. Kyseisen laskentaprojektin ensisijainen tarkoitus oli antaa kaupungin virkamiehille lisää tietoa erilaisten metsänhoidon vaihtoehtojen seurauksista metsien rakenteen kehittymiseen sekä vaikutuksista Porin kaupungille kertyviin metsätalouden puunmyyntituloihin.

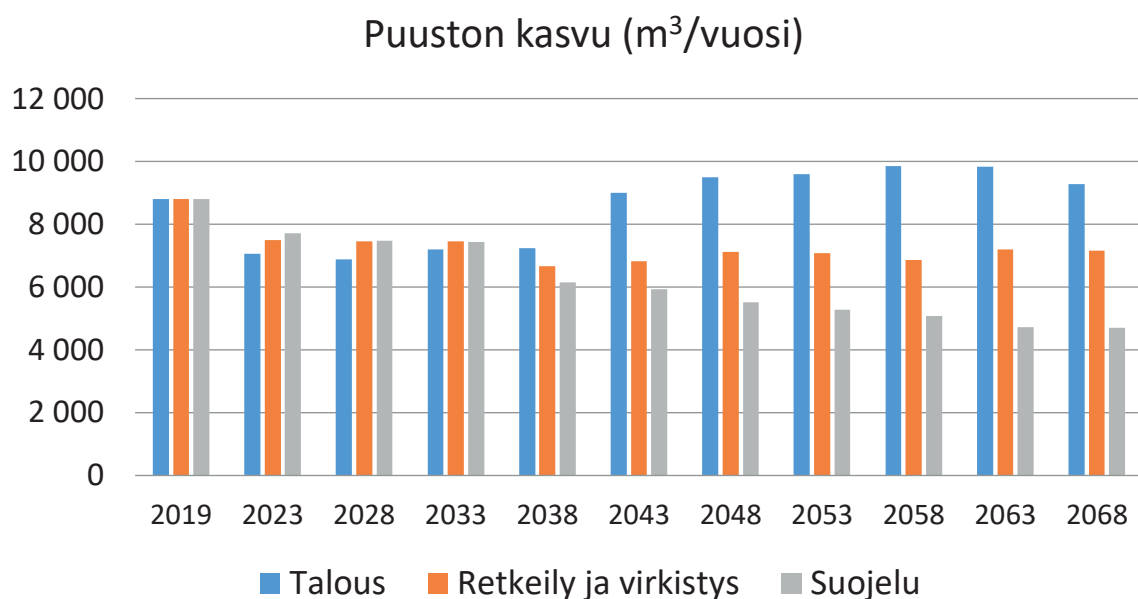
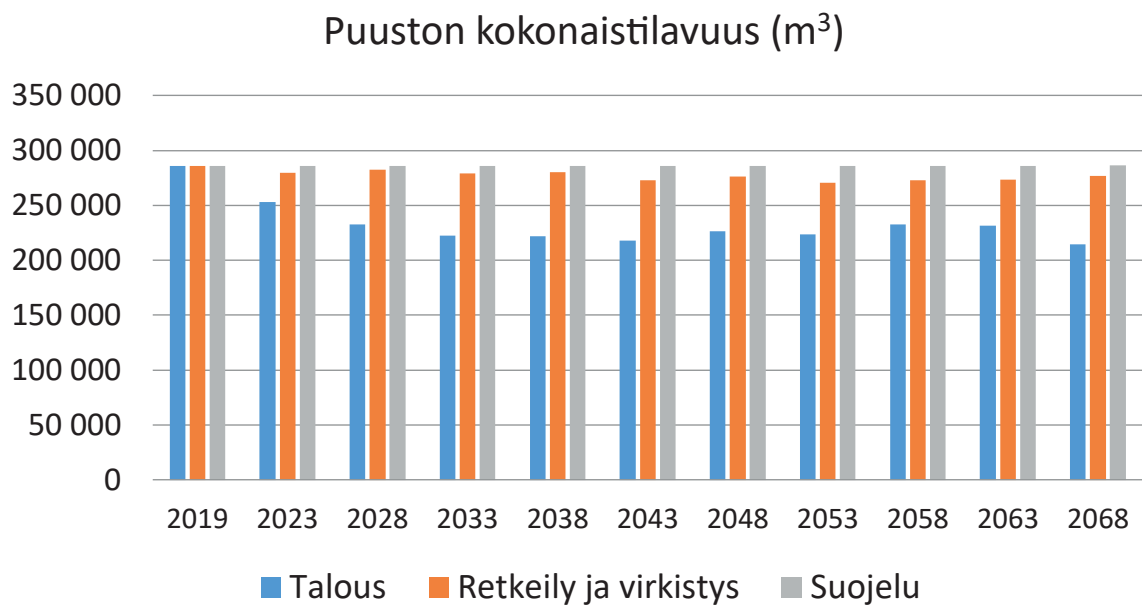
*”Päätöksentekijöiden tehtäväksi jää punnita,
miten he arvostavat metsien tarjoamia
ekologisia ja sosiaalisia arvoja
suhteessa kaupungin taloudellisiin tarpeisiin.”*

Tammen tila on Porin kaupungin omistama, Ulvilan Kullaalla Joutsijärven ympäristössä sijaitseva kiinteistö, jonka alueella on metsää noin 1 650 hehtaaria. Joutsijärvi on suosittua ulkoilu- ja retkeilyaluetta, minkä lisäksi alueella on todettu pesivän uhanalaisia lintulajeja, kuten pohjantikka ja mehiläishaukka. Kansalaiset ovat vaatineet nykyistä tiukempia rajoituksia Tammen tilan metsien käytölle, joten Porin kaupunki päätti laatia alueelle metsienhoito-ohjelman 50 vuodeksi ohjaamaan metsätoimihenkilöiden työtä. Laadimme Tammen tilan metsille kolme erilaista skenaariolaskelmaa, jotka määritettiin yhdessä kaupungin metsätoimihenkilön kanssa seuraavasti:

- 1) **Taluspainotteisen metsänhoidon** skenaariossa metsien käytöltä edellytetään ainoastaan taloudellisen kestävyys toteutumista. Puuston kokonaismäärän muuttumista ei rajoiteta, mutta metsätalouden nettotulojen sallitaan vaihtelevan eri vuosikymmenien välillä enintään 20 %. Tällä tavalla varmistetaan, että Porin kaupungille kertyy puunmyyntituloja myös pidemmällä aikavälillä, eikä kaikkia hakkuumahdollisuuksia realisoida välittömästi.
- 2) **Retkeily- ja virkistyspainotteisen metsänhoidon** skenaariossa pyritään huomioimaan retkeilijöiden arvostamia asioita. Tyypillisesti retkeilijät arvostavat avointa maisemaa, jollainen syntyy esimerkiksi vanhassa talousmetsässä, jossa harvennukset on tehty ajallaan. Puuston kasvua simuloidaan 20 % metsänhoidon suosituksia pidemmillä kiertoajoilla, ja avohakkuiden vuosittainen pinta-ala rajoitetaan enintään 1 %:iin talouskäytössä olevan metsämaan pinta-alasta. Koska puuston keskitilavuus on nykyhetkellä varsin korkea (186 m³/ha) ja metsien kehitysluokkajakauma on painottunut varttuneisiin kasvatusmetsiin sekä uudistuskypsyihin metsiin, puuston keskitilavuuden sallitaan hieman pienentyä nykytilasta.
- 3) **Suojelupainotteisen metsänhoidon** mallissa kaikki hakkuut simuloidaan jatkuvan kasvatuksen periaattein joko poiminta- tai pienaukkohakkuina. Puuston kokonaistilavuuden vaaditaan säilyvän vähintään nykyisellä tasolla. Lisäksi kaikkien järvien ja jokien rantaan jätetään 15 metriä leveä suojavyöhyke, jolle ei simuloida mitään toimenpiteitä.

Laskenta toteutettiin Simosol Oy:n kehittämällä IPTIM-metsäsuunnitteluohjelmistolla, josta on kerrottu tarkemmin luvussa 4.3. Laskennan simulointivaiheessa aineiston jokaiselle kuviolle generoitiin suuri joukko vaihtoehtoisia toimenpideketjuja varioimalla metsänhoitotöiden ja hakkuiden ajoitusta ja toteutusta. Optimointivaiheessa kaikille kolmelle skenaariolle etsittiin taloudellisesti tuottavin ja annettujen rajoitteiden mukainen toimenpideohjelma.

Laskennan keskeisenä tuloksena päätöksentekijöille vietiin muun muassa viesti siitä, että vaatimus nykyisen kokonaistilavuuden ylläpitämisestä Tammen tilalla johtaa vääjäämättä metsien kasvun taantumiseen ja hakkuutulojen pienemiseen pitkällä aikavälillä (Kuva 9). Taluspainotteiseen skenaarioon verrattuna virkistyskäyttöpainotteinen skenaario aiheutti noin 70 000 €/vuosi tulonmenetykset, ja vastaavasti suojelua painottava laskelma keskimäärin liki 100 000 €/vuosi tulonmenetykset. Toisaalta luonnon monimuotoisuus säilynee parhaiten



Kuva 9. Puuston kokonaistilavuuden ja kasvun kehitys eri skenaarioissa Porin kaupungin omistamalla Tammen tilalla. Vuonna 2019 puuston keskitilavuus on 186 m³/ha, keski-kasvu on 5,7 m³/ha/vuosi, ja metsien kehitysluokkajakauma on voimakkaasti painottunut vanhoihin metsiin.

suojelua painottavan metsänhoidon mukaisessa metsien käsittelyssä. Näin ollen päätöksentekijöiden tehtäväksi jää punnita, miten he arvostavat metsien tarjoamia ekologisia ja sosiaalisia arvoja suhteessa kaupungin taloudellisiin tarpeisiin.

LISÄTIETOJA skenaariotarkastelujen hyödyistä: <https://tapio.fi/tiedotteet/skenaariotarkastelu-metsanhoidon-vaihtoehtoista-tukee-kestavaa-metsien-kayttoa/>.



Metsävaratieto

Luotettava ja ajantasainen metsävaratieto on lähtökohta kaikelle metsäsuunnittelulle, sillä ilman hyvää metsästä kerättyä tietoa ei voida suunnitella mitään. Seuraavassa luvussa kerrotaan lyhyesti ja pintapuolisesti metsien inventoinnista sekä inventointimenetelmien kehityksestä. Osion painopiste on metsävaratiedossa, jonka sisältö avataan ja pilkotaan palasiksi tarkempaa tarkastelua varten luvuissa 3.2.1–3.2.3.

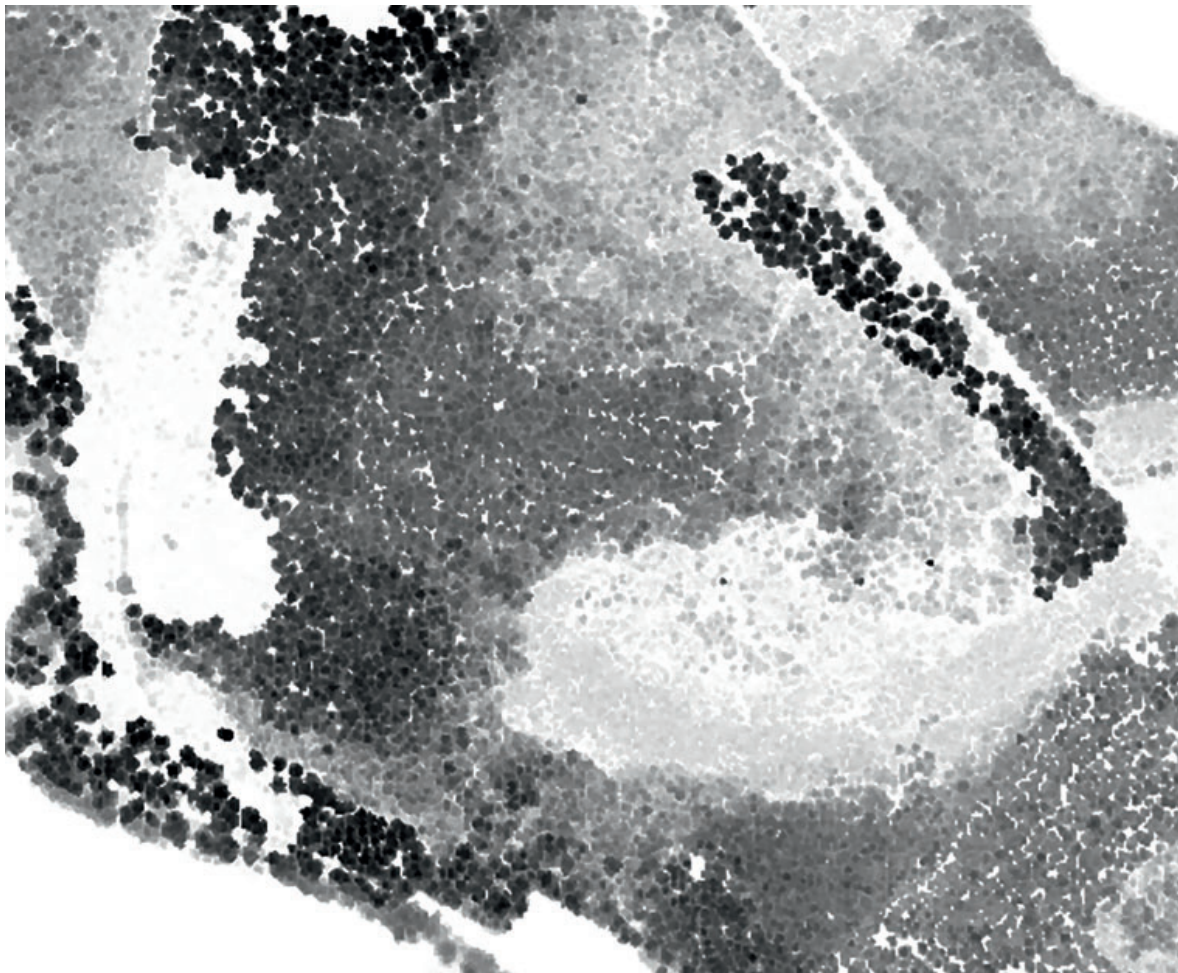
3.1 Metsien inventointi

Perinteisesti metsäsuunnitteluprosessi on sisältänyt noin kymmenen vuoden välein tehtävän kuvioittaisen maastoinventoinnin, jonka perusteella metsäsuunnitelmat on sen jälkeen laadittu (Hokajärvi 2012). Suunnittelijat ovat käyttäneet ilmakuvia ja vanhoja metsäsuunnitelmia tilojen ennakkokuvioinnissa, mutta muutoin työ on jouduttu aloittamaan metsässä puhtaalta pöydältä. Nykyisin lentokoneesta tehtävä laserkeilaus on yleisin laajojen alueiden kaukokartoituksessa käytettävä menetelmä. Laserkeilauksen käyttö metsien inventoinnissa aloitettiin Suomessa vuonna 2008, ja sitä tullaan käyttämään päämenetelmänä metsävarojen inventoinnissa myös tulevana vuosina. Kansallisten laserkeilaus- ja ilmakuvausohjelmien mukaan koko maa tullaan jatkossa keilaamaan joka kuudes vuosi ja ilmakuvamaan joka kolmas vuosi (Maanmittauslaitos 2019). Laserkeilauksen etuna muihin inventointimenetelmiin verrattuna on sen kustannustehokkuus pinta-alayksikköä kohti sekä erinomainen tarkkuus erityisesti kohteiden korkeustiedon arvioinnissa.

Laserkeilauksen käyttö puustotietojen arvioinnissa on sitä tarkempaa, mitä varttuneempi ja yhtenäisempi metsikkö on kyseessä. Heikoimmin laserkeilaus-inventointi toimii nuorissa kasvatusmetsissä, taimikoissa ja erijaksoissa metsissä. Yleisesti laserkeilauksella voidaan inventoida hyvin luotettavasti puuston pituus ja kokonaistilavuus, mutta eniten virheitä tulee puulajisuhteiden, puuston tukki-
osuuden ja metsikön tiheyttä kuvaavien tunnusten määrittämisessä (esim. Holopainen

ym. 2013). Joka tapauksessa laserkeilauksen avulla saadaan hyödyllistä pohja-aineistoa niin kuvioiden muodostamiseen kuin kuviotietojen pohjaksi, eikä suunnittelijan tarvitse enää aloittaa työtään ainoastaan peruskartan ja ilmakuvan pohjalta. Esimerkiksi laserkeilauksella tuotettu puuston korkeusmalli tarjoaa suunnittelijalle käyttökelpoista tietoa latvuston sulkeutuneisuudesta, mitä voidaan soveltaa hakkuutarpeen arvioinnissa (Kuva 10). Maastotyö nopeutuu, kun metsässä ainoastaan tarkennetaan olemassa olevaa tietoa sekä laaditaan toimenpide-ehdotukset.

Laserkeilausinventoinnin ohella ketterät metsäpalveluyritykset ovat alkaneet tarjota miehittämättömillä lennokeilla, eli drooneilla inventoituja metsäsuunnitelmia. Droonien avulla tehtyjen metsäsuunnitelmien vahvuutena on kartoituksen nopeus ja mitattujen puustotietojen täsmällisyys. Drooni-metsäsuunnitelmia ensimmäisenä Suomessa tarjoava Metsä Group kertoo esimerkiksi inventoivansa



Kuva 10. Kuvakaappaus Suomen metsäkeskuksen julkaisemasta latvusmallista, jota suunnittelija voi käyttää aputietona kuvioinnissa. Mitä pidempää puustoa alueella on, sitä tummemmalla värillä alue on kuvattu. Latvusmallin avulla voidaan karkeasti arvioida muun muassa latvusten sulkeutuneisuutta (Suomen metsäkeskus – Metsään.fi/Latvusmallit, 2020).

droonilla jopa 70 hehtaaria metsää tunnissa, tuottavansa metsätilasta paljon tavanomaista tarkemman lähi-ilmakuvan sekä laativansa metsästä puukartan, jonka avulla metsämaisema voidaan visualisoida realistisesti. Drooni-inventointiin keskittynyt Silvere lupaa tuottavansa droonien avulla selvästi perinteisiä mittaustapoja tarkemmat, jopa puutason metsäsuunnitelmat, ja samalla toimialalla toimiva MosaicMill korostaa viestinnässään droonien korvaavan kokonaan perinteiset maastotyöt metsäsuunnitelmien laadinnassa.

Myös metsäsuunnittelun maastotyöhön on kehitetty uuden teknologian avulla uusia työtä tehostavia ja tietoa tarkentavia menetelmiä. Laajimmin metsäsuunnittelijoiden maastotyöhön levinnyt palvelu on valokuvien ottamiseen ja automaattiseen prosessointiin perustuva TRESTIMA-mittaus, jonka avulla metsän mittaus ja tietojen tallennus on tehty helpoksi ja nopeaksi.

Avoimen metsävaratiedon hyödyntäminen suunnittelijan maastotyössä

Metsäsuunnittelija voi halutessaan hyödyntää Metsään.fi-palvelusta vapaasti saatavaa avointa metsävaratietoa monin tavoin. Avoimen metsävaratiedon kuviointi on yleensä hyvin tarkkaa, mutta automaattikuvioinnilla muodostetut kuviorajat sisältävät kuitenkin pientä mutkaa, jota metsäsuunnittelija voi halutessaan yksinkertaistaa kartalle pienimpiä mutkia oikaisemalla. Näin suunnitelmakartasta saadaan luettavamman näköinen. Suunnittelija voi hyödyntää kuviorajojen tarkennuksessa myös laserkeilauksesta muodostettavaa puuston korkeusmallia. Avoimessa metsävaratiedossa on tyypillisesti enemmän kuvioita kuin toteutuskelpoisessa metsäsuunnitelmassa voi olla. Maastossa liikkueensa suunnittelijan kannattaa havainnoida, mikäli viereiset avoimen metsävaratiedon kuviot ovat riittävän samanlaisia ollakseen samaa kuviota metsäsuunnitelmassa.

Avoimessa metsävaratiedossa olevat kuvion perustiedot ovat usein monelta tietokentältäään oikein. Suunnittelijan ei tarvitse täyttää avointa metsävaratietoa hyödyntäessään jokaista kenttää alusta asti, vaan hän voi tarkistaa tiedot ja muuttaa tarpeen mukaan esimerkiksi kasvupaikkaa, kehitysluokkaa, kuvion saavutettavuutta tai maalajia.

Avoimen metsävaratiedon puustotietojen hyödyntäminen metsäsuunnittelussa on hyvin tapaus- ja työtapakohtaista. Tärkeää on myös tiedostaa, kuinka tarkasti puustotiedot halutaan kyseiseen suunnitelmaan arvioida tai mitata. Puuston korkeusmallia hyödyntäen suunnittelija voi arvioida myös puuston pituutta. Korkeusmallissa näkyvä pituus on kuitenkin usein hienoinen aliarvio, koska laserkeilauksen säteet eivät ole aina osuneet puiden korkeimpiin kohtiin tai alimmat kaiut ovat heijastuneet maaperän sijaan tiheästä kenttäkerroksesta.

Samuel Heinonen, Tapio & Metsänterä Ky (17.10.2019)

3.2 Metsätietostandardi

Metsäalan toimijat ovat luoneet yhteistyössä määritelmät, joilla metsistä kerättävää tietoa kuvataan ja siirretään eri tietojärjestelmien välillä. Standardoinnin etuna on se, että standardien mukaan uloskirjoitettu metsävaratieto voidaan lukea sisään kaikkiin ammattitason metsätietojärjestelmiin. Tietojärjestelmien yhteensopivuus on tärkeää, jotta esimerkiksi metsäsuunnittelijoiden mittaamat puustotiedot ja toimenpide-ehdotukset siirtyvät töiden toteuttajille ja puuta hankkiville organisaatioille. Toimijoiden välinen sujuva tiedonsiirto tuo kustannussäästöjä koko alalle ja parantaa metsätalouden kannattavuutta arvoketjun joka vaiheessa. Lisätietoja: www.metsatietostandardit.fi

Metsätietostandardin mukainen kuviotieto muodostuu kiinteistötunnuksesta, useista luokkamuuttujista, kuvion kulmapisteiden koordinaateista, puustositteista ja toimenpide-ehdotuksista. Puuston kuvaukselle ja toimenpide-ehdotuksille on hyvin oleellista, että tietoon liitetään aikaleima sekä informaatio siitä, millä tavalla kyseinen puustotieto tai toimenpide-ehdotus on määritetty. Metsätiedon keskeisimmät osa-alueet käydään läpi seuraavissa alaluvuissa.

3.2.1 Luokkamuuttujat

Metsikkökuvion kasvu- ja korjuuolosuhteet sekä puuston kehitysluokka ja pääpuulaji kuvataan metsätiedon luokkamuuttujissa. Alla on esimerkki luokkamuuttujien määrittelystä xml-tiedostomuotoon tallennetusta metsävaratiedosta. Koodien selitteet on avattu punaisella fontilla kunkin rivin viereen. Kattava koodilista löytyy standardin ylläpitäjän (tällä hetkellä Bitcomp Oy) kokoamasta Excel-tiedostosta ”Sanomakuvaukset ja koodistot” (kts. <https://bitcomp.com/metsa-tieto-tiedonsiirtosanomat/?lang=fi>)

ESIMERKKI. METSÄTIEDON LUOKKAMUUTTUJAT

<code><st:StandNumber>280</st:StandNumber></code>	Kuvion numero
<code><st:MainGroup>1</st:MainGroup></code>	Pääryhmä = metsämaa
<code><st:SubGroup>1</st:SubGroup></code>	Alaryhmä = kangas
<code><st:FertilityClass>3</st:FertilityClass></code>	Ravinteisuus = tuore kangas
<code><st:SoilType>11</st:SoilType></code>	Maaperä = karkea moreeni
<code><st:DrainageState>1</st:DrainageState></code>	Ojitustila = ojittamaton kangas
<code><st:DevelopmentClass>02</st:DevelopmentClass></code>	Kehityslk. = nuori kasvatusmetsä
<code><st:StandQuality>10</st:StandQuality></code>	Metsikön laatu = hyvä
<code><st:MainTreeSpecies>2</st:MainTreeSpecies></code>	Pääpuulaji = kuusi
<code><st:Accessibility>1</st:Accessibility></code>	Saavutettavuus = ympäri vuoden
<code><st:StandBasicDataDate>2019-09-11</st:StandBasicDataDate></code>	Tiedon tallennusaika
<code><st:Area>1.7842</st:Area></code>	Kuvion pinta-ala

Yllä olevan esimerkkikuvaksen lisäksi luokkamuuttujissa voidaan kuvata muun muassa kuvion käsittelyyn liittyviä hakkuu- tai metsänhoitorajoituksia. Lisäksi metsätietostandardi mahdollistaa joka kuviolle sertifiointitiedon ja metsikön hoitoluokan tallentamisen. Myös kuvion sijainti saadaan esitettyä standardin mukaisessa sanomatiedostossa ETRS-TM35FIN-koordinaattien avulla.

Eri organisaatioiden metsätietojärjestelmiin on rakennettu algoritmit, joiden avulla standardin mukaan kirjoitetut metsävaratiedot voidaan helposti lukea sisään järjestelmään. Kuvassa 11 on havainnollistettu, miten esimerkiksi TAPIO ForestKIT -metsäsuunnitteluohjelmisto kuvaa käyttäjälleen yllä olevan esimerkin luokkamuuttujiin tallennettua tietoa. Ammattilaisille suunnatuissa metsätietojärjestelmissä on aina mukana mahdollisuus muokata metsävaratietoa sekä kirjoittaa ulos metsätietostandardin mukainen tiedosto, joka voidaan lukea sisään jossain toisessa tietojärjestelmässä.

ID: 3499668 Kuvio: 280 1,78 Hehtaari Tuore kangas, vastaava suo ja mustikkaturvekangas Aina 02 - Nuori kasvatusmetsä Ei käytön rajoituksia null KAPPELIKIVI 109-516-1-43 (0)			
Kuvio: 280	Pinta-ala: 1,78	Vähenemysala: 0,00	Laskenta tilanne: OK
Paaryhmä: Metsämaa	Alaryhmä: Kangas	Kasvupaikka: Tuore kangas, vastaava s	Maalaji: Karkea moreeni
Kuivatus tilanne: Ojittamaton kangas	Ojitusvuosi: -	Kehitysluokka: 02 - Nuori kasvatusmetsä	Metsikön laatu: Hyvä
Pääpuulaji: Kuusi	Saavutettavuus: Aina	Hakkurajoitus: Ei käytön rajoituksia	Hoitoluokka: -
Hakkurajoituksen päättymispäivä: -	Metsänhoitorajoitus: Ei käytön rajoituksia	Metsänhoitorajoituksen päättymispäivä: -	Muokkaa: Mikko Niemi

Kuva 11. Luokkamuuttujien esittäminen TAPIO ForestKIT -ohjelmistossa (2020).

3.2.2 Puusto

Metsätietostandardissa kuvion puusto kuvataan aina puusto-ositteiden avulla. Periaatteessa ositteita voi olla standardin mukaisessa tiedostossa rajoittamaton määrä, mutta sovellukset, joilla tietoa käsitellään, saattavat rajoittaa puusto-ositteiden maksimimäärää. Jokaisesta ositteesta määritetään jakson (vallitseva jakso, ylispuusto tai alikasvos) lisäksi puuston keskitunnukset (ikä, keskiläpimitta ja keskipituus) sekä puuston tiheyttä kuvaavat tunnuksien (pohjapinta-ala tai runkoluku). Tunnuksista runkoluvun, pohjapinta-alan ja keskiläpimitan välillä on riippuvuus, jonka ansiosta toisen tiheystunnuksen avulla voidaan laskea automaattisesti toinen tiheystunnus (esim. runkoluku voidaan laskea automaattisesti pohjapinta-alan ja keskiläpimitan perusteella). Kuvassa 12 on havainnollistettu, miten puustotieto on esitetty ForestKIT-suunnitteluohjelmistossa.

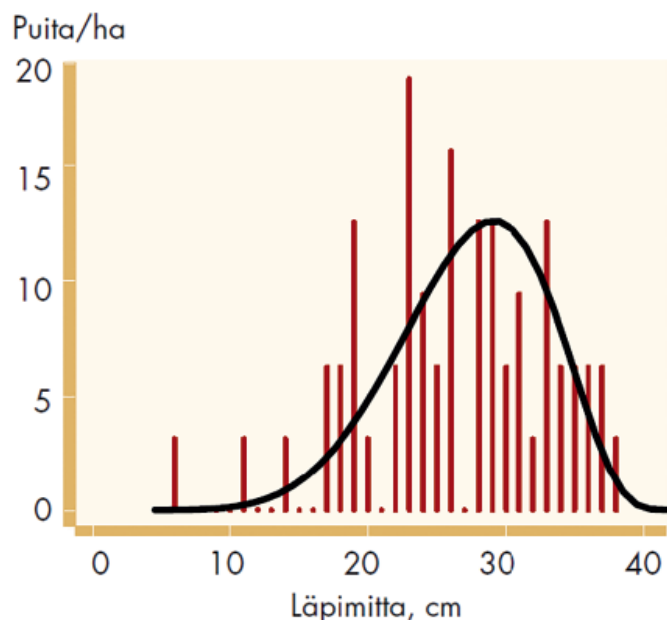
Metsätalouden päätöstukijärjestelmissä on keskeistä ennustaa puuston kasvu sekä toimenpiteiden vaikutus kasvuun. Kasvumallinnus voidaan tehdä joko suoraan keskitunnuksien kehityksen kautta kuviotason kasvumalleilla tai ennustamalla

Ikä 134 v Ppa 12.1 m ² Ri 1644 kpl Klpm 21.9 cm Kpit 15.1 m Tilavuus 87 m ³ /ha Kok.til 75 m ³ Mikko Niemi 02-04-2019										
Inventointipäivämäärä:	Kes	18	2020	Puustotieto: 02-04-2019 (Laskenta)		Muokkaa	Palaa			
Jakso	Puulaji	Ika	Pohjapinta-ala	Runkoluku	Keskilapimitta	Keskipituus	Tilavuus	Tukki-%	Käyttöpuu-%	Kasvu
Ylispuusto	Mänty	134	6.6	75	33.6	21.1	64	79	100	1.1
Vallitseva jakso	Mänty	29	1.3	387	6.8	7	5	0	23	0.8
Vallitseva jakso	Haapa	31	0.4	76	8.8	8.5	2	0	75	0.1
Vallitseva jakso	Hieskoivu	31	3.1	630	8.8	8.9	14	0	72	0.9
Vallitseva jakso	Hieskoivu	20	0.7	476	4.3	5.3	2	0	0	0.3

Kuva 12. Puusto-ositteiden kuvaaminen TAPIO ForestKIT -ohjelmistossa (2020). Vihreään yläpalkkiin on laskettu yhteenveto vallitsevan jakson puustosta. Puuston tilavuus, tukki-%, käyttöpuu-% ja kasvu on laskettu automaattisesti järjestelmään integroidun SIMO-laskennan avulla (<http://www.simo-project.org>).

ensin keskitunnuksien perusteella metsikön runkolukusarja (ns. kuvauspuut), johon sovelletaan puutason kasvumalleja. Suomalaisissa suunnitteluohjelmistoissa vallitseva menetelmä on runkolukusarjan ennustaminen (Kuva 13).

