

Toimittaneet Mikko Havimo ja Jussi Rasinmäki

Kollokvioiden satoa - Tutkimuksia metsänarvioinnista, metsä- ja puuteknologiasta



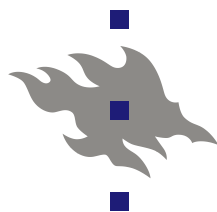
Metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja

45

HELSINGIN YLIOPISTO
METSÄVAROJEN KÄYTÖN LAITOS
JULKAISUJA 45

**KOLLOKVIIDEN SATOA – TUTKIMUKSIA
METSÄNARVIOINNISTA, METSÄ- JA
PUUTEKNOLOGIASTA**

Toimittaneet Mikko Havimo ja Jussi Rasinmäki



HELSINGIN YLIOPISTO

Kannen kuvat Mikko Havimo and Juha Rikala

ISBN 975-952-10-4529-5

Helsinki 2009

ESIPUHE

Metsävarojen käytön laitoksella on järjestetty jo usean vuoden ajan kollokvioita, joissa laitoksen tutkijat ovat esittäneet tutkimusongelmiaan ja tutkimustensa tuloksia. Kollokvioissa on vierailut myös laitoksella jatko-opintoja suorittavia tutkijoita, joiden varsinaisina työpaikkoina ovat olleet Metla tai ammattikorkeakoulut.

Kollokviot ovat tutustuttaneet laitoksen tutkijat toistensa töihin. Vaikka tutkijat saattavat istua viereisissä huoneissa, voi käsitys naapurin työstä olla hyvinkin ohut. Yhteisissä tapaamisissa käsitys muiden tekemästä tutkimuksesta on syventynyt, ja syntyneistä keskusteluista on toivon mukaan ollut apua tutkimusongelmien ratkaisemisessa. Koska laitoksella on kolme erilaista oppiainetta, ovat esitysten aiheet olleet hyvinkin erilaisia.

Esitysten lisäksi kollokvioihin on kuulunut lyhyen artikkelin kirjoittaminen, mutta kaikista kollokviossa pidetyistä esityksistä ei ole tehty artikkelia. Ennen Helsingin yliopiston metsälaitosten yhdistymistä vuoden 2010 alussa on hyvä koota yhteen nämä artikkelit. Toivon mukaan uudella metsälaitoksella jatketaan kollokvioita muodossa tai toisessa – ja tietenkin entistä suuremman tutkijajoukon voimin.

Helsingissä Elokuussa 2009

Mikko Havimo

Jussi Rasinmäki

SISÄLLYSLUETTELO

Miten laadullista ja laskennallista päätöstukea voidaan yhdistää osallistavassa metsäohjelmatyössä?	7
Argumentative moves in qualitative case study reports	17
Lämpötilan vaikutus männyn pituuskasvuun Lapissa	23
Kuivuustuhojen inventointi talousmetsissä.....	40
LiDAR suoekologisissa tutkimuksissa - Lyhennelmä	44
Ennakkoraivauksen merkitys nuoren metsän hoitokohteella.....	54
Matemaattinen mallintaminen sovelletuissa tieteissä	61

MITEN LAADULLISTA JA LASKENNALLISTA PÄÄTÖSTUKEA VOIDAAN YHDISTÄÄ OSALLISTAVASSA METSÄOHJELMATYÖSSÄ?

Teppo Hujala¹, Annika Kangas² & Ninni Saarinen³

JOHDANTO

Kohti hienostuneita ja tarkoituksenmukaisia osallistavan suunnittelun prosesseja

Metsäsuunnittelun menetelmiä on kehitetty Suomessa viime vuosikymmeninä monella tavoin: tutkimus on tuottanut sekä taktisen että strategisen suunnittelun työvälineitä optimoinnin, metaheuristiikan ja hyötyanalyysin pohjalta. Viime aikoina on kuitenkin huomattu, että monissa suunnitteluongelmissa tärkeimmät vaiheet ovat itse ongelman määrittelyssä (esim. Leskinen ym. 2009). Monesti on epäselvää, keitä suunnitteluprosessin eri vaiheissa pitäisi olla mukana, mitkä olisivat oikeat kriteerit ja millaisia vaihtoehtoja kannattaa tarkasteluun ottaa mukaan (esim. Belton ja Stewart 2002). Vaikka esimerkiksi kriteerien ja vaihtoehtojen määrittelyllä voi kvantitatiivisia menetelmiä sovellettaessa olla ratkaiseva merkitys projektin lopputulokselle, niihin on tutkimuksissa kiinnitetty vain vähän huomiota. Kansainvälisessä päätöksenteon tutkimuksessa ongelmanmäärittelyyn on kuitenkin kehitetty omia menetelmiään, joita kutsutaan nimellä "Soft OR" eli "*pehmeä operaatioanalyysi*" (esim. Hjortsø 2004, Mingers ja Rosenhead 2004, Eden ja Ackermann 2006).

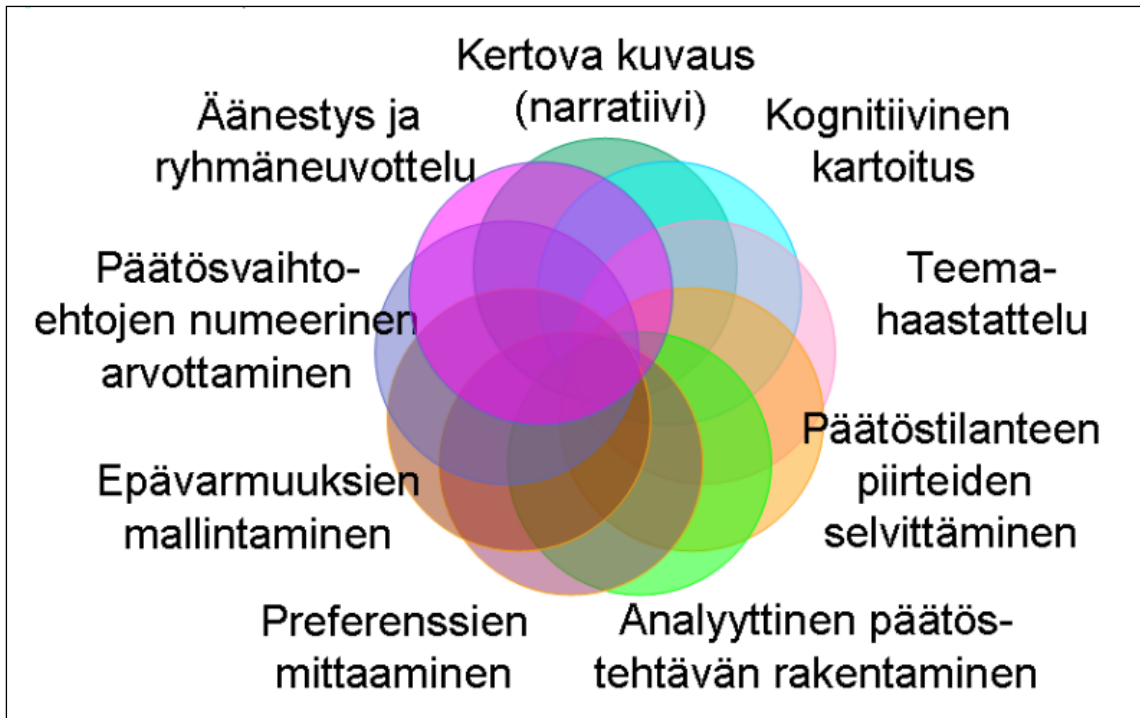
Pehmeän päätöstuen menetelmien tarkoituksena on parantaa laskennallisen päätöstuen havainnollisuutta, ymmärrettävyyttä ja yhteensopivuutta päätöksentekijöiden näkökulmien kanssa. Toisaalta osallistamisprosessi voidaan toteuttaa myös puhtaasti kvalitatiivisin menetelmin, eli ryhmässä ohjatusti keskustellen. On mahdollista, että osa tällaisista keskustelevista suunnitteluprosesseista hyötyisi puolestaan kvantitatiivisten suunnittelutekniikoiden mukanaan tuomasta tavoitteiden ja niiden vaihtosuhteiden järjestelmällisestä tarkastelusta. Ne voivat osaltaan edistää ongelman hahmottamista ja oppimista (Pykäläinen ym. 2007). Siksi monissa prosesseissa olisi järkevää pyrkiä yhdistämään mielekkäällä tavalla sekä kvalitatiivisia että kvantitatiivisia menetelmiä (ks. kuva 1) ja pyrkiä näin saamaan käyttöön molempien menetelmäperheiden hyödyt ja

¹ Tutkijatohtori, Metsävarojen käytön laitos, PL 27, FI-00014 Helsingin yliopisto, Puh: +358 10 211 3288, Fax: +358 9 1915 8159, E-mail: etunimi.sukunimi@helsinki.fi

² Professori, Metsävarojen käytön laitos, PL 27, FI-00014 Helsingin yliopisto, Puh: +358 9 1915 8177, Fax: +358 9 1915 8159, E-mail: etunimi.sukunimi@helsinki.fi

³ Projektitutkija, Metsävarojen käytön laitos, PL 27, FI-00014 Helsingin yliopisto, Puh: +358 9 1915 8174, Fax: +358 9 1915 8159, E-mail: etunimi.sukunimi@helsinki.fi

välttämään molempien heikkoudet. Parhaimmillaan tuloksena on yhteisymmärrys muutamasta kehittämisteemasta tai -toimesta, joihin ohjelmakaudella keskitytään.



Kuva 1. Metsäsuunnittelussa tai metsäohjelmatyössä yhdistettävät menetelmät ovat eriluonteisia: toiset laadullisia, toiset laskennallisia, ja jotkut niiden yhdistelmiä.

TUTKIMUSKOHDDE JA TAVOITTEET: ALUEELLISTEN METSÄOHJELMAPROSESSIIEN KEHITTÄMINEN

Yksi tärkeä osallistavan suunnittelun tapaus Suomen metsäsektorilla on Metsäohjelman (Kansallinen taso: KMO; alueellinen taso: AMO) laatimisprosessi. Kansallinen metsäohjelma perustuu osaltaan 13 alueelliseen ohjelmaan, mutta toisaalta kansallisen ohjelman tavoitteita pyritään saavuttamaan maakunnissa alueellisten ohjelmien kautta.

AMO:ssa kullekin metsäkeskusalueelle määritellään tavoitteet puun käytölle ja metsätalouden edistämistoimille, esimerkiksi ainespuun hakkuille, energiapuun käytölle, metsäteiden rakentamiselle ja taimikonhoidoille. Alueellinen metsäohjelma on oman alueensa metsätalouden strateginen kehittämisohjelma, johon kaikkien osapuolien toivotaan sitoutuvan (Alueelliset metsäohjelmat 2006-2010..., 2006). Lakisääteiset ohjelmat laaditaan metsäkeskuksen johdolla sidosryhmäyhteistyönä.

Kullekin metsäkeskusalueelle maa- ja metsätalousministeriö on nimennyt alueellisen metsäneuvoston, joka laatii ohjelman (Alueellisten metsäneuvoston asettaminen 2007). Lopullisesti ohjelman hyväksyy Metsäkeskus. Kaikissa metsäneuvostoissa ovat olleet edustettuina seuraavat tahot: metsänomistajat, metsäteollisuus, ympäristöhallinto,

metsäopetus ja -tutkimus (Metla ja metsäalan oppilaitokset), maakunnalliset hallinto-organisaatiot (TE-keskukset, maaseutukeskukset, kunnat, maakuntaliitot, ja Metsähallitus) ja -järjestöt (mm. 4H-yhdistykset ja riistanhoitopiirit), ympäristöjärjestöt sekä ammatillinen edunvalvonta.

Metsäneuvostojen toiminta on perustunut säännöllisiin kokouksiin, joissa osallistujat ovat voineet vaihtaa tietoja, ilmaista mielipiteitä ja omia näkökantojaan metsäohjelmassa käsiteltävistä asioista (Saarikoski ym. 2008). Kokoukset ovat kestäneet yleensä kahdesta kolmeen tuntiin, ja lisäksi on pidetty päivän seminaari- ja työryhmäkokouksia. Kokouksissa on tarkasteltu ohjelmatyöryhmien ja metsäkeskusten laatimia ohjelmaluonnoksia ja tehty näihin lisäys- ja korjausehdotuksia sekä käyty tässä yhteydessä keskustelua alueen metsäsektorin kehittämissuunnista. Lisäksi metsäneuvostot ovat laatineet tai osallistuneet alueen metsäsektorin vahvuuksien, heikkouksien, mahdollisuuksien ja uhkien analyysiin (ns. SWOT-analyysi). Joissakin tapauksissa metsäneuvostot ovat myös ottaneet kantaa Metlan laatimiin hakkuuvaihtoehtoihin erilaisten pisteytysmenetelmien avulla (Saarikoski ym. 2008).