Puutason kasvumallien soveltamisessa on se etu, että erikokoisten puiden välinen kilpailutilanne voidaan huomioida niiden avulla paremmin kuin keskitunnuksia käyttävissä kuviotason malleissa. Myös erilaisten hakkuutapojen vaikutus puuston kehittymiseen saadaan ennustettua tarkemmin puutason malleilla. Suurin epävarmuustekijä puutason mallien soveltamisessa on runkolukusarjan ennustaminen (Rasinmäki ym. 2009).



Kuva 13. Maastotyönä mitattu runkolukusarja (punainen pylväskaavio) sekä keskitunnuksien perusteella ennustettu runkolukusarja (musta viiva). Runkolukusarjan ennustamiseen liittyy aina epävarmuutta (Rasinmäki ym. 2009).

Runkolukusarjan puiden pituuden arvioinnissa on tyypillisesti sovellettu Veltheimin (1987) puulajikohtaisia pituusmalleja, joissa hyödynnetään selittävinä muuttujina kasvupaikan ominaisuuksia ja puuston sulkeutuneisuutta. Eri puutavaralajien tilavuudet on jo vuosikymmeniä estimoitu Laasasenahon (1982) tilavuusyhtälöillä. Puuston kuvaamisen osalta ollaan kuitenkin hiljalleen menossa murrosvaiheeseen, sillä sekä Veltheimin että Laasasenahon mallit ovat ajalta, jolloin puiden rinnankorkeusläpimitat mitattiin huolella, mutta pituuden ennustamiseen tarvittiin mallinnusta. Tänä päivänä tilanne on päinvastoin, sillä laserkeilausinventoinnin myötä puuston pituus on tarkin sekä puu- että metsikkötasolta inventoitava tunnus, joten tulevaisuudessa metsien inventointiin tarkoitettut mallit tuleekin perustaa enemmän puuston pituuden varaan, koska tarkkaa pituustietoa on laajasti saatavilla.

3.2.3 Toimenpiteet

Metsänomistajan kannalta keskeisin osa metsävaratietoa ovat siihen kuuluvat toimenpide-ehdotukset. Toimenpide-ehdotuksiin kirjataan hakkuutavan tai metsänhoitotoimenpiteen lisäksi hakkuun ehdotusvuosi sekä tieto siitä, mihin ehdotus perustuu: simuloitu- tai maastoehdotus (Kuva 14). Metsätietostandardi mahdollistaa myös toimenpiteen tilan tallentamisen seuraavalla luokituksella: toimenpide suunniteltu / toteutus ketjutettu / toteutus alkanut / toteutus päättynyt.

Metsätietostandardiin on sovittu laajat koodistot hakkuiden ja metsänhoitotöiden ohjaamiseen tarvittavista tarkenteista ja lisämääreistä. Taulukkoon 1 on koottu muutama esimerkki, millaisia toimenpiteiden toteuttajille suunnattuja ohjauskeinoja metsätietostandardi mahdollistaa (lista ei ole kattava).

Kuvio	Pinta-ala	Pääryhmä	Alaryhmä	Kehitysluokka	Pääpuulaji	Hakkuutapa	Hakkuun ehdotusv	Hakkuun ehdotus	Mh toimenpide	Mh ehdotusv	Mh ehdotustyyppi
1	1,10	Metsämaa	Kangas	A0 - Aukea					Kuusen istutus	2020	Maastoehdotus
2	2,45	Kitumaa	Räme		Mänty						
3	1,90	Metsämaa	Kangas	03 - Varttunut	Mänty						
4	0,36	Metsämaa	Kangas	03 - Varttunut	Mänty	Avohakkuu	2038	SIMO-ehdotus	Uudistusalan raivaus	2038	SIMO-ehdotus
5	2,78	Metsämaa	Kangas	03 - Varttunut	Mänty	Poimintahakkuu	2028	Maastoehdotus			
6	0,84	Metsämaa	Kangas	03 - Varttunut	Mänty						
7	3,10	Metsämaa	Kangas	T2 - Taimikko	Kuusi				Taimikon varhaisperkaus	2021	Maastoehdotus
8	1,01	Metsämaa	Räme	03 - Varttunut	Kuusi	Harvennus	2020	Maastoehdotus			
8.1	0,51	Metsämaa	Kangas	03 - Varttunut	Mänty	Harvennus	2023	SIMO-ehdotus			

Kuva 14. Esimerkki metsävaratiedoissa olevista hakkuu- ja metsänhoitotyöehdotuksista. Ehdotukset perustuvat joko metsäsimulaattorin käyttämiin toimenpidemalleihin ("SIMO-ehdotus") tai suunnittelijan maastotyönä laadittuihin ehdotuksiin.

Taulukko 1. Esimerkkejä metsätietostandardissa olevista hakkuiden ja metsänhoitotöiden lisämääreistä.

KOODISTONIMI	KOODISTOSELITE	KOODI	
CuttingDirectingType	Hakkuun ohjaustiedot	0	Alaharvennus
CuttingDirectingType	Hakkuun ohjaustiedot	1	Suositaan mäntyä
CuttingExtraQualifierType	Hakkuun lisämääreet	101	Alikasvos säästetään
CuttingExtraQualifierType	Hakkuun lisämääreet	116	Siemenpuut jätetään ryhmiin
CuttingExtraQualifierType	Hakkuun lisämääreet	171	Maaston kaltevuus vaikeuttaa korjuuta
SilvicultureExtraQualifierType	Metsänhoitotyön lisämääre	204	Jaloja lehtipuita säästetään
SilvicultureExtraQualifierType	Metsänhoitotyön lisämääre	251	Kemera-rahoituskelpoinen
CommonOperationExtraQualifierType	Yleiset toimenpiteen lisämääreet	10012	Puron uoman ylittäminen

Metsävaratieto vai metsäsuunnitelma?

Metsävaratieto ja metsäsuunnitelma ovat käsitteitä, jotka menevät jopa monelta metsäalan ihmiseltä usein sekaisin. Molemmat edellä mainitut dokumentit ovat tyypillisesti tietosisällöltään varsin samankaltaisia, koska sekä metsävaratiedon että metsäsuunnitelman tallentamisessa ja jakelussa käytetään metsätietostandardin mukaista xml-tiedostotyyppiä. Mitä eroa näillä termeillä sitten oikein on?

Metsävaratieto on kuvioittain kerättyä inventointitietoa, jota kerätään systemaattisesti läpi Suomen kaikilta metsätiloilta – suuralue kerrallaan. Tiedonkeruussa hyödynnetään tänä päivänä lentolaserkeilausta, ja toimenpide-ehdotukset laaditaan joka kuviolle automaattisesti metsäsimulaattorin avulla puustotietoihin perustuen. Toimenpidemallit perustuvat useiden alan toimijoiden yhdessä kokoamiin metsänhoidon suosituksiin.

Metsäsuunnitelma on sen sijaan erikseen tilauksesta metsäomistajalle koottava tietopaketti, jossa on huomioitu metsänomistajan arvot ja tavoitteet. Kaikkien toimenpide-ehdotusten laadinnassa tulisi olla otettu huomioon tilakokonaisuus sekä mahdollisuuksien mukaan myös metsänomistajan muu taloudellinen tilanne. Tyypillisesti metsäsuunnitelmaan on laskettu arviot seuraavien viiden tai kymmenen vuoden hakkuukertymästä ja puunmyyntituloista, sekä tietoa millainen metsäomaisuus metsänomistajalle tulee jäämään suunnittelukauden lopussa.



Simulointiin ja optimointiin perustuvat suunnittelulaskennat

Monitavoitteisessa metsäsuunnittelussa hyödynnetään päätöksenteon tukena simulointiin ja optimointiin perustuvia laskentamenetelmiä, joiden avulla useiden mahdollisten toimenpidevaihtoehtojen joukosta voidaan löytää kussakin tilanteessa päätöksentekijän kriteerien mukaan suurimman mahdollisen hyödyn tuottava ratkaisu. Nykyaikaiset metsäsuunnittelujärjestelmät koostuvat monesta toisiaan tukevasta osasta, jotka voidaan karkeasti jaotella seuraavasti:

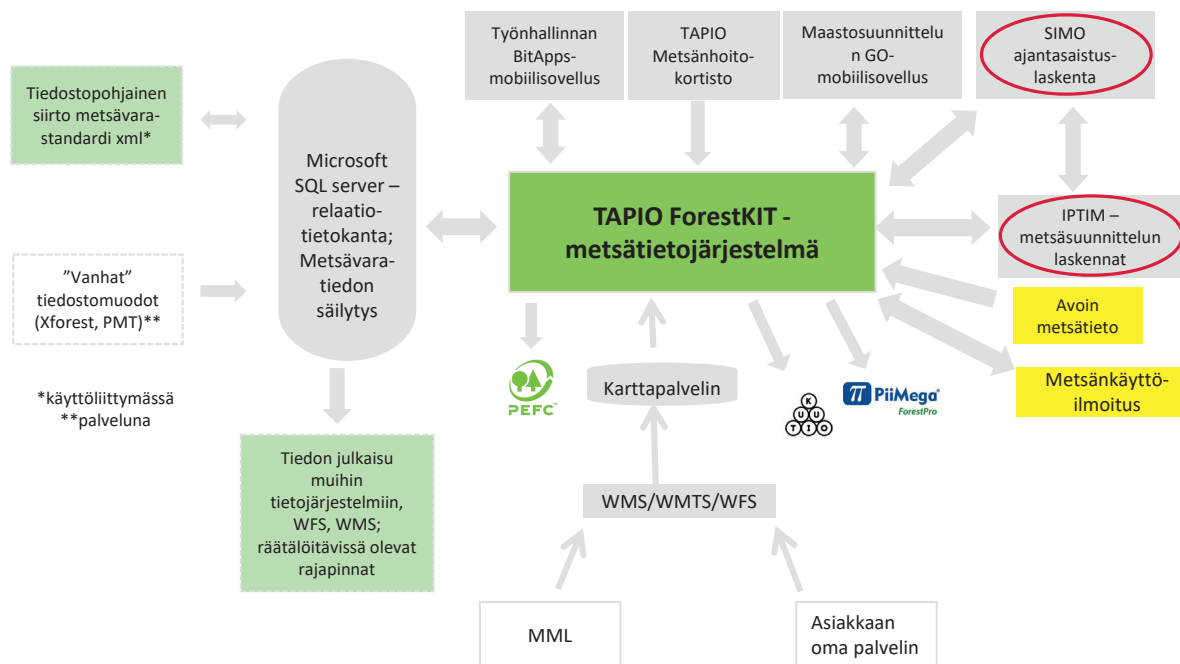
- 1) Metsävaratiedon hallinta
- 2) Toimenpidevaihtoehtojen simulointi
- 3) Toimenpidevaihtoehtojen optimointi
- 4) Metsäsuunnitelman raportointi
- 5) Toimenpiteiden operatiivinen ohjaus

”Metsäsimulaattori on tietokoneistettu malli, jolla ennustetaan metsän kasvua ja tulevaa kehitystä, sekä hakkuiden ja käsittelyiden vaikutuksia metsiin. Metsäsuunnittelujärjestelmä on päätöstukijärjestelmä, joka yleisesti koostuu metsäsimulaattorista ja optimointimallista ja jonka avulla metsien käsittelyitä voidaan optimoida.”

(Mäkinen 2010)

Jokainen ammattitason metsätietojärjestelmä sisältää työkalut metsävaratiedon sisäänlukuun, paikkaan sidotun tiedon esittämiseen ja tietojen muokkaukseen. Toimenpide-ehdotuksia voidaan laatia joko manuaalisesti käyttäjän ammattitaitoon

ja valistuneisiin näkemyksiin perustuen, tai laskennallisesti kasvu- ja toimenpide-
malleja hyödyntäen. Suunnittelun ja raportoinnin avuksi metsätietojärjestelmiin
tuodaan useita erilaisia karttatasoja eri toimijoiden tarjoamista rajapinnoista. Li-
säksi järjestelmistä voidaan lähettää tietoja rajapintojen kautta esimerkiksi töiden
toteuttajien omiin paikkatietojärjestelmiin, puunostajien seuraamalle sähköiselle
puukauppapaikalle tai viranomaisten järjestelmiin. Kuva 15 havainnollistaa, mil-
laista tietoa ammattitason metsäsuunnitteluajärjestelmässä liikkuu eri suuntiin.

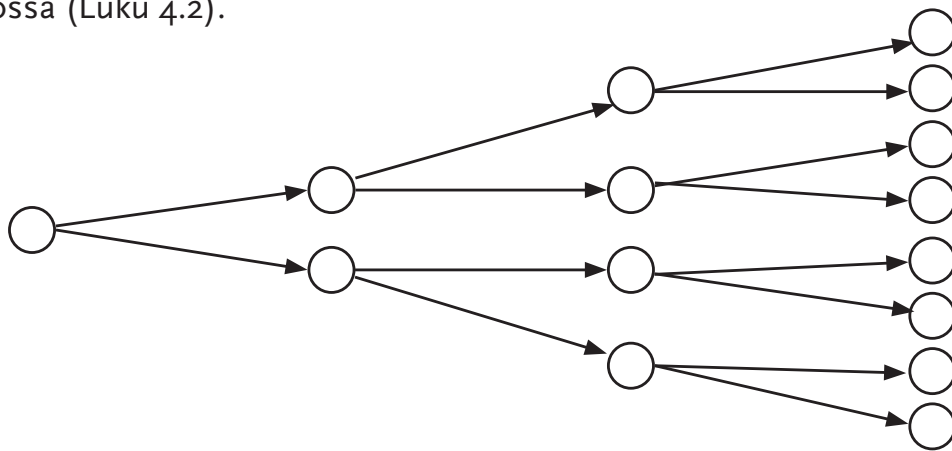


Kuva 15. Kaaviokuva ammattikäyttöön suunnitellun metsätietojärjestelmän rakenteesta. © Anssi Aalto 2020. Tämän oppimateriaalin painopisteenä olevat simulointi- ja optimointilaskennat on korostettu punaisella.

4.1 Simulointi

Metsäsuunnittelulaskentojen ensimmäiset vaiheet ovat metsävaratiedon ajan-
tasaistus ja erilaisten käsittelyvaihtoehtojen simulointi. Tässä vaiheessa kukin
metsikkökuvio käsitellään erikseen. Ensin kuvioiden puustotiedot joko mallinne-
taan vanhoista tiedoista kasvumallien avulla nykyhetkeen tai inventoidaan uudes-
taan. Kun tieto on saatu vastaamaan nykytilannetta, joka kuviolle luodaan useita
vaihtoehtoisia toimenpideketjuja varioimalla toimenpiteiden ajoitusta ja toteutus-
tapaa toimenpidemallien (Luku 4.1.1) mukaan. Toimenpiteiden välillä puuston
kasvua simuloidaan kasvumallien (Luku 4.1.2) mukaan ohjelmistoon määritellyn

Simulointivaiheessa jokainen vaihtoehtoinen käsittelyketju tuottaa erilaiset hakkuutulot ja metsänhoidon kustannukset. Lisäksi kasvamaan jäävän puuston rakenne vaihtelee voimakkaasti eri vaihtoehtojen välillä, jolloin myös kyseisen metsikkökuvion tuottamat ekologiset ja sosiaaliset hyödyt vaihtelevat. Yksittäisellä kuviolla taloudelliset ja ekologiset hyödyt ovat tyypillisesti suurimmillaan eri vaihtoehtoissa, joten päätöksentekijän kriteerien kannalta suurimman mahdollisen hyödyn tuottavan ratkaisun löytäminen edellyttää optimointia koko kuviojoukossa (Luku 4.2).



Kuva 16. Joka kuviolle luodaan päätöspuu varioimalla toimenpiteiden ajoitusta ja toteutusta.
© Simosol Oy

Puuston kehityksen simuloinnissa toimenpidemallit määrittävät eri toimenpidevaihtoehtojen mahdollisen ajoituksen, toteutustavan, vaikutuksen puustoon sekä mahdolliset hakkuukertymät, tulot ja kustannukset. Toimenpidemallien toteutus riippuu siitä, mitä toimenpidettä niillä simuloidaan. Tyypillinen esimerkki toimenpidemallista on päätehakkuun simulointimalli, jolla simuloidaan erityyppisiä päätehakkuita. Päätehakkuun simulointimallin toteutus koostuu useammasta vaiheesta:

- SIMULOINTIIN JA OPTIMOINTIIN PERUSTUVAT SUUNNITTELULASKENNAT • 45

2. **Päätehakkuutavan valinta** tapahtuu usein kuvion kasvupaikan, maalajin ja olemassa olevan puuston perusteella. Esimerkiksi toimenpidemalleissa voidaan määritellä, että kuivahkolla kankaalla ja sitä karummilla kasvupaikoilla olevat männiköt uudistetaan siemenpuuhakkuilla ja tuoreilla kankailla ja sitä ravinteikkaimmilla kasvupaikoilla olevat metsät avohakataan. On tärkeää mainita, että logiikka, jolla päätehakkuutavan valinta tapahtuu, riippuu siitä, miten ja mihin käyttöön metsäsimulaattori on rakennettu. Päätehakkuutapojaa on paljon erilaisia ja eri organisaatioilla on erilaisia käytäntöjä siitä, miten erityyppiset kuviot uudistetaan.
3. **Päätehakkuun simulointi** mallin ohjelmallisella toteutuksella. Simulointimallin syöttötietoina voi olla jakaumamallilla generoitu runkolukusarja (Kuva 13), jonka perusteella ennustetaan hakkuun tuottamat puutavaralajikertymät. Puutavaralajien tilavuudet saadaan apteeraamalla runkolukusarjan kuvauspuut, joiden runkojen muodot on ennustettu runkokäyrämalleilla (Laasasenaho 1982). Apteerauksessa hyödynnetään puu- ja puutavaralajien minimipituuksia ja -läpimittoja sekä puutavaralajihintoja, joiden perusteella apteerausmalli osaa arvioida, miten rungot kannattaa katkoa. Lisäksi simulointimallille voidaan antaa muita parametreja, kuten kuinka monta säästöpuuta per hehtaari kuviolle tulee jättää. Simulointimallien ohjelmalliset toteutukset riippuvat metsätietojärjestelmästä ja hakkuutavasta.
4. **Hakkuukertymien ja -tulojen** laskenta. Yksi hakkuumallien tärkeimpiä tehtäviä on hakkuusta saatavan puutavaralajikertymän ja hakkuutulojen arviointi. Apteeraamalla saaduista puutavaralajikertymistä saadaan laskettua hakkuutulot, kun kertymät kerrotaan puutavaralajikohtaisilla hinnoilla.
5. **Puustotunnusten päivittäminen** laskennallisesti hakkuun seurauksena. Simulointimallin tulee päivittää kuviolle jäävän puuston puustotunnukset, jotta hakkuun vaikutus puuston kehitykseen tulee huomioitua.

Eri toimenpiteille on erityyppisiä malleja. Esimerkkeinä näistä ovat päätehakkuu-, harvennus- ja muut hakkuita simuloivat mallit, maanmuokkausmallit, uudistusmallit, taimikonhoitomallit, lannoitusmallit sekä muut metsissä tehtäviä toimenpiteitä kuvaavat mallit. Yksinkertaisimmillaan malleilla on pelkkä kustannusvaikutus, mutta usein mallit myös vaikuttavat kuvion puuston ominaisuuksiin tai tulevaan kehitykseen.

Kun eri toimenpidemalleja tehdään peräkkäisinä sekvensseinä, puhutaan usein malliketjuista. Esimerkkinä tästä ovat uudistusketjut, jotka voidaan määritellä esimerkiksi eri kasvupaikoille, maalajeille ja puulajeille ja jotka sisältävät maanmuokkauksen, metsikön uudistamisen sekä heti uudistamisen jälkeen tehtävät hoitotoimenpiteet. Uudistusketjun ensimmäiset vaiheet avohakkuun jälkeen voisivat olla yksinkertaistettuna esimerkiksi tällaiset:

- *Jos kasvupaikka on tuore kangas tai ravinteikkaampi, hakkuutähteet kerätään, metsämaa mätästetään ja istutetaan kuusen taimet. Kaksi vuotta istutuksen jälkeen tehdään ensimmäinen heinäntorjunta.*
- *Jos kasvupaikka on kuivahko tai kuiva kangas, kivennäismaa äestetään ja kylvetään männyin siemenet.*

Edellä mainittujen kaltaiset säännöt on määritelty kaikille kasvupaikka- ja maalaajityypeille siten, että ne kattavat kaikki mahdolliset kasvupaikkojen ja maalaajien yhdistelmät.

4.1.2 Kasvumallit

Kasvumalleilla kuvataan puuston kasvua, sekä muita luonnonprosesseja, kuten puiden välisestä kilpailusta johtuvaa luonnonpoistumaa. Erityyppisiä kasvumalleja on paljon; usein kasvumallit jaetaan empiirisiin (tilastollisiin) kasvumalleihin sekä prosessimalleihin. Prosessimallit ovat tärkeitä tutkimuksen työkaluja, joilla pystytään kuvaamaan yksittäisten puiden elintoimintoja, mutta niiden käyttäminen vaatii usein mittaustietoja, joita ei ole mukana tyypillisissä metsävaratiedoissa. Käytännön metsäsuunnittelussa käytetään valtaosin empiirisiä kasvumalleja niiden helpomman sovellettavuuden vuoksi. Empiiriset kasvumallit voidaan jakaa eri ryhmiin sen perusteella, miten metsä on mallissa kuvattu.

Yksinkertaisimmat kasvumallit ovat staattisia tuotostaulukoita, joilla kuvataan puustotunnusten kehitystä metsän iän suhteen. Tuotostaulukoiden etuna on yksinkertaisuus ja helppo sovellettavuus, mutta heikkoutena se, että ne toimivat luotettavasti vain tietyllä tavalla hoidettuihin istutusmetsiin.

Dynaamiset metsikkömallit kuvaavat metsän keskitunnusten ja niiden kehityksen kautta. Tyypillisesti metsikkömalleilla ennustetaan puuston valtapituuden, keskiläpimitan, pohjapinta-alan ja tilavuuden kehitystä iän suhteen. Metsikkömalleissa voidaan huomioida metsikön erilaiset käsittelyt, esimerkiksi vaihtoehdot harvennusohjelmat.

Dynaamisissa puutason malleissa puusto kuvataan yksittäisistä puista koostuvana joukkona. Puujoukko, eli ns. kuvauspuut, voivat muodostua joko todellisista, maastossa tai kaukokartoituksella mitatusta kokojakaumasta tai jakaumamallilla generoidusta, teoreettisesta kokojakaumasta. Käytännön metsäsuunnittelussa käytetään yleisimmin teoreettisia jakaumia, koska yksittäisten puiden mittaaminen maastotyönä on ollut kallista. Kaukokartoitusmenetelmien kehitys antaa jo nyt mahdollisuuden kerätä mittaustietoa yksittäisistä puista ja sen myötä käyttää todellisia, mitattuja puujoukkoja (esim. Peuhkurinen ym. 2008). Puutason mallien etuna on se, että niiden avulla voidaan huomioida puiden välinen kilpailu ja sen vaikutus puiden kasvuun sekä erilaisten toimenpiteiden, kuten harvennusten vaikutus metsikön rakenteeseen. Puutason mallien heikkoutena on monimutkaisuus, jonka vuoksi niiden soveltaminen on mahdollista ainoastaan laskentaohjelmistojen avulla.

Spatiaalisissa puutason malleissa huomioidaan lisäksi puiden sijainti, jolloin puiden välinen kilpailu valosta ja muista resursseista voidaan mallintaa realistisemmin. Spatiaalisten mallien heikkoutena on ollut lähtötiedon hankinnan työläys ja korkeat kustannukset, jotka laskevat todennäköisesti kaukokartoitusmenetelmien kehityksen ansiosta.

Suomalaisissa metsäsuunnittelujärjestelmissä käytetään yleisimmin ei-spatiaalisia puutason kasvumalleja. Näistä esimerkkejä ovat Luonnonvarakeskuksen kehittämät ja ylläpitämät MELA- ja Motti-kasvumallit sekä niiden laskennalliset toteutukset eli laskentaohjelmistot. Seuraavissa kappaleissa käsitellään MELA/Motti-tyyppisiä kasvumalleja sekä niiden soveltamista metsäsuunnittelulaskentaan.

Kasvun ennustaminen lähtee liikkeelle laskenta-aineiston muodostamisesta ja tyypillisesti laskenta-aineistona käytetään puuston inventointitietoja, joissa kuvataan puuston keskitunnukset ositteittain inventointihetkellä. Puusto-ositteista muodostetaan puiden kokojakauma eli kuvauspuut, jakaumamallien avulla. Jakaumamalleina käytetään mm. Weibull-, Beta- ja normaalijakaumia (esim. Maltamo ym. 2002).

Puutason kasvumallit ennustavat nimensä mukaisesti yksittäisten puiden tai kuvauspuiden kasvua. Kasvua selittäviä tekijöitä ovat puun ja sen latvuksen koko eli pituus, läpimitta ja latvuksen alarajan korkeus. Kasvupaikan ja sijainnin vaikutusta kasvuun kuvataan kasvupaikan, maalajin, korkeuden merenpinnasta ja erityisesti lämpösumman avulla. Lisäksi yksittäisen puun kasvuun vaikuttaa sen asema metsikössä eli puun koko suhteessa metsikön muihin puihin nähden. Yksittäisille puille ennustetaan läpimitan ja pituuden kasvua. Yksittäisistä puista saadaan laskettua osite- ja kuviotason puustotunnukset sekä niiden kasvu.

Puuston kasvun lisäksi kasvumalleilla ennustetaan muita luonnonprosesseja, kuten uusien puiden syntymistä sekä luonnonpoistumaa eli puiden kuolemista. Syntymismalleilla kuvataan luontaista uusien puiden syntymistä metsikön pohjakerrokseen. Syntymismallien toimintaan vaikuttaa kuvion jo olemassa oleva puusto, kasvupaikka ja maalaji. Syntymismallit lisäävät metsään uusia puita ja ne ovat erityisen tärkeitä silloin kun malleilla ennustetaan eri-ikäisrakenteisen metsän kehitystä. Luonnonpoistumaa kuvaavat kuolleisuusmallit ennustavat todennäköisyyttä, jolla yksittäiset puut kuolevat puiden välisen kilpailun ja muiden luontaisten syiden seurauksena. Metsikön korkea ikä ja puuston tiheys lisäävät luontaista kuolleisuutta ja alentavat kokonaistuotosta. Metsikön harventaminen väljentää tiheyttä ja siten pienentää luonnonpoistumaa.

Suomessa yleisimmin käytetyt kasvumallit ovat suhteellisen monimutkaisia ja koostuvat kymmenistä tai jopa sadoista ”osamalleista”, joilla kaikilla on oma tehtävänsä metsikön kasvun ja kehityksen ennustamisessa. Kasvumallien ohjelmallista toteutusta kutsutaan usein metsäsimulaattoriksi ja se sisältää edellä mainittuja komponentteja puiden kasvun ja muiden luonnonprosessien kuvaamiseen, mutta usein myös kappaleessa 4.1.1 mainittuja toimenpidemalleja. Kasvu- ja toimenpidemallit ovat usein vuorovaikutteisia: toimenpiteet vaikuttavat puiden kasvuun ja toisaalta puiden kasvu vaikuttaa toimenpiteiden toteutukseen ja tuloksiin.

Kasvumallinnuksen haasteet eri-ikäisrakenteisissa metsissä

Olemassa olevat Luonnonvarakeskuksen MELA- ja Motti-kasvumallit on laadittu kuvaamaan lähinnä yksi- tai kaksijaksoisen metsikön kehitystä, eikä niiden laadinta-aineistoissa ole mainittavasti eri-ikäisrakenteisuutta. Tällöin ne soveltuvat lähtökohtaisesti huonosti eri-ikäisrakenteisen metsikön kehityksen ennustamiseen.

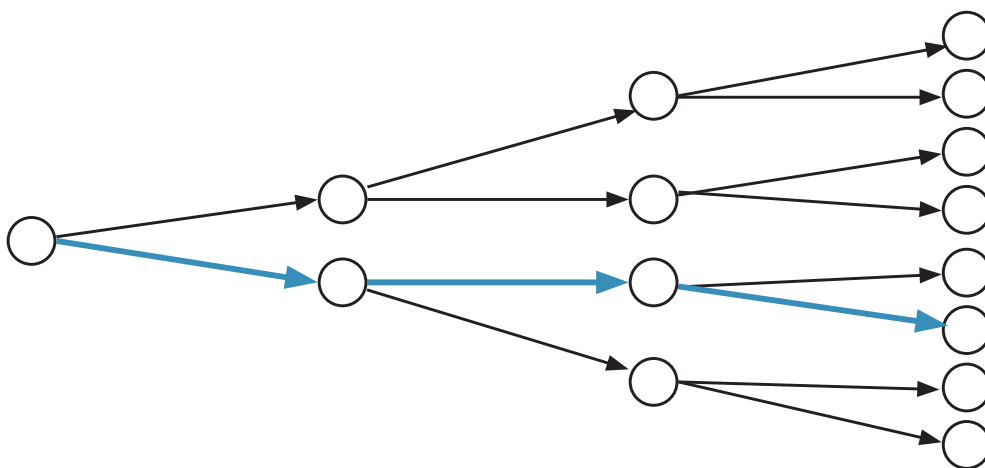
Haasteita eri-ikäisrakenteisen metsikön luonnonprosessien mallinnukseen tuo puiden ryhmittäisyys, alempien latvuserrosten puiden elpyminen hakkuun jälkeen ja erityisesti puiden syntyminen sekä varhaiskehitys tällaisessa tilajärjestykseltään usein hyvin epätasaisessa metsikössä. Tämän takia ennustevirheiden mahdollisuus kasvaa eri-ikäisrakenteisessa metsikössä nopeammin kuin tasaikäisessä metsikössä simulointiajan kasvaessa. Tämä johtuu nimenomaan puiden syntymisen ja varhaiskehityksen ennustamisen epävarmuudesta. Lyhyen ajan simulointiennusteita, joissa syntyvällä taimikolla ei vielä ole puuntuotannollista merkitystä, voidaan pitää edes jollakin tavalla luotettavina.

Jouni Kalliovirta, Simosol Oy (23.4.2020)

4.2 Optimointi

Optimointi tarkoittaa parhaan mahdollisen vaihtoehdon etsimistä lukuisten vaihtoehtojen joukosta. Koska metsätilat koostuvat useista kuvioista, tulee jokaiselle kuviolle simuloida oma päätöspuu. Kuvioiden määrän kasvaessa metsätilan vaihtoehtoisten käsittelyketjujen määrä kasvaa eksponentiaalisesti, sillä jokaiselle kuviolle löytyy useita erilaisia käsittelyvaihtoehtoja. Vaihtoehtoisten suunnitelmien määrä (S) riippuu käsittelyvaihtoehtojen (V) ja kuvioiden (K) määrästä seuraavasti: $S = V^K$. Pienelläkin metsätilalla (15 kuviota) ja vähäisellä vaihtoehtojen määrällä (3 vaihtoehtoa per kuvio) mahdollisia suunnitelmakombinaatioita löytyisi 14 348 907 kappaletta.

Koska vaihtoehtoisten käsittelyketjujen määrä kasvaa nopeasti äärettömän suureksi, metsänomistajan arvot ja tavoitteet parhaiten täyttävän ratkaisun löytäminen vaatii optimointilaskentaa. Optimoinnin tarkoituksena on valita jokaisen kuvion päätöspuusta se haara, jota seuraamalla saavutetaan koko metsäomaisuus huomioiden päätöksentekijän kriteerien kannalta suurin mahdollinen hyöty (Kuva 17). Käytännössä optimointilaskenta ohjaa metsänhoitoa siten, että joillakin kuvioilla tullaan valitsemaan enemmän yhtä hyötyä (esim. talous) tuottava vaihtoehto, ja joillakin kuvioilla enemmän toista hyötyä (esim. luonnonsuojelu) tuottava vaihtoehto.



Kuva 17. Optimoinnissa jokaisen kuvion päätöspuusta valitaan yksi haara. © Simosol Oy

4.2.1 Lineaarinen optimointi

Lineaarinen optimointi on tehokas päätöksenteon tukimenetelmä niissä tilanteissa, kun ratkaistavaan ongelmaan liittyy toimintaympäristön asettamia rajoitteita.

Monitavoitteisessa metsäsuunnittelussa ollaan aina tällaisessa tilanteessa, kun päätöksentekijän sosiaaliset ja ekologiset arvot rajoittavat metsien taloudellisen potentiaalin hyödyntämistä. Lineaarisessa optimoinnissa ongelma kirjoitetaan matemaattiseksi malliksi, joka sisältää ainakin seuraavat tekijät:

1. **Päätösmuuttujat** ovat muuttujia, joiden arvoon päätöksentekijä voi ratkaistaan vaikuttaa. Metsäsuunnittelulaskelmissa päätösmuuttujia voivat olla esimerkiksi metsätaloudesta saatavien nettotulojen nykyarvo, puuston kokonaistilavuus, puuston kasvu, hakkuukertymä, vanhojen metsien pinta-ala, avohakkuiden pinta-ala tai metsän hiilivarasto. Kaikki edellä mainitut tekijät ovat muuttujia, joiden määrä eri suunnitelmakombinaatiossa eri ajanhetkillä voidaan laskea metsäsimulaattorin avulla.
2. **Tavoitefunktio** muodostetaan päätösmuuttujien avulla. Tavoitefunktio voi muodostua joko yhdestä tai useammasta päätösmuuttujasta, jotka voidaan tarvittaessa laskea yhteen vakioilla kerrottuna. Eri päätösmuuttujien keskinäistä tärkeyttä painotetaan ja skaalataan vakioiden avulla. Tavoitefunktio voisi olla esimerkiksi muotoa $5 \cdot \text{nettotulojen nykyarvo} + 2 \cdot \text{vanhojen metsien pinta-ala}$, jos metsänomistaja haluaisi maksimoida juuri näitä päätösmuuttujia. Lineaarisessa optimoinnissa tavoitefunktioita voidaan joko maksimoida tai minimoida.
3. **Rajoitteet** ovat lineaaristen lauseiden avulla kirjoitettuja toimintaympäristön tai päätöksentekijän arvojen perusteella määritettyjä rajoitteita. Metsänomistaja voisi esimerkiksi haluta, että puuston kasvun tulee olla joka vuosi suurempi kuin hakkuupoistuma. Mikäli metsänomistaja haluaisi säilyttää tietyn puustopääoman, rajoite voitaisiin muotoilla esimerkiksi siten, että puuston kokonaistilavuuden tulee olla joka vuosi vähintään tietyn arvon suuruinen.

Lineaarisessa optimoinnissa etsitään tavoitefunktion mukaan parasta mahdollista ratkaisua kaikkien mahdollisten suunnitelmakombinaatioiden joukosta. Mikäli laskentatehtävälle on asetettu rajoitteita, tavoitefunktioita optimoidaan rajoitteet täyttävien käsittelyvaihtoehtojen joukosta. Laskennan logiikan havainnollistamiseksi alle on kuvattu lineaarisen optimoinnin avulla ratkaistu esimerkkitalanne, joka on paljon yksinkertaisempi kuin tavanomaisissa metsäsuunnittelulaskelmissa.

ESIMERKKI. LINEAARINEN OPTIMOINTI

Metsälössä on kaksi harvennettavaa kuviota: kuusikko ja männikkö (Taulukko 2). Tehtävänä on laskea, paljonko metsänomistajan kannattaa harvennuttaa kuusikkoa ja männikköä alla kuvatuilla rajoitteilla.

Taulukko 2. Hakkuisiin kuluva työaika, hakkuupoistuma ja puunmyyntitulot eri kuvioilla.

Kuvio	Työaika (tuntia/ha)	Hakkuupoistuma (m ³ /ha)	Myyntitulot (€/ha)
Kuusikko	12	50	1 000
Männikkö	10	75	1 400

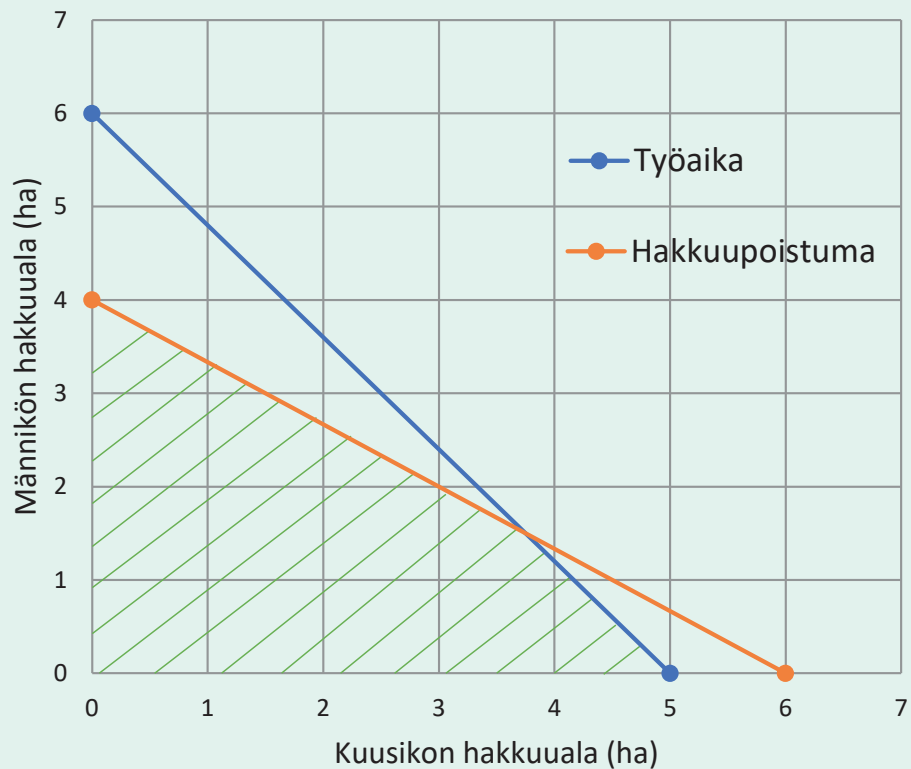
Koneyrittäjä voi käyttää kyseisen metsälön harvennuksiin tänä vuonna enintään 60 työtuntia. Metsänomistajan toiveiden mukaisesti hakkuupoistuma saa olla enintään puuston kasvun suuruinen (kasvuksi arvioitu 300 m³/vuosi). Metsänomistajan tavoitteena on saada metsästä mahdollisimman suuri myyntitulo.

Määritetään päätösmuuttujat, tavoitefunktio ja rajoitteet:

- **Päätösmuuttujat:** kuusikon ja männikön hakkuiden pinta-alat
- **Tavoitefunktio:** Mahdollisimman suuri puunmyyntitulo. Myyntitulo lasketaan kaavalla $1000 \cdot \text{kuusikon hakkuuala} + 1400 \cdot \text{männikön hakkuuala}$
- **Rajoitteet:** Työaika ja hakkuupoistuman suuruus.
 - Työaika = $12 \cdot \text{kuusikon hakkuuala} + 10 \cdot \text{männikön hakkuuala} \leq 60$
 - Hakkuupoistuma = $50 \cdot \text{kuusikon hakkuuala} + 75 \cdot \text{männikön hakkuuala} \leq 300$

Kun päätösmuuttujia on vain kaksi, ratkaisu voidaan piirtää 2-ulotteiseen koordinaatistoon, jossa x-akseli kuvaa kuusikon hakkuuala ja y-akseli männikön hakkuuala. Mikäli kaikki työaika käytettäisiin kuusikossa, saataisiin käsiteltyä 5 hehtaaria metsää, ja vastaavasti männikköä voitaisiin hakata enintään 6 hehtaaria. Näin ollen työaika koskeva rajoite voidaan piirtää koordinaatistoon suorana viivana, joka kulkee pisteiden (5,0) ja (0,6) kautta (Kuva 18). Vastaavasti hakkuupoistumaa koskeva rajoite voidaan piirtää suoralla viivalla, joka leikkaa x- ja y-akselin niissä kohdissa, joissa suurin sallittu hakkuupoistuma kertyy kokonaisuudessaan: kuusikossa 6 hehtaaria ja männikössä 4 hehtaaria.

Optimointitehtävän mahdolliset ratkaisut löytyvät vihreällä poikkiviivoituksella värjätystä alueelta, koska vain tällä alueella sekä työaika että hakkuupoistumaa koskevat rajoitukset toteutuvat (Kuva 18). Linearisessa optimoinnissa optimiratkaisu löytyy jostakin kyseisen monikulmion kärkipisteistä eli x-akselin leikkauspisteestä (5,0), y-akselin leikkauspisteestä (0,4) tai työaika ja hakkuupoistumaa kuvaavien rajoitteiden keskinäisestä leikkauspisteestä. Tämän pisteen koordinaatit lasketaan seuraavasti:



Kuva 18. Lineaarisella optimoinnilla ratkaistavan tehtävän graafinen ratkaisu.

Muunnetaan molemmat rajoitteita kuvaavat yhtälöt sellaiseen muotoon, että vasemmalla puolella on ainoastaan y:

$$12x + 10y = 60$$

$$10y = 60 - 12x$$

$$y = 6 - (12/10)x$$

$$50x + 75y = 300$$

$$75y = 300 - 50x$$

$$y = 4 - (50/75)x$$

Lasketaan x:n arvo:

$$4 - (50/75)x = 6 - (12/10)x$$

$$-(50/75)x + (12/10)x = 6 - 4$$

$$0,533x = 2$$

$$x = 3,75$$

Lasketaan y:n arvo sijoittamalla äsken saatu x:n arvo jompaan kumpaan rajoiteyhtälöön:

$$12 \cdot 3,75 + 10y = 60$$

$$45 + 10y = 60$$

$$10y = 15$$

$$y = 1,5$$

Näin ollen tehtävään on kolme mahdollista optimiratkaisua. Näistä paras vaihtoehto saadaan selville sijoittamalla x ja y tavoitefunktioon:

$$1000 \cdot 5 + 1400 \cdot 0 = 5000$$

$$1000 \cdot 0 + 1400 \cdot 4 = 5600$$

$$1000 \cdot 3,75 + 1400 \cdot 1,5 = 5850$$

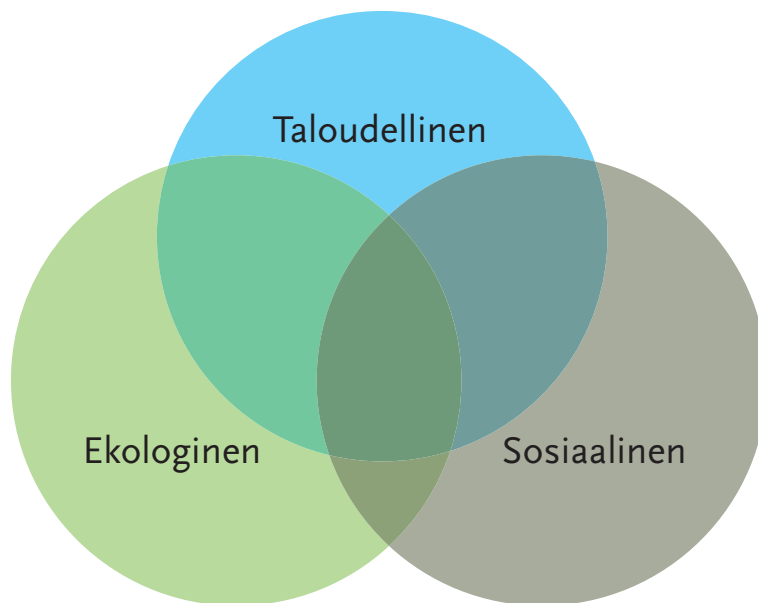
Lineaarisen optimoinnin avulla saatiin selville, että kyseisessä tehtävässä optimiratkaisu on harventaa 3,75 hehtaaria kuusikkoa ja 1,5 hehtaaria männikköä. Tällöin metsänomistajalle kertyy 5 850 euron puunmyyntitulot.

Voit perehtyä lineaariseen optimointiin myös esimerkiksi YouTubesta löytyvän selkeän videosimerkin avulla: https://www.youtube.com/watch?v=HFV_bxzTY3s

4.2.2 Tavoitefunktio ja rajoitteet suunnittelulaskelmissa

Monitavoitteisissa suunnittelulaskelmissa metsänomistajan päätöksentekokriteerit kirjoitetaan tavoitefunktion ja rajoitteiden muotoon. Perinteisesti metsäalalla on käytetty tavoitefunktiona nettotulojen nykyarvon maksimointia. Nettotulojen nykyarvo muodostuu tulevaisuudessa ennustettavista tuloista ja menoista, jotka diskontataan nykyhetkeen valitulla diskonttokorolla. Tulevaisuudessa laskentajärjestelmiin tullaan varmasti kehittämään monimutkaisempiakin tavoitefunktioita, koska päätöksentekijöiden arvot muuttuvat, eikä taloudellisen hyödyn tavoittelu ole enää kaikille metsänomistajille tärkein tavoite. Erityisesti metsien hiilensidontaa optimoiville suunnitelmille tulee olemaan jatkossa enemmän kysyntää.

Nettotulojen nykyarvon maksimointi ilman rajoitteita kertoo metsätilan tuottoarvon eli suurimman taloudellisen potentiaalin, joka metsätaloudesta voidaan saada. Koska pelkän taloudellisen hyödyn maksimointi johtaisi tyypillisesti metsien ekologisten ja sosiaalisten arvojen alenemiseen, metsäsuunnittelun laskentoihin on tarpeen määrittää metsänhoidon ekologista ja sosiaalista kestävyyttä tukevat reunaehdot, sillä monitavoitteisen metsäsuunnitelman tulee toteuttaa kaikki kestävyyskriteerit (Kuva 19).



Kuva 19. Metsätalouden kestävyttä tarkastellaan kolmen osa-alueen kautta: taloudellinen, ekologinen ja sosiaalinen kestävyys. Osa-alueita voidaan painottaa metsikkökuvioiden välillä eri tavoin, mutta koko suunnittelualueen tasolla kaikkien kestävyyskriteerien tulee täyttyä. Suunnittelulaskelmissa tämä toteutuu rajoitteiden avulla. (Kuva: Äijälä ym. 2019)

Suurinta mahdollista hakkuupotentiaalia kutsutaan myös nimellä hakkuumahto, jota käytetään erityisesti Luonnonvarakeskuksen (Luke) tekemissä hakkuusuunnitelaskelmissa vertailuarvona kestäväälle hakkuusuunnittelelle. Hakkuumahdon laskennassa optimoidaan kuviotason puuston käsittelyä ilman tilatasolle asetettuja rajoitteita. Lisätietoja: <https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/metsa/metsa-varat-ja-metsasuunnittelu/hakkuumahdollisuusarviot/>

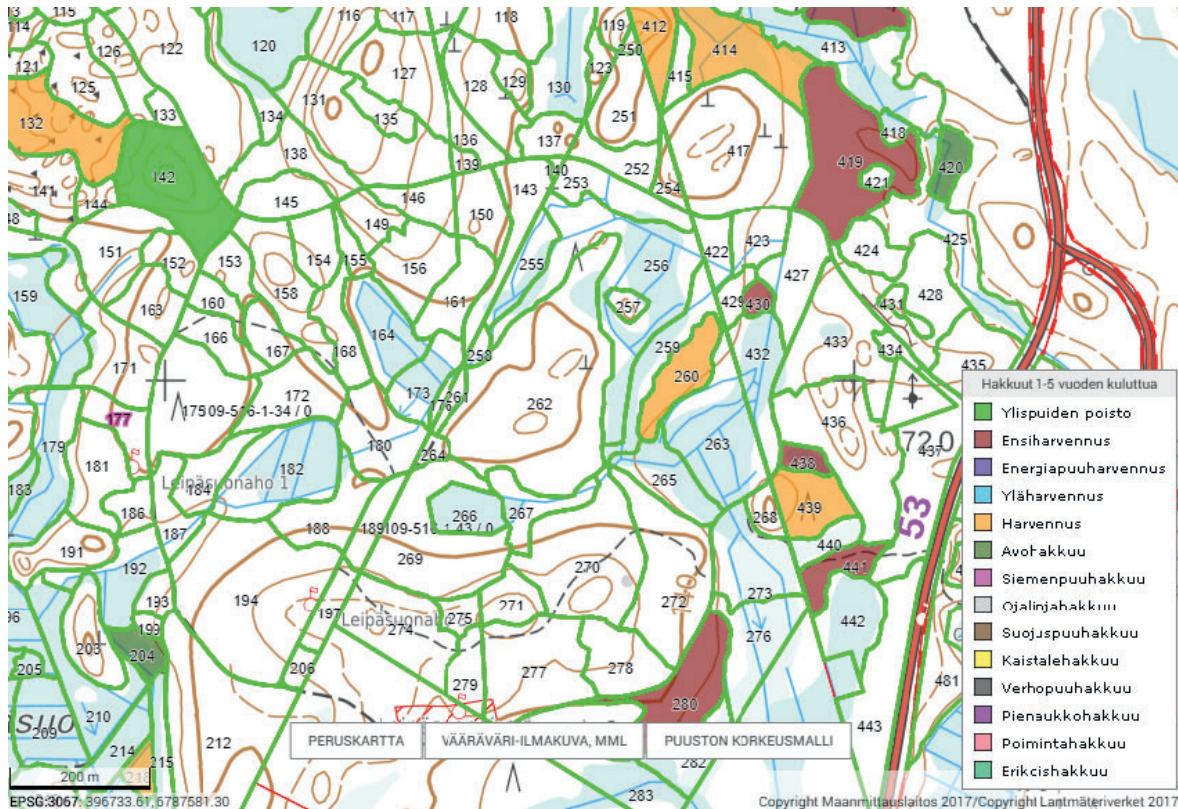
Laskentaohjelmistoissa suunnittelulaskentojen rajoitteet tulee kirjoittaa käytettävän ohjelmiston tukemien päätösmuuttujien avulla, joten ne voivat koskea esimerkiksi suurinta sallittua hakkuukertymää tietyssä ajanjaksona, avohakkuiden pinta-alaa, kasvatettavan puuston kokonaistilavuutta, jonkin kehitysluokan pinta-alaa tai mitä tahansa tavanomaisen metsävaratiedon perusteella määritettävää tunnusta. Rajoitteet määritetään koskemaan aina joko yhtä ajanhetkeä tai tiettyä ajanjaksoa. Rajoitteiden määrittämiseen palataan oppimateriaalin Harjoitukset-liitteen tehtävissä.

”Nettotulojen nykyarvon maksimointi ilman rajoitteita kertoo metsätilan tuottoarvon eli suurimman taloudellisen potentiaalin, joka metsätaloudesta voidaan saada.”

4.2.3 Optimointi suunnittelulaskelmissa

Metsäsuunnittelulaskelmissa, kuten missä tahansa optimointitehtävässä, optimoinnin lopputuloksena jokaisen kuvion päätöspuusta valitaan yksi haara eli tässä tapauksessa yksi vaihtoehtoinen toimenpideketju. Optimaalinen suunnitelma on sellainen, joka maksimoi tavoitefunktion ja toteuttaa rajoitteet koko metsäomaisuuden osalta. Optimointi on ylivoimaisen tehokas tapa valita päätöksen tekijän haluamat hyödyt maksimoiva suunnitelma.

Käytännössä optimointitehtävien lopputuloksena päädytään tavallisesti painottamaan yhtä tavoitetta jollakin kuviojoukolla ja toista tavoitetta toisella kuviojoukolla – etenkin jos laskentatehtävän rajoitteet ovat hyvin tiukat. Optimoinnin lopputuloksena saadaan jokaiselle metsikkökuvioille oma toimenpideketju, minkä avulla lasketun suunnitelman mukaiset toimenpide ehdotukset voidaan viedä kartalle (Kuva 20). Nykyisillä tietojärjestelmillä on mahdollista tehdä myös spatiaalista optimointia joko olemassa olevaa kuviotietoa hyödyntäen (Luku 6.1) tai muodostaen toimenpidekuviot laserkeilaustiedon perusteella kokonaan uusiksi (Luku 6.2).



Kuva 20. Metsäsuunnitelma, jossa on korostettu eri värein seuraaville viidelle vuodelle suunnitellut hakuut.

4.3 Ohjelmistoratkaisut

MELA-METSÄSUUNNITTELUOHJELMISTO

Luonnonvarakeskuksen MELA-ohjelmisto on metsien tuotanto- ja käyttömahdollisuuksien analysointiin sekä metsien käytön suunnitteluun kehitetty laskentaväline. Suomen oloihin laadittua ohjelmistoa voidaan käyttää erilaisissa metsiä koskevissa valtakunnallisissa ja alueellisissa vaihtoehtolaskelmissa ja vaikutusarvioiden laadinnassa. Luken lisäksi MELA on käytössä metsäteollisuusyrityksissä, Metsähallituksessa ja metsäalan oppilaitoksissa.

Ohjelmiston perusteet luotiin 1960-luvulla Pekka Kilkin (1968) väitöskirjassa ja ohjelmiston ensimmäiset versiot laadittiin 1970-luvulla. Ohjelmisto otettiin operatiiviseen käyttöön 1980-luvulla, jolloin sen avulla laskettiin muun muassa METSÄ 2000 -ohjelman tuloksia (esim. Salminen 1999). Ohjelmistosta on julkistettu uusi versio muutaman vuoden välein ja tällä hetkellä uusin versio on MELA2016 (Hirvelä ym. 2017).

MELA-ohjelmistoa on hyödynnetty useissa kansallisen, alue- ja paikallistason metsien käyttömahdollisuuksien analyysissä, viimeisimpinä mm. Kansallisen metsästrategian 2025 (2015), energia- ja ilmastostrategian 2008 ja 2016 (Koljonen ym. 2017), Valtioneuvoston metsäpoliittisen selonteon 2050 (2014) sekä alueellisten metsäohjelmien valmisteluissa.

MELA-ohjelmiston avulla lasketaan alueellisia tuotanto- ja käyttömahdollisuusarvioita valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) aineistojen avulla ja niitä ylläpidetään vapaasti käytettävissä olevassa MELA Tulospalvelussa. Palvelu sisältää tällä hetkellä kolmeen eri inventointiin perustuvaa tietoa (VMI10–VMI12) eli tietoa on saatavissa vuosilta 2004–2018. Palvelua pyritään kehittämään laajentamalla palvelun tietosisältöä ja parantamalla palvelun käytettävyyttä, jotta käyttäjien tarpeita vastaavat tiedot olisivat entistä helpommin saatavilla.

Ohjelmiston käyttö

Metsien käyttö- ja hakkuumahdollisuuksien analysointiin ja metsien käytön suunnitteluun kehitetty MELA-ohjelmisto jakaantuu kahteen osaan: simulointiin ja optimointiin. Metsävara-aineisto välitetään simuloinnille laskentayksiköinä, jotka voivat olla yksittäisiä metsikkökuvioita tai otosyksiköitä, esim. koealoja. Suomen oloihin kehitetty simulointi tuottaa laskentayksiköille vaihtoehtoisia käsittely- ja kehityssarjoja etukäteen määritettyjen laskelmakausien ajalle. Simuloinnissa puusto kuvataan yksittäisinä kuvauspuina ja kasvu- ym. kehitysmallit ovat pääosin puukohtaisia (Hynynen et al. 2002). Laskentayksikkökohtaiset puustotiedot saadaan summaamalla yksittäisten kuvauspuiden tietoja ja aluekohtaiset tiedot saadaan laskentayksikötietojen summina.

Simuloitujen vaihtoehtoisten käsittely- ja kehityssarjojen joukosta valitaan lineaarisen optimoinnin (Lappi 1992) avulla aluekohtaisten puuston kehitykselle ja metsien käytölle asetettujen vaatimusten mukainen ratkaisu. Optimiratkaisussa puuston kehitys, hakkuumäärät ja -tulot sekä korjuukustannukset määräytyvät siis simuloitujen käsittely- ja kehityssarjojen sekä koko alueen metsätaloudelle asetettujen tavoitteiden ja rajoitteiden perusteella. Aluekohtaisen optimiratkaisun lisäksi tuloksena saadaan optimiratkaisua vastaavat käsittelyketjut jokaiselle aineiston laskentayksikölle.

MELA on tällä hetkellä käytössä Windows- ja Linux/Unix-käyttöjärjestelmissä, ja ohjelmiston toimintaa ohjataan komennoilla ja parametreilla tekstipohjaisen käyttöliittymän avulla (Hirvelä et al. 2017). Laskelmatuloksina voidaan tuottaa erillisiä tulostiedostoja liittyen laskelman yleiseen kulkuun ja käytettyihin parametreihin, aluetason summaraporttiin, optimiratkaisussa valittuihin laskenta-

yksikkökohtaisiin käsittelyketjuihin, optimiratkaisun vaihtoehtokustannuksiin ja rajoitteiden varjohintoihin, laskentayksikkökohtaisiin metsikkötietoihin sekä laskentayksikkökohtaisiin ajantasaistettuihin puustotietoihin.

Kaupallisen MELA-ohjelmiston lisäksi Lukella on tarjolla opetus- ja esittelykäyttöön tarkoitettu DemoMELA-laskentapalvelu. Palvelu on vapaasti käytettävissä ja se koostuu MELA-ohjelmiston käyttöä helpottavasta käyttöliittymästä, kiinteistä esimerkkiaineistoista ja valmiista parametrimäärittelyistä. Palvelussa käyttäjä voi muuttaa simuloinnin ja optimoinnin määrittelyjä, mutta palvelussa olevia metsävara-aineistoja käyttäjä ei voi vaihtaa.