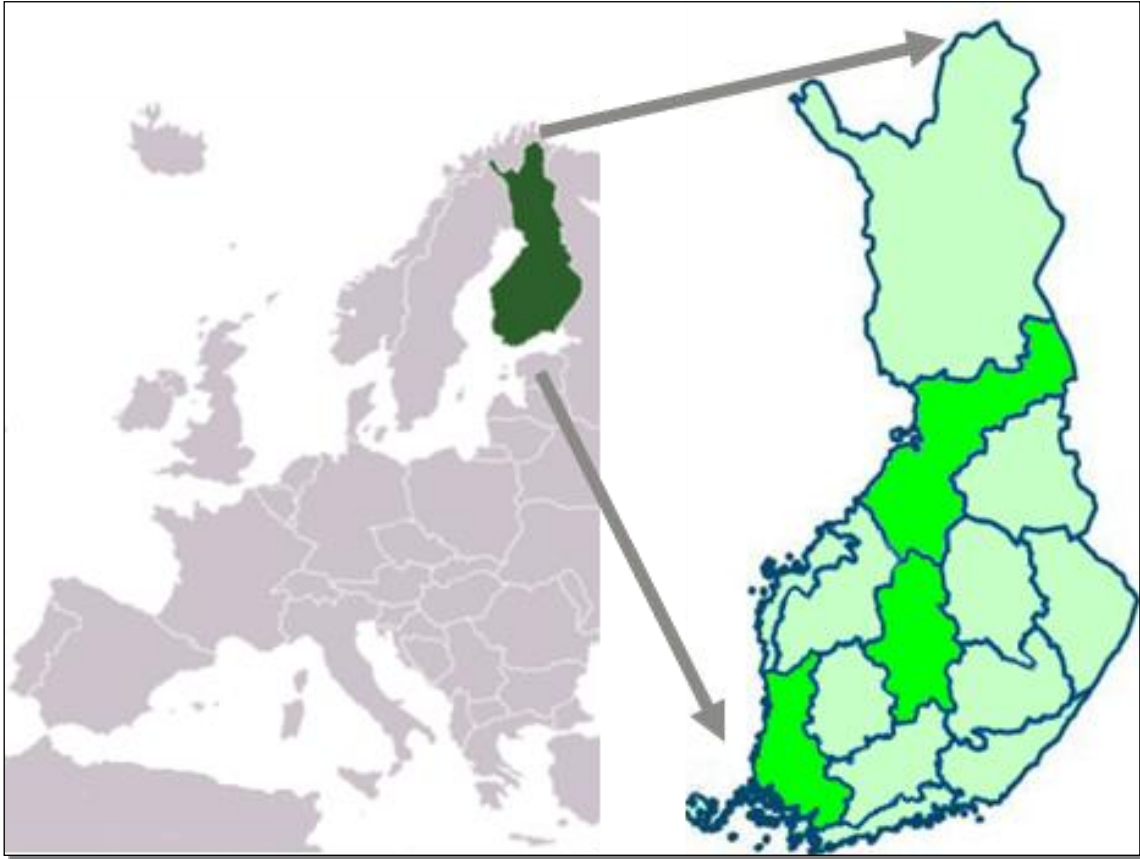
Metsäsuunnittelun ja operaatioanalyysin tutkimuksen tuottamia menetelmiä ei kuitenkaan ole järjestelmällisesti hyödynnetty esimerkiksi vaihtoehtoisten linjausten valinnoissa tai toimenpiteiden priorisoinnissa eli muutaman tärkeimmän kehittämiskohteen valinnassa. Maa- ja metsätalousministeriön rahoittamassa HyvAMO-hankkeessa ("*Alueellinen metsäohjelma hyväksyttävänä ja vaikuttavana prosessina*"; <http://www.oamk.fi/hyvamo>) tavoitteena on ollut kehittää prosessia hyväksyttävämmäksi ja vaikuttavammaksi suunnittelun tutkimuksen keinoin (ks. Hujala ym. 2009). Menetelmällistä ja tieteellistä tukea tämä Kansallisen metsäneuvoston sihteeristölle raportoiva kehittämishanke on vuoden 2009 alusta lähtien saanut Suomen Akatemian rahoittamasta nelivuotisesta tutkimusprojektista "*Sillanrakennus laadullisen ongelmanmäärittelyn ja määrällisen päätösanalyysin välille metsäalalla*".

MENETELMÄNÄ KEHITTÄVÄ INTERVENTIOTUTKIMUS

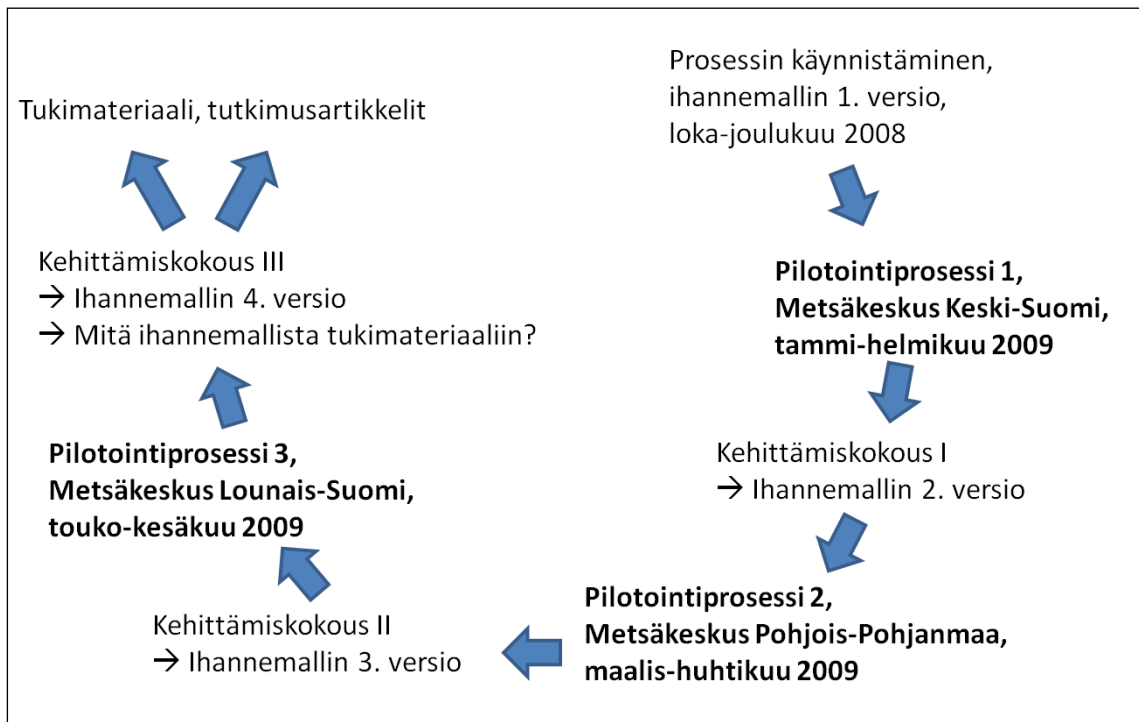
Tutkimuksessa tehtiin aluksi haastatteluja ja kyselytutkimuksia siitä, millaisia aikaisemmat AMO-prosessit ovat olleet ja millaisia niiden toivottaisiin olevan (Saarinen 2008, Laitala ym. 2008, Saarikoski ym. 2008, Saarinen ym. 2009). Näiden pohjalta tutkijat laativat luonnoksen ns. ihanneprosessista. Tätä ihanneprosessia on tämän jälkeen testattu kolmessa tapausmetsäkeskuksessa, Lounais-Suomessa, Keski-Suomessa sekä Pohjois-Pohjanmaalla (kuva 2). Kussakin tapausmetsäkeskuksessa keskityttiin hieman eri vaiheisiin prosessissa, ja myöhemmissä piloteissa pyrittiin huomioimaan aiemmista tapauksista saatu palaute (kuva 3).

Keski-Suomessa pyrittiin viemään koko prosessi läpi nopeutetulla tahdilla. Pohjois-Pohjanmaalla keskityttiin erityisesti vaihtoehtoisten toimintalinjojen muotoiluun, mittarien rakentamiseen sekä toteutettavan toimintalinjan valintaan. Lounais-Suomessa syvennyttiin toimintalinjan toteuttamisen vaatimien toimenpiteiden konkretisointiin ja priorisointiin. Jokaisessa vaiheessa kerättiin kyselyin palautetta sovelletuista menetelmistä ja itse prosessista. Kolme pilottiprosessia noudattivat niin kutsuttua design-tutkimuksen mallia: kukin jälkimmäisten pilottien vaiheista vietiin läpi edellisen pilotin kokemuksen ja kerätyn palautteen perusteella paranneltuna. Näin ihannemallista on kolmen pilottiprosessin jälkeen muotoutunut koeteltu ja paranneltu neljäs versio

(kuva 3). Tätä mallia ja saatuja kokemuksia palautteineen on hyödynnetty metsäkeskusten käyttöön tarkoitetussa alueellisten metsäohjelmien tukimateriaalissa.



Kuva 2. Tapausmetsäkeskukset Lounais-Suomi, Keski-Suomi ja Pohjois-Pohjanmaa.

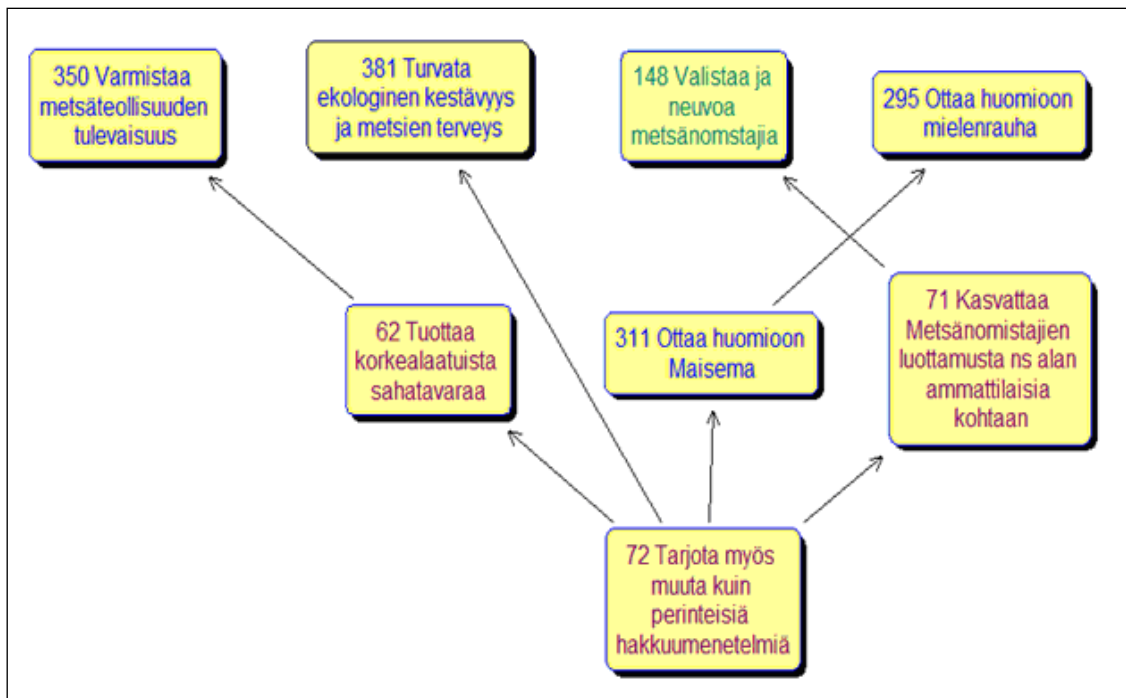


Kuva 3. Vaiheittain etenevän design-tutkimuksen eteneminen HyvAMO-hankkeessa.

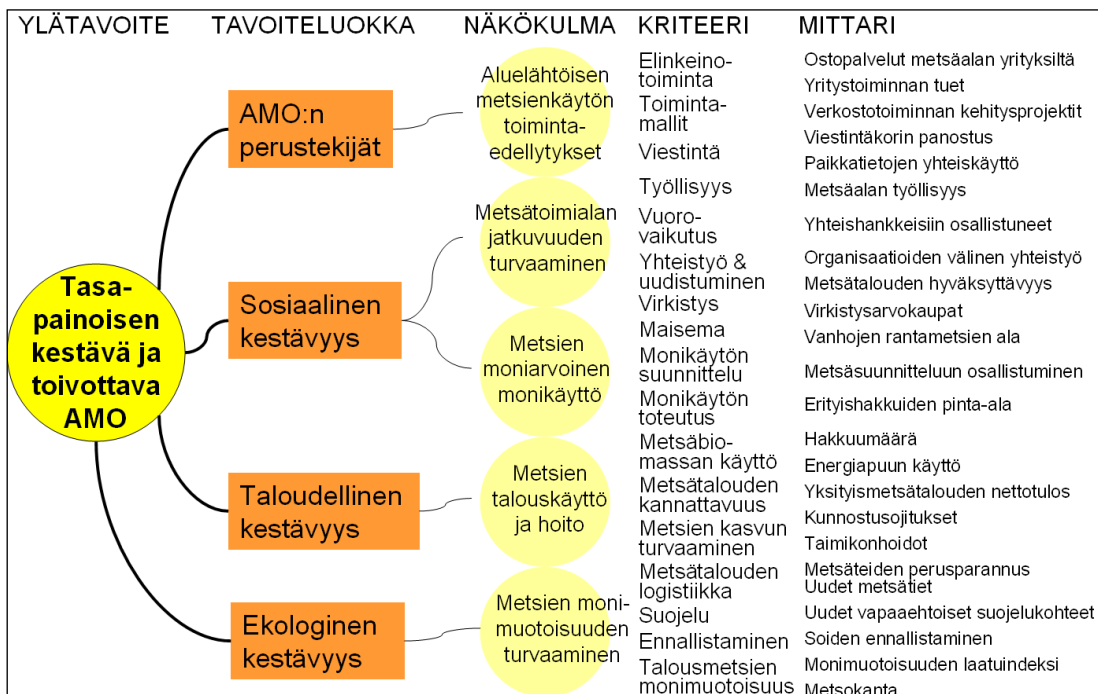
Esimerkki: laadullisen tavoitekartoituksen kautta yhdessä määriteltyyn toimintalinjaan ja tärkeimpiin kehittämistoimiin

Oleellinen osa Keski-Suomessa toteutettua prosessia oli kognitiivisena kartoituksena läpiviety tavoitekartoitus (ks. Eden 1988, Hjortsø 2004). Sen pohjalle rakentuivat niin toimintalinjan valinta, strategisten toimenpiteiden muotoilu kuin käytetyt arvottamismenetelmätkin. Tavoitekartoituksessa haastateltiin joko kasvokkain tai sähköpostin välityksellä jokaista pilottiin osallistunutta sidosryhmäedustajaa. Tutkijoiden tulkintaa sisältävä konsultointityö sisälsi seuraavat kuusi vaihetta:

1. Tavoitehaastatteluja käytettiin formuloitaessa **tavoitelauseita** (~ 300 kpl)
2. Tavoitteiden ja niiden saavuttamiseen käytettävien keinojen (alemman tason tavoitteiden) suhteita havainnollistettiin erityisillä **käsitekartoilla**
3. Osallistujien käsitekartat yhdistettiin **yhdeksi Keski-Suomen tavoitekartaksi** (periaate esitetty kuvassa 4)
4. Käsitekartan avulla etsittiin **tavoitteiden hierarkia** kriteereineen ja mittariehdokkaineen (kuva 5)
5. Käsitekartoista tehtiin laskelmia, joiden perusteella pyrittiin löytämään tärkeimmät asiat ja mahdolliset strategisen ohjelman laadinnassa tarpeelliset **kriteerit ja strategiset tavoitteet**
6. ...ja myös tavoitteiden toteuttamisen kannalta tärkeimmät **avaintoimenpiteet**



Kuva 4. Tavoitekartoituksen tuottaman käsittekartan periaate. Nuolet kuvaavat yhteyttä tavoitteen ja keinon välillä.



Kuva 5. Tavoitehierarkiaan on tuotu yksinkertaistettu esitys osallistujaryhmän esille nostamista olennaisimmista eri tason tavoitteista sekä ehdotukset, miten kunkin tavoitteen toteutumista voitaisiin mitata ja seurata.

Seuraavassa vaiheessa mittariehdokkaista valittiin pisteytysäänestyksen avulla tärkeimmät, siten että kaikki kestävyuden ulottuvuudet olivat tasaisesti edustettuina. Toimintalinjan valintaa varten luotiin erilaisia vaihtoehtoja (nykytoiminta, painotukset bioenergiaan, monikäyttöön, yrittäjyyden tukemiseen). Näitä vaihtoehtoja havainnollistettiin tekemällä asiantuntija-arviot kunkin toimintalinjan mukaisesta ennusteesta kunkin mittarin toteutuvaksi arvoksi. Toimintalinjan vertailuun käytettiin MESTA-päätöstukityökalua (Hiltunen ym. 2009), jossa jokainen vastaaja antoi kullekin kriteerille alimman hyväksyttävän mittariarvon. Hyväksymisrajoja piti säätää kunnes vähintään yksi vaihtoehto muodostui hyväksyttäväksi kaikkien kriteerien suhteen. Lopullinen toimintalinjan valinta tapahtui ryhmässä keskustelemalla. Yhteiseksi valitussa toimintalinjassa oli piirteitä ainakin kahdesta alkuperäisestä vaihtoehdosta.

Toimintalinjavalinnan jälkeen edettiin kohti tärkeimpien kehittämistoimien valintaa. Tavoitekartoituvaiheessa esiin nousseet kehittämistoimista valittiin jatkokeskusteluun niin kutsutulla hyväksymisäänestyksellä ne, jotka osallistujien mielestä yksimielisimmin tukivat valitun toimintalinjan mukaisten mittariarvojen saavuttamista. Tämän jälkeen kutakin kehittämistointia täsmennettiin, ja lopuksi tehtiin niiden arvotus yksilötehtävänä, jonka tulokset yhdistettiin kehittämistoimien prioriteettiarvoiksi. Taulukossa 1 on esitetty Lounais-Suomen pilotin arvottamistehtävän tulokset, joita käytettiin edelleen resurssien allokointia ja metsäohjelman toteutuksen työnjakoa käsittelevässä ryhmäkeskustelussa.

Taulukko 1. Esimerkki toimenpiteiden arvotuksen tuloksista (ote Lounais-Suomen pilotiryhmän tulostaulukosta, toukokuu 2009). Eri toimenpiteiden saamat prioriteettiarvot ja osallistujien antamien prioriteettien hajonnat voivat toimia jatkokeskustelun suuntaajana ja resurssien jakotehtävän pohjana.

Nro	Lounais-Suomen AMO-kehittämisryhmän toimenpide-ehdotukset	Tavoite	Prioriteetti	Sija
1	Panostetaan METSO-välineiden käyttöönottoon koko metsäkeskusalueella: Luonnonhoitosuunnitelmia markkinoidaan metsänomistajille tehostetusti	Suonnonhoitohankkeiden volyymin lisääminen, tuloksellisia yhteistoimintaverkostoja ja vapaaehtoisen suojelun sopimuksia	0,086	2
2	Monimuotoisuuden , ympäristön ja kulttuuriympäristön hoidon yrittäjyys hanke (sis. koulutus, neuvonta, verkostoituminen)	Tuetaan ja kannustetaan monimuotoisuuden, ympäristön- ja kulttuuriympäristön hoitoon liittyvää yrittäjyyttä (varmistetaan Lumomaa-toimintatavan jatkuminen)	0,065	
3	Puuenergiayrittäjyyteen liittyvä neuvontapalvelu, koulutus ja verkostoituminen -hanke (sis. tilaaja-tuottaja -toimintamalli, liiketoiminta- ja markkinointiosaaminen sekä tietotekniikan monipuolinen hyödyntäminen)	Parannetaan metsäbiomassaa hyväksi käyttävien bioenergiayritysten toimintapuitteita	0,128	1
4	Metsänomistus- ja tilusrakenteen kehittäminen-hanke (sis. koulutus, yksilöity neuvonta, verkkopalvelut, markkinointi (maiden vaihto))	Suurennetaan yhtenäisten metsälaiden kokoa ja tehostetaan sitä kautta metsänkättöä ja suunnittelua	0,085	3
5	Puutuoteyrittäjien liiketoiminta- ja markkinointiosaamista parannetaan koulutuksella, painopisteinä: Asiakaslähtöisyys ja verkostoituminen sekä tilaaja-tuottaja- toimintamalli ja tietotekniikan monipuolinen hyödyntäminen	Tuetaan puutuotteita valmistavien yritysten perustamisen ja laajentamisen vaatimia investointi-, kehittämis- ja markkinoillepääsyä parantavia toimenpiteitä	0,063	
6	Edistetään uusia monikäytön tapoja perustamalla kokeilualue monikäytön tueksi (Markkinoidaan tehokkaasti virkistysarvokauppaa metsänomistajille, tuodaan esille hyviä esimerkkejä virkistys- ja maisema-arvokauppaan sekä matkailuyrittäjyyteen, sis. luonnontuotteiden keruun, jalostuksen ja markkinoinnin)	Saadaan virkistys- ja maisema-arvokauppa kunnolla käyntiin ja yhteensovitetaan metsän käyttömuotoja aiempaa tehokkaammin	0,041	

ALUSTAVIA TULOKSIA

Kokouksissa käytyjen palautekeskustelujen sekä kirjallisten palautteiden perusteella metsäkeskuksen sidosryhmiä edustaneet toimijat pitivät prosessia kohtuullisen onnistuneena. Toimijoiden palaute tavoitekartoituksesta oli pääasiassa positiivista. Lounais-Suomen osallistujat kiittivät erityisesti sitä, että menetelmällä saatiin kohtuullisen pienillä resursseilla kohtuullisen paljon aineistoa ryhmän pureskeltavaksi.

Tavoitteita selvitettiin sähköpostikyselyn sekä kahden erilaisen haastattelumenetelmän avulla (virikkeellinen teemahaastattelu ja kognitiivinen kartoitus). Molempia haastattelumenetelmiä pidettiin kehittämiskelpoisina, tosin virikehaastattelun alustustekstiä toivottiin etukäteen luettavaksi. Sähköpostikyselyn tuloksista oli tutkijoiden näkemyksen mukaan vaikeampi saada materiaalia tavoitehierarkian muodostamiseen kuin haastatteluaineistosta. Niin tavoitekartoitukseen kuin koko prosessiin toivottiin skenaarioajattelun lisäämistä. Tavoitekartoituksen yhteydessä skenaarioajattelua voisi tuoda saatteessa vahvemmin toimintaympäristö-käsitteen kautta. Tutkijoiden tuoma tavoitehierarkia (kuva 5) ei tuntunut Keski-Suomen osallistujista aivan omalta, vaikka se johdattikin pohtimaan tavoitteiden ja keinojen yhteyttä.

MESTA-päätöstukimenetelmän käyttöä toimintalinjan valinnassa kritisoiitiin Keski-Suomessa melko voimakkaastikin, koska käytetyt mittarit ja kriteerit tuntuivat osallistujien mielestä vierailta ja tehtävä tuntui jopa epämiellyttävältä. Mittarit koettiin myös liian epäselviksi ja toisaalta niiden arvot olivat liian lähellä toisiaan. Toimijat totesivat kuitenkin, että keskustelun alustajana MESTA-menetelmä on ihan käyttökelpoinen, mutta pelkästään MESTA-menetelmän varaan osallistujat eivät toimintalinjan valintaa jättäisi.

Keski-Suomen toimijat kokivat myös toimenpiteiden sanamuotojen tulleen liikaa tutkijoilta. Niiden muotoilu vaatii keskustelua osallistuvien tahojen kesken, jotta toimenpiteet tuntuisivat omilta ja selkeiltä eikä niihin jäisi tulkinnanvaraisuutta, samoin kuin mittareidenkin kohdalla. Tähän kiinnitettiin erityistä huomiota Pohjois-Pohjanmaan ja Lounais-Suomen piloteissa. Toimenpiteiden priorisointia pidettiin kuitenkin hyvänä menetelmänä, vaikka arvottaminen tuntui vaikealta, varsinkin kun osallistujilla ei ollut tietoa prosessin jatkosta arvottamisen jälkeen. Kehitettyinä versiona toimenpiteiden arvotus sai hyväksyvän ja myönteisen vastaanoton Lounais-Suomen toimijoilta. Kaikkien pilottien toimijat totesivat, että osallistujajoukon kokoonpano vaikuttaa valtavasti siihen, mistä keskustellaan ja minkälaisia mittareita ja toimenpiteitä valitaan.

Saadun palautteen perusteella tutkijat arvioivat menetelmien soveltuvuutta AMO-prosessin käytettäväksi. Toimijoiden selkeä viesti oli, että prosessia kokonaisuutena ja sen eri tehtäviä täytyy selkeyttää. Prosessi kuitenkin tuki palautteen perusteella osallistujien omaa ajattelua, ryhmän sisäistä vuoropuhelua sekä uusien ideoiden löytymistä. Myös prosessin keskusteleva ote sai myönteistä palautetta. Prosessin selkeyttämisen ja osallistumisen vahvistuminen vähentää tutkijavetoisuutta ja parantaa osallistujien omistajuuden tunnetta, minkä toimijat kokivat tärkeäksi.