MELA-ohjelmistoa kehitetään edelleen ja tarkoituksena on lisätä siihen ominaisuuksia mm. ekosysteempipalveluiden osalta. Tavoitteena on uusiin ja muuttuviin käyttötarpeisiin vastaamisen lisäksi parantaa kuhunkin analyysitilanteeseen parhaimmin sopivan aineiston ja mallien valintaa ja hyödyntämistä siten, että laskenta ja sen lopputulos kuvataan käyttäjille läpinäkyvästi. Uudistuksen myötä MELAssa voidaan hyödyntää laajempaa valikoimaa erilaisia metsävara-aineistoja, tarjota monipuolisempi valikoima metsävaroja ja operaatioita kuvaavia funktioita sekä ottaa huomioon riskien ja epävarmuuksien olemassaolo optimointitehtävien muotoilussa ja ratkaisemisessa.

Lähde: Luke 2019. MELA-ohjelmisto ja metsälaskelmat. www.luke.fi/mela-metsalaskelmat

MONSU-METSÄSUUNNITTELUOHJELMA

Monsu-ohjelmisto on kehitetty tavoitevetoiseen monitavoitteiseen metsäsuunnitteluun. Suunnitelma koostetaan kahdessa vaiheessa. Metsikkökuvioille simuloidaan ensin käsittelyvaihtoehtoja. Sen jälkeen simuloiduista käsittelyvaihtoehtoista valitaan numeerisen optimoinnin avulla yhdistelmä, joka maksimoi metsänomistajan ilmoittamat tavoitteet.

Käsittelyvaihtoehtoja simuloitaessa voidaan käyttää useita eri kasvumalleja sen mukaan, mitkä mallit katsotaan luotettavimmiksi. Käytettävissä ovat ns. Monsu-mallien lisäksi mm. MELA-mallit.

Metsiköiden käsittelyjä ja kehitystä voidaan simuloida erilasten metsänhoitomenetelmien mukaisesti. Valittavia vaihtoehtoja ovat muun muassa:

- Tasaikäismetsätalous, jossa harvennukset ovat alaharvennuksia
- Tasaikäismetsätalous, jossa harvennukset ovat ylaharvennuksia
- Tasaikäismetsätalous kivennäismailla ja jatkuva kasvatus soilla

- Tasaikäismetsätalous muualla kuin jatkuvaan kasvatukseen osoitetuissa metsiköissä
- Jatkuva kasvatus kaikkialla
- Sekä tasaikäismetsätalous että jatkuva kasvatus (jolloin optimointi ratkaisee, mitä missäkin metsikössä käytetään)
- Vapaan tyylin metsätalous, jossa ei tehdä jakoa tasaikäismetsätalouden ja jatkuvan kasvatuksen välillä

Simuloinnin ja suunnittelun aikajänne voidaan valita 3 ja 300 vuoden väliltä, ja tämä aikajänne voidaan jakaa maksimissaan kymmeneen osajaksoon. Tulokset lasketaan kullekin osajaksolle ja koko aikajänteelle.

Optimoinnissa maksimoidaan metsänomistajan ilmoittamia tavoitteita. Optimointiin voidaan käyttää lineaarista ohjelmointia tai heuristisia menetelmiä (mm. simuloitu jäähdytys, tabuhaku, geneettinen algoritmi, kynnysarvomenetelmä, vedenpaisumusmenetelmä ja Hero). Monsulla on mahdollista tehdä myös spatiaalista optimointia, jonka avulla voidaan muun muassa luoda leimikko-keskityksiä tai yhtenäisiä vanhan metsän alueita.

Tavanomaisten puustotunnusten lisäksi Monsu laskee myös muihin ekosysteemi-palveluihin liittyviä tunnuksia:

- Lahopuun määrä ja puuston biomassa
- Hiilitase, hiilivarastot ja albedo (metsän heijastavuus)
- Luonnontuotteet, mm. marja- ja sienisato sekä mahlan, pakurin, pihkan, siirtokuntan, kuusenkerkkien yms. tuotantopotentiaali metsässä
- Monimuotoisuuteen liittyviä tunnuksia kuten:
- Puulajidiversiteetti
- Yksittäisten lajien tai lajiryhmien elinympäristöindeksit. Näitä indeksejä, jotka kuvaavat metsän soveltuvuutta ko. lajiryhmälle, lasketaan n. 30
- Monikäyttöön liittyviä tunnuksia, mm. maisema- ja ulkoilupistemäärä

Timo Pukkala, Itä-Suomen yliopisto (24.1.2020)

IPTIM-METSÄSUUNNITTELUOHJELMISTO

Simosol Oy:n IPTIM-metsäsuunnitteluohjelmisto on strategisen ja taktisen metsäsuunnittelun työkalu. IPTIMin avulla käyttäjä voi hallita metsävaratietojaan, suunnitella metsien käyttöä omien tavoitteidensa mukaisesti sekä tarkastella vaihtoehtoisia metsien käsittelytapoja.

IPTIM-ohjelmistossa on valmiina vaihtoehtoisia kasvumalleja sekä metsien hoito-ohjelmia. Laskennan tärkeimmät parametrit, kuten puun hinnat, toimenpiteiden kustannukset ja metsien käytön rajoitteet ovat muokattavissa käyttöliittymän kautta. IPTIM sisältää sisäänrakennetut simulointi- ja optimointimallit, joiden avulla ennustetaan puuston kehitys, erilaisten toimenpiteet sekä optimoidaan käsittelyohjelma käyttäjän tavoitteiden ja rajoitteiden mukaiseksi.

Suomessa IPTIM on käytössä metsäteollisuuden yrityksillä, metsäpalveluyrittäjillä, kaupungeilla ja kunnilla, oppilaitoksilla sekä metsäsijoittajilla. Suomen ulkopuolella IPTIM on käytössä muualla Pohjoismaissa, Baltiassa, Irlannissa, sekä useassa muussa maassa, muun muassa Etelä-Amerikassa, Afrikassa ja Aasiassa. IPTIM-ohjelmiston rakenne mahdollistaa erityyppisten metsävaratietojen, kasvumallien ja metsien hoito-ohjelmien hyödyntämisen.

IPTIM toimii verkkopalveluna, minkä ansiosta se voidaan integroida osaksi yritysten metsätietojärjestelmiä. Esimerkkinä integraatiosta on ForestKIT-ohjelmiston ja IPTIM-ohjelmiston integraatio, jonka kautta käyttäjän metsävaratiedot ja suunnitelmat liikkuvat täysin automaattisesti ohjelmistojen välillä. Simosol on toteuttanut asiakkailleen myös räätälöityjä ja täysin automatisoituja metsäsuunnittelun laskentapalveluita, jotka on rakennettu IPTIM-ohjelmistoa hyödyntäen.

IPTIM-ohjelmistoa käytetään metsäsuunnittelun lisäksi yleisesti metsien arvomäärityksiin sekä strategiaan puu- ja kassavirtalaskelmiin. IPTIM tarjoaa käyttäjilleen kattavat ja yksityiskohtaiset raportit sekä sisäänrakennetun tuottoarvolaskelman.

Lähde: Simosol Oy 2020. IPTIM Assets.

<https://www.simosol.fi/assets-long-term-optimization?lang=fi>



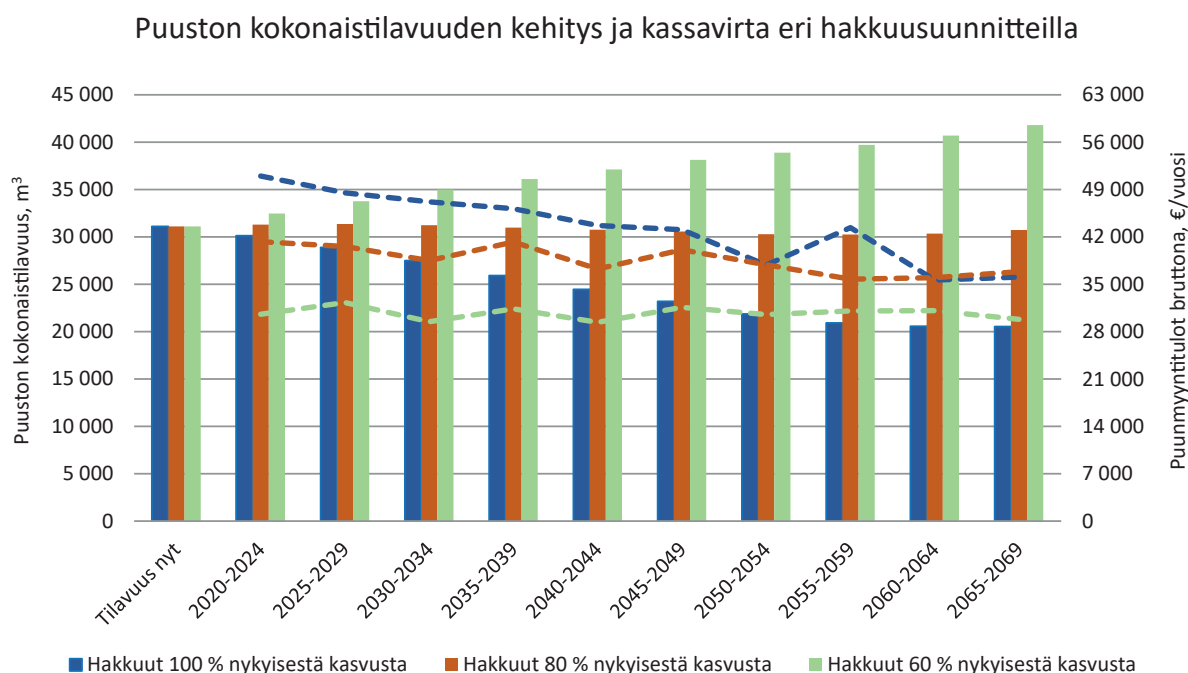
Strateginen metsäsuunnittelu

Tilatason strateginen metsäsuunnittelu koostuu edellisessä luvussa käsitellyistä osista: vaihtoehtoisten toimenpideketjujen simuloinnista sekä tavoitefunktion optimoinnista. Tässä luvussa suunnittelutehtäviin otetaan käytännönläheisempi näkökulma erilaisten laskentaesimerkkien avulla. Kaikki esimerkit on laskettu IPTIM-metsäsuunnitteluohjelmistolla. Kaikissa simulointiin ja optimointiin perustuvissa monitavoitteisen metsäsuunnittelun tarpeisiin kehitetyissä järjestelmissä on kuitenkin samankaltainen logiikka, joten vastaavat laskennat olisi mahdollista toteuttaa myös muilla vastaavilla järjestelmillä. Suurimpana erona eri järjestelmien välillä ovat hieman toisistaan poikkeavat valikoi-
mat käytettävissä olevia päätösmuuttujia ja tavoitefunktioita.

5.1 Tasaiset tulot

Monilla metsää omistavilla isoilla organisaatioilla on tavoitteena saada metsästä kohtalaisen tasaista ja ennalta odotettua kassavirtaa. Tasaisten puunmyyntitulojen ansiosta esimerkiksi osakeyhtiö pystyy jakamaan omistajilleen vuosittain tasaista osinkotuloa, kunta tai kaupunki saa säännölliset puunmyyntitulot omien menojensa kattamiseen tai Metsähallituksen kaltainen toimija pystyy tarjoamaan tasaista työllisyyttä urakoitsijoilleen sekä tasaiset puutoimitukset metsäteollisuudelle. Simulointi- ja optimointilaskelmien avulla voidaan iteroida erikokoisia hakkuusuunnitteita sekä arvioida niiden puuntuotannollista kestävyyttä pitkällä aikavälillä.

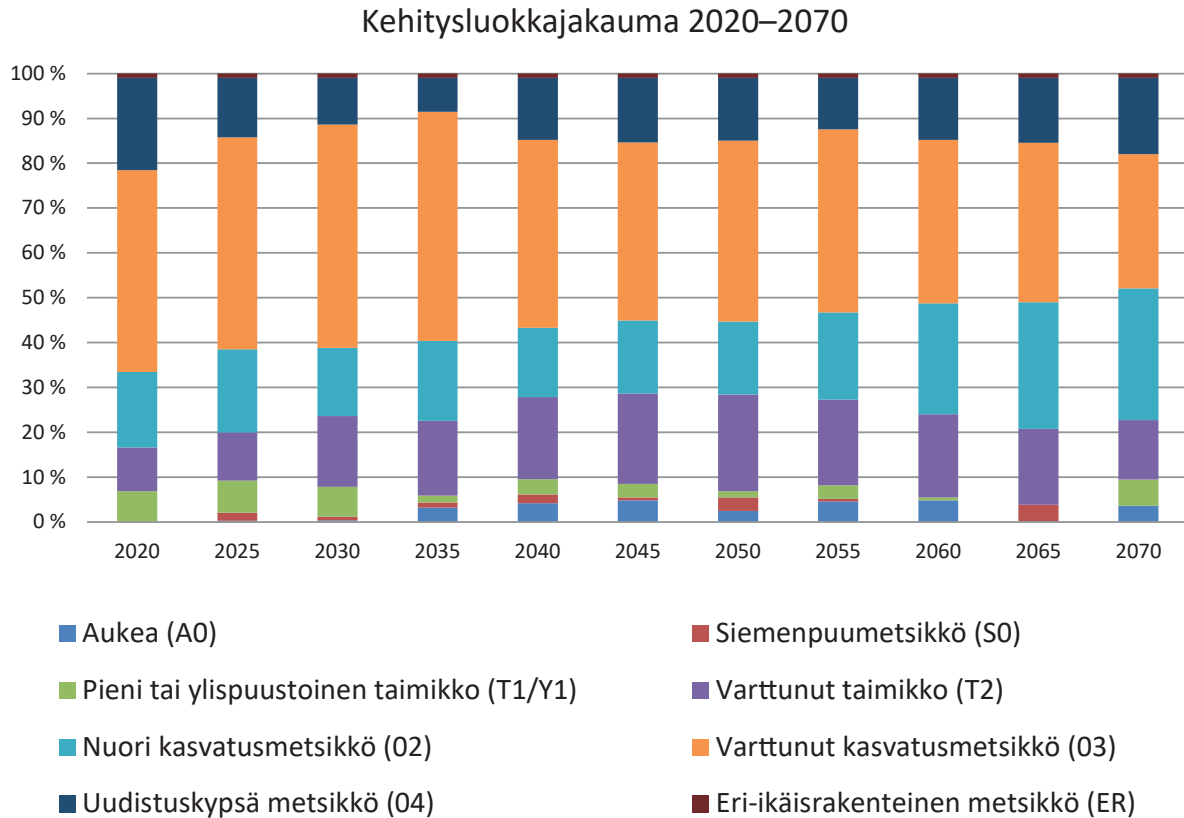
Harjoitusliitteessä kuvattu aineisto C: ”Tasainen kehitysluokkajakauma”, vaikuttaa ensisilmäykseltä olevan varsin lähellä sellaista metsää, jossa voitaisiin tasaisesti hakata puuston kasvua vastaava hakkuukertymä ja ylläpitää koko ajan samaa puustopääomaa. Tarkempi tarkastelu kuitenkin osoittaa, että simuloimalla kyseiselle tilakokonaisuudelle aina nykyistä kasvua vastaavat hakkuut, puuston kokonaistilavuus lähtee laskuun, eikä haluttua hakkuusuunnitetta enää edes



Kuva 21. Puuston kokonaistilavuuden (pylväät, vasen asteikko) ja puunmyyntitulojen (viivat, oikea asteikko) kehitys Evon opetusmetsien harjoitusaineistolla C (kts. harjoitusliite), jos tasainen hakkuusuunnite olisi enintään 1) nykyisen kasvun suuruinen (1089 m³/vuosi), 2) 80 % nykyisestä kasvusta (871 m³/vuosi) tai 3) 60 % nykyisestä kasvusta (653 m³/vuosi). Kun lähtötilanteessa metsien kehitysluokkajakauma on melko tasainen, voidaan pitkän aikavälin suunnittelussakin lähteä liikkeelle melko tasaisia hakkuukertymiä tarjoavista vaihtoehdoista. Tässä tapauksessa on simuloinnin mukaan hyvät perusteet hakata alle puuston nykyisen kasvun, jotta metsien tuotoskyky säilyy nykyisellään.

saavuteta 50 vuoden tarkastelujakson lopussa (Kuva 21). Tämän 50 vuoden tarkastelujakson perusteella vaikuttaa siltä, taloudellisesti kestävä hakkuusuunnite kyseisessä metsälössä on noin 870 m³/vuosi, mikä tuottaa metsänomistajalle keskimäärin hieman alle 40 000 euron vuosittaiset metsätalouden bruttotulot.

Edellisen tarkastelun lisäksi on hyvä analysoida vähintäänkin sitä, miten metsälön kehitysluokkajakauma muuttuu parhaalta vaikuttavassa skenaariossa (Kuva 22). Tässä tapauksessa kehitysluokkajakauma tulee säilymään esitetyllä hakkuusuunnitteella hyvin samankaltaisena – toki varttuneiden kasvatusmetsien (o3) määrä hieman vähenee ja nuorten kasvatusmetsien (o2) määrä lisääntyy. Toisaalta o3-kehitysluokan metsien osuus olikin lähtötilanteessa hieman ylipainotunut, mikä selittää myös sen, ettei puuston kokonaiskasvu pystytä mitenkään pitämään koko kiertoaika simuloinnin alkuhetken tasolla, koska juuri o3-kehitysluokassa puuston kasvu on kaikkein nopeinta.



Kuva 22. Kehitysluokkajakauma vuosina 2020–2070 skenaariossa, jossa hakataan vuosittain 80 % puuston nykyisestä kasvusta. Aineistona Evon opetusmetsien harjoitusaineisto C.

Metsätalouden ekologisen ja sosiaalisen kestävyyskannalta on hyvä merkki, että uudistuskypsiä metsiä löytyy suunnittelualueelta koko ajan, eikä taimikoiden tai aukeiden osuus pinta-alasta ole missään vaiheessa kohtuuttoman iso. Tämä ei tietenkään takaa metsäluonnon monimuotoisuuden tai virkistysarvojen säilymistä, mutta antaa kuitenkin mahdollisuudet toteuttaa hyvää talousmetsien luonnonhoitoa osana toimenpiteiden toteutusta, kun kaikkia hakkuuresursseja ei ole pakko käyttää välittömästi.

5.2 Suurin kestävä hakkuutaso

Jo edellisessä luvussa nähtiin, että pelkästään puuston nykyhetken kasvun perusteella ei voida määrittää suurinta kestävää hakkuutasoa, vaan kestävä hakkuutaso määrittämisessä tulee huomioida puuston ikä- ja kehitysluokkarakenne. Tässä

luvussa keskitytään tarkastelemaan sitä, miten metsikön rakenne tulee huomioida hakkuusuunnitteen arvioinnissa. Innoitus tämän luvun kirjoittamiseen on saatu VTT Juha Lapin (1997; 2016) Metsätieteen aikakauskirjoissa julkaistuista artikkeleista.

Aihe on ajankohtainen myös valtakunnallisissa keskusteluissa, joissa väitellään toistuvasti siitä, miten paljon Suomen metsistä on kestävää hakata puuta. Koska metsien kasvu on kiihtynyt Suomessa valtavasti 1970-luvulta lähtien, hakkuut ovat jääneet selvästi kasvua pienemmiksi ja uudistuskypsien metsien osuus puuston ikärakenteessa on lisääntynyt (esim. Korhonen ym. 2017), tullaan Suomessa olemaan valtakunnan tasolla jatkossa siinä tilanteessa, että suurin taloudellisesti kestävä hakkuutaso ylittää puuston nettokasvun, mikä johtaisi tällaisessa tilanteessa puuston kokonaistilavuuden pientymiseen (Lehtonen ym. 2016). Koko valtakunnan tasolla on kuitenkin syytä pohtia myös sitä, millainen hakkuutaso on ilmastopoliittisesti Suomen kannalta kestävä strategia.

”Metsälön nykykasvu ei anna mitään suoraan viitettä siitä, miten metsälöä kannattaa hakata. Erityisesti kasvua pienemmät hakkuut johtavat pitkän ajan kuluessa sekä kasvun että hakkuiden loppumiseen.”

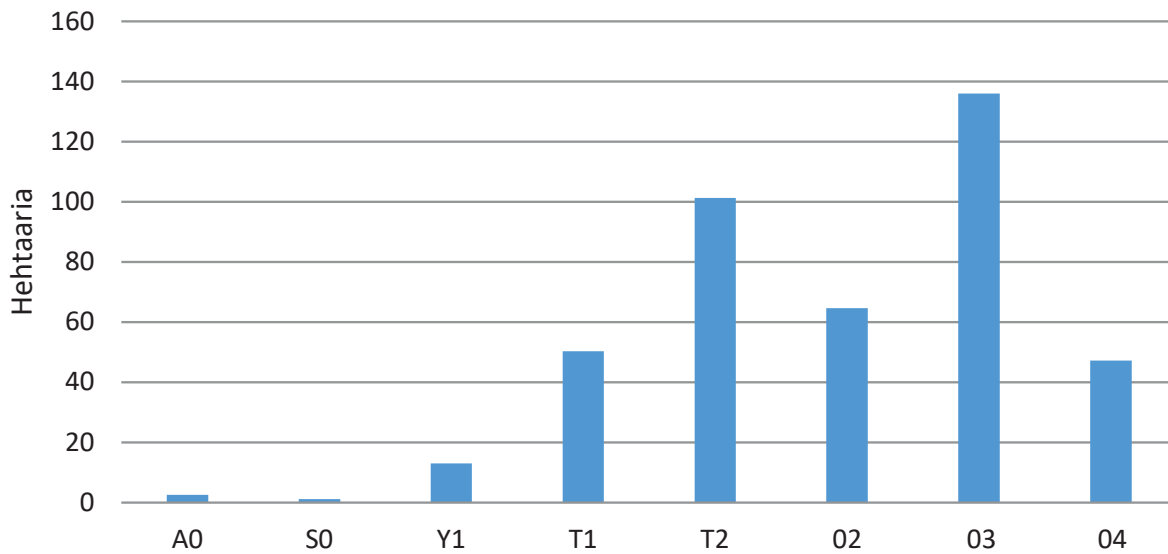
(Lappi 2016)

Mikäli metsäsuunnittelun lähtötilanteena on sellainen metsälö, jossa eri-ikäisiä ja erilaisessa kasvuvaiheessa olevia metsikkökuvioita on melko tasaisesti, suurinta kestävää hakkuutasoa voidaan iteroida tasaisella hakkuusuunnitteella, kuten luvussa 5.1 tehtiin. Tässäkin tapauksessa havaittiin, että hieman keskimääräistä suurempi osuus nopean kasvun vaiheessa olevia varttuneita kasvatusemetsiä johti siihen, että hakkuusuunnitteen määrittäminen pelkästään nykyhetken kasvua vastaavaksi olisi johtanut puuston kokonaistilavuuden ja sitä myöten tulevien hakkuumahdollisuuksien pienenemiseen pitkällä aikavälillä. Monesti suunnittelun lähtötilanne saattaa myös olla sellainen, ettei ole taloudellisesti järkevää edes pyrkiä tasaisiin hakkuumääriin, saati verrata kasvua ja hakkuukertymää toisiinsa.

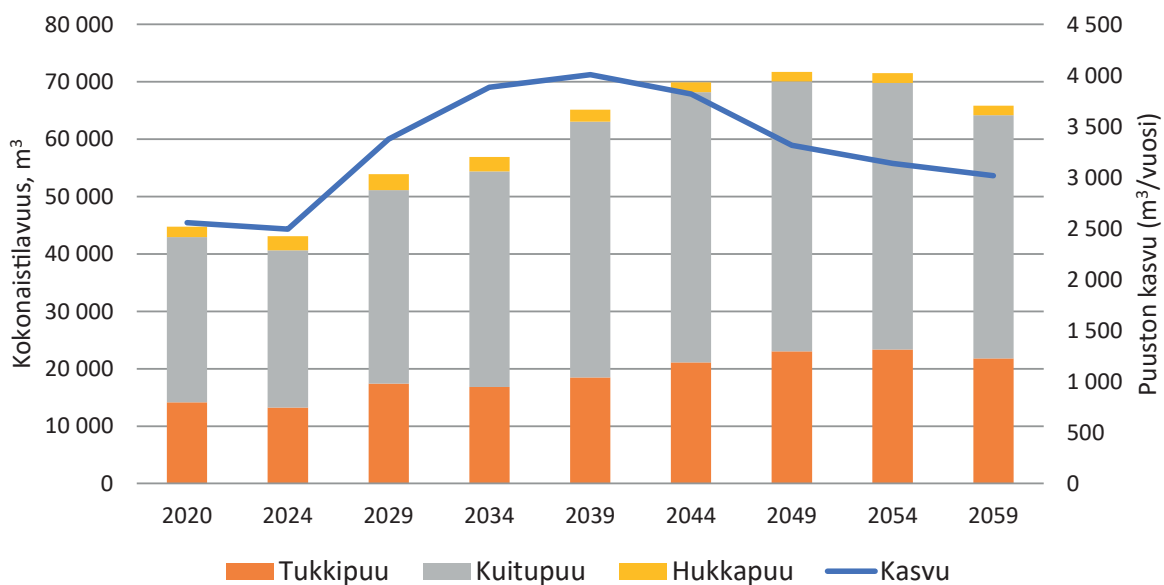
5.2.1 Lähtötilanteessa paljon nuoria metsiä

Mikäli suunnittelun lähtötilanteessa metsälössä on runsaasti taimikoita ja nuoria kasvatusemetsiä, puuston kasvun voidaan odottaa kiihtyvän tulevaisuudessa.

Kehitysluokkien pinta-alajakauma



Puuston tilavuuden ja kasvun kehitysennuste



Kuva 23. Kehitysluokkajakauma ja puuston kehitysennuste metsälössä, jossa kasvu tulee kiihtymään. Ote Etelä-Suomessa sijaitsevalta metsätilalta, jossa hakkuumahdollisuudet on realisoitu tehokkaasti, ja iso osa kuvioista on joko taimikoita tai kasvatusmetsiä. Alemmassa kuvassa on simuloitu, miten puuston kokonaistilavuus ja kasvu kehittyvät, jos hakkuut toteutettaisiin metsänhoidon suositusten mukaisesti. Nykyinen kasvu on pieni verrattuna siihen, mitä on odotettavissa 2030-luvulla. Samassa yhteydessä todettiin, että riippumatta siitä, miten voimakkaita hakkuuta suunnittelujakson ensimmäisinä vuosina tehdään, tilan arvokasvu tulee olemaan 2030-luvulla reilusti yli 10 % (Kuvat: Juho Lammi, Tapio).

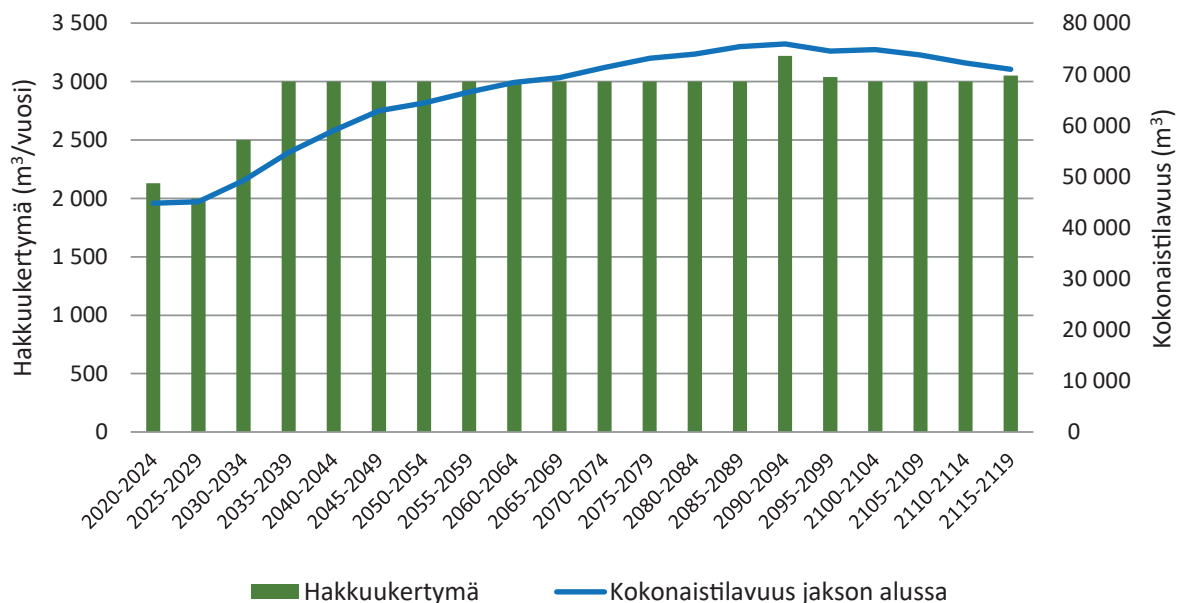
Tällöin kiihtyvä kasvu voidaan ulosmitata voimakkain hakkuin jo ennen kasvun tason nousemista. Kuva 23 havainnollistaa erästä todellista suunnittelutilannetta, jossa havaittiin metsälön siirtyvän kymmenen vuoden päästä erittäin nopean kasvun vaiheeseen. Tässä tapauksessa suunnittelija oli ehdottanut jo ensimmäiselle viidelle vuodelle puuston kasvua suurempaa hakkuupoistumaa, koska puuston rakenne kestää sen kiihtyvän kasvun ansiosta, eivätkä tulevat hakkuumahdollisuudet pienene – vaan nimenomaan päinvastoin.

Mikäli suunnittelualueella on paljon nuoria metsiä ja tavoitteena on löytää suurin kestävä hakkuutaso, metsänomistajan pitää maltaa odottaa jonkin aikaa ennen kuin puuta voidaan alkaa myydä suurimman hakkuutason mukaisesti (Kuva 24). Metsän ikä- ja kehitysluokkajakaumien pitää antaa ensin varttua hie- man vanhemmaksi, jotta haluttu tilarakenne saavutetaan. Mikäli hakkuiden ta- saisuusvaatimus olisi määritelty alkamaan laskentatehtävässä välittömästi, suu- rin tasainen hakkuutaso olisi jäänyt selvästi pienemmäksi, koska metsänhoidon suositusten mukaisia hakkuumahdollisuuksia ei olisi ollut heti ensimmäisinä vuosina riittävästi.