Keski-Suomen palautteen perusteella prosessimallia muutettiin kahta seuraavaa metsäkeskusaluetta varten siten, että Pohjois-Pohjanmaalla keskityttiin enemmän prosessin alkuvaiheeseen, mittareiden muodostamiseen ja toimintalinjan valintaan, kun taas Lounais-Suomessa painopisteenä oli prosessin loppuvaihe, toimenpiteiden muotoilu ja priorisointi. Näin sekä Pohjois-Pohjanmaalla että Lounais-Suomessa jäi

enemmän aikaa laajemmalle keskustelulle jokaisessa vaiheessa. Pohjois-Pohjanmaalla tehtiin metsäkeskuksen vetämän Innometsä-hankkeen kanssa yhteistyötä ja järjestettiin skenaariotyöpaja. Tällä koetettiin vastata Keski-Suomessa nousseeseen toiveeseen saada ankkuroitua tavoitekartoitusta ja siihen liittyvä ryhmäkeskustelu johonkin tai joihinkin perusteltuihin käsityksiin alueen metsäsektorin toimintaympäristön kehittymisestä.

PÄÄTELMÄT

Pilottiprosessien kokemukset ja saatu palaute osoittavat, että toimijoiden näkökulmien saaminen aidosti mukaan käytävään keskusteluun voi lisätä metsäohjelmatyön mielekkyyttä ja sitä kautta kehittämistyöhön sitoutumista. Laadullista ja määrällistä otetta yhdistelevä tavoitekartoitusta on tähän toimiva keino.

Strategisten vaihtoehtojen muodostamisessa on tärkeää valita toimijavetoisesti olennaiset kriteerit ja niitä kuvaavat mittarit. Vaikka vaihtoehtoiset toimintalinjat ja niiden mittariarvot laadittaisiinkin asiantuntijatyönä, niistä ryhmässä keskusteleminen parantaa osallistujien käsitystä tavoitteista ja niihin soveltuvista keinoista. Toimintalinjojen vertailusta on kuitenkin syytä edetä varsin nopeasti kehittämistoimien muotoiluun ja arvottamiseen, sillä toimenpiteiden vertailu konkretisoi kehittävän toimintaohjelman laadintaa ja vaikuttaa käytännön tasolla osallisten työhön.

Lisää tutkimustietoa tarvitaan kvantitatiivisten ja kvalitatiivisten päätöstukimenetelmien roolista metsäohjelmapirosessin eri vaiheissa. Vaiheisiin on tässä yhteydessä liitettävä myös metsäohjelman toteutus ja sen seuranta, kun tähän saakka on paneuduttu lähinnä vain metsäohjelman laatimisvaiheen päätöstukeen. Lisäksi vaikuttaa siltä, että asiantuntijätiedon ja kokemusperäisen tiedon rooleja sekä näkökulmien välisiä institutionaalisia valtasuhteita alueellisen metsäohjelmien laadinnassa on tarpeen analysoida tarkemmin, jotta metsäohjelmien vaikuttavuus ja hyväksyttävyyttä voisivat parantua.

Tähän asti metsäneuvostojen kokoonpanoissa perinteinen metsäala on painottunut edustajien lukumääräisellä enemmistöllä. HyvAMO-hankkeen ihannemallissa ehdotetaan metsäneuvostoa lukumääräisesti pienemmän AMO-ryhmän perustamista, jossa voimasuhteet jakautuisivat tasaisemmin. Esimerkiksi Keski-Suomen pilottiprosessin AMO-ryhmä koostui yhdeksästä edustajasta, jotka edustivat metsäkeskusta, metsänhoitoyhdistystä, metsäteollisuutta, ympäristökeskusta, TE-keskusta (ELY:ä), yliopistoa, maakuntaliittoa sekä yrittäjiä. Ryhmän keskusteluilmapiiri koettiin avoimeksi, minkä voidaan osaltaan olettaa olleen tulosta ryhmän koosta ja kokoonpanosta. Näkökulmien voimasuhteet tulevat esiin erityisesti äänestystilanteissa ja keskusteluaiheiden painopisteissä.

Kiitokset

Tekijät haluavat kiittää Jukka Tikkasta ja Jouni Pykäläistä yhteistyöstä AMO-pilottiprosessien toteuttamisessa.

KIRJALLISUUS

- Alueelliset metsäohjelmat 2006-2010, yhteenveto metsäkeskusten metsäohjelmista. 2006. Maa- ja metsätalousministeriö 4/2006. 45 s.
- Alueellisten metsäneuvostojen asettaminen. 2007. Maa- ja metsätalousministeriön dokumentti 4124/621/2006.
- Belton, V. & Stewart, T.J. 2002. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Kluwer Academic Publishers.
- Eden, C. 1988. Cognitive mapping. *European Journal of Operational Research* 36: 1–13.
- Eden, C. & Ackermann, F. 2006. Where next for Problem Structuring Methods? *Journal of the Operational Research Society* 57(7): 766–768.
- Hiltunen, V., Kurttila, M., Leskinen, P., Pasanen, K. & Pykäläinen, J. 2009. Mesta: An internet-based decision-support application for participatory strategic-level natural resources planning. *Forest Policy and Economics*, 11(1):1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2008.07.004>
- Hjortso, C.N., 2004. Enhancing Public Participation in Natural Resource Management Using Soft OR: an Application of Strategic Option Development and Analysis in Tactical Forest Planning. *European Journal of Operations Research* 152: 631-640.
- Hujala, T., Laitala, M., Saarinen, N., Tikkanen, J. & Weckroth, T. 2009. Alueellisella metsäohjelmalla toimivaa vuoropuhelua ja hyväksyttävää tuloksia - Yhteenveto HyvAMO-hankkeen tuloksista ja johtopäätöksistä alueellisten metsäneuvostojen jäsenille. Oulun seudun ammattikorkeakoulu ja HyvAMO-hanke, 8 s. Saatavilla: http://www.oamk.fi/luova/tk/hankkeet/hankeportfolio/hyvamo/docs/hujala_laitanen_saarinen_tikkanen_weckroth.pdf (viitattu 27.7.2009).
- Laitala, M., Tikkanen, J. ja Saarinen, N. 2008. Alueellinen metsäohjelma kokoaa metsän monet merkitykset. Oulun seudun ammattikorkeakoulun verkkojulkaisusarja ePooki 1/2009. Saatavissa: <http://www.oamk.fi/epooki/?julkaisu=1> (viitattu 10.7.2009).
- Leskinen, P., Hujala, T., Tikkanen, J., Kainulainen, T., Kangas, A., Kurttila, M., Pykäläinen, J. & Leskinen, L.A. 2009. Adaptive decision analysis in forest management planning. *Forest Science* 55(2): 95–108.
- Mingers, J. & Rosenhead, J. 2004. Problem structuring methods in action. *European Journal of Operational Research* 152(3): 530–554.
- Pykäläinen, J., Hiltunen, V. & Leskinen, P. 2007. Complementary use of voting methods and interactive utility analysis in participatory strategic forest planning: experiences gained from western Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 853–865.
- Saarikoski, H., Weckroth, T., Leskinen, L.A., Laitala, M. & Tikkanen, J. 2008. Alueellisten metsäohjelmien 2006–2010 laadinnan hyväksyttävyyden ja vaikuttavuuden – Analyysi alueellisista metsäohjelmista. *Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 94. 23 s. ISBN 978-951-40-2125-1 (PDF). Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2008/mwp094.htm> (viitattu 7.9.2009)
- Saarinen, N. 2008. Alueellisten metsäohjelmajärjestelmien hyväksyttävyyden Q-analyysin pohjalta. Pro gradu, Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitos.
- Saarinen, N., Kangas, A., Tikkanen, J., Leskinen, L., Hujala, T. & Saarikoski, H. 2009. Osallistujien näkökulmat alueellisiin metsäohjelmajärjestelmiin. Hyväksytty julkaistavaksi *Metsätieteen aikakauskirjassa*.

ARGUMENTATIVE MOVES IN QUALITATIVE CASE STUDY REPORTS

Teppo Hujala¹

INTRODUCTION

Reporting research activities in a coherent and understandable manner is a challenging task. An article is only a tip of an iceberg, but it should however give a realistic view on the whole process. Credence to a report, in the eyes of a critical reader, does not spring up from impressive numbers or illustrative figures. Instead, a logical chain of arguments should be the heart of any research article. This principle is particularly useful in qualitative case study reports, where the connection between the problem, the data, the findings, and general inferences is not always obvious. In order to convince readers, it is worth investing on transparent argumentation in the reporting of qualitative case studies.

In this paper I will demonstrate and theorize some argumentative moves in our recent case study report, which deals with communication in decision-making context among Finnish family forest owners. The data comprises 30 semi-structured research interviews, and the analysis focuses on pieces of anecdotes, which are examined by combining theory- and data-driven approaches. This paper deals with motivating the topic, justifying the method, and generalizing the results. The aim is to reflect the constructing of credible argumentation which would illuminate the writer's thinking and make the report digestible. The use of Rationale, Australian argument visualisation software [<http://www.austhink.com/>] provides illustrative examples of flows of arguments and *lacunae* in written thoughts.

In the field of forest sciences, a qualitative case study is a non-traditional approach. There is a need to explain and illustrate the usage of such methodology. One has to convince peer scientists and forest practitioners about the adequacy of the data, the reliability of the method, and the significance of the findings. From the researcher this requires thorough comprehension about the whole study. However, it is rewarding to get along with the reasoning chain after the struggle. As Shakespeare states in Hamlet (III, iii, 100-103): "*My words fly up, my thoughts remain below: Words without thoughts never to heaven go*" (Moore 2001).

The following sections aim at guiding the reader through some written argumentation extractions with the aid of a meta-level approach to a research report. All indented italic quotes are from our submitted manuscript, which differs from the actual published version (Hujala & Tikkanen 2008). The exemplary quotes are used here for argumentation demonstration only.

¹ Postdoctoral researcher, Department of Forest Resource Management, University of Helsinki, P.O. Box 27, FI-00014 University of Helsinki, Tel: Puh: +358 10 211 3288, Fax: +358 9 19158159, E-mail: firstname.lastname@helsinki.fi

MOTIVATING THE TOPIC AND FORMULATING RESEARCH QUESTIONS

In the beginning of our manuscript, we motivate the study with a forecast of changes in Finnish forest planning practices. The current situation offers an opportunity to develop new owner-based decision support services:

"In over the next few years, the State-subsidised forest planning system will be modernized around more market-driven decision support services (Ministry of Agriculture and Forestry, 2001 & 2006). This change has also been motivated by the recent development of remote-sensing-based inventory... - - - Along with the change in the technical forest planning practices, it is possible – although not obvious without motivating catalysts and deliberate activity – to develop new owner-based consulting practices (Cockman et al., 1999), consistent with the actual needs and expectations of forest owners."

The background shows topicality and relevance from viewpoints of society, technological development, and forest owners. However, the rationale is fundamentally practical rather than scientific. In a scientific research article we should as well define the theoretical motivation for the study. A gap in the current knowledge should be pointed out. Then we could perhaps determine, what the research is supposed to offer for the practical development. The research questions could rise from deeper scenarios and hypotheses. For example:

"Information needs, communication preferences, and usage of different media among family forest owners in Finland have been rather thoroughly investigated (e.g. Karppinen, 1998; Karppinen et al., 2002; Toivonen et al., 2005). Because this study focuses on the social phenomena around communication in the decision-making context, these studies providing general and rather practically oriented results are insufficient. This study seeks to explore deeper into the lives of forest owners as socially interacting decision-makers." [Gap in knowledge, argued through previous related research.]

"Technological development ... may be the main catalyst of the present change in forest planning practices, but not the main product. Experiences from other disciplines have shown (e.g. Virkkunen et al., 1999) that the most fundamental change, although technologically motivated, takes place in social practices in particular. ...we assume that a comparable phenomenon could take place in decision support services in family forestry as well..." [Scenario-building and a hypothesis through a phenomenon-transfer from other fields.]

Before writing down the motivation for our study, we formulated justification for the topic with the aid of a graphical reasoning using Rationale software. We found it a suitable tool for illustrating the main points in an argument flow. In Figure 1 there is an example from an early preparation phase of our manuscript. The figure shows somewhat the same basic ideas that were presented as sequential text above. As a part of the reasoning map, green *because*-moves, red *but*-moves, and yellow *however*-moves can be seen.

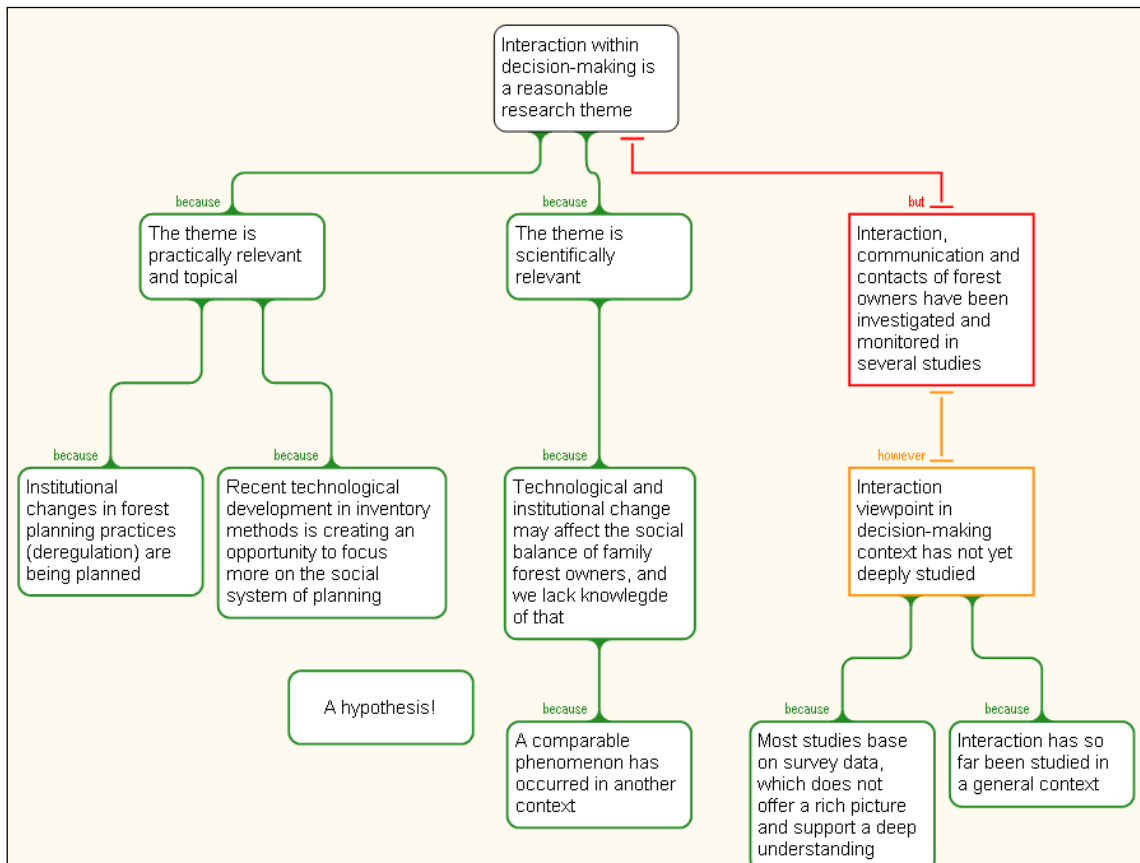


Figure 1. An example of argument visualisation using Rationale software: motivation for the study that explores family forest owners' communication in decision making.

As the knowledge need, motivated by the background, is descriptive, the research task deals with the state-of-the-art of communication in decision-making context in family forestry. The following formulation of specific research questions rests on the motivation described above.

- "(1) How do family forest owners experience and use different communication options, including existing social relationships and mediated interaction, in their decision-making processes?"*
- "(2) Which are the main phenomena involved in planning-interaction that limits communicatively rational decision making (Forester, 1989, p. 53; Sager, 1994)"*
- "(3) What is the development space for planning services when pursuing social sustainability and smooth learning?"*

In order to place the study in a reasonable theoretical framework, the concepts of communicative rationality, social sustainability, and smooth learning are introduced in more detail under a separate section preceding empirical sections. This part of the report is however omitted here.

JUSTIFYING THE METHOD

When selecting the appropriate method, the first questions relate to the need of data. In our case, which is more or less explorative, empirical evidence seems necessary. But

what is required from the data to answer the research questions? How can such data be gathered? What are the validity threats of the selected methods? We have tried to state reasons for our choices in order to increase the transparency of the process. Examples:

"A reasonable method to investigate individual experiences involves personal interview, because it offers space for the interviewee's own perspectives, thus revealing underlying motivations of behaviour. ...since this present study focuses on forest owners' desires and perceptions as well as on their meaningful experiences, we consider retrospective speech obtained through in-depth interviews an adequate source of relevant data." [The character of information sought forms a basis for method selection. Our presumption here is that the rich picture of interaction desires would help practitioners to create the future services – should it have been written down more clearly?]

Perhaps the most difficult choice was to decide, of what kind would be the distribution of theoretical ideas in the report. Would the study be theory-driven (hypothetico-deductive) or data-driven (inductive), or both? We chose the last option, because we recognised our a-priori theoretical ideas simultaneously with a trust in the power of the data – this argument is not explicitly in the report, but it could be there, or should it?

"...the qualitative analysis of transcripts, which combined theory- and data-driven approaches (Layder, 1998). Our base theory presumed the significance of personal relationships and of the digital divide, thus offering a conscious perspective on the interviews. In the course of the study, interpretation of the data helped to enhance the base theory and to deepen our understanding of the role of communication-linked phenomena in decision-making processes." [Introducing the adaptive theory approach as the principle of the analysis.]

SEE(K)ING THE RESULTS

To ensure the transparency of the report it is essential to describe how the analysis was conducted. Especially the rules that guide the coding and grouping (basic phases of a qualitative text analysis) are important for readers to assess the credibility of a qualitative report. There is a difference in *seeking* for the results systematically and *seeing* them accidentally. Of course we do not neglect creative discovery, but we rely our approach more on systematic reasoning than on serendipity.

"Short anecdotes in the retrospective of the interviewees served as units of analysis providing information about the interviewees' social world and about family forest owners who make decisions aided by various moments and sequences of interaction and communication. The analysis generally followed the steps described by Creswell (2003, pp. 191–195): organising, obtaining a general sense, coding, condensing themes, representing, and interpreting." [Explaining the systematics of the analysis, justified by a reference (details of each phase omitted here).]

After finding an interesting result, one should try to rule out all validity threats. In qualitative case studies, falsifying means seeking for opposite evidence and biases in research process. Here is an example of a finding and of an opposite finding. What could have been stated as a result if either of those viewpoints had accepted without active seeking for opposite evidence?

"The interviewees revealed a desire for better services for family forest owners that would supersede the self-service that is currently available. ...

'...Now it is completely self-service and I wish that services will arise in this [forestry] branch.' (MO102, M57)

On the contrary, some owners preferred self-directive learning and interaction with illustrative simulation programmes, which may show a desire for mediated self-service in which case the owner's own initiatives and imagination would guide the activity.

'Now I've been waiting just to get it [forest plan] in this electronic form I mean... It's probably the aim to get them so that you could yourself, with a computer, do those calculations and stuff and you could see the pictures of the stands and so on...' (MO312, M43) "

Below is an example of enhancing a base theory by means of adaptive reasoning. When focusing on both positive and negative attitudes towards computers and mediated interaction, altogether four distinctive attitudes were found. We believe that there is something useful for service providers in this finding.

"As in earlier studies, the digital divide proved to be a notable phenomenon among the interviewees of this study. Attitudes towards the Internet and mediated interaction services are fundamentally dichotomised: some are interested or enthusiastic, others are reserved or suspicious."

GENERALISING THE FINDINGS

The researcher is susceptible to fail in explaining the significance of the phenomena revealed in qualitative case studies. Even if the cases are "representative" examples, a rich picture of the whole population may not be reached. This is often used as a critical argument towards case studies or qualitative research in general. However, the rich picture of the cases enables us to conceptualize the results to be logically acceptable on the phenomenon-level rather than on the population-level.

Instead of trying to generalise from case study results by statistical reasoning, it may be better to focus on *transferability of conclusions* (Tashakkori & Teddlie 1998, p. 65–66). The same principle is stated by Yin (2003, p. 54), who points out the importance of analytical generalisation and the logical use of existing theoretical knowledge. In our conclusions we have tried to state something relevant and justifiable beyond statistical (in)significance:

"...it may be reasonable to provide time and space for informal intercourse between forest owners as a part of or alongside official services. This conclusion is valid, however, only for those owners who maintain a sentimental hands-on attitude towards their forests. For purely economic financial investors, who represent an owner group of hitherto poorly estimated future size, a totally different tone of support service may work better."

"The results show a strong preference for live services: for the moment, it seems reasonable to maintain intensive face-to-face counselling and consulting while enhancing primarily technical data and document transfer procedures via the

internet. However, some signs indicate a preference for internet-mediated services to complement the live communication."

CONCLUSION: BRIDGING THE GAPS IN REASONING

The researcher has to accept that coherent reports require intellectual struggling. Argument visualisation software could be of great help in that. According to my short experience, I warmly recommend using argument maps to clarify the (re-)arrangement of reasoning. Especially in the early phases of an article project such graphical reasoning may be of help. But along with technical facilitators, one should rely on peer colleagues as well. Critical cross-reading is always a smooth method to improve the argumentation and focus on unnoticed weaknesses. My advice is to let others comment your draft texts early enough to support consistent thought-building.

Acknowledgements

Motivation for considering argumentation arose from the postgraduate course "Argumentative writing" at the Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinki. Supportive discussions with teachers Hannu Rita and Timo Tuomivaara as well as peer colleagues were inspiring. This article is based both on a talk in DFRM-colloquium and on an oral presentation given at YHYS Conference (November 23–24, 2006, Tampere, Finland), workshop "How to emancipate Finnish forestry practices by qualitative case study research?" Katja Tervo, Riku Rinnekangas and Leena Leskinen provided valuable comments on an earlier version of this paper.

REFERENCES

- Hujala, T. & Tikkanen, J. 2008. Boosters of and barriers to smooth communication in family forest owners' decision making. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23, 466–477.
- Moore, R. 2006. "My words fly up, my thoughts remain below." *Shakespeare Quotes eNotes Publishing, eNotes.com* [Cited 7 September 2009]. <<http://www.enotes.com/shakespeare-quotes/my-words-fly-up-my-thoughts-remain-below>>
- Tashakkori, A. & Teddlie, C. 1998. *Mixed Methodology: Combining Qualitative and Quantitative Approaches*. 1st ed. Sage Publications, Thousand Oaks.
- Yin, R.K. 2003. *Case study research : Design and methods*. 3rd ed. Sage Publications, Inc., Thousand Oaks.

LÄMPÖTILAN VAIKUTUS MÄNNYN PITUUSKASVUUN LAPISSA

Hannu Salminen¹

JOHDANTO

Puiden kasvun ja ympäristötekijöiden välisen yhteyden tutkiminen on jo vakiintunut tieteenala. Dendrokronologia (*dendron* = puu, *chronos* = aika, *logos* = puhe, sana, oppi) perustuu puiden vuosilustojen tutkimiseen. Kasvuvuoteensa ajoitettujen vuosirenkaiden ominaisuuksista voidaan tehdä johtopäätöksiä siitä, minkälaisissa kasvuolosuhteissa vuosirengas on muodostunut. Tämän sinänsä yksinkertaisen tarkastelun avulla voidaan johtaa niin biologeja kuin historioitsijoitakin kiinnostavia päätelmiä. Dendrokronologian keskeisimpiä osa-alueita on dendroklimatologia, jossa puiden kasvun ja ilmaston välistä yhteyttä käytetään menneen ilmaston rekonstruointiin.

Oma aiheeni sijoittuu dendroekologiaan alaan, jonka painopisteenä on puista mitattujen kasvuajasarjojen hyödyntäminen ekosysteemin tutkimuksessa. Dendroekologia – kuten muutkin dendrokronologian osa-alueet – rakentuu pääasiassa vuosilustoista saatavan informaation varaan. Vuosilustojen kerääminen ja mittaaminen on suhteellisen helppoa, ja havaintojen toistomäärän kasvattaminen ei nosta kustannuksia kohtuuttomasti. Lustonleveys ei kuitenkaan ole paras mahdollinen ilmaston mittari, sillä se reagoi herkästi esimerkiksi hakkuista johtuviin kasvutilan muutoksiin. Niukkuuden vallitessa puu allokoii resursseja ensin strategisesti tärkeisiin kohteisiin, joita ovat esimerkiksi kukinta ja siementuotanto sekä valokilpailun vallitessa pituuskasvu. Niinpä pituuskasvun vuotuinen vaihtelu seuraa läpimitan kasvua paremmin nimenomaan kasvun minimitelijän vaihtelua, joka pohjoista metsänrajaa lähestyttäessä on useimmin kasvukauden aikainen lämpötila. Pituuskasvun tarkka mittaaminen ja pitkien havaintosarjojen muodostaminen on työlästä, jos sitä verrataan vuosilustojen keruuseen ja käsittelyyn. Lumi-, hyönteis- ja sienituhoista tai kilpailevien puiden aiheuttamasta mekaanisesta rasituksesta johtuvat ranganvaihdot ovat nuorissa männiköissä enemmän sääntö kuin poikkeus, joten pelkkien oksakiehkuroiden välisten etäisyyksien mittaaminen voi johtaa virheellisiin tuloksiin.