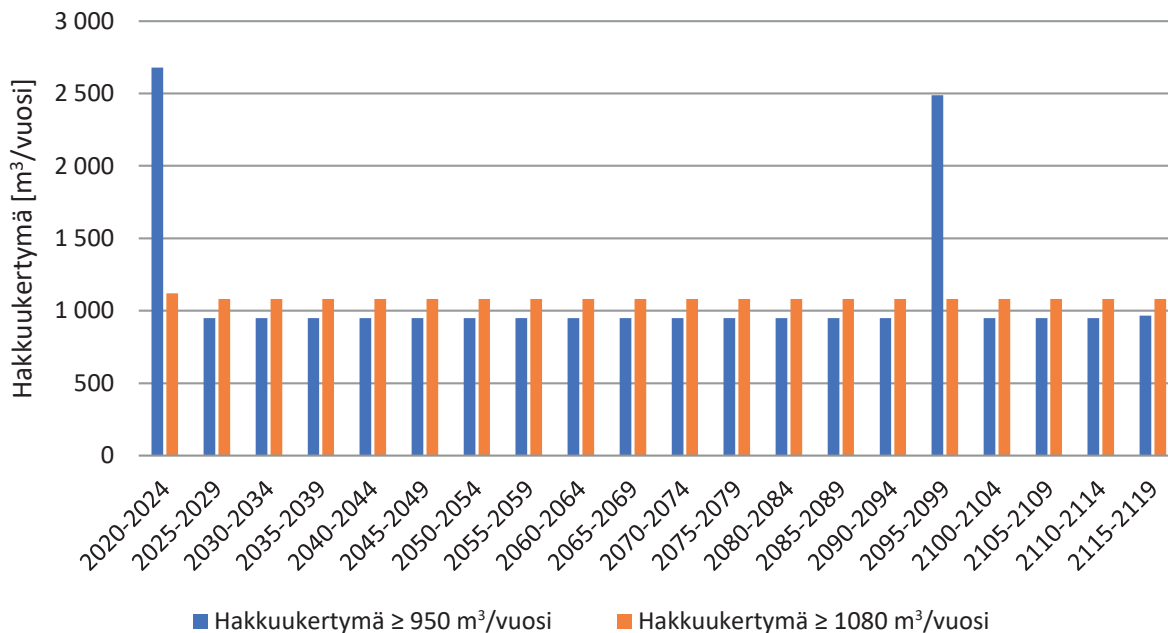
5.2.2 Lähtötilanteessa paljon uudistuskypsiä metsiä

Myöskään siinä metsäsuunnittelun lähtötilanteessa, että tilalla on paljon uudistus- kypsiä metsikkökuvioita, ei ole taloudellisesti järkevää pyrkiä tasaisiin hakkuu- tuloihin välittömästi. Jos metsälössä on paljon käyttämättömiä hakkuuresurss- eja, jotka voidaan toteuttaa tasaisen hakkuusuunnitteen päälle, kannattaa nämä lisähakkuuresurssit realisoida taloudellisesta näkökulmasta varsin pian. Tällaises- sa tilanteessa ei kannata kiinnittää juurikaan huomiota puuston nykyiseen kas- vuun, etenkin jos metsälössä on talouskäytössä olevia kuvioita, joiden metsän- hoidon suositusten mukainen uudistamisajankohta on jo ohitettu. Toki suunnit- telijan kannattaa myös selvittää metsänomistajan kiinnostus joidenkin kuvioi- den vapaaehtoiseen suojeluun, mikäli tilalla on paljon taloudellisesti ”yli-ikäisiä” metsiä, eikä hakkuita kuitenkaan haluta nopeasti realisoida.

Kun suurinta tasaista hakkuutasoa iteroidaan pitkällä aikavälillä, optimointi- algoritmi voi tuottaa tasaiset hakkuut viivytämällä jo uudistuskypsien kuvioi- den käsittelyä pitkälle tulevaisuuteen, mikä ei ole taloudellisesti järkevää. Tä- män takia suunnittelulaskennan tasaisuusvaatimusta kannattaa höllentää, jot- ta olemassa olevat hakkuuresurssit saadaan tehokkaampaan käyttöön. Tilan- teessa, jossa kehitysluokkajakauma on painottunut uudistuskypsiin metsiin, tasaisuusvaatimuksen lieventäminen lisää merkittävästi metsien tuottoarvoa (Kuva 25).



Kuva 24. Suurin kestävä hakkuutaso saavutetaan pienellä viiveellä, mikäli suunnittelun lähtötilanteessa metsät ovat melko nuoria (kehitysluokkakajakauma kuvassa 23). Iteroinnin perusteella tämän Uudellamaalla sijaitsevan 416 hehtaarin metsätilan suurin kestävä hakkuutaso on vähintään 3 000 m³/vuosi (= 7,2 m³/ha/vuosi), mutta metsänomistajan pitää odottaa sen saavuttamista 10–15 vuotta.



Kuva 25. Kahden eri hakkuutason vertailu Evon opetusmetsien harjoitusaineistolla B, jossa on runsaasti uudistuskypsiä metsiä. Siniset pylväät kuvaavat tilannetta, jossa metsästä hakataan vähintään 950 m³/vuosi (= 6,4 m³/ha/vuosi), ja vastaavasti oranssit pylväät tilannetta, jossa hakataan vähintään 1080 m³/vuosi (= 7,3 m³/ha/vuosi). Nettotuloksen nykyarvoksi laskettiin pienemmällä kertymärajoitteella optimoitaessa 1,16 milj. euroa, ja vastaavasti suuremmalla kertymärajoitteella 1,01 milj. euroa (diskonttokorko 4 %).

Kehitysluokkien tavoitejakauma metsäsuunnittelun ohjauskeinona

Ennen kehittyneitä simulointi- ja optimointimalleja tehtiin hakkuulaskelmia ja ehdotuksia yksinkertaisilla koko tilaa tai metsäaluetta käsittelevillä kaavoilla, kuten kameraalitaksa (vuosilohkomenetelmä) ja tavoitehakkuulaskelma. 1960-luvulta alkaen yksityismetsien metsäsuunnitelmissa pyrittiin näitä ikäluokkien pinta-alaan ja puuston tilavuuteen sekä tavoitteelliseen kehitysluokkajakaumaan perustuvia malleja yhdistämään kuvioittaisiin metsänhoito- ja hakkuutarpeisiin. Kuvioittaisten metsänhoitotarpeiden mukaisten ehdotusten summana saatiin uudistus-pinta-ala ja hakkuukertymä, jota säädettiin tarvittaessa kuvioehdotuksia muuttamalla.

Menetelmästä on käytetty nimitystä Tapion suunnite-% menetelmä. Suunnite-% tarkoittaa tulevan 10-vuotiskauden hakkuuehdotuksen suhdetta alkupuustoon inventointihetkellä. Etelä-Suomessa suunnite-% on ollut noin 40 %. Esimerkiksi 30 ha tilalla, jossa puustoa on 4500 m³ (150 m³/ha), hakkuuehdotus on 1800 m³ tulevalle 10-vuotiskaudelle (Taulukko 3).

Taulukko 3. Esimerkki suunnite-% -menetelmän soveltamisesta hakkuusuunnitteen laatimisessa.

30 ha metsätilan hakkuusuunnite alkupuustoilla:

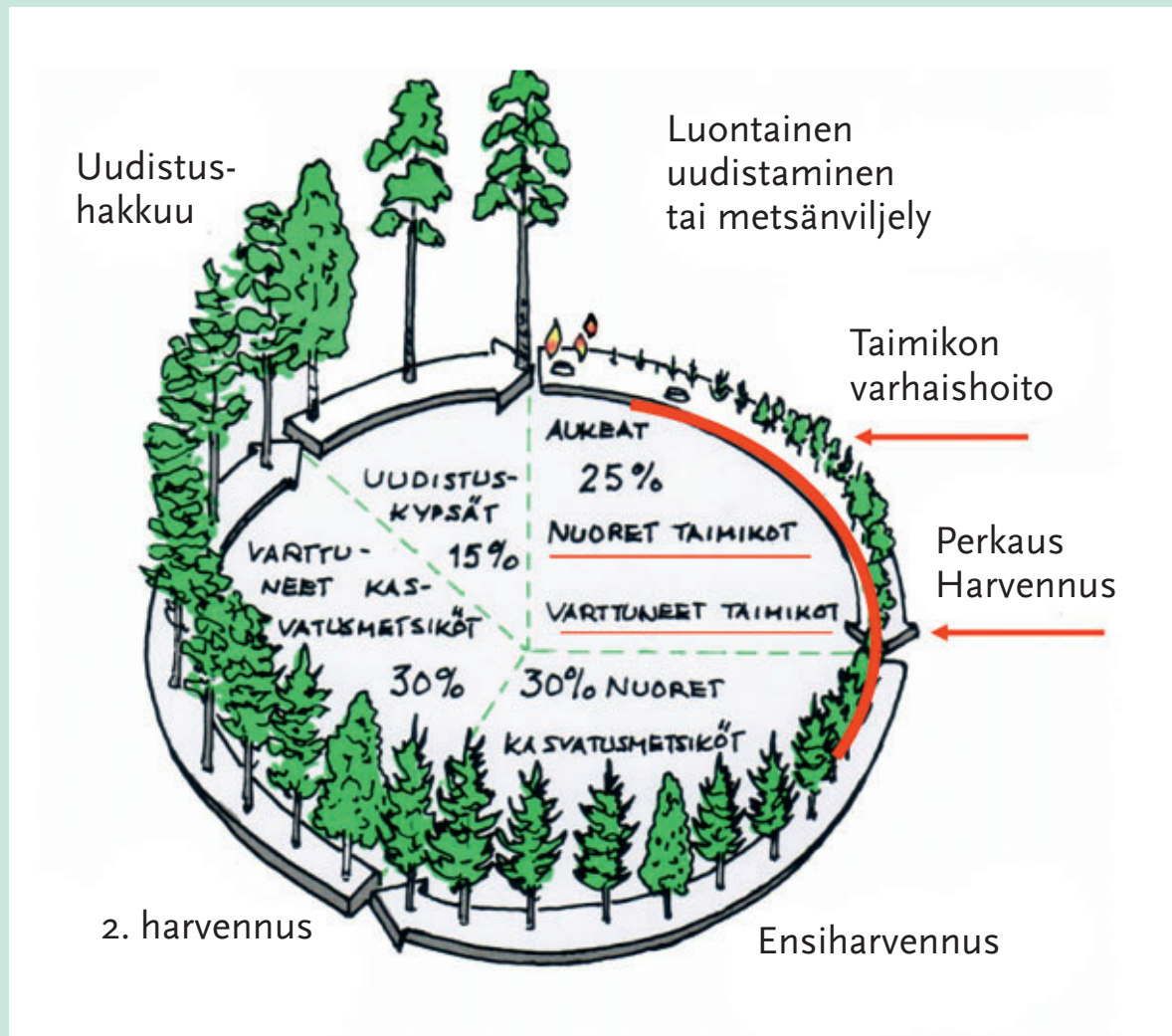
Alkupuusto + kasvu – hakkuu = loppupuusto 10 vuoden kuluttua

	Alkupuuston määrä		Puuston kasvu		Hakkuu-poistuma		Loppupuuston määrä	
	m ³ /ha	Yht. m ³	m ³ /ha/v	Yht. m ³	s-%	m ³ yht.	m ³ /ha	Yht. m ³
a	100	3 000	5	1 500	40	1 200	110	3 300
b	150	4 500	6	1 800	40	1 800	150	4 500
c	200	6 000	7	2 100	40	2 400	190	5 700

Suunnite-%:n lisäksi hakkuuehdotuksen määrittämisessä tarkastellaan uudistus-pinta-alan tavoite-%:ia. Tilan pinta-alasta voidaan uudistaa Etelä-Suomessa noin 15 % tulevan 10-vuotiskauden aikana, jos puuston kehitysluokkarakenne on lähellä tavoitetta (Kuva 26). Tavoitteen mukainen kehitysluokkajakauma mahdollistaa puuston määrän säilymisen tasaisena ja kasvun suuruiset hakkuut pitkälle tulevaisuuteen. Tämä voi kuitenkin poiketa huomattavasti eri metsäkiinteistöillä.

Kaaviota voidaan tulkita myös ”Kelloperiaatteella”. Etelä-Suomen hoidetuissa tuoreen tai lehtomaisen kankaan kuusikoissa kiertoaika voi olla 60 vuotta, jolloin koko kiekon ympärys on 60 vuotta eli 60 minuuttia. Ikävuodet ja minuutit sekä kehitysluokkien rajat ovat kellotaulussa karkeasti kohdillaan. Kuvassa 26 näkyvät ajoitettuina myös tärkeimmät hakkuut ja metsänhoitotyöt.

Kasvun ja poistuman tasapaino sekä puuston määrän säilyminen vakiona ovat usein liian teoreettinen ja tiukka tavoite, joka voi toteutua vain suuremmilla pinta-aloilla ja pidemmällä aikavälillä. Suomen yksityismetsien keskikoko on noin 30 hehtaaria, ja alle 50 hehtaarin metsätiloja on yli 80 % noin 350 000 tilasta.



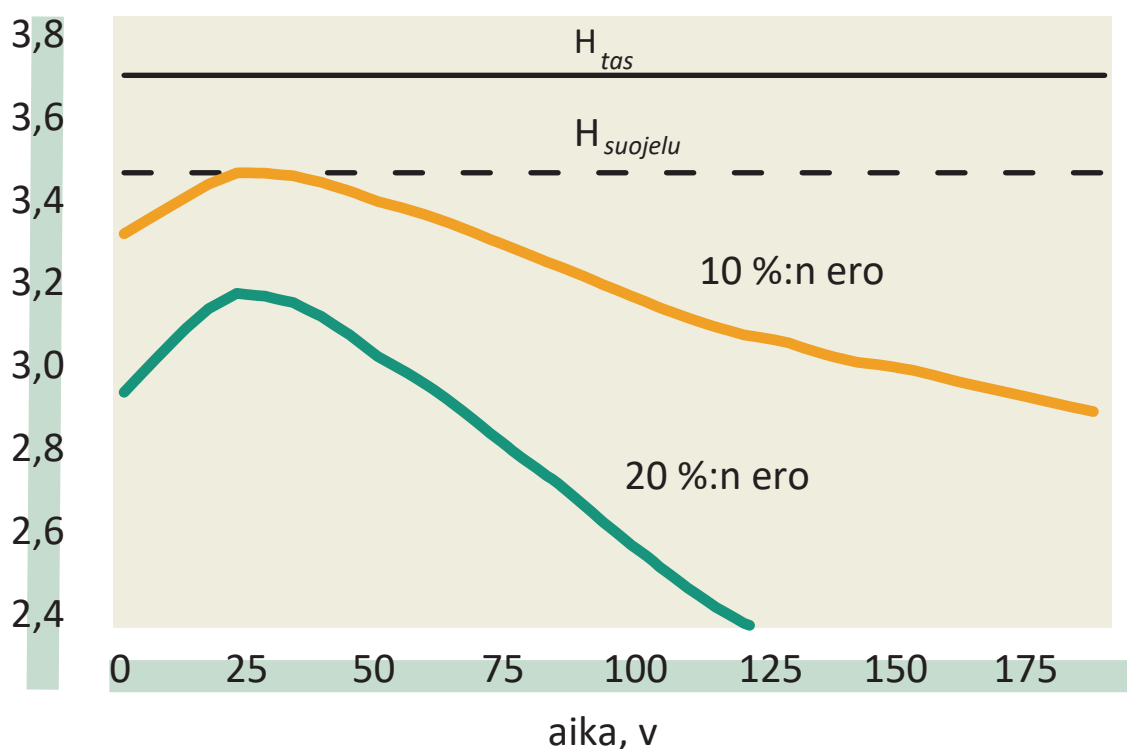
Kuva 26. Tavoiteltava kehitysluokkajakauma (Metsäkeskus, Metsään ABC).

Näillä pienillä tiloilla suunnite-% on hyvä apuväline hakkuiden mitoituksessa. Se ohjaa vähäpuustoisilla tiloilla puuston lisäämiseen ja runsaspuustoisilla tiloilla kasvua suurempiin hakkuihin, jolloin puustopääoma pienenee, mutta kehitysluokkarakenne lähestyy tavoitetta. Pienillä tiloilla on helppo löytää muutamia kuvioita, joiden käsittelyä muuttamalla saadaan koko tilan hakkuuehdotus säädettyä metsänomistajan tavoitteen mukaiseksi. Uusi tarkastelu ja laskelma tehdään sitten 10 vuoden kuluttua.

Heikki Lehmonen, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu (10.12.2019)

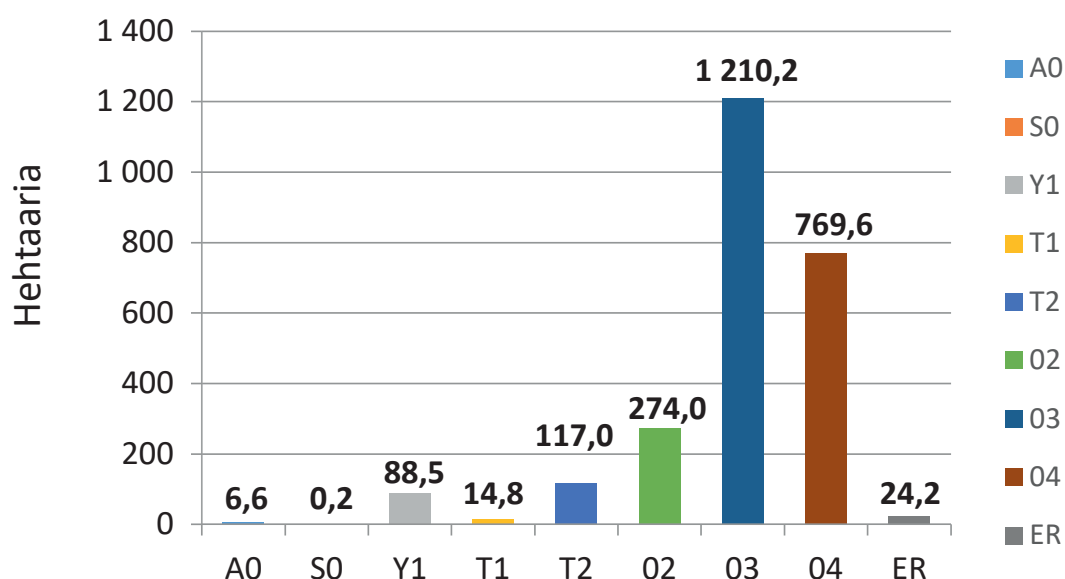
5.3 Jatkuvasti kasvua pienemmät hakkuut

Metsien kasvu noudattaa sigmoidisen käyrän muotoa: kiertoajan alussa kasvu on hidasta, minkä jälkeen se kiihtyy huippuunsa ja lähtee lopulta ennen pitkää laskemaan. Mikäli metsien kaikkia hakkuumahdollisuuksia ei hyödynnetä puuntuotannollisesti katsoen ajallaan, metsien ikärakenne vanhenee ja puuston kokonaistilavuus kasvaa. Lyhyellä aikavälillä puuston kasvua pienemmät hakkuut näkyvät kasvun hetkellisenä nousuna, koska vanhat metsät kasvavat kuitenkin enemmän kuin aivan kiertoajan alussa olevat metsät, mutta pitkällä aikavälillä metsien ikärakenteen vanheneminen johtaa kasvun taantumiseen. Mikäli alenevan kasvun tilanteessa jatketaan toimintamallia, jossa hakataan edelleen alle puuston senhetkisen kasvun, ollaan kierteessä, joka johtaa ennen pitkää kasvun ja sitä myöten hakkuukertymien merkittävään romahdukseen (Kuva 27).

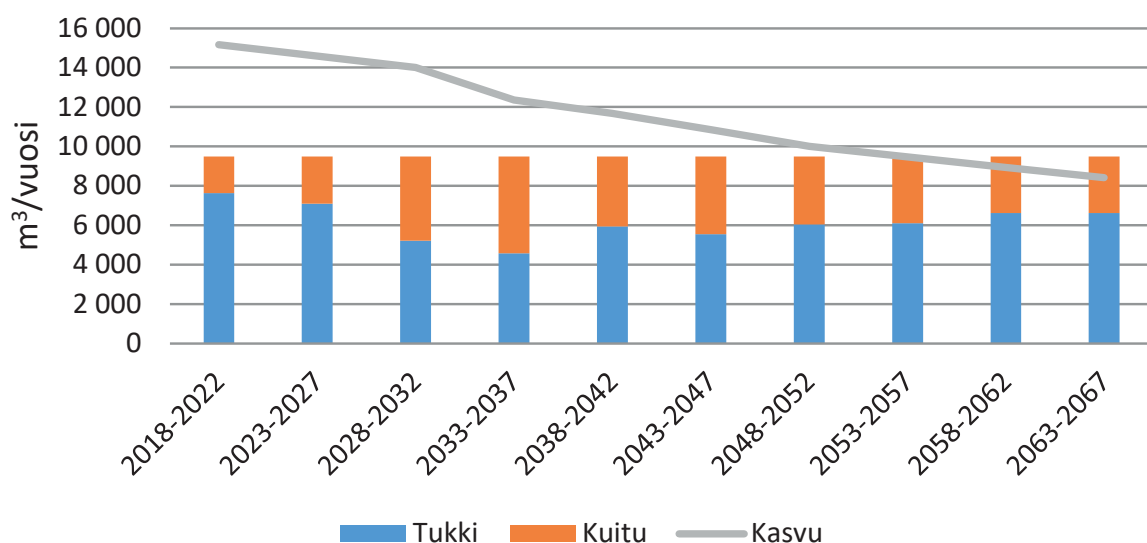


Kuva 27. Hakkuiden kehitys, jos 90-vuotiaassa normaalimetsässä hakattaisiin aina 10 % tai 20 % alle suurimman kestäväen hakkuutason (H_{tas}). Kaikissa kolmessa skenaariossa kasvu on aluksi tasolla H_{tas} . Jos hakataan vähemmän kuin nykyhetken kasvu, kasvu tulee lyhyellä aikavälillä lisääntymään, koska kokonaistilavuus on suurempi kuin simuloinnin alkuhetkellä. Pitkällä aikavälillä kasvun ja sitä myöten tulevien hakkuumahdollisuuksien määrä tulee kuitenkin vähenemään merkittävästi. Juha Lapin (1997) laatimassa esimerkissä on myös kuvattu, miten paljon 5,7 % suojelupinta-ala vaikuttaisi suurimpaan kestäväen hakkuutasoon ($H_{suojelu}$).

Metsämaa kehitysluokittain



Hakkuut puutavaralajeittain (m³/vuosi) ja puuston kasvu (m³/vuosi)



Kuva 28. Muun muassa monissa kaupungeissa ollaan siinä tilanteessa, että metsien keski-ikä on korkea ja keskitilavuus suuruusluokkaa 200 m³/ha. Lisäksi useiden julkisyhteisöjen omistamilla mailla sallitaan monesti vain selvästi puuston nykyistä kasvua pienemmät hakkuut. Kuvassa Jyväskylän kaupungin ulkoilu- ja virkistysmetsille laadittu kehitysennuste, jos seuraavien 50 vuoden aikana hakattaisiin 60 % puuston nykyisestä kasvusta. Kaaviossa puuston kokonaiskasvua kuvaava harmaa käyrä romahtaa simuloinnin mukaan puoleen nykyhetkestä, jos hakkuukertymä pidetään näin pienenä (Niemi & Lumperoinen 2018).

”Kasvu on ollut Suomen metsissä parin vuosikymmenen ajan hakkuita suurempi. Tähän on totuttu niin vankasti, että julkisuudessa on esitetty jopa niinkin huimia ajatuksia, että kasvua pienemmät hakkuut ovat kestävän metsätalouden tunnusmerkki. Tämä on pitemmällä tähtäyksellä vaarallinen ajatusvirhe. Jatkuvasti kasvua pienemmät hakkuut johtavat metsien ikääntymiseen ja sitä kautta kasvun ja hakkuiden syöksykierteeseen.”

(Lappi 1997)

Konkreettisesti kasvua pienemmistä hakkuista johtuva metsien puuntuotannollisen tuotoskyvyn aleneminen näkyy Suomessa erityisesti monien julkisyhteisöjen metsissä. Monissa yhteisöissä on päädytty sitomaan metsien hakkuupoistuma puuston kasvuun poliittisen kompromissin löytämiseksi. Muun muassa Tapion asiantuntijat ovat pyrkineet viemään tietoutta tällaisen toimintamallin vaikutuksista metsätalouteen esimerkiksi Jyväskylän kaupungille, jonka metsäohjelman (<https://www.jyvaskyla.fi/ymparisto/metsat/jyvaskylan-metsa-ohjelma>) liitteestä löytyvät tätä ilmiötä havainnollistavat hakkuusuunnitelaskennat (Kuva 28).

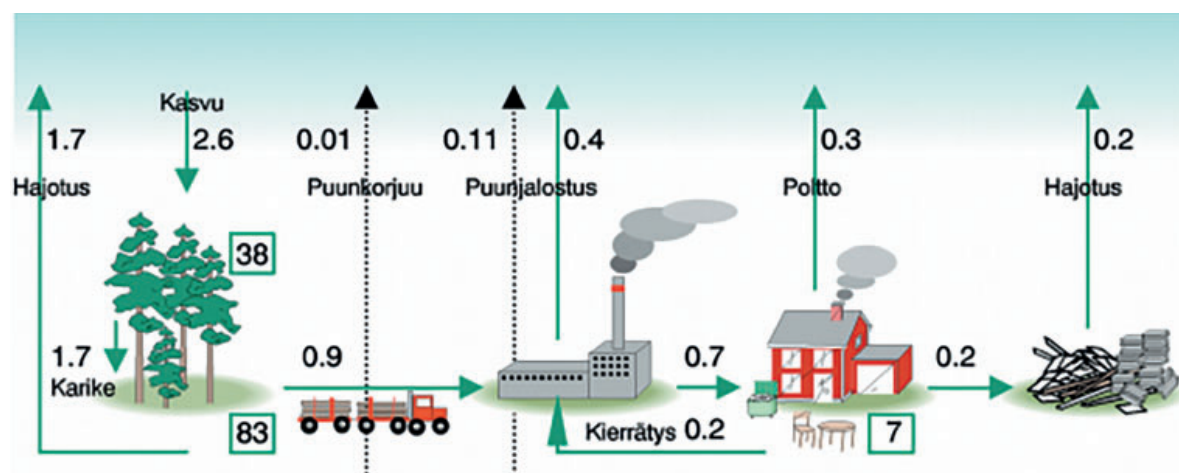
5.4 Hiilitase metsäsuunnittelussa

Metsäsuunnittelulla on keskeinen rooli metsien hiilitaseen kehityksessä. Tässä oppimateriaalissa hiilitaseeseen liittyvät käsitteet on määritelty seuraavasti (mukaan Tuomainen 2018):

- **Hiilivarasto:** Hiilivarastolla tarkoitetaan puustoon ja maaperään sitoutuvaa kumulatiivista hiilen kokonaisvarastoa. Hiilivaraston kasvu määräytyy vuosittaisen hiilitaseen mukaan.
- **Hiilensidonta:** Hiilensidonnalla kuvataan puuston ja maaperän kykyä sitoa hiiltä. Hiilensidonta on bruttoarvo, josta ei ole vähennetty hiilen poistumaa.
- **Hiilitase:** Hiilitaseella kuvataan puustoon ja maaperään sitoutuvan ja siitä poistuvan hiilen yhteenlaskettua määrää. Hiilitaseessa voi olla mukana myös puutuotanto- ja puutuoteketjun hiilitase.

- **Hiilinielu:** Hiilinielu syntyy, mikäli vuosittainen puustoon ja maaperään sitoutuvan hiilen määrä ylittää siitä poistuvan hiilen määrän. Päinvastaisessa tilanteessa puhutaan hiililähteestä.
- **Hiilijalanjälki:** Hiilijalanjäljellä kuvataan kokonaispäästöjen aiheuttamaa ilmastokuormaa, josta vähennetään hiilensidonnasta ja hiilivaraston kasvun positiiviset vaikutukset. Mikäli hiilijalanjälki on negatiivinen, hiiltä sitoutuu ilmakehästä (= päästöjä pystytään välttämään).
- **Korvaavuusvaikutus / kompensointi:** Kompensoinnilla tarkoitetaan tilannetta, jossa hiilidioksidipäästöjä kyetään vähentämään esimerkiksi korvaamalla fossiiliset polttoaineet bioenergialla tai käyttämällä puuta rakennusmateriaalina fossiilisten materiaalien sijaan.

Metsien hiilitaseella tarkoitetaan puuston ja maaperän yhteen laskettua hiilitasetta. Hiilitaseeseen yhdistetään useimmiten myös puuntuotanto- ja puutuoteketjun hiilitase, mikä perustuu käytännössä tilastoituihin keskiarvoihin ketjun päästöistä ja korvaavuusvaikutuksista sekä tuotteiden elinkaarista. Puutuotteiden ja bioenergian korvaavuusvaikutus voi olla merkittävä suhteessa vaihtoehtoihin fossiilisiin polttoaineisiin ja materiaaleihin. Kuitenkin selvyyden vuoksi tässä oppimateriaalissa keskitytään pääasiassa puuston ja maaperän hiilitaseeseen. Kuvas-
sa 29 on esimerkki mäntymetsien hiilitaseesta ja hiilivirroista 90 vuoden kiertoajalla pohjautuen vuonna 2000 voimassa olleisiin metsänhoidon suosituksiin (Liski 2000).



Kuva 29. Esimerkki puuntuotanto- ja puuntuotoksetketjun hiilitaseesta mäntymetsissä 90 vuoden kiertoajalla. Vihreät nuolet indikoivat metsään sitoutuvan ja metsästä poistuvan hiilen virtoja, ja mustat nuolet puolestaan fossiilisen hiilen virtoja (muodossa Mg CO₂/ha/vuosi). Hiilivarastojen suuruus on ilmoitettu vihreissä laatikoissa (muodossa Mg CO₂/ha). (Kuva: Liski 2000)

Esimerkiksi IPTIM-metsäsuunnitteluohjelmistossa yleisesti käytettyjen MELA2002-kasvumallien (Hynynen ym. 2002) yhteyteen on kytketty Repolan ym. (2007) biomassamallit, joiden avulla voidaan laskea puuston sitoma hiilimäärä mille tahansa ajanjaksolle. Maaperän hiilivaraston suuruus ei kuitenkaan kuulu metsäsuunnittelussa yleisesti inventoitaviin tietoihin, joten hiilitaselaskennoissa kivennäismaiden hiilivarastojen suuruuden täytyy olettaa vastaavan esimerkiksi metsämaan kasvupaikkakohtaisesti mitattuja keskimääräisiä hiilivarastoja (esim. Liski & Westman 1997). Turvemaiden hiilivarastojen arviointi yleisesti inventoitujen metsävaratietojen pohjalta on hyvin epävarmaa, koska hiilivaraston suuruus riippuu voimakkaasti turvekerroksen syvyydestä ja turpeen maatuneisuudesta.

Maaperän hiilitaseen mallintamisessa voidaan soveltaa karikesadantaa ennustavia malleja (Liski ym. 2006) sekä maaperässä olevan hiilen hajoamista ennustavia malleja, kuten Yasso15 -malli (Tuomi ym. 2011). Maanmuokkauksen vaikutuksen huomioiminen hiilivirtojen mallinnuksessa vaatii kuitenkin vielä lisää tutkimusta aiheesta, sillä aiheesta laaditut tutkimusjulkaisut ovat toistaiseksi keskenään ristiriitaisia. Haastetta lisää myös se, että eri kasvihuonekaasujen – hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4) ja typpioksiduuli (N_2O) – nielut ja päästöt käyttäytyvät maaperässä eri tavoin, mutta ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta kaikki edellä mainitut kaasuvirrat tulisi pystyä huomioimaan (esim. Hautanen & Ojanen 2014).

Yleisesti ottaen puuston hiilivarasto vastaa yhtä kolmasosaa ja maaperän hiilivarasto kahta kolmasosaa metsän koko hiilivarastosta, joten maaperän hiilen arviointi on selvästi suurin yksittäinen epävarmuustekijä hiilitaselaskennoissa. Lisäksi turvemaihin sitoutunut hiilivarasto on keskimäärin selvästi suurempi kuin kivennäismaiden hiilivarasto, mikä lisää hiilitaseen ennustamisen epävarmuutta turvemaavaltaisilla metsätiloilla.

Joka tapauksessa metsäsuunnittelussa tehtävillä päätöksillä on pitkäaikainen vaikutus metsien hiilitaseen kehitykseen: olennaisia tekijöitä ovat metsiköiden kiertoajat sekä hakkuiden ajoitus ja voimakkuus. Suunnittelijan tuleekin osata selvittää myös tämän päätöksentekokriteerin osalta metsänomistajan tavoitteet: missä suhteessa metsäsuunnittelussa painotetaan taloudellisia tavoitteita, hiilensidontaa sekä luonto- ja virkistysarvoja.

Pidentämällä metsien kiertoaikaa hiilivarastot kasvavat, mutta samalla puustoon sitoutuneen pääoman määrä kasvaa ja puuston kasvu hidastuu, mikä korreloi vahvasti puuston hiilensidonnan kanssa. Vastaavasti lyhentämällä metsien kiertoaikaa ja pitämällä metsien kehitysluokkajakaumaa nuorempana, puuston hiilivarasto jää pienemmäksi, mutta hiilensidonta pysyy nopeamman kasvun takia

suurempana. Lisäksi tässä monimutkaisessa ongelmassa on syytä tarkastella myös puutuotteiden korvaavuusvaikutusta, jonka merkitys ilmastonmuutoksen hillitsemisessä saattaa olla hyvinkin merkittävä (Liski 2000).

Ylipäättään metsien käytön ilmastovaikutuksiin liittyvä keskustelu on tällä hetkellä valitettavan kahtiajakautunutta, eivätkä eri osapuolet ymmärrä toistensa näkemyksiä. Lisäksi tarkastelun aikaperspektiivillä on ratkaiseva vaikutus johtopäätöksiin, kuten esimerkiksi Hurmekoski (2020) on avannut kiitettävän objektiivisessa kannanotossaan metsäsektorin ilmastotoimista: pitkällä aikavälillä metsien hakkuihin perustuva kiertobiotalous on ilmaston kannalta kestävämpi ratkaisu kuin fossiilitalous, mutta lyhyellä aikavälillä fossiilisten raaka-aineiden käyttö vaikuttaa biotaloutta paremmalta vaihtoehdolta.

”Puusta valmistetut tuotteet, puun energiakäyttö mukaan lukien, tyydyttävät erilaisia tarpeita. Jos näitä tarpeita ei tyydytettäisi puusta valmistetuilla tuotteilla, ne tyydytettäisiin joillakin muilla tuotteilla. Tämän vuoksi puusta valmistettujen tuotteiden hiilitaloutta on syytä verrata myös muiden tuotteiden hiilitalouteen. Uusiutuvasta luonnonvarasta, puusta, valmistetut tuotteet voivat osoittautua hiilitaloudeltaan muita tuotteita edullisemmiksi. Jos näin käy, hiilitalouden kannalta on edullista käsitellä metsiä niin, että niistä saadaan riittävästi raaka-ainetta muiden tuotteiden korvaamiseen. Hakkuiden lisääminen ja kiertoajan lyhentäminen voi tässä tapauksessa olla metsien hiilivarastojen vähenemisestä huolimatta hiilitalouden kannalta edullista. Tuskin puutuotteet maailmaa pelastavat, mutta niistä voi olla vähemmän haittaa kuin muista tuotteista.”

(Liski 2000)

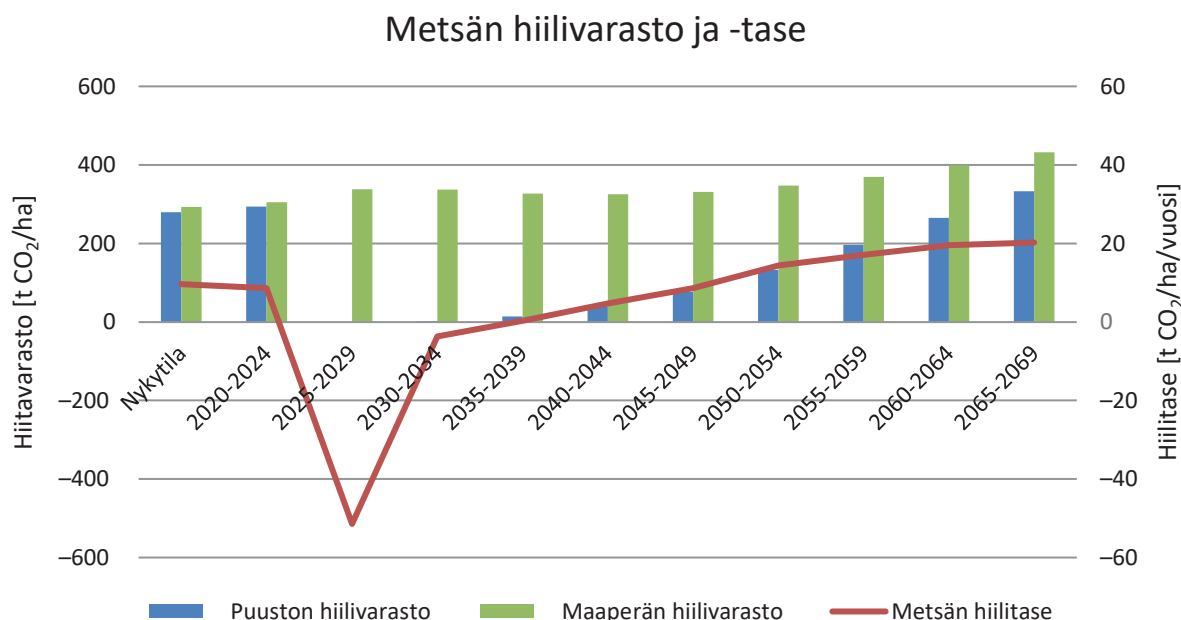
ESIMERKKI: UUDISTUSHAKKUUN VAIKUTUS METSÄN HIILITASEESEEN

Tässä luvussa havainnollistamme metsäsuunnittelun ja metsänhoitotoimenpiteiden vaikutusta metsien hiilitaseeseen kuviotasolla lasketun esimerkin avulla. Kuva 30 havainnollistaa tilannetta, jossa Pohjois-Savossa sijaitsevaan uudistuskypsään tuoreen kankaan mänty-kuusi-sekametsään simuloidaan uudistushakkuu vuonna 2025, ja istutetaan samana vuonna kuuselle. Lisäksi kuviolla toteutetaan sekä taimikon varhais-

perkaus että taimikonharvennus 2030-luvulla. Ensiharvennusta ei tehdä kuvassa esitetyn tarkastelujakson aikana. Hiilitaselaskenta on simuloitu IPTIM-laskenta-ohjelmistolla vuosille 2020–2069 luvussa 5.4 mainittujen tieteellisten mallien avulla.

Uudistushakkuun jälkeen puuston hiilivarasto poistuu hakatun puutavaran mukana metsästä, mutta jo 15 vuoden iässä puuston hiilivaraston kasvu on voimakasta muuttaen metsikön selkeäksi hiilinieluksi (Kuva 30). Maaperän hiilivaraston osalta muutokset ovat vähäisempiä, vaikka mallien mukaan uudistushakkuun aiheuttama runsas karikesadanta kasvattaakin hieman maaperän hiilivarastoa hakkuun jälkeen. Tässä tapauksessa maaperän hiilivarasto on kooltaan samaa suuruusluokkaa uudistuskypsen puuston hiilivaraston kanssa, sillä kyseinen kuvio sijaitsee kangasmaalla – vastaavalla turvemaan kohteella maaperän hiilivarasto olisi huomattavasti suurempi suhteessa puuston hiilivarastoon.

Metsäsuunnittelussa on tehtävä valinta sen välillä, halutaanko ylläpitää puuston hiilivarastoa pidempään vai uudistaa metsiä huolehtien voimakkaasti kasvavien ja hiiltä sitovien metsien osuudesta. Mikäli kiertoaikaa pidennetään ja hiilivarastoja ylläpidetään, päätöksentekijän on hyvä tiedostaa heikentyvä hiilensidonta, kasvava luonnonpoistuma sekä lisääntyvät tuhoriskit. Hiilivarastojen kasvattaminen palvelee enemmän lyhyen aikavälin suunnittelua ja syö hiilensidonnan potentiaalia tulevaisuudessa. Pidemmällä aikavälillä, metsätalouden pitkäjänteisyys huomioiden, on syytä huolehtia puuston kasvusta ja kokonaistuotoksesta, jota voidaan kasvattaa merkittävästi vain ja ainoastaan metsien ikärakennetta nuorentamalla. Uudistamisen myötä on hyväksyttävä yksittäisten metsikkökuvioiden negatiivinen hiilitase lyhyellä aikavälillä, sillä metsän kasvaessa sekä hiilivarasto että hiilensidonta lisääntyvät merkittävästi puuston voimakkaan kasvun myötä.



Kuva 30. Puuston ja maaperän hiilivarastojen muutokset (t CO₂/ha; vasen akseli) ja metsän keskimääräinen hiilitase 5-vuotisjaksolla (t CO₂; oikea akseli). Kyseessä Pohjois-Savossa sijaitseva tuoreen kankaan o4-kehitysluokan mänty-kuusivaltainen metsikkökuvio, jolle simuloidaan uudistushakkuu ja kuusen istutus vuonna 2025. (Kuva: Juho Lammi, Tapio)



Taktinen metsäsuunnittelu

Strateginen metsäsuunnittelu antaa päätöksentekijälle suuntaviivat, miten paljon metsiä kannattaisi hakata milloinkin, ja miten tämä vaikuttaa tulevien hakkuumahdollisuuksien kehittymiseen. Strategisen suunnittelun avulla voidaan myös sovittaa yhteen metsänomistajan metsätaloutta ja muita elämiin liittyviä tuloja ja menoja. Strategisen metsäsuunnittelun yksikkönä on tavallisesti metsikkökuvio ja laskennallisesti suunnittelun ehdotukset tulevat aina jollekin tietylle kuviolle, mutta isomman kuviojoukon tai metsätilan osalta ei ole vielä strategisen suunnittelun vaiheessa kiinnitetty huomiota esimerkiksi toimenpiteiden alueelliseen keskittämiseen, elinympäristöjen kytkeytymiseen tai suunnitelman maisemallisiin vaikutuksiin.

Taktisessa metsäsuunnittelussa ratkaistaan konkreettisesti, mitä toimenpiteitä kannattaa tehdä missäkin, ja milloin. Tällöin suunnittelussa on tarpeellista huomioida metsikkökuvioiden sijainti suhteessa toisiinsa (Luku 6.1). Uusien inventointi- ja laskentamenetelmien avulla on mahdollista myös hylätä kokonaan perinteiset metsikkökuviot suunnittelun perusyksikkönä, jolloin toimenpiteiden rajat voidaan optimoida ilman kuviorajojen tuomia rajoituksia (Luku 6.2).

6.1 Spatiaalinen suunnittelu

Spatiaalisen suunnittelun lähtökohta on, että päätösyksiköiden (tässä luvussa metsikkökuvion) käsittelyyn vaikuttavat myös naapurikuvioiden ominaisuudet ja käsittelyt. Spatiaalinen metsäsuunnittelu on ilmiönä varsin monimutkainen, minkä vuoksi tässä yhteydessä käsitellään spatiaalisen suunnittelun periaatteita yleisellä tasolla.

Spatiaalista suunnittelua on helpointa havainnollistaa muutamalla esimerkillä. Tavanomaisin käytännön metsätalouden spatiaalinen suunnitteluongelma on leimikkokeskitysten muodostaminen. Tällä tarkoitetaan sitä, että metsikkökuvioista pyritään muodostamaan useamman kuvion samaan aikaan käsiteltäviä kokonaisuuksia.

Leimikkokeskityksillä tavoiteltava keskeisin hyöty on metsäkoneiden siirtokustannusten ja puutavaran kaukokuljetuskustannusten pieneneminen, minkä pitäisi johtaa metsänomistajan näkökulmasta parempaan puusta saatavaan kantohintaan ja ylipäättään leimikon kiinnostavuuteen puukauppoja tehtäessä.

Toinen spatiaalinen metsäsuunnitteluongelma on luonnon monimuotoisuuden kannalta oleellinen peitteisten ja vanhojen metsäalueiden välinen kytkeytyneisyys. Eri tutkimusten mukaan laajoilla yhtenäisillä vanhojen metsien alueilla esiintyy esimerkiksi enemmän vaateliasta lajistoa kuin alueilla, joilla vanhat metsät ovat voimakkaasti pirstoutuneet.

Spatiaalinen optimointi on mahdollista matemaattisen optimoinnin keinoin, mutta luvussa 4.2.1 kuvattu lineaarinen optimointi ei sovellu spatiaaliseen optimointiin kovin hyvin. Spatiaalisten suunnittelutehtävien haaste on siinä, että esimerkiksi leimikkokeskitystä muodostettaessa puun kantohintojen oletetaan muuttuvan leimikon koon kasvaessa. Toisin sanoen, kun leimikkoon kerätään enemmän kuvioita, kasvaa puusta saatava yksikköhinta. Tällöin suunnittelutehtävä muuttuu epälineaariseksi, eikä sitä voida ratkaista normaalin lineaarisen optimoinnin menetelmillä.

6.1.1 Spatiaalisen suunnittelun menetelmiä

Spatiaalista metsäsuunnittelua varten on kehitetty erilaisia menetelmiä. Näistä yleisimmät ovat heuristia optimointimenetelmiä. Heurististen optimointimenetelmien idea on, että kokeilemalla, intuitiolla ja ratkaisua vähin erin parantamalla haetaan mahdollisimman optimaalista ratkaisua suunnitteluongelmaan. Toisin kuin lineaarisessa optimoinnissa, heuristisissa optimointimenetelmissä ei välttämättä löydetä globaalia ratkaisua suunnitteluongelmaan, mutta todennäköisesti löydetään riittävän hyvä ratkaisu.

Esimerkkejä heuristisista optimointialgoritmeista ovat muun muassa Hero, Tabuhaku ja simuloitu mellotus. Yleensä heuristiset optimointimenetelmät toimivat niin, että optimointiongelmaan haetaan satunnainen alkuratkaisu, joka täyttää suunnittelutehtävän rajoitteet. Tämän jälkeen käydään läpi esimerkiksi kuvioittain vaihtoehtoisia ratkaisuja ja seurataan, miten ne vaikuttavat tavoitefunktion arvoon. Tavoitefunktion arvoa parantavat siirrot hyväksytään ja heikentävät hylätään. Optimointialgoritmin juuttumista globaaliin optimiin pyritään estämään hakemalla useita satunnaisia alkuratkaisuja. Iterointikierroksia jatketaan ennalta määritelty määrä, minkä jälkeen lopputulos hyväksytään lopulliseksi.

Toinen vartenotettava vaihtoehto käytännönläheiseen spatiaaliseen metsäsuunnitteluun on niin sanottu hierarkinen suunnittelu. Siinä muodostetaan

ensin pienemmille metsätilan osille vaihtoehtoisia suunnitelmia, joiden yhdistelmänä optimoidaan metsäomaisuustasolle optimaalinen suunnitelma. Suora- viivaisesti toteutettu hierarkisen suunnittelun prosessi voi edetä esimerkiksi seuraavasti:

- 1) Jaetaan metsätila esimerkiksi 5–10 kuvion osakokonaisuuksiin. Osakokonaisuuksien tulee olla luontaisia käsittelyalueita. Esimerkiksi tietyn metsäautotien vaikutusalue tai yksittäinen palsta muodostaa yhden osakokonaisuuden.
- 2) Laaditaan osakokonaisuuksille vaihtoehtoisia suunnitelmia. Tämä vaihe voidaan hoitaa yksinkertaisimmillaan siten, että simuloidaan eli sallitaan tietyn osakokonaisuuden kuvioille hakkuutoimenpiteitä vain tiettyinä vuosina. Tällöin osakokonaisuuden kaikki kuviot käsitellään samalla kerralla.
- 3) Muodostetaan osakokonaisuuksista tilatason suunnitelma optimoimalla. Tässä vaiheessa valitaan siis, mikä osakokonaisuus käsitellään minäkin vuonna.

Yhteenvedona voidaan todeta, että spatiaalisen metsäsuunnittelun menetelmistä on vielä runsaasti kehitettävää, jotta niitä voitaisiin tehokkaasti käyttää pinta-alaltaan varsin pienikokoisten yksityismetsien suunnittelussa. Sen sijaan suur- maanomistajien metsien suunnittelussa tällä lähestymistavalla on saatu varsin lupaavia tuloksia.

6.2 Dynaamisten käsittelykuvioiden muodostaminen

Metsikkökuviot ovat puustoltaan ja maaperältään yhtenäisiä alueita, jotka on perinteisesti muodostettu metsäsuunnittelijan toimesta, usein kaukokartoitus- aineistojen avulla. Metsätaloudessa metsikkökuvioita käytetään tavallisesti myös käsittelykuvioina. Metsikkökuviot ovat luonteeltaan staattisia eli niitä muokataan yleensä vain toimenpiteiden jälkeen tai metsäsuunnitelman päivityksen yhteydessä. Metsikkökuviot pyritään usein muodostamaan siten, että ne eivät ole pinta-alaltaan liian suuria tai liian pieniä. Tämän vuoksi puuston ominai- suuksien vaihtelu yksittäisten metsikkökuvioiden sisällä voi olla hyvinkin suurta.

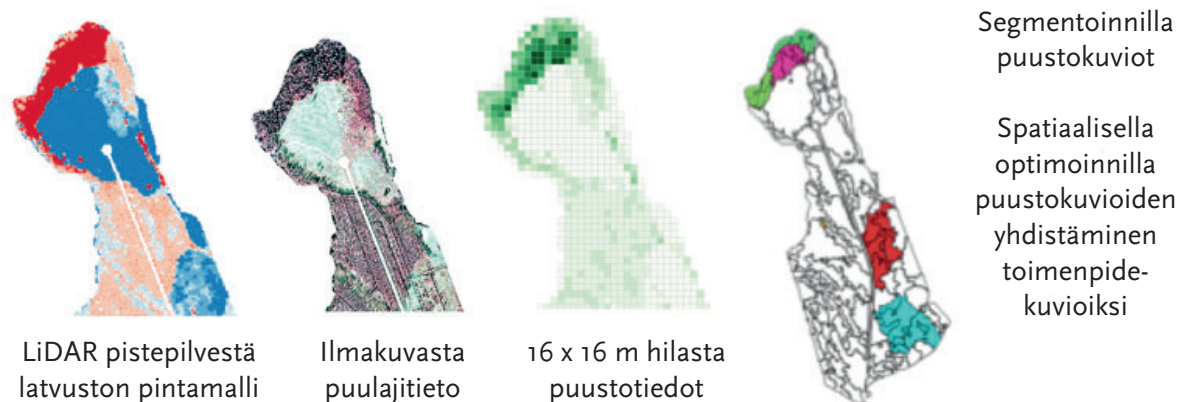
Erilaiset kaukokartoitusaineistot tarjoavat huomattavasti yksityiskohtaisemman ja tarkemman kuvauksen metsien rakenteesta sekä sisäisestä vaihtelusta. Suomen metsäkeskuksen tuottama, laserkeilaukseen perustuva hila-aineisto kuvaa metsän 16 x 16 metrin soluina, mikä mahdollistaa perinteisiä metsikkökuvioita huomattavasti yksityiskohtaisemman metsän kuvauksen. Drooneilla voidaan kerätä vielä tätäkin yksityiskohtaisempaa mittausdataa, aina yksittäisten puiden tarkkuudella. Kun yksityiskohtaisempaa tietoa sovelletaan perinteisessä, metsikkökuvioihin perustuvassa metsäsuunnittelussa, joudutaan tarkempi tieto keskiarvoistamaan metsikkökuvioille ja hienojakoisemman tiedon tuomat hyödyt menevät hukkaan.

Dynaamisella käsittelykuvioden muodostamisella tarkoitetaan prosessia, jossa metsän käsittelykuviot muodostetaan automaattisesti tai puoliautomaattisesti yksityiskohtaisen tiedon avulla. Dynaamisessa käsittelykuvioden muodostamisessa huomioidaan puuston ominaisuudet tarkan kaukokartoitusaineiston perusteella, mutta lisäksi voidaan huomioida muita tavoitteita ja rajoitteita, kuten esimerkiksi maaperän ominaisuudet, käsittelykuvion minimi- ja maksimikoko, kriteerit harvennus- ja päätehakkuukypsyysyden määrittämiseen, suojelualueet ja arvokkaat elinympäristöt sekä toimenpiteen kannattavuuteen vaikuttavat tekijät, kuten puun hinnat sekä hakkuu- ja lähikuljetuskustannukset.

Menetelmät dynaamisten käsittelykuvioden muodostamiseen perustuvat erilaisiin segmentointi- ja klusterointialgoritmeihin, spatiaalisiin optimointimalleihin tai koneoppimis-/tekoälymalleihin sekä näiden yhdistelmiin. Menetelmien joukko on kirjava, mutta yleisesti ne perustuvat puustoltaan ja maaperältään samankaltaisten, mutta kooltaan pienten mikrokuvioden (myös puustokuvioden) muodostamiseen, toimenpidekohteiden tunnistamiseen sekä samankaltaisten kohteiden yhdistämiseen automaattisesti.

”Kun yksityiskohtaisempaa tietoa sovelletaan perinteisessä, metsikkökuvioihin perustuvassa metsäsuunnittelussa, joudutaan tarkempi tieto keskiarvoistamaan metsikkökuvioille ja hienojakoisemman tiedon tuomat hyödyt menevät hukkaan.”

Haasteena automaattisessa käsittelykuvioden muodostamisessa on kuvioinnin subjektiivisuus; mitä tarkemmin metsä ja sen ominaisuuksien vaihtelu kuvataan, sitä hankalampaa on määritellä, millainen on hyvä kuviointi. Esimerkiksi, jos



Kuva 31. Yksinkertaistettu esimerkki dynaamisten toimenpidekuvioiden muodostamisesta laserkeilaukseen perustuvasta hila-aineistosta. Kuvassa esitettyjen aineistojen lisäksi kuvioiden muodostamisessa voidaan käyttää myös muita aineistoja ja karttatasoja, kuten maaperä- ja kasvupaikkakarttoja. Kuva: Simosol Oy.

puusto on erittäin vaihtelevaa sekä iältään että puulajisuhteiltaan, voi usein olla vaikeaa tai jopa mahdotonta määritellä yksiselitteisesti missä metsikkökuvioiden rajojen tulisi kulkea.

Lähes koko Suomen kattavat laserkeilatut hila-aineistot (Kuva 31) mahdollistavat dynaamisen käsittelykuvioiden muodostamisen. Kuvan yksinkertaistettu esimerkki havainnollistaa, mitä aineistoja kuvioinnissa käytetään ja miten prosessi etenee. Mikro- tai puustokuvioit muodostetaan hila-aineiston ja muiden karttatasojen avulla segmentoimalla. Varsinaiset toimenpidekuvioit muodostetaan simuloimalla puustokuvioille toimenpide-ehdotuksia ja valitsemalla sopivimmat ehdotukset spatiaalisen optimoinnin avulla. Spatiaalisessa optimoinnissa voidaan huomioida myös metsänomistajan tavoitteet, aivan kuten ”perinteisessä” metsäsuunnittelussa.

Drooneilla kerätty, yksityiskohtainen metsävaratieto mahdollistaa toimenpidekuvioiden muodostamisen puutason mittaustietojen perusteella (Kuva 32). Drooneilla kerätyn kuva-aineiston erotuskyky on erittäin tarkka, jolloin aineistosta pystytään tunnistamaan ja mittaamaan yksittäisiä puita fotogrammetrista mittausta hyödyntäen. Yksittäiset puut mahdollistavat dynaamisen toimenpidekuvioinnin samalla tavalla kuin hila-aineisto. Drooniaineiston etuna on se, että muodostettavien kuvioiden todellinen kokojakauma tunnetaan tarkasti ja sen avulla pystytään ennustamaan hakkuista saatava puutavaralajijakauma myös erittäin tarkasti. Menetelmän heikkoutena on se, että drooneilla aineiston keräämisen kustannukset ovat vielä kohtuullisen suuret.

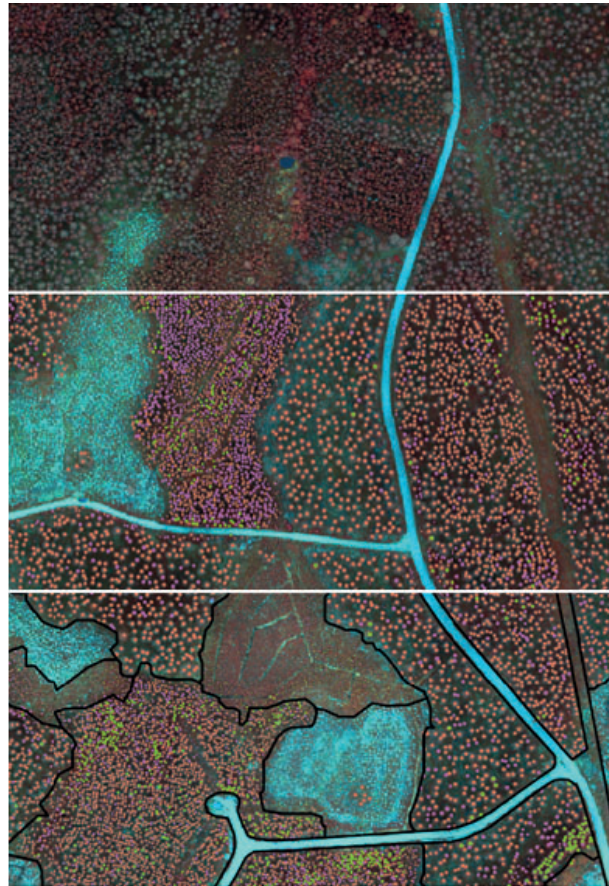
Aineistona drooneilla kerätyt *hyper-spektriset* valokuvat ja fotogrammetrisesti muodostettu latvuston pintamalli.



Yksittäisten puiden paikantaminen, puulajitulkinta ja pituuden ja latvuksen läpimitan mittausta pintamallista. Rinnankorkeusläpimitan ennustaminen pituuden ja latvuseläpimitan avulla.



Käsittelykuvien muodostaminen yhdistämällä yksittäisiä puita segmenteiksi ja edelleen käsittelykuvioiksi spatiaalisen optimoinnin avulla.



Kuva 32. Toimenpidekuvien muodostaminen yksittäisistä puista koostuvasta, drooneilla kerätystä aineistosta. Kuva: Simosol Oy.