Vuosiluston leveyden ja vuosikasvaimen pituuden ohella puista voidaan kerätä paljon muuta vuositason kehitykseen sidottavissa olevaa tietoa. Vuosilustotutkimus onkin siirtynyt pelkkien vuosirenkaiden leveyksien tarkastelusta ns. multiproksilähestymiseen, jossa puun kehityksen piirteitä kuvaavien aikasarjojen avulla tuotetaan entistä laajempi ja tarkempi kuvaus kasvun vaihtelusta ja kasvuympäristön siihen aiheuttamista muutoksista. Uusimpia tulokkaita pitkien ympäristöajasarjojen joukkoon ovat neulasjälkimenetelmällä (Needle Trace Method, NTM) tuotetut puun pääranan neulasyntetisyyttä kuvaavat aikasarjamuuttujat kuten neulastuotanto, neulastiheys ja neulasvuosikertojen määrä (Jalkanen 1995, Aalto ja Jalkanen 1998, Jalkanen ym. 1998, Jalkanen 2000, Jalkanen ym. 2002).

¹Metsäntutkimuslaitos, Rovaniemen toimintayksikkö, PL 16, FI-96300 Rovaniemi, Puh: +358 10 211 4541, Fax: +358 10 211 4401, E-mail: etunimi.sukunimi@metla.fi

Männyn (*Pinus sylvestris* L.) pituuskasvu on ennalta määräytynyttä; latvasilmuun luodaan lopulliseen latvakasvaimen tulevien ”kasvuyksikköjen” aiheet jo varsinaista kasvuvuotta edeltävällä kaudella, ja pituuskasvu on päätesilmuun muodostuneiden kasvuaiheiden erilaistumista ja venymistä lopulliseen mittansa. Männyn pituuskasvuyksikkö on kahden peräkkäisen ”solmukohdan” (engl. *node*) rajaama osa pituuskasvainta (Doak 1935). Solmukohdat ovat useimmiten ja kasvaimen keskiosassa yksinomaan lyhytversoja (kääpiöversoja, neulaspareja) (Kanninen 1990). Vuosikasvaimen pituus on yksinkertaistettuna pituuskasvuyksiköiden keskimääräisen loppupituuden ja lukumäärän tulo. Päätesilmu muodostuu edellisen vuoden pituuskasvun päättymisen aikoihin. Suurelta osin tuon ajankohdan kasvulosuhteet määräävät kasvuyksiköiden lukumäärän ja siten myös kasvaimen lopullisen pituuden (Junttila 1986).

Vastaavasti myös neulastiheys (kääpiöversotiheys) määräytyy pääsääntöisesti jo edellisenä kesänä. Kasvukesän olosuhteet – etenkin ääritilanteet – voivat ”hienosäätää” kasvaimen lopullista pituutta ja vaikuttaa sitä kautta neulastiheyteen. *Pinus*-suvun männyillä kasvupyrähdyksiä voi olla useampiakin, mutta kotimaisella männyllä niitä on yksi ja se ajoittuu kasvukauden alkupuolelle (Lanner 1976). Poikkeuksellisen lämpimissä ja/tai ravinteikkaissa oloissa, esimerkiksi kasvihuoneissa, varsinaista pituuskasvujaksoa saattaa seurata ns. jälkikasvu (engl. *lammas growth*), joka on itse asiassa seuraavan vuoden pituuskasvun ”varaslähtö” (Kanninen 1990). Jälkikasvuinen silmu talvehtii osittain auki kasvaneena ja jatkaa kasvuaan seuraavana kasvukautena.

Kasvupaikan ominaisuudet ohjaavat puun kasvua. Mikäli ominaisuuksissa on vaihtelua, se heijastuu myös puiden kasvussa. Etenkin Pohjois-Suomessa, missä ilmasto rajoittaa puiden levinneisyyttä ja kasvua, ilmastollinen vaihtelu korostuu puiden vuotuisen ja kasvukauden aikaisen kasvun vaihtelussa. Fotosynteesissä tarvitaan auringonvaloa, vettä, ravinteita ja hiilidioksidia. Fotosynteesin valoreaktion nopeus riippuu säteilyn määrästä mutta ei lämpötilasta. Toisaalta korkea säteilyn intensiteetti nostaa myös lämpötilaa. Lämpötila on merkittävä fotosynteesin pimeäreaktiolle ja vaikuttaa yleisestikin useimpien kemiallisten reaktioiden nopeuteen. Hengitykseen tarvitaan lisää energiaa lämpötilan noustessa, joten nettofotosynteesi alkaa laskea lämpötilan kohotessa riittävän korkealle. Fotosynteesillä on siis optimilämpötila, mutta se ei ole vakio, vaan vaihtelee kasvukauden ja fenologisten vaiheiden mukaan.

Kasvun lämpötilavastetta voidaan tarkastella eri aikaskaaloissa. Välitön vaste voi olla hieman erilainen kuin esimerkiksi koko kasvukauden vaste keskilämpöön tai kymmenien vuosien keskikasvun vaste ilmaston pitkäaikaiseen muuttumiseen. Vasteen suuruus ja herkkyys muutoksiin voi riippua myös puun kehitysvaiheesta sekä sen elinkaareissa että kasvukauden aikana.

Lämpötila ja sadanta ovat yleisesti mitattuja suureita, joten on luontevaa käyttää niitä mallitettaessa ilmaston vaikutusta puiden kasvun vuosivaihteluun, vaikka juuriston käytettävissä oleva vesi ei yleensä rajoitakaan kasvua Pohjois-Suomessa (Mikola 1950). Kasvukauden aikainen sadanta on jossain määrin yhteydessä lämpötilaan; yleensä sateinen kasvukausi on myös keskimääräistä viileämpi. Sadannalla on myös epäsuoria vaikutuksia kuten lumipeitteen merkitys roudan syntyyn ja lumen sulamisvesien aiheuttamat muutokset kasvukauden alun olosuhteisiin.

Ravinteiden saatavuus sekä tuhohyönteisten ja -sienten esiintyminen voivat vaikuttaa kasvuun ja ne riippuvat osittain ilmaston vaihtelusta. Sadanta ja etenkin kasvukauden aikainen lämpötila vaikuttavat puiden kasvuun siis sekä suorasti että epäsuorasti. Vaikka monet ympäristötekijät ohjaavat puun kasvua, voidaan sanoa, että kasvukauden

aikainen lämpötila on suurin yksittäinen puun kasvuun vuosivaihtelua aiheuttava tekijä Pohjois-Suomessa.

Tämän viiteen osajulkaisuun perustuvan artikkelin keskeiset tutkimuskysymykset liittyvät männyn kasvuun Pohjois-Suomessa:

1. Miten lämpötila vaikuttaa pituuskasvun kulkuun kasvukauden aikana ja miten pituuskasvun päätyminen voidaan mallittaa (IV: Salminen ja Jalkanen 2007)?
2. Miten kuukausilämpötilat vaikuttavat pituuskasvun vuosien väliseen vaihteluun (I: Salminen ja Jalkanen 2004, II: Salminen ja Jalkanen 2005)?
3. Mikä on pituuskasvun ja neulastiheyden välinen yhteys ja voidaanko sen avulla tarkentaa pituuskasvun ja lämpötilan riippuvuutta (III: Salminen ja Jalkanen 2006)?
4. Millä tavalla läpimitan ja pituuden kasvun vaihtelu poikkeavat toisistaan ja mikä on niiden välinen riippuvuus (V: Salminen ym. 2009)?

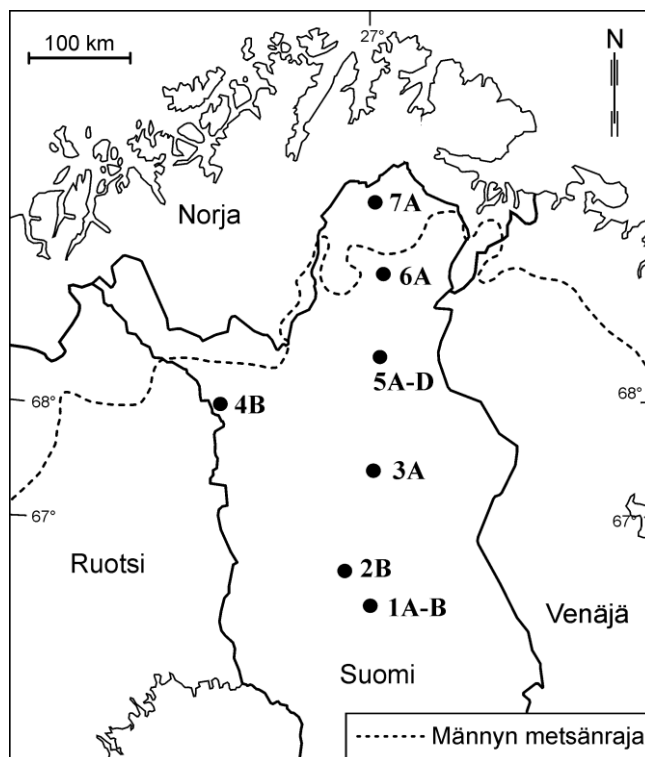
AINEISTO JA MENETELMÄT

Osajulkaisuissa on käytetty kolmea eri aineistoa, jotka on kerätty osittain samoilta paikkakunnilta (kuva 1). Vuotuista pituuskasvua ja neulastiheyttä tutkittiin aineistolla, joka on mitattu viideltä eri paikkakunnalta valituista kaatokoepuista (taulukko 1). Kasvukesän alun olosuhteiden vaikutusta yksittäisten puiden kehitykseen tutkittiin yhden paikkakunnan havaintojen perusteella, ja kaikkia viittä paikkakuntaa käytettiin kattavammissa pituuskasvun ja neulastiheyden tarkastelussa. Fenologiaa ja pituuskasvun kulkua kasvukauden aikana seurattiin neljässä metsikössä 2–7 päivän välein 3–4 peräkkäisen kasvukauden aikana, ja lämpötila mitattiin päivittäin koemetsiköihin sijoitetuilla mitta- ja tiedonkeruulaitteilla (taulukko 2). Pituus- ja läpimitan kasvun eroja tarkasteltiin keräämällä aineisto kahdesta vierekkäisestä mutta eri-ikäisestä puustosta koostuvasta metsiköstä (taulukko 3). Yksi paikkakunta, Inarin Laanila, oli mukana kaikissa koesarjoissa.

Taulukko 1. Vuotuisen pituuskasvun ja neulastiheyden tutkimuskohteiden yleistiedot.

Metsikkö	1A	3A	5A	6A	7A
Sijainti	Rovaniemi, Vanttauskoski	Sodankylä	Inari, Laanila	Inari, Kaamanen	Utsjoki, Kenesjärvi
Pohj.lev.	66°22'	67°22'	68°30'	69°07'	69°40'
It.pit.	26°43'	26°38'	27°30'	27°15'	27°05'
Kork. mpy, m	150	180	220	155	110
Kasvupaikkatyyppi ¹⁾	EV	UVE	UEM	UVE	EV
Koepuiden lukumäärä	9	10	10	10	10
Koepuiden keskim. d _{1,3} -ikä	33	51	34	42	46

¹⁾EV = Empetrum-Vaccinium, MCCI = Myrtillus-Calluna-Cladina, UEM = Uliginosum-Empetrum-Myrtillus.



Kuva 1. Koemetsiköiden sijainnit. Vuotuisen pituuskasvun ja neulastiheyden vaihtelu (1A–5A), pituuskasvu kasvukauden aikana (1B, 2B, 4B ja 5B) sekä pituuskasvun ja läpimitan kasvun vaihtelu (5C ja 5D).

Koepuiksi pyrittiin valitsemaan aukealla paikalla häiriöttä kasvaneita yksilöitä, joissa ei ollut näkyviä vaurioita tai tuhoja. Poikkeuksen muodostivat metsikön 5C koepuut. Ne poimittiin noin 150 vuoden ikäisistä poimintahetkellä terveistä ja hyväkuntoisista puista, joiden kehityshistoria ei kuitenkaan ollut tarkasti tiedossa.

Taulukko 2. Kasvukauden aikaisen pituuskasvun tutkimuskohteiden yleistiedot.

Metsikkö	1B	2B	4B	5B
Sijainti	Rovaniemi, Vanttauskoski	Rovaniemi, Perunkajärvi	Muonio, Kätkäsuvanto	Inari, Laanila
Pohj.lev.	66°22'	66°45'	68°08'	68°30'
It.pit.	26°43'	26°00'	23°21'	27°30'
Kork. moy. m	150	164	250	220
Kasvupaikkatyppi ¹⁾	EV	MCCI	MCCI	UEM
Lämpösumma ²⁾	890	749	703	662
Koepuiden lukumäärät				
2000	5 ³⁾	—	—	5 ³⁾
2001	15	11	—	5
2002	15	11	—	4 ⁴⁾
2003	15 ⁵⁾	10 ⁴⁾	5	5

¹⁾EV = Empetrum-Vaccinium, MCCI = Myrtillus-Calluna-Cladina, UEM = Uliginosum-Empetrum-Myrtillus. ²⁾1961-1990 keskiarvo. ³⁾Eri koepuut kuin vuosina 2001-2003, ⁴⁾Yksi tuhoutunut koepuu jätettiin mittaamatta, ⁵⁾Yksi tuhoutunut puu korvattiin uudella koepuulla.