Suunnittelulaskentojen epävarmuus ja virhelähteet

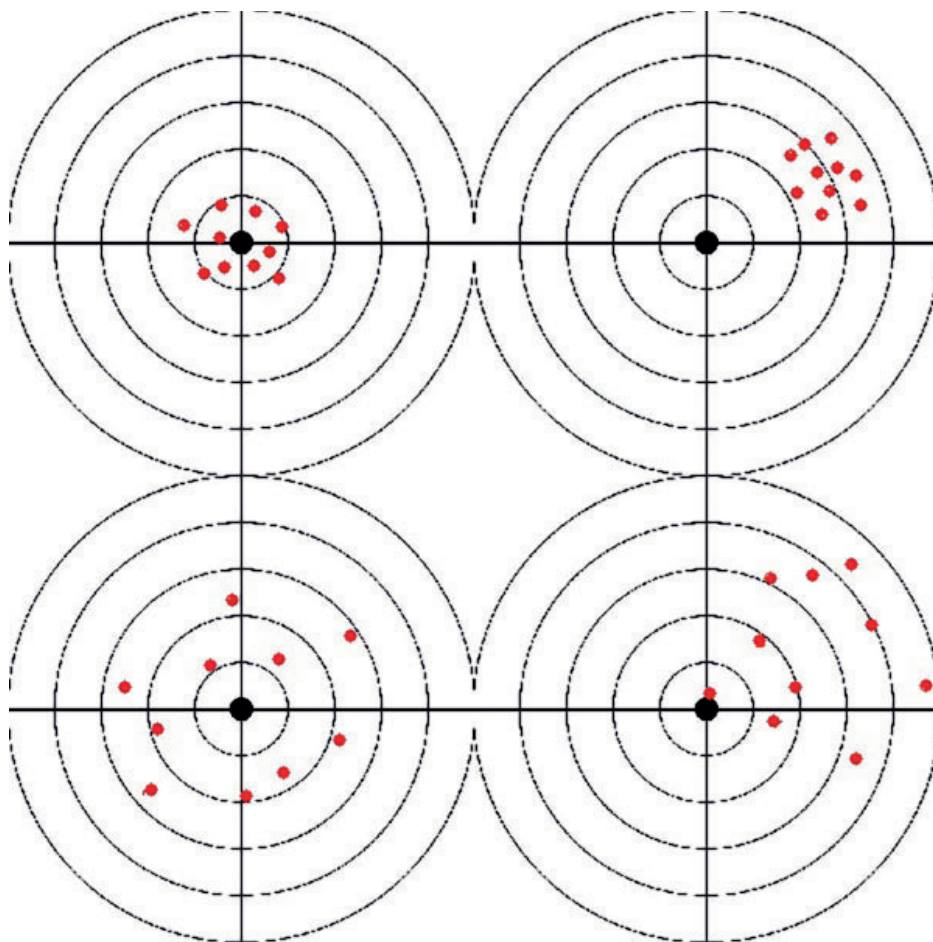
Metsäsuunnitteluun liittyy poikkeuksetta epävarmuutta, sillä virheitä saat-
taa syntyä työn monessa eri vaiheessa. Metsävaratietojen keruussa ta-
pahtuu inventointivirheitä, koska mittausmenetelmät eivät ole absoluut-
tisen tarkkoja, eivätkä mitatut koealat edusta inventointiyksikön ominaisuuksia
täydellisesti. Kasvun ennustamisessa tapahtuu mallivirheitä, koska valtakunnal-
lisesti laaditut kasvumallit eivät voi alueellisista kalibroinneista ja kasvupaikko-
jen erilaisten ominaisuuksien huomioimisesta huolimatta mitenkään tuottaa
absoluuttisen oikeita ennusteita metsikön tulevasta kehityksestä. Emme myös-
kään tiedä, miten eri puutavaralajien hintakehitys jatkuu tulevaisuudessa. Lisäksi
ilmastonmuutos aiheuttaa tulevaisuuden ennustamiseen valtavaa epävarmuut-
ta, koska emme tiedä, millaisessa ilmastossa nykyiset taimikot varttuvat ja kehiti-
tyvät tukkipuustoksi. Myös poliittinen päätöksenteko saattaa tuoda muutoksia
metsätalouden toimintaympäristöön, sillä etenkin turvemaiden puuston hyödyn-
tämiseen liittyy huomattava poliittinen riski jo lähitulevaisuudessa.

7.1 Metsävaratiedon laatu

Metsäsuunnittelulaskennoissa joudutaan aina tulemaan toimeen erilaisten virhe-
lähteiden ja niistä mahdollisesti seuraavien epäoptimaalisten päätösten kanssa.
Mitä pienempiin virheisiin ja optimaalisempiin päätöksiin pyritään, sitä enem-
män laskentoihin kerättävä tieto myös maksaa. Suunnittelutehtävä tai päätös-
ongelma vaikuttaa ratkaisevasti siihen, miten tarkkaa inventoitavan metsävara-
tiedon tulisi olla. Suomessa tutkimusprofessori Annika Kangas on tehnyt uraa-
uurtavaa tutkimustyötä metsävaratiedon arvoon liittyen. Kangas (2018) määrit-
telee asian seuraavasti: *”Tiedon käyttöarvo kuvaa rahallista lisähyötyä, jonka
pätöksentekijä paremman metsävaratiedon avulla saa – tai toisin päin paljonko*

metsänomistaja häviää rahaa sen takia, että metsävaratiedoissa on virheitä.” Laserkeilaustiedon arvosta metsätalouden päätöksenteossa suosittelemme lukemaan lisää myös Holopaisen ym. (2013) kirjoittamasta suomenkielisestä oppikirjasta.

Metsävaratiedon arvoon liittyy myös kysymys siitä, miten usein metsävaratietoa kannattaa päivittää, jotta parempi tieto johtaisi metsänomistajan taloudellisen tuloksen kannalta parempiin toimenpide-ehdotuksiin. Mäkinen ym. (2012) päätyivät antamaan varovaisen suosituksen siitä, että suomalaisessa metsätalouden toimintaympäristössä taloudellisesti optimaalinen inventointiväli on 10–15 vuotta, jotta inventointitiedon päivityksen kustannukset maksavat itsensä takaisin



Kuva 33. Havainnekuvat erilaisten mallien tuottamista estimaateista, eli mallien avulla ennustetuista tuloksista. Molemmissa vasemmanpuoleisissa kuvissa estimaatit osuvat todellisten arvojen ympärille ja tulokset ovat keskimäärin oikeita, joten kyseiset mallit ovat harhattomia. Molemmissa oikeanpuoleisissa kuvissa estimaatit ovat systemaattisesti väärässä suunnassa, eli malleissa on harhaa. Ylärivin mallit ovat tarkempia kuin alarivin mallit, koska estimaattien vaihteluväli on ylärivissä pienempi. Vasemman yläkulman malli on siis tarkka ja harhaton, oikea yläkulma tarkka ja harhainen, vasen alakulma epätarkka ja harhaton, oikea alakulma epätarkka ja harhainen.

parempina päätöksinä. Tutkimuksissa on myös osoitettu, että merkittävin epä-optimaalisiin toimenpide-ehdotuksiin johtava virhelähde on kasvumallien epävarmuus (Holopainen ym. 2010), joten kasvumallien kehittämiseen on tärkeää panostaa.

”Suunnittelutehtävä tai päätösongelma vaikuttaa ratkaisevasti siihen, miten tarkkaa inventoitavan metsävaratiedon tulisi olla.”

Metsien inventointiin liittyvässä tieteellisessä tutkimuksessa tyypillisimmät tiedon luotettavuutta kuvaavat tilastolliset tunnuksset ovat keskineliövirhe (*eng. root-mean-square error*, RMSE) ja harha (*eng. bias*). Inventoinnissa menetelmän harhattoisuus tarkoittaa sitä, että mitatut metsikkötunnukset ovat keskimäärin oikeita – tosin yksittäisissä kohteissa tulokset saattavat olla joko yli- tai aliarvioita. Sen sijaan harhainen inventointimenetelmä tuottaisi systemaattisesti vääriä tuloksia (Kuva 33). Keskineliövirhettä käytetään eri inventointimenetelmien tarkkuuden vertailussa, eli mitä pienempi RMSE, sitä tarkempi malli tai menetelmä. Monesti metsien inventoinnissa on lisäksi tapana ilmoittaa suhteellinen keskineliövirhe (RMSE-%), joka kertoo sen, kuinka monen prosentin virheitä estimaateissa on keskimäärin. RMSE:n ja harhan laskentakaavat löytyvät Kaavat-liitteestä.

7.2 Ilmastonmuutos

Ilmastonmuutos tulee väistämättä muuttamaan metsätalouden toimintaympäristöä tulevina vuosikymmeninä. Lämpösumma nousee koko Suomessa nopeutuen puuston kasvua, minkä ansiosta metsätaloudessa voidaan todennäköisesti lyhentää kiertoaikoja sekä lisätä hakkuukertymää. Muutokset tulevat olemaan suurimmat Pohjois-Suomessa, jossa metsätalouden harjoittamisen mahdollisuuksien oletetaan parantuvan. Puulajien osalta todennäköisiä hyötyjiä ovat mänty ja koivu sekä eteläiset lehtipuut, joista esimerkiksi tammen odotetaan menestyvän jatkossa nykyistä pohjoisempana. Tutkijat ovat varsin yksimielisiä siitä, että muuttuvassa ilmastossa kärsijän rooli jää kuuselle, joka matalajuurisenä puulajina kestää huonosti myrskyjä ja kuivuutta (esim. Kellomäki ym. 2018).

Ilmastonmuutoksen myötä hyönteistuhojen riskin oletetaan kasvavan, kun tuholaisien ja vieraslajien levinneisyys siirtyy kohti pohjoista. Nykyisistä merkittävistä

metsätalouteen kohdistuvista riskeistä sekä kirjanpainajatuhoriskin (Neuvonen & Viiri 2017) että juurikääpäriskin (Müller ym. 2012) oletetaan kasvavan eteläisessä ja keskisessä Suomessa. Metsäsuunnittelijan on hyvä tiedostaa ilmastomuutoksen vaikutukset ja riskit erityisesti kuusen kasvatukselle: kuusen viljelyä on jo nyt syytä välttää hyvin vettä läpäisevillä, kuivumiselle herkillä kasvupaikoilla, sillä etenkin kevään ja kesän kuivuusjaksojen oletetaan lisääntyvän (Ruosteenoja ym. 2018). Lisäksi lehtipuustoa ja sekapuustoisuutta kannattaa suosia, koska monimuotoisen metsän oletetaan kestävän yhden puulajin metsiköitä paremmin muuttuvassa ilmastossa.

”Ilmastomuutoksen mukanaan tuomat muutokset sääilmiöissä pitää huomioda kaikessa pitkän aikavälin päätöksenteossa.”

(Pilli-Sihvola 2020)

Voidaanko ilmastomuutoksen tuomat riskit ja muutokset huomioda metsäsuunnittelussa? Osittain nämä riskit voidaan huomioda, sillä esimerkiksi tuulituhoriskia on onnistuttu kohtuullisin tuloksin mallintamaan spatiaalisesti (esim. Saarinen ym. 2016). Tuulituhojen osalta metsäsuunnittelija voisi ehdottaa kevyempiä harvennushakkuita niille kohteille, joilla tuulituhoriski on korkea. Vastaa- vasti kuivumiselle alttiit alueet voitaisiin kartoittaa paikkatietoanalyysillä, mikä ohjaisi metsänomistajia välttämään kuusen viljelyä tällaisille kohteille. Erilaiset kosteusindeksit tulevat olemaan hyödyllinen paikkatietoaineisto monissa metsätalouteen liittyvissä analyyseissa, kuten korjuuvaurioille herkkien kohteiden ennustamisessa (esim. Niemi ym. 2017).

7.3 Muut epävarmuustekijät

Kattava kansainvälinen kirjallisuuskatsaus metsäsuunnitteluun ja päätöksentekoon liittyvistä riskeistä ja epävarmuustekijöistä erottelee kaikki tunnetut epävarmuustekijät sekä kuvio-, maisema- että aluetasolla (Pasalodos-Tato ym. 2013). Nostamme tässä luvussa esiin vielä muutaman keskeisen suomalaisen metsätalouteen vaikuttavan epävarmuustekijän.

Ensinnäkin puun hintakehitystä on hankala ennustaa, sillä markkinatilanteet vaihtelevat hyvinkin nopeasti. Kantohinnoista on hyvä käyttää useamman vuoden

keskiarvoja, jotta osutaan lähemmäs oikeaa pidemmän aikavälin hintatasoa. Inflaation vaikutusta voidaan hallita myös korjaamalla kantohintatilastoa elinkustannusindeksillä muuttaen sen tietyn hetken rahan arvoon. Koska puutavarasta maksettava kantohinta vaikuttaa esimerkiksi metsien arvonmäärittelyyn ja toimenpiteiden optimaaliseen ajoitukseen, virheelliset arviot tulevista kantohinnoista saattavat johtaa päätöksentekijän kannalta epäoptimaalisiin päätöksiin. Puun hintakehityksen tuomaa epävarmuutta voidaan hallita optimoimalla metsien käyttöä erilaisilla hintaskenaarioilla ja tarkastelemalla tämän skenaarioanalyysin tuottamia tuloksia.

Metsien kasvussa esiintyy sekä paikallista että vuotuista vaihtelua, joita voidaan pyrkiä tarkentamaan kalibroimalla kasvumalleja paikallisella aineistolla sekä avoimesti saatavalla säädatalla, mutta jonkinasteinen epävarmuus joudutaan aina hyväksymään. Myös suunnitteluyksikön (tavallisesti kuvio) sisällä saattaa esiintyä merkittävää kasvuolosuhteiden vaihtelua, minkä huomioiminen edellyttäisi dynaamisten käsittelykuvioiden muodostamista kuten luvussa 6.2 esitettiin.

Metsätuhot ovat luultavasti suurin metsien käyttöä koskeva riski, sillä niiden mittakaava ja vaikutus voivat olla erittäin merkittäviä, kuten hyönteistuhot Pohjois-Amerikan länsiosissa (esim. Meddens ym. 2012) ja Keski-Euroopassa (esim. Hlásny & Turčáni 2013). Koska metsätuhoihin vaikuttavat monet eri tekijät yhdessä, niiden esiintymistä on vaikea ennustaa. Suomessa merkittävimpiä taloudellisia riskitekijöitä ovat tuuli-, lumi- ja hyönteistuhot sekä metsäpalot, joiden ennustamista paikkatietoanalyysin keinoin sivuttiin ja luvussa 7.2. Vaikka nämä tuhot ovat monesti melko paikallisia, niiden merkitys saattaa silti olla yksittäisten metsätilojen kohdalla katastrofaalinen.

Isossa kuvassa metsänomistajan vaikutusmahdollisuudet luonnonilmiöiden edessä ovat rajalliset, ja yksittäinen luonnonilmiö saattaa muuttaa pitkäjänteisiä suunnitelmia hyvinkin nopeasti. Yhteenvetona metsänomistaja voi pyrkiä hillitsemään metsätuhojen aiheuttamia riskejä tekemällä ja ajoittamalla hakkuut sekä metsänhoitotyöt suositusten mukaan, valitsemalla kasvupaikalle sopivat puulajit, suosimalla sekametsiä ja huolehtimalla puuston elinvoimaisuudesta sekä pitämällä metsävakuutuksen voimassa.

Lähteet

- Airaksinen, M. 2008. Summa-arvomenetelmä metsän markkina-arvon määrittämisessä. Maanmittauslaitoksen julkaisuja nro. 108. <http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789512292677/>
- Faustmann, M. 1849. Berechnung des Wertes welchen Waldboden sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung 15: 441–455.
- Hautanen, J. & Ojanen, P. 2014. Eri kaasujen ja metsänhoitotöiden merkitys metsien kasvihuonekaasutaseessa: esimerkkinä Etelä- ja Keski-Pohjanmaa. Metsätieteen aikakauskirja 1/2014: 3–12.
- Hirvelä, H., Härkönen, K., Lempinen, R. & Salminen, O. 2017. MELA2016 Reference Manual. Natural resources and bioeconomy studies 7/2017. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-358-1>
- Hlásny, T. & Turčáni, M. 2013. Persisting bark beetle outbreak indicates the unsustainability of secondary Norway spruce forests: case study from Central Europe. Annals of Forest Science 70: 481–491. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0299-7>
- Hokajärvi R. 2012. Metsäsuunnitteluprosessin kehittäminen - yksityismetsien suunnittelutoiminta ja sen historiallinen kehitys muutoksen suuntaajana. Dissertationes Forestales. <https://doi.org/10.14214/df.145>
- Holopainen, M., Hyypä, J. & Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 5: 1–75.
- Holopainen, M., Mäkinen, A., Rasinmäki, J., Hyytiäinen, K., Bayazidi, S., & Pietilä, I. 2010. Comparison of various sources of uncertainty in stand-level net present value estimates. Forest Policy and Economics, 12, 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2010.02.009>
- Hurmekoski, E. 2020. Miten suunnata metsäsektorin ilmastotoimia? Tutkijan ääni, Helsingin yliopisto. <https://www.helsinki.fi/fi/uutiset/kestava-kehitys/miten-suunnata-metsasektorin-ilmastotoimia>
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA system. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 835.
- Juutinen, A. 2015. Metsien monet hyödyt ja taloudellinen arvottaminen. Metsätieteen aikakauskirja 2/2015: 113–118.
- Kangas, A. 2018. Laserkeilausaineiston ja fotogrammetrisen 3D aineiston arvo metsätalouden päätöksenteossa. Metsätieteen aikakauskirja. Artikkelid id 9952. <https://doi.org/10.14214/ma.9952>
- Kangas, A., Kurttila, M., Hujala, T., Eyvindson, K. & Kangas, J. 2015. Decision Support for Forest Management, Second Edition. Managing Forest Ecosystems 30. Springer International Publishing Switzerland.
- Kansallinen metsästrategia 2025. 2015. Maa- ja metsätalousministeriö.
- Kellomäki, S., Strandman, H., Heinonen, T., Asikainen, A., Venäläinen, A. & Peltola, H. 2018. Temporal and spatial change in diameter growth of 2 boreal Scots pine, Norway spruce and birch under 3 recent-generation (CMIP5) global climate model 4 projections for the 21st century. Forests 9(3), 118. <http://dx.doi.org/10.3390/f9030118>

- Kilkki, P. 1968. Income-oriented cutting budget. *Acta Forestalia Fennica* 91: 1–54. <https://doi.org/10.14214/aff.7600>
- Koljonen, T., Soimakallio, S., Asikainen, A., Lanki, T., Anttila, P., Hildén, M., Honkatukia, J., Karvosenoja, N., Lehtilä, A., Lehtonen, H., Lindroos, T.J., Regina, K., Salminen, O., Savolahti, M., Siljander, R. & Tiittanen, P. 2017. Energia- ja ilmastostrategian vaikutusarviot: Yhteenvedoraportti. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 21/2017. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-355-2>
- Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Ahola, A., Heikkinen, J., Henttonen, H.M., Hotanen, J.-P., Nevalainen, S., Pitkänen, J., Strandström, M. & Viiri, H. 2017. Suomen metsät 2009–2013 ja niiden kehitys 1921–2013. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 59/2017. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-467-0>
- Kurttila, M., Pykäläinen, J. & Hujala, T. 2013. Optimoinnin käyttö yksityismetsien tilatason metsäsuunnittelussa. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2013: 61–70.
- Kuuluvainen, J. & Valsta, L. 2009. Metsäekonomian perusteet. s. 83–89.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Communications Instituti Forestalis Fenniae* 108. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-0589-9>
- Lappi, J. 1992. JLP: A Linear Programming Package for Management Planning. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 414.
- Lappi, J. 1997. Metsien kasvu ja kestävät hakkuut. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/1997: 138–145.
- Lappi, J. 2016. Suurin kestävä hakkuutaso. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2016: 33–41.
- Lehtonen, A., Salminen, O., Kallio, M., Tuomainen, T. & Sievänen, R. 2016. Skenaariolaskelmiin perustuva puuston ja metsien kasvuhuonekaasutaseen kehitys vuoteen 2045. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 36/2016. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-264-5>
- Liski, J. & Westman, C.J. (1997). Carbon storage in forest soil of Finland. *Biogeochemistry* 36: 261–274.
- Liski, J. 2000. Millainen kiertoaika eduksi metsien hiilitaloudelle? *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2000: 639–642.
- Liski, J., Lehtonen, A., Palosuo, T., Peltoniemi, T., Eggers, T., Muukkonen, P., & Mäkipää, R., 2006. Carbon accumulation in Finland's forests 1922–2004 – an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil. *Annals of Forest Science* 63: 687–697. <https://doi.org/10.1051/forest:2006049>
- Luke 2019. MELA-ohjelmisto ja metsälaskelmat. <http://www.luke.fi/mela-metsalaskelmat/>
- Maanmittauslaitos. 2019. Laserkeilausaineistoja ja ilmakuvia päivitetään jatkossa tiheämmin. Uutiset ja blogit, 25.9.2019. <https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankohtaista/laserkeilausaineistoja-ja-ilmakuvia-paivitetaan-jatkossa-tiheammin>.
- Maltamo, M., Haara, A., Hirvelä, H., Kangas, A., Lempinen, R., Malinen, J., Nalli, A., Nuutinen, T. & Siipilehto, J. 2002. Lämpimittajakaumamalleihin perustuvat vaihtoehdot kuvauspuiden muodostamiseen puuston keskitunnustietojen avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 407–423.
- Meddens, A.J.H., Hicke, J.A. & Ferguson, C.A. 2012. Spatiotemporal patterns of observed bark beetle-caused tree mortality in British Columbia and the western United States. *Ecological Applications* 22(7): 1876–1891. <https://doi.org/10.1890/11-1785.1>
- Müller, M.M., Piri, T. & Hantula, J. 2012. Ilmaston lämpeneminen haastaa nykyistä tehokkaampaan juurikäävän torjuntaan. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2012: 312–315.

- Mäki, O. 2013. Summa-arvomenetelmän aputaulukot. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio.
- Mäkinen, A. 2010. Uncertainty in forest simulators and forest planning systems. *Dissertationes Forestales* 97. <https://doi.org/10.14214/df.97>
- Mäkinen, A., Kangas, A. & Nurmi, M. 2012. Using Cost-Plus-Loss Analysis to Define Optimal Forest Inventory Interval and Forest Inventory Accuracy. *Silva Fennica* 46(2): 211–226. <https://doi.org/10.14214/sf.55>
- Neuvonen, S. & Viiri, H. 2017. Changing Climate and Outbreaks of Forest Pest Insects in a Cold Northern Country, Finland. Chapter 5 (s. 49-59) Teoksessa: Latola, K. & Savela, H. (Eds.): *The Interconnected Arctic — UArctic Congress 2016*; Springer Polar Sciences.
- Niemi, M. & Lumperoinen, M. 2018. Hakkuusuunnitteiden laskenta hoitoluokittain Jyväskylän kaupungille [30.6.2020]. https://www.jyvaskyla.fi/sites/default/files/atoms/files/metsaohjelma_liite_laskelmat.pdf
- Niemi, M.T., Vastaranta, M., Vauhkonen, J., Melkas, T., & Holopainen, M. 2017. Airborne LiDAR-derived elevation data in terrain trafficability mapping. *Scandinavian Journal of Forest Research* 32 (8): 762–773. <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1296181>
- Nyysönen, A. 1999. Kiertoaikamalli Suomen metsätaloudessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/1999: 540–543.
- Pasalodos-Tato, M., Mäkinen, A., Garzia-Gonzalo, J., Borges, J.G., Lämås, T. & Eriksson, L.O. 2013. Review. Assessing uncertainty and risk in forest planning and decision support systems: review of classical methods and introduction of innovative approaches. *Forest Systems* 22(2): 282–303. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2013222-03063>
- Peuhkurinen, J., Maltamo, M. & Malinen, J. (2008). Estimating species-specific diameter distributions and saw log recoveries of boreal forests from airborne laser scanning data and aerial photographs: a distribution-based approach. *Silva Fennica* 42 (4). <https://doi.org/10.14214/sf.237>
- Pietilä, I., Kangas, A., Mäkinen, A. & Mehtätalo, L. 2010. Influence of growth prediction errors on the expected losses from forest decisions. *Silva Fennica* 44(5): 829–843. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ELE-1514613>
- Pilli-Sihvola, K. 2020. Building a Bridge between Inundated Shores: Analyses on Integrated Disaster Risk Management and Climate Change Adaptation Policies and Measures. *Finnish Meteorological Institute Contributions* 168. <https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361140>
- Pohjanmies, T. 2018. Trade-offs among intensive forestry, ecosystem services and biodiversity in boreal forests. *Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science* 342. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-7342-1>
- Pukkala, T. 2007. Metsäsuunnittelun menetelmät. Gummerus Kirjapaino Oy. 208 s.
- Rasinmäki, J., Mäkinen, A. & Kalliovirta, J. 2009. Puukohtainen inventointitieto metsätalouden suunnittelun päätöstukijärjestelmässä. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009: 382–385
- Repola, J., Ojansuu, R. & Kukkola, M. 2007. Biomass functions for Scots pine, Norway spruce and birch in Finland. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 53. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2046-9>
- Ruosteenoja, K., Markkanen, T., Venäläinen, A., Räisänen, P. & Peltola, H. 2018. Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century. *Climate Dynamics*, 50, 1177–1192
- Saarinen, N., Vastaranta, M., Honkavaara, E., Wulder, M.A., White, J.C., Litkey, P., Holopainen, M. & Hyypä, J. 2016. Using Multi-Source Data to Map and Model

- the Predisposition of Forests to Wind Disturbance. *Scandinavian Journal of Forest Research* 31(1): 66–79. <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1056751>
- Saaristo, L., Seppälä, M., Vesanto, T. & Ruutiainen, J. 2017. Talousmetsien luonnonhoidon tehokkaat ratkaisut. Tapion julkaisuja.
- Salminen, O. 1999. Kiertoaikamallin rooli MELA-ohjelmistossa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/1999: 561–564.
- Tuomainen, T. 2018. Metsien hiilitase. Julkaisussa: Rantala, S. (toim.). Tapion taskukirja. Tapio Oy. Helsinki. s. 14–19.
- Tuomi, M., Rasinmäki, J., Repo, A., Vanhala, P. & Liski, J. 2011 Soil carbon model Yasso07 graphical user interface. *Environmental Modelling & Software* 26(11): 1358–1362. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.05.009>
- Valtioneuvoston metsäpoliittinen selonteko 2050. 2014. Maa- ja metsätalousministeriö.
- Veltheim, T. 1987. Pituusmallit männylle, kuuselle ja koivulle. *Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma*. Helsingin yliopisto.
- Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) 2019. Metsänhoidon suositukset. Tapion julkaisuja.
- Ärölä, E. 2015. Yhteismetsän ja yhteismetsäosuuden arvo. Maanmittauslaitoksen julkaisuja nro 115.

Liite 1: Kaavat

Koronkorko $K_n = Kq^n$

Korkotekijä $q = 1 + \frac{p}{100}$

K = alkupääoma (esim. 10 000 €)

p = korkoprosentti korkokaudelta (esim. 3 % vuosikorko)

n = korkokausien määrä (esim. 20 vuotta)

K_n = kasvanut pääoma korkokausien n jälkeen

Diskonttaus $V_o = \frac{V_t}{(1+r)^t}$

Korkokanta $r = \frac{p}{100}$

V_o = kertaluonteisen tulon tai menon nykyarvo

V_t = kertaluonteisen tulon tai menon arvo t :n vuoden kuluttua
(esim. 40 vuoden päästä saatava hakkuutulo)

Nettonykyarvo $NPV = V_0 = \sum_{t=0}^T \frac{V_t}{(1+r)^t}$

Sisäinen korko saadaan etsimällä se korkokanta r , jolla nettonykyarvo $NPV = 0$

Faustmannin kiertoaikamalli

Faustmannin (1849) kiertoaikamallissa oletetaan, että metsää kasvatetaan vakiokiertoajalla u yli puusukupolvien siten, että päätehakkuun jälkeen paljas maa uudistetaan välittömästi. Vastaavasti seuraavan puusukupolven tulot ja meno diskontataan u vuotta kauempaa tulevaisuudesta, ja niin edelleen...

Faustmannin kaavalla saadaan laskettua tasaikäisrakenteisen metsänkasvatuksen optimikiertoaika maksimoimalla äärettömien kiertoaikojen tuottamaa nettotulojen nykyarvoa z . Muuttuvana tekijänä yhtälössä on kiertoajan pituus u :

$$\text{Metsikön optimikiertoaika } \mathbf{max}(z) = \frac{\sum_{t=0}^u N_t(1+r)^{u-t}}{(1+r)^u - 1}$$

u = kiertoajan pituus

N = hakkuutulot ja metsänhoidon kustannukset

t = ajankohdat, jolloin tulot ja kustannukset syntyvät

z = nettotulojen nykyarvo, jonka maksimiarvo saavutetaan silloin kun kiertoaika on optimaalinen

Kaavan osoittajassa kaikki kiertoajan kassavirrat N_t prolongoidaan uudistamishetkeen u korkokannalla r , minkä jälkeen näistä eristä lasketaan summa.

Kaavan jakajana on diskonttaustekijä, jonka avulla osoittajassa lasketut nettotulot diskontataan nykyhetkeen. Jakajassa olevaa tekijää (-1) kutsutaan päättymättömän sarjan tekijäksi, jonka avulla myös tulevien kiertoaikojen nettotulot saadaan laskettua nykyhetkeen.

$$\begin{aligned} \text{Keskineliövirhe } \mathbf{RMSE} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \\ \text{Harha } \mathbf{bias} &= \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \end{aligned}$$

n = havaintojen lukumäärä

y_i = havaittu arvo kohteessa i

$\hat{y}_i$ = estimoitu arvo y kohteessa i

Suhteellinen RMSE ($RMSE\%$) lasketaan jakamalla RMSE kaikkien havaittujen arvojen keskiarvolla.

Liite 2: Harjoitukset

Excel-harjoituksia

HARJOITUS 1A: KOROILLA ELÄVÄN KORKOTUOTOT

Saat perinnöksi metsätilan, jonka myyntiarvo on 150 000 €. Pohdiskelet vaihtoehtoa, että myisit tilan ja sijoittaisit rahat kiinteäkorkoiseen, turvalliseen sijoituskohteeseen 2 % korolla. Jokaisen korkokauden jälkeen korko nostetaan ja alkupääoma jätetään kasvamaan edelleen korkoa. Kuinka paljon sinulle kertyisi vuosittain korkotuottoja elämiseen?

Laske ja visualisoi Excelillä, paljonko korkotuotot ovat yhteensä 20 vuoden aikana?

HARJOITUS 1B: KORKOA KOROLLE (/prolongaus)

Laske ja visualisoi Excelillä, paljonko edellisessä tehtävässä kuvatulle pääomalle kertyy tuottoja 20 vuoden aikana, mikäli korkotuottoa ei nosteta korkokauden päätyttyä vaan se liitetään pääomaan kasvamaan korkoa?

HARJOITUS 1C: KORKOA KOROLLE (/prolongaus)

Investoit 1 000 euroa istuttaaksesi männyn taimet hehtaarin kokoiselle aukolle Kajaanissa, kasvupaikkana kuivahko kangas. Mikäli vaadit sijoittamallesi pääomalle 3 % tuottoa, miten paljon taimikon perustamiseen tähtäävä investointi ehtii kasvaa korkoa

- a) 40 vuoden päästä tehtävään ensiharvennukseen mennessä?
- b) 90 vuoden päästä tehtävään uudistushakkuuseen mennessä?

Uskotko saavuttavasi haluamasi tuottotavoitteen tällä tavalla?

Entäpä, jos olisit päättänyt laikutuksen ja istutuksen sijaan äestämään ja kylvämään taimikon. Taimikon perustamiskustannus olisi tällöin 600 euroa, mutta hitaamman uudistumisen takia myös vastaavat hakkuut siirtyisivät hieman myöhäisempään ajankohtaan. Paljonko investointisi kasvaa korkoa

- a) 45 vuoden päästä tehtävään ensiharvennukseen mennessä?
- b) 95 vuoden päästä tehtävään uudistushakkuuseen mennessä?

Monestikaan metsään tehtävät investoinnit eivät maksa itseään takaisin vielä ensiharvennukseen mennessä, mutta uudistushakkuuseen mennessä näin tulisi tapahtua, jotta metsätalouden harjoittaminen on taloudellisesti kannattavaa.

Kummalla edellä mainitulla uudistamistavalla uskoisit varmemmin saavasi investoimasi rahat korkoineen takaisin kainuulaisessa kuivahkon kankaan männikössä?

HARJOITUS 2A: NETTONYKYARVON LASKENTA

Eteläsuomalaisesta tasaikäisrakenteisena kasvatettavasta kuusikosta oletetaan syntyvän kiertoajan aikana seuraavat hakkuutulot ja metsänhoidon menot (Taulukko 4):

Taulukko 4. Oletetut yhden kiertoajan tulot ja menot eteläsuomalaisessa kuusikossa.

Vuosi	Toimenpide	Tulot	Menot
2020	Taimikon perustaminen (maanmuokkaus + istutus)		1 100 €/ha
2026	Taimikon varhaisperkaus		350 €/ha
2032	Taimikonharvennus		450 €/ha
2055	Ensiharvennus	900 €/ha	
2068	Harvennushakkuu	2 700 €/ha	
2080	Avohakkuu	13 400 €/ha	

Laske metsikön yhden kiertoajan aikana tuottama nettotulojen nykyarvo taimikon perustamishetkellä

- a) 3 % diskonttokorolla
- b) 5 % diskonttokorolla

HARJOITUS 2B: SISÄINEN KORKO

Sisäinen korko tarkoittaa korkokantaa, jolla diskontattujen kassavirtojen nykyarvojen summa on nolla. Laske/iteroi, mikä on sisäinen korko yllä kuvatun kuusikon kasvatuksessa?

HARJOITUS 3: METSIKÖN OPTIMIKIERTOAIKA

Verkkosivulta www.tapio.fi/metsasuunnittelun-laskenta on ladattavissa Excel-taulukko, johon on kuvattu Etelä-Suomessa kuivahkolla kankaalla kasvavan istutusmännikön kehitystä ja metsänhoidon kassavirtoja yhden kiertoajan aikana. Taulukkoon on haettu eri metsänhoitotöiden vuoden 2018 keskimääräiset yksikkökustannukset (<https://stat.luke.fi/metsanhoito-ja-metsanparannustyot>) sekä laskettu keskiarvo vuosien 2016–2019 Etelä-Suomen tilastointialueen kantohinnoista eri hakkuutavoilla (<https://stat.luke.fi/teollisuuspuun-kauppa>).

Voit päivittää yksikkökustannukset ja kantohinnat uudemmilla hintatiedoilla, jotka löytyvät edellä mainituista linkeistä. Tee hintapäivitykset taulukon vaaleanvihreällä värjättyihin soluihin. Motti-ohjelman avulla voit laatia vastaavia kasvatusohjelmia myös muille puulajeille, kasvupaikoille ja maantieteisiin, sekä päivittää uudet kertymätiedot taulukon vaaleankeltaisella värjättyihin soluihin. Kokeile erilaisten työlajiyhdistelmien vaikutusta maan arvoon säätämällä taulukon ”TOTEUTUS”-saraketta (kyllä = 1; ei = 0). Kylvön ja istutuksen yksikköhinnat sisältävät siementen ja taimien hinnat.

Optimikiertoaika on se kiertoaika, jolla maan arvo on suurin. Excelin solu C28 hakee automaattisesti suurimman mahdollisimman maan arvon soluista K28:T28. Mikäli suurin arvo löytyy esimerkiksi solusta O23, olisi metsikön optimikiertoaika tällöin 70 vuotta. Vertaamalla suurinta maan arvoa viereisiin sarakkeisiin on myös nähtävissä, miten paljon kiertoaika vaikuttaa maan arvoon.

- Kokeile ja raportoi, miten diskonttokorko vaikuttaa maan arvoon?
- Kokeile ja raportoi, miten diskonttokorko vaikuttaa optimikiertoaikaan?
- Millä korkokannalla maan arvo on o €?

Idea ja alkuperäinen versio: © Risto Viitala, HAMK/Exo, 2015 Päivitys: Mikko Niemi, Tapio, 2020							KIERTOAIKA											
TOTEUTUS	Kertymä	Hinta		meno/ tulo														
vuosi	kyllä=1	Tukki	Kuitu	Tukki	Kuitu	/ha		50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	
Kulu-/tulolaji																		
Uudistusalan raivaus	0	0				200 €	- €	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Äestys	0	0				250 €	- €	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Laikutus	0	1				350 €	- 350 €	-1534,37	-1778,75	-2062,06	-2390,49	-2771,24	-3212,62	-3724,31	-4317,5	-5005,16	-5802,36	
Mätästys	0	0				430 €	- €	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Kylvö	0	0				410 €	- €	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Istutus	0	1				790 €	- 790 €	-3463,29	-4014,9	-4654,37	-5395,69	-6255,08	-7251,35	-8406,3	-9745,21	-11297,4	-13096,7	
Varhaisperkaus	5	1				360 €	- 360 €	-1361,37	-1578,21	-1829,57	-2120,98	-2458,79	-2850,42	-3304,41	-3830,72	-4440,86	-5148,17	
Taimikonharvennus	15	1				460 €	- 460 €	-1294,38	-1500,54	-1739,53	-2016,6	-2337,79	-2710,14	-3141,79	-3642,2	-4222,31	-4894,81	
Ennakkoraivaus	30	1				270 €	- 270 €	-487,65	-565,32	-655,361	-759,743	-880,75	-1021,03	-1183,65	-1372,18	-1590,73	-1844,1	
Ensiharvennus	30	1	5,5	50	43,8 €	13,1 €	896 €	1618,095	1875,816	2174,584	2520,939	2922,46	3387,932	3927,541	4553,097	5278,287	6118,982	
2. harvennus	50	1	52,6	117	52,7 €	16,6 €	4 716 €	4715,88			7347,187	8517,404	9874,005	11446,68	13269,84	15383,38	17833,55	
Päätähakkuu (vain 1 harvennus)	55	1	79	125	59,9 €	18,1 €	6 991 €		6990,98									
Päätähakkuu (vain 1 harvennus)	60	1	104,6	135	59,9 €	18,1 €	8 716 €			8716,28								
Päätähakkuu	65	1	105,2	79,2	59,9 €	18,1 €	7 735 €				7735							
Päätähakkuu	70	1	132,2	80,2	59,9 €	18,1 €	9 370 €					9370,4						
Päätähakkuu	75	1	158	80	59,9 €	18,1 €	10 912 €						10912,2					
Päätähakkuu	80	1	185	81,6	59,9 €	18,1 €	12 558 €							12558,46				
Päätähakkuu	85	1	201,3	68,4	59,9 €	18,1 €	13 296 €								13295,91			
Päätähakkuu	90	1	214,8	65,3	59,9 €	18,1 €	14 048 €									14048,45		
Päätähakkuu	95	1	243,9	69,4	59,9 €	18,1 €	15 866 €										15865,75	
Faustmannin kaavan osoittaja (jaettava)																		
Faustmannin kaavan nimittäjä (jakaja)																		
max(z) nettotulujen nykyarvo																		
u =																		
KIERTOAIKA																		

Kuva 34. Excel-taulukko Faustmannin kiertoaikamallin laskentaan.

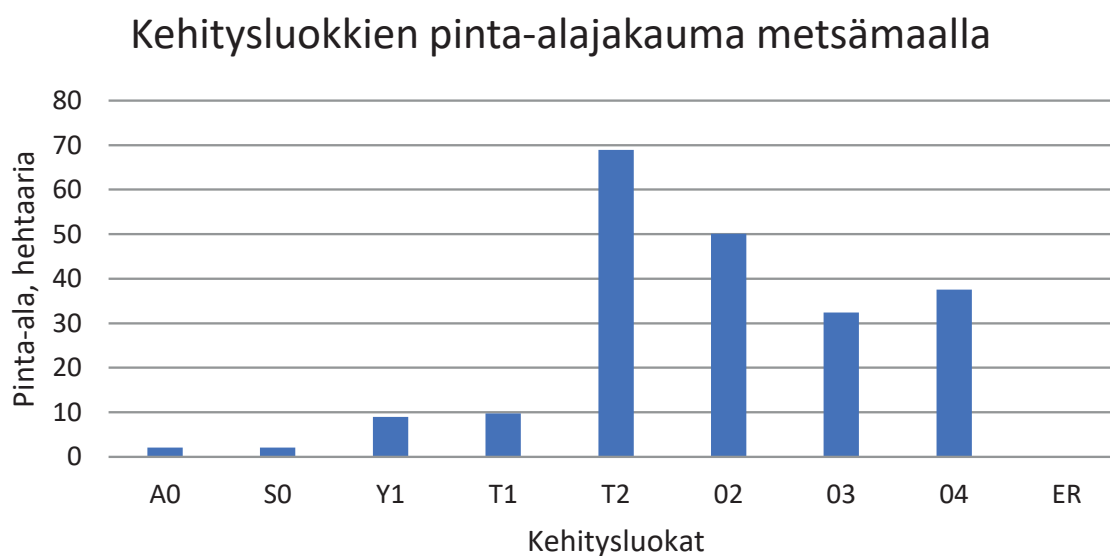
IPTIM-harjoituksia

Laskenta-aineistot:

IPTIM-harjoituksia varten on koottu kolme erillistä laskenta-aineistoa, jotka ovat ladattavissa verkkosivulta www.tapio.fi/metsasuunnittelun-laskenta. Kyseiset metsikkökuviot sijaitsevat Hämeenlinnassa, Hämeen ammattikorkeakoulun Evon opetusmetsissä. Alla lyhyet kuvaukset aineistoista:

A NUORET METSÄT VALLITSEVAT

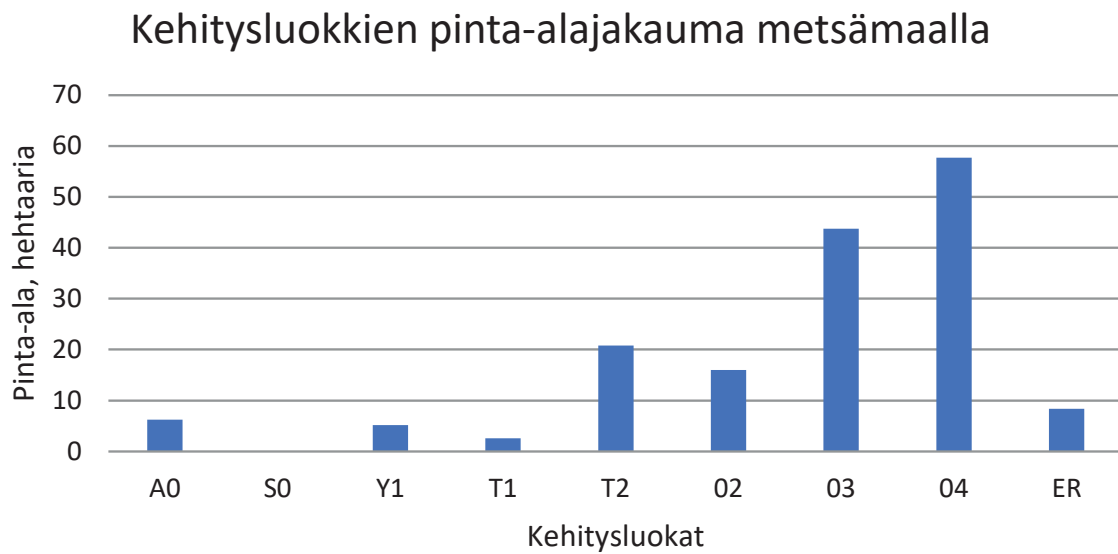
- Kiinteistöt: Kappelikivi (109-516-1-43), Lammin valtionmaa A (109-893-1-2), Leipäsuu (109-516-1-34)
- Pinta-ala yhteensä 215,1 ha, josta metsämaata 211,7 ha
- Käytönrajoitusalueetta metsämaalla 9,3 ha (4,4 % metsämaasta)
- Metsämaasta 68 % kangasmaata ja 32 % turvemaata
- Metsämaan kasvupaikoista valtaosa joko tuoretta kangasta (67 %) tai kuivahkoa kangasta (26 %)
- Puuston keskitilavuus metsämaalla 104 m³/ha
- Puuston keskikasvu metsämaalla 5,8 m³/ha/vuosi



Kuva 35. Kehitysluokkajakauma laskenta-aineistossa A.

B PUUSTOINEN KEHITYSLUOKKAJAKAUMA

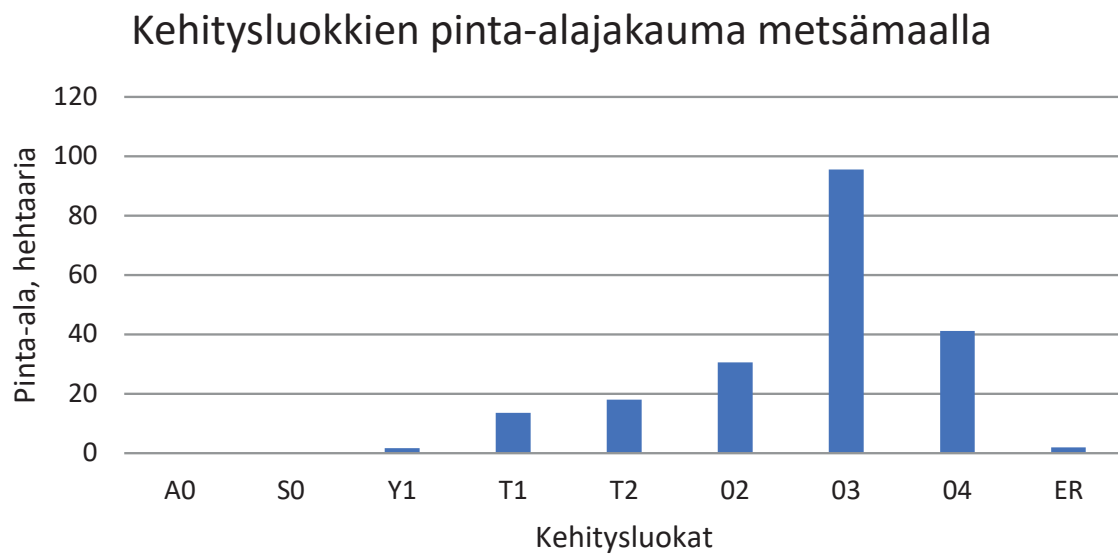
- Kiinteistöt: Lammin valtionmaa B (109-893-1-2)
- Pinta-ala yhteensä 167,2 ha, josta metsämaata 160,5 ha
- Käytönrajoitusaluetta metsämaalla 12,7 ha (7,9 % metsämaasta)
- Metsämaasta 84 % kangasmaata ja 16 % turvemaata
- Metsämaan kasvupaikat: lehtomainen kangas (15 %), tuore kangas (62 %), kuivahko kangas (21 %)
- Puuston keskitilavuus metsämaalla 194 m³/ha
- Puuston keskikasvu metsämaalla 5,5 m³/ha/vuosi



Kuva 36. Kehitysluokkajakauma laskenta-aineistossa B.

C TASAINEN KEHITYSLUOKKAJAKAUMA

- Kiinteistöt: Lammin valtionmaa C (109-893-1-2), Patakallio (109-540-1-21)
- Pinta-ala yhteensä 201,3 ha, josta metsämaata 199,8 ha
- Käytönrajoitusaluetta metsämaalla 4,0 ha (2,0 % metsämaasta)
- Metsämaasta 77 % kangasmaata ja 23 % turvemaata
- Metsämaan kasvupaikat: lehtomainen kangas (13 %), tuore kangas (43 %), kuivahko kangas (41 %)
- Puuston keskitilavuus metsämaalla 156 m³/ha
- Puuston keskikasvu metsämaalla 5,5 m³/ha/vuosi



Kuva 37. Kehitysluokkajakauma laskenta-aineistossa C.

HARJOITUS 4: DISKONTTOKORON VAIKUTUS TUOTTOARVOLASKELMAAN

Tee IPTIMissä tuottoarvolaskelma kiinteistölle Leipäsuu (109-516-1-34) käyttäen kahta eri diskonttokorkoa. Laskenta-ajot kannattaa tehdä määrittelemällä ja laskemalla tehtävä ensin yhdellä laskentakorolla (Kuva 38), minkä jälkeen voit kopioida valitun suunnitelman Suunnittelu-välilehdellä. Kopioidusta suunnitelmasta täytyy tuolloin muokata vain korkokanta. Kopioinnin suurin etu on se, että mikäli aineistoon tai laskentajakson pituuteen ei tehdä muutoksia, IPTIM ei enää simuloi vaihtoehtoisia toimenpideketjuja uudelleen, vaan suorittaa ainoastaan optimoinnin. Optimointivaihe vie huomattavasti simulointivaihetta vähemmän aikaa.

Laskentatehtävien valmistuttua vertaile hakkuiden ajoittumista IPTIMin Vertailu-välilehdellä kahdella eri diskonttokorolla. Miten korkokanta vaikuttaa hakkuukertymään eri ajanhetkillä? Mitä tämä tarkoittaa metsiköiden keskimääräisen kiertoajan kannalta? Kummalla suunnitelmalla keskimääräinen vuosittainen kassavirta (ilman diskonttausta) on suurempi ja miksi? (kts. Vertailu-välilehdellä Yleistiedot-kohta)

Suunnittelu

Evo_Leipäsuu_tuottoarvo_4 tallenna sulje

Aineistot ja tavoite | Yleiskustannukset | Rajoitteet

Projekti	Kasvumalli	Toimenpideohjelma	Puun hinnat
LEIPÄSUU (109-516-1-34)	MELA2002	Toimenpidehinnastot (2019)	Keskiarvot 2015-2019

Mihin Tavoite Laskentakorko %

Tee suunnitellut toimenpiteet ☐ Pilko kuviot ☐

Kuva 38. Esimerkki suunnittelulaskennan määrittelystä IPTIM-käyttöliittymässä. Kiinteistöt haetaan oikealla olevan +-painikkeen kautta. Tuottoarvolaskennassa 100 vuotta eteenpäin on sopiva simulointiaika. Valinta "Tee suunnitellut toimenpiteet" pakottaisi metsäsimulaattorin noudattamaan metsävaratiedossa olevia maastoehdotuksia ensimmäiset 10 vuotta. Kuvioiden pilkkominen kannattaa sallia silloin, kun laskentaan liittyy tiukkoja rajoitteita.

HARJOITUS 5: HAKKUUMÄÄRÄN RAJOITTAMINEN

Metsätaloudessa on kaksi varsin syvälle juurtunutta tapaa perustella metsänhoidon kestävyyttä:

- A Hakkuukertymä rajoitetaan enintään puuston nykyisen kasvun suuruiseksi
- B Puuston kokonaistilavuuden vaaditaan pysyvän vähintään nykyisellä tasolla

IPTIM-ohjelmistossa rajoitteet voidaan määritellä joko ”muuttuja vs. lukuarvo”- tai ”muuttuja vs. muuttuja”-tyyppisiksi. Harjoitellaan molempien edellä mainittujen rajoitetyyppien käyttämistä kiinteistöllä Patakallio (109-540-1-21). Puuston kasvu on Patakalliolla yhteensä 353 m³/vuosi (= keskimäärin 5,52 m³/ha/vuosi).

A. Simuloi metsikön kehitystä Patakalliolla 50 vuotta eteenpäin rajoittaen hakkuut enintään puuston nykyhetken kasvun tasolle. Huomaa, että IPTIMissä simulointi etenee ensimmäiset kymmenen vuotta yhden vuoden askeleissa, ja sen jälkeen viiden vuoden askeleissa. Näin ollen vuodesta 11 alkaen rajoitteet täytyy kirjoittaa koskien viiden vuoden jaksoja (Kuva 39):

Ota ”Pilko kuviot” -valinta käyttöön, jotta IPTIM voi löytää optimaalisen ratkaisun ehdottamalla tarvittaessa jotain toimenpidettä vain tietylle osalle kuvion pinta-alasta. Ilman tätä valintaa optimiratkaisua ei välttämättä löydy, koska kyseinen hakkuurajoitus saattaa muutoin ylittyä jo yksittäisellä pinta-alaltaan isolla kuviolla. Laskentakoron voit valita itsenäisesti, kunhan se on metsien kasvun kannalta realistinen.

Tarkastele laskennan tuloksia luomalla ja lataamalla raportti. Miten puuston kasvu ja kokonaistilavuus kehittyvät pitkällä aikavälillä? Säilyttääkö metsätila nykyisen puuntuotoskykynsä?

Aineisto ja tavoite | Yleiskustannukset | Rajoitteet

"muuttuja vs. lukuarvo" -tyyppiset rajoitteet ▼

Muuttuja	Mistä (vuosi)	Mihin (vuosi)	Kerroin	Ehto	<>	Arvo
Hakkuukertymä	8	8	1	lisää	<	353
Hakkuukertymä	9	9	1	lisää	<	353
Hakkuukertymä	10	10	1	lisää	<	353
Hakkuukertymä	11	15	1	lisää	<	1 765
Hakkuukertymä	16	20	1	lisää	<	1 765
Hakkuukertymä	21	25	1	lisää	<	1 765
Hakkuukertymä	26	30	1	lisää	<	1 765

Kuva 39. Vuodesta 11 alkaen simulointi etenee viiden vuoden jaksoissa, joten myös rajoitteet pitää kirjoittaa vastaaville jaksoille. Hakkuukertymän maksimiarvo on myös kerrottu vuodesta 11 alkaen viidellä.

B. Rajoita hakkuumäärää siten, että puuston kokonaistilavuus säilyy vähintään nykyisellä tasolla (tarvitaan ”muuttuja vs. muuttuja” -tyyppinen rajoite). Poikkeako tulos kohdassa A saaduista tuloksista? Voit käyttää tulosten tulkinnassa sekä Excel-raporttia että IPTIM-käyttöliittymän Vertailu-näkymää.

HARJOITUS 6: RAJOITTEIDEN KIRJOITTAMINEN

Luvun 2 lopussa on kuvattu Tammen tilalle laadittujen kolmen eri skenaariolaskelman rajoitteita. Mieti, miten kirjoittaisit kyseiset määrittelyt IPTIM-ohjelmistoon. Voidaanko kaikki käytetyt rajoitukset huomioida IPTIMissä, vai pitääkö metsävaratietoon tehdä joitakin muutoksia jo ennen kuin aineisto tuodaan IPTIMiin?

- 1) **Taluspainotteisen metsänhoidon** skenaariossa metsien käytöltä edellytetään ainoastaan taloudellisen kestävyysden toteutumista. Puuston kokonaismäärän muuttumista ei rajoiteta, mutta metsätalouden nettotulojen sallitaan vaihtelevan eri vuosikymmenien välillä enintään 20 %. Tällä tavalla varmistetaan, että Porin kaupungille kertyy puunmyyntituloja myös pidemmällä aikavälillä, eikä kaikkia hakkuumahdollisuuksia realisoida välittömästi.
- 2) **Retkeily- ja virkistyspainotteisen metsänhoidon** skenaariossa pyritään huomioimaan retkeilijöiden arvostamia asioita. Tyypillisesti retkeilijät arvostavat avointa maisemaa, jollainen syntyy esimerkiksi vanhassa talousmetsässä, jossa harvennukset on tehty ajallaan. Puuston kasvua simuloidaan 20 % metsänhoidon suosituksia pidemmällä kiertoajoilla, ja avohakkuiden vuosittainen pinta-ala rajoitetaan enintään 1 %:iin talouskäytössä olevan metsämaan pinta-alasta. Koska puuston keskitilavuus on nykyhetkellä varsin korkea (186 m³/ha) ja metsien kehitysluokkajakauma on painottunut varttuneisiin kasvatusmetsiin sekä uudistuskypsyihin metsiin, puuston keskitilavuuden sallitaan hieman pienentyä nykytilasta.
- 3) **Suojelupainotteisen metsänhoidon** mallissa kaikki hakkuut simuloidaan jatkuvan kasvatuksen periaattein joko poiminta- tai pienaukkohakkuina. Puuston kokonaistilavuuden vaaditaan säilyvän vähintään nykyisellä tasolla. Lisäksi kaikkien järvien ja jokien rantaan jätetään 15 metriä leveä suojavyöhyke, jolle ei simuloida mitään toimenpiteitä.

HARJOITUS 7: SUURIMMAN KESTÄVÄN HAKKUUTASON ITEROINTI

Määritä suurin kestävä hakkuutaso harjoitusaineistoilla A ja B. Kertaa tarvittaessa luvuissa 5.2.1–5.2.2 käsitellyt asiat, ja sovelta näitä oppeja erilaisissa lähtötilanteissa:

- a. ”Mikäli suunnittelualueella on paljon nuoria metsiä ja tavoitteena on löytää suurin kestävä hakkuutaso, metsänomistajan pitää maltaa odottaa jonkin aikaa ennen kuin puuta voidaan alkaa myydä suurimman hakkuutason mukaisesti.”
- b. ”Myöskään siinä metsäsuunnittelun lähtötilanteessa, että tilalla on paljon uudistuskypsiä metsikkökuvioita, ei ole taloudellisesti järkevää pyrkiä tasaisiin hakkuutuloihin välittömästi. Koska metsissä on paljon käyttämättömiä hakkuuresursseja, jotka voidaan toteuttaa tasaisen hakkuusuunnitteen päälle, kannattaa nämä lisähakkuuresurssit realisoida taloudellisesta näkökulmasta varsin pian.”

Metsän tarjoamille hyödyille on tyypillistä niiden välillä vallitseva vaihdantasuhde: miten sovittaa yhteen metsänomistajan taloudelliset ja luonnonsuojelulliset tavoitteet? Voidaanko hiilensidonta ottaa osaksi kestävää metsien hyödyntämistä? Mitä epävarmuuksia liittyy jatkuvan kasvatuksen mallinnukseen? Miten hallita ilmastonmuutoksen tuomia riskejä pitkän aikavälin metsäsuunnittelussa?

Kirjassa syvennyttään kestävän metsien käytön periaatteisiin monitavoitteisen metsäsuunnittelun näkökulmasta. Teoksessa käsitellään käytännönläheisten esimerkkien avulla perusteet metsien kasvun dynamiikasta ja taloudellisesti optimaalisen kiertoajan laskennasta. Harjoitustehtävät ja verkosta avoimesti saatavat lisämateriaalit antavat lukijoille mahdollisuuden kokeilla muun muassa hakkuiden ajoituksen vaikutusta metsän tuottoarvoon. Myös uudenlaiset metsäsuunnitteluun liittyvät teknologiat, kuten drooneilla tapahtuva metsien inventointi sekä kaukokartoitukseen perustuva dynaaminen toimenpidekuviointi, on huomioitu.

Kirjan tekijät työskentelevät metsäalan asiantuntijoina Tapiossa ja Simosolissa sekä opetustehtävissä Hämeen ammattikorkeakoulussa. Tekijöillä on pitkä kokemus metsäsuunnittelun laskentajärjestelmien kehitystyöstä sekä laskentojen toteutuksesta. Teoksen ensisijaisena kohderyhmänä ovat metsäalan ammattikorkeakoulujen metsäsuunnittelun opiskelijat, mutta kirja soveltuu luettavaksi myös kenelle tahansa metsäsuunnittelun teoriasta kiinnostuneelle.



ISBN 978-952-338-093-6