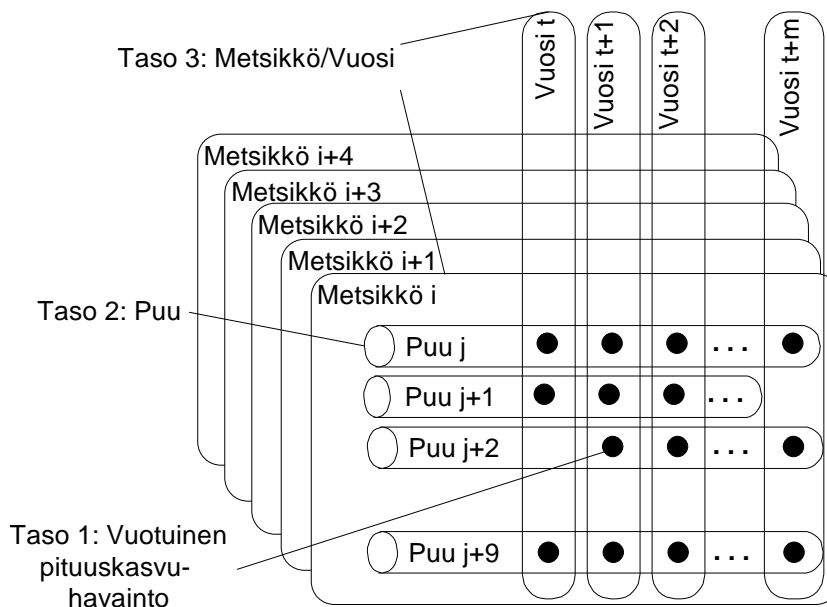
Vuotuisen kasvun vaihtelua tutkittiin mittaamalla kaatokoepuista pituuskasvut (Salminen ja Jalkanen 2004, Salminen ja Jalkanen 2005) sekä neulastiheys (Salminen ja Jalkanen 2006) ja läpimitan kasvu (Salminen ym. 2009). Koepuiden rinnankorkeusikä oli noin 50–150 vuotta, ja niiden kasvua verrattiin Ilmatieteen laitoksen mittauspisteissä vuodesta 1908 (päivittäishavainnot vuodesta 1961) mitattuihin kuukausilämpötiloihin, joita täydennettiin Torniolaaksoon vuosille 1802–1957 konstruoidulla aineistolla (Klingbjer ja Moberg 2003).

Taulukko 3. Vuotuisen pituuskasvun ja läpimitan kasvun tutkimuskohteiden yleistiedot.

Metsikkö	5C	5D
Sijainti	Inari, Laanila	Inari, Laanila
Pohj.lev.	68°30'	68°30'
It.pit.	27°28'	27°28'
Kork. mpy, m	220	220
Koepuiden keskim. d _{1,3} -ikä	158	42
Mittausvuosi: koepuiden lukumäärä	2003: 5 2005: 5	2000: 5 2001: 5 2002: 5 2003: 5 2004: 5
Koepuiden lukumäärä yhteensä	10	25

Samasta puusta tehdyillä perättäisillä havainnoilla on riippuvuus rakenne, jonka voimakkuuteen vaikuttavat havainnoitavan muuttujan ominaisuudet ja havaintojen ajallinen välimatka. Samasta metsiköstä poimituilla koepuilla on myös sijainnin ohjaama keskinäinen riippuvuus. Lisäksi eri puista ja jopa eri metsiköistä samaan aikaan tehdyillä havainnoilla on mittaamisajankohtaan liittyvää samankaltaisuutta. Esimerkiksi saman vuoden vuosikasvut noudattavat kyseisen vuoden kasvuolosuhteiden yleistä tasoa. Puista mitattuja vuotuisia kasvuja sisältävät aineistot ovat siten rakenteeltaan kolmitasoisia; alimmalla tasolla ovat yksittäiset kasvuhavainnot, toisella tasolla yhden puun kaikki havainnot, ja kolmannella tasolla yhden metsikön kaikki koepuut tai yhden vuoden kaikki kasvuhavainnot (kuva 2). Vuosi ei määritä havaintoja selkeän hierarkkisesti, koska jokainen havainto kuuluu johonkin vuoteen, mutta yksikään puu tai metsikkö ei. Siinä mielessä vuosi voisi edustaa myös 2-tasoa. Toisaalta vuosi ei ole samalla tavalla 2-tason luokittaja kuin puu, joka kuuluu aina yhteen ja vain yhteen metsikköön.

Pituuskasvun ja ilmastotekijöiden (Salminen ja Jalkanen 2005) sekä pituuskasvun ja neulastiheyden yhteyttä (Salminen ja Jalkanen 2006) koskevien osa-aineistojen rakenne oli samankaltainen (kuva 2). Pituuskasvun ja läpimitan kasvun tarkastelu (Salminen ym. 2009) perustui kahden vierekkäisen metsikön käyttöön, joten metsiköt eivät edustaneet eri paikkakuntia. Kasvukesän ilmastovaikutukseen ja pituuskasvun puutason vaihteluun keskittynyt osatutkimus sisälsi vain yhden metsikön (6A, kuva 1) ja oli siten rakenteeltaan vielä yksinkertaisempi (Salminen ja Jalkanen 2004).



Kuva 2. Aineistojen rakenne.

Kasvukauden aikaisen kehityksen tarkastelu poikkesi muista osatutkimuksista jo käytetyn havaintovälin ja aikaperspektiivin vuoksi (Salminen ja Jalkanen 2007). Siinä kumulatiivisen pituuskasvun selittäväksi muuttujaksi valikoitui lämpösummakertymä. Malli oli muodoltaan epälineaarinen (kaava 1). Lähtökohdaksi otettua Gompertz – funktiota yksinkertaistettiin käyttämällä sekä selitettävästä että selittävästä muuttujasta suhteellista arvoa. Samalla eri metsiköiden tulokset tulivat paremmin yhteismitallisiksi. Pituuskasvu suhteutettiin kunkin kasvukauden lopulliseen pituuteen, ja lämpösummakertymä kyseisen paikkakunnan pitkäaikaiskeskiarvoon (1961–1990 jakso).

$$H(GDD) = \frac{100}{e^{b \cdot (GDD - c)}} \quad (1)$$

missä H on puun suhteellinen pituus ja GDD suhteellinen lämpösummakertymä sekä b ja c parametreja. Mallin parametrit ratkaistiin ensin koko aineistolle ja sitten tasapainoisella osa-aineistolla (metsiköt 1B, 2B ja 5B, vuodet 2001–2003) tarkastellen myös metsikkö- ja vuositaso satunnaisvaihtelua. Koska käytetty ohjelmisto (SAS NLMIXED) sallii vain yhden satunnaismuuttujan, metsikkö- ja vuositaso vaikutusta testattiin erikseen.

Vuotuisten havaintojen tilastollisen analyysin päävaiheet olivat esikäsittely, potentiaalisten kohdemuuttujan vaihtelua selittävien ilmastomuuttujien valinta ja kohdemuuttujan ilmastovasteen tarkempi mallittaminen (taulukko 4). Mahdollisten selittävien muuttujien valinta tehtiin ristikorrelaatioanalyysillä, jonka tuloksia tulkittiin myös sellaisenaan. Aikasarjojen korrelaatioanalyysi voi johtaa virheellisiin päätelmiin, jos analysoidavissa sarjoissa on voimakkaita trendejä tai samankaltainen autokorrelaatorakenne. Siksi esikäsittelyssä mitatuista puukohtaisista havainnoista puhdistettiin autokorrelaation ja tutkimuskysymysten kannalta häiritsevien trendien vaikutusta sekä muodostettiin metsikkökohtaisia indeksisarjoja (kronologioita). Jos tutkimus keskittyy kasvun ilmastovasteeseen, ikään ja metsikön käsittelyyn liittyvät

trendit ja vaihtelu eivät ole kiinnostavia ja voidaan irrottaa aineistosta omaksi komponenttikseen. Trendipuhdistus on tehtävä harkiten, sillä siinä voidaan poistaa myös tutkimuskysymysten kannalta kiinnostavaa informaatiota. Tämä on otettava huomioon etenkin ei-deterministisiä menetelmiä käytettäessä.

Taulukko 4. Eri osatutkimuksissa käytetyt analyysimenetelmät ja ohjelmistot.

Osatutkimus	Viite	Esikäsittely (detrendaus, esivalkaisu ja kronologian muodostaminen)	Mallitus
Kasvukauden alun lämpötilan merkitys pituuskasvulle	I	lineaarinen trendi, autokorrelaation suodatus, SAS ARIMA ja SAS Forecast Builder	lineaarinen siirtofunktio, SAS ARIMA
Pituuskasvun ja ilmastomuuttujien yhteys	II	lineaarinen sekamalli, SAS MIXED	lineaarinen sekamalli (monitasomalli), SAS MIXED
Pituuskasvun ja neulastiheyden riippuvuus	III	lineaarinen sekamalli, SAS MIXED	lineaarinen sekamalli (monitasomalli), SAS MIXED
Pituuskasvun ja läpimitan kasvun yhteys	V	splini-tasointi, autokorrelaation suodatus, ARSTAN	Vektori-autoregressiivinen vuorovaikutusmalli, SAS VARMAX
Pituuskasvu kasvukauden aikana	IV		Epälineaarinen sekamalli, SAS NLMIXED

Trendipuhdistusmenetelmät olivat joko deterministisiä tai ei-deterministisiä. Esimerkkinä deterministisestä menetelmästä on kasvutrendin selittäminen puun iällä ja jäljelle jäävän ”oikaistun” indeksisarjan jatkotarkastelu. Vuosilustotutkimuksessa yleisin ei-deterministinen menetelmä on havaintosarjan vaihteluiden tasoittaminen splini-funktion avulla (Cook ja Kairiukstis 1990). Niinpä pituuskasvun ja läpimitan kasvun aikasarjojen vertailussa sovellettiin ARSTAN-ohjelmistossa toteutettua splini-mallitusta 30 vuoden jaksoissa. Sen sijaan pituuskasvua ja neulastiheyttä tarkasteltaessa sekä korrelaatioanalyysiä edeltävä trendien ja autokorrelaation suodattaminen että lopullinen kasvumalli laadittiin sekamallimuotoisena.

Lineaarista sekamallia sovellettiin pituuskasvu- ja neulastiheysaineistojen analysointiin seuraavissa muodoissa:

$$\log(Y_{ijt}) = \beta_0 + X_{ijt}\beta + z_i + w_t + k_{it} + v_{ijt} + \varepsilon_{ijt} \quad (2)$$

missä Y_{ijt} on metsikön i puun j mitattu tunnus (pituuskasvu tai neulastiheys) vuonna t , β_0 on vakio (keskikasvu), $X_{ijt}\beta$ on mallin kiinteä osa, z_i on satunnainen metsikkövaikutus, u_j on satunnainen puuvaikutus, w_t on satunnainen vuosivaikutus, k_{it} on vuoden t ja metsikön i satunnainen yhdysvaikutus ja $v_{(ijt)}$ on metsikön i puun j autokorreloitunut virhetermi vuonna t ja ε_{ijt} on jäännösvaihtelu. Mallin varianssikomponenttien rakenne oli lohkodeagonaalinen, jossa jokaisessa diagonaalielementissä (alimmalla tasolla) oli autokorrelatiivinen pitkittäisrakenne.

Pituuskasvun vaihtelua selitettiin puun iällä (2. asteen polynomi) ja vastaavasti neulastiheyttä pituuskasvulla muodossa $ae^{b/iH}$, missä iH on puun pituuskasvu sekä a ja b metsikkökohtaisia vakioita, joiden arvot estimoitiin erikseen. Kun kiinteänä selittäjänä käytettiin vain mainittuja puukohtaisia (puun ikä tai pituuskasvu), vuosivaikutusten (w_t+k_{it}) estimaatit poimittiin metsikkökohtaisiksi kronologioiksi. Vastaavaa menettelyä läpimitan kasvulle ovat soveltaneet mm. Henttonen (Henttonen 1990) ja Miina (Miina 2000).

Vaihtelun osuuksia monitasomallien eri tasoille voidaan tarkastella ”tyhjän mallin” varianssikomponenttien avulla. Siinä ei ole lainkaan kiinteitä selittäjiä, vaan pelkästään vakio ja eri tasojen satunnaismuuttujat. Jos merkitään kolmitasoisen mallin alimman tason (vuosikasvu), puutason sekä vuosi- ja metsikkötason variansseja σ_{ei}^2 , σ_{ui}^2 ja σ_{vi}^2 , joissa i on 0 (tyhjä malli) tai 1 (täysi malli), voidaan vaihtelun jakautumista toiselle ja kolmannelle tasolle arvioida kaavoilla (Hox 2002):

$$\rho_2 = \frac{\sigma_{u0}^2 + \sigma_{v0}^2}{\sigma_{u0}^2 + \sigma_{v0}^2 + \sigma_{e0}^2} \quad (3)$$

$$\rho_3 = \frac{\sigma_{v0}^2}{\sigma_{u0}^2 + \sigma_{v0}^2 + \sigma_{e0}^2} \quad (3)$$

Kiinteiden selittäjien vaikutusta eri tasojen varianssiin selvitettiin vertaamalla ”tyhjää mallia” ja ”täyttä mallia”, jossa on mukana kaikki selittäjät. Eri tasoilla selitetyn varianssin määrä laskettiin kaavoilla (Snijders ja Bosker 1999)

$$R_1^2 = 1 - (\sigma_{e1}^2 + \sigma_{u1}^2 + \sigma_{v1}^2) / (\sigma_{e0}^2 + \sigma_{u0}^2 + \sigma_{v0}^2) \quad (4)$$

$$R_2^2 = 1 - \left(\frac{\sigma_{e1}^2}{n} + \sigma_{u1}^2 + \sigma_{v1}^2 \right) / \left(\frac{\sigma_{e0}^2}{n} + \sigma_{u0}^2 + \sigma_{v0}^2 \right) \quad (5)$$

$$R_3^2 = 1 - \left(\frac{\sigma_{e1}^2}{nm} + \frac{\sigma_{u1}^2}{m} + \sigma_{v1}^2 \right) / \left(\frac{\sigma_{e0}^2}{nm} + \frac{\sigma_{u0}^2}{m} + \sigma_{v0}^2 \right) \quad (6)$$

missä n ja m ovat mittauskertojen ja kussakin metsikössä olevien koepuiden keskimääräiset lukumäärät.

Mahdollisia selittäjiä lopulliseen pituuskasvumalliin etsittiin kronologioiden ja kuukausitason ilmastomuuttujista korrelaatioanalyysin avulla. Mallin muuttujien valintaperusteena käytettiin sekä niiden merkittävyyttä lopullisissa kasvumallissa että koko mallin sopivuutta kuvaavan Akaiken informaatiokriteerin muutosta (Littell ym. 1996). Residuaaleja tarkasteltiin sekä graafisesti että aikasarja-analyysillä. Kun kaikki selittävät muuttujat olivat mallissa, vuosivaikutusten estimaatit tulkittiin selittämättä jääneeksi vuositason vaihteluksi. Tulosten konkretisoimiseksi lopullista kasvumallia sovellettiin ennusteiden laskentaan, jolloin linearisoinnin yhteydessä tuloksiin lisättiin virhevarianssikorjaus (Flewelling ja Pienaar 1981).

Pituuskasvun ja läpimitan kasvun välinen yhteys mallitettiin dynaamisella aikasarjamallilla, jossa oli mukana endogeenisten eli molempien kasvutunnusten lisäksi eksogeenisena muuttujana heinäkuun keskilämpötila sekä kaikkien muuttujien autoregressiiviset komponentit (VARMAX, vektori-autoregressiivinen malli eksogeenisilla muuttujilla). VAR(p,s) -mallin rakenne on seuraava:

$$y_t = \delta + \sum_{i=1}^p \phi_i y_{t-i} + \sum_{i=0}^s \Theta_i^* x_{t-i} + \varepsilon_t \quad (7)$$

missä $y_t = (y_{1t}, \dots, y_{rt})'$ on endogeenisten ja $x_t = (x_{1t}, \dots, x_{rt})'$ eksogeenisten muuttujien aikasarjavektori, p ja s viiveiden pituudet sekä ϕ_i ja Θ_i^* kerroinmatriiseja.

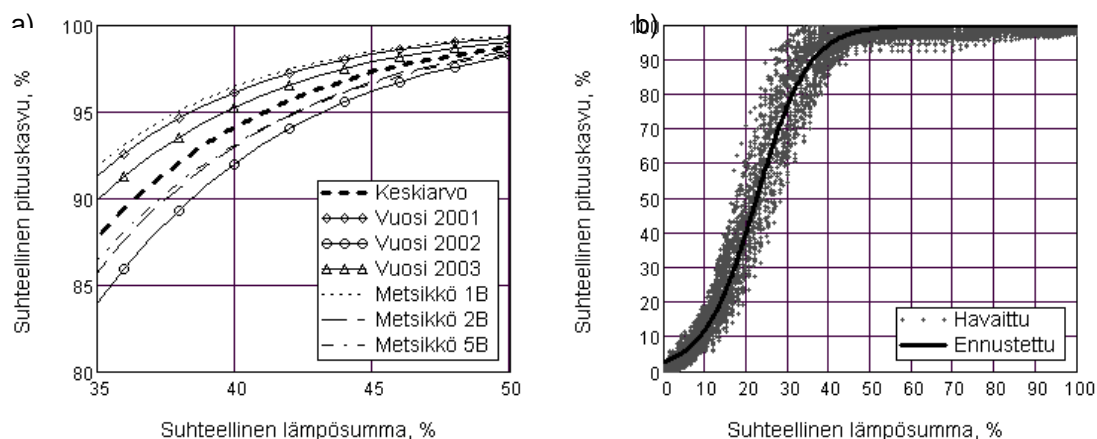
Pituuskasvun ja läpimitan kasvun vastetta erimittaisille ja eri ajankohtaan sijoitetuille lämpötilajaksoille testattiin suorahakumenetelmää käyttäen (Hooke and Jeeves 1961). Jaksojen alku ja loppu (jakson pituus) määritettiin joko kalenteripäivien tai lämpösummakertymän avulla, joten erilaisia määrittelyjä oli yhteensä neljä (kalenteripäivästä kalenteripäivään, lämpösumma-arvosta lämpösumma-arvoon, kalenteripäivästä lämpösumma-arvoon ja lämpösumma-arvosta kalenteripäivään). Maksimoitavaksi tavoitefunktioksi asetettiin lineaarinen korrelaatio kasvumuuttujan ja vastaavan lämpötilamuuttujan välille. Pituuskasvun yhteydessä käytettiin edellisen vuoden lämpötiloja. Optimiratkaisua haettiin muuttamalla jakson alkua ja loppua päivän tai lämpösummayksikön tarkkuudella.

TULOKSET

Kasvukauden aikainen pituuskasvu

Pituuskasvu käynnistyy keväällä lämpötilan ohjaamana, ja lämpötila on myös tärkein kasvun etenemistä selittävä tekijä. Kolmen perättäisen vuoden havaintosarjassa aikaisimman ja myöhäisimmän kasvuun lähdön ero oli eteläisimmässä kohteessa viikko ja pohjoisimmassa kaksi viikkoa. Päivittäiskasvu kiihtyy päivien lämmitessä ja saavuttaa huippunsa yleensä aivan alkukesästä. Päivittäiskasvun keskimääräinen taso korreloi vuosikasvaimen lopullisen pituuden kanssa, mutta kasvujakson pituuden ei. Tässä aineistossa huippukasvun ajankohta vaihteli 2–3 viikkoa vertailtaessa eri vuosia ja paikkakuntia. Pituuskasvuyksiköiden saavutettua lopullisen mittansa — yleensä heinäkuun alkupuolella — kasvu hiipuu, jonka jälkeen latvasilmu venyy vielä hieman. Pituuskasvu määriteltiin päättyneeksi, kun kasvain oli saavuttanut 95% lopullisesta pituudestaan.

Pituuskasvukertymää kuvattiin mallilla, jossa selittävänä muuttujana oli lämpösummakertymä (kaava 1). Riippumatta pituuskasvun määrästä se päättyi, kun noin 40% paikkakunnan pitkäaikaisesta lämpösummasta oli kertynyt (kuva 3b). Poikkeuksellisen lämpimänä vuonna 2002 lämpösummaa ”ehti” kertyä hieman enemmän muihin vuosiin verrattuna ennen kuin pituuskasvu päättyi (kuva 3a).



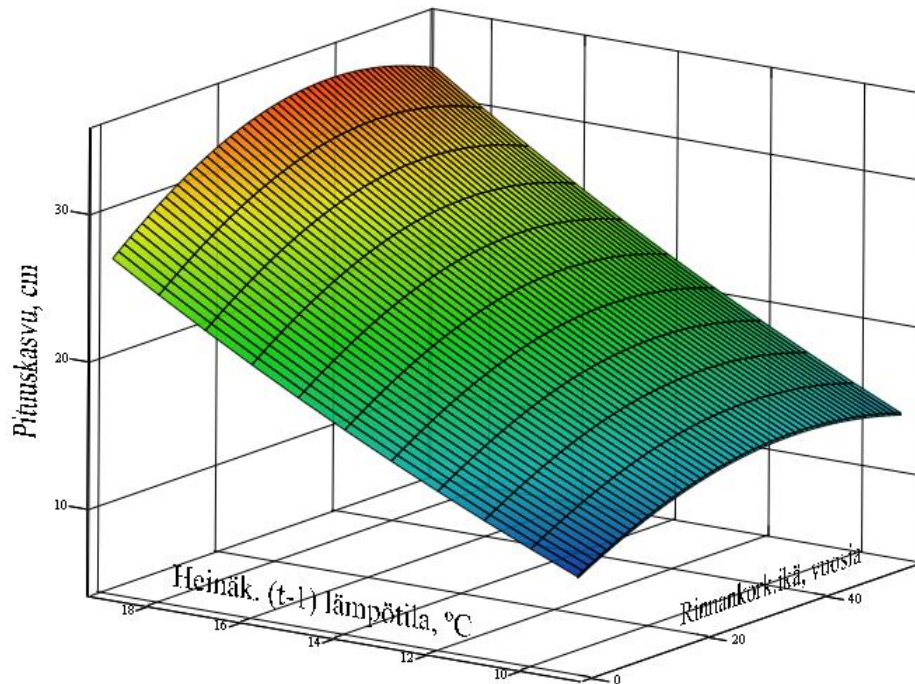
Kuva 3. Männyn kasvukauden aikainen pituuskasvu suhteessa lämpösuummakertymään tasapainoisessa osa-aineistossa (a) ja koko aineistossa (b) (Salminen ja Jalkanen 2007). Pituuskasvu esitetään suhteessa kasvaimen lopulliseen pituuteen ja lämpösuummakertymä suhteessa kasvupaikan vuosille 1961-1990 laskettuun keskiarvoon.

Metsikön sisällä kasvurytmi vaihteli muutaman päivän. Aikaisin kasvuun lähteneet puut myös päättivät kasvunsa aikaisemmin. Niiden sijainti oli yleensä edullinen ja kasvun taso korkeampi kuin hieman myöhemmin kasvavilla puilla. Lähes kaikki puut kuitenkin saavuttivat 95%:n pituuskasvurajan viimeistään suhteellisen lämpösuumman ylitettyä 45%:n tason (kuva 3b).

Lämpötilan vaikutus vuotuisen pituuskasvuun ja neulastiheyteen sekä pituus- ja läpimitan kasvun suhteeseen

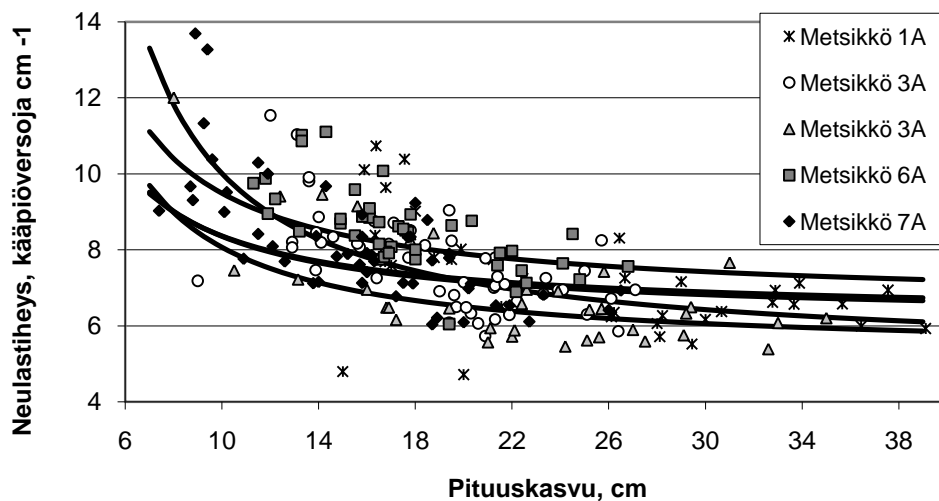
Edellisen kesän lämpötilan vaikutus seuraavan kesän pituuskasvuun on tiedetty jo pitkään (Hesselman 1904). Tässä tutkimuksessa voitiin myös estimoida sekä ilmastomuuttujien osuus pituuskasvun vaihtelusta että lämpötilan vaikutus tulevaan pituuskasvun määrään. Kuukausitason muuttujista edellisen heinäkuun lämpötila on tärkein pituuskasvuun vaikuttava ilmastomuuttuja. Sen ohella kasvukauden alun lämpötilalla oli joissakin kohteissa havaittavaa mutta vähäistä vaikutusta (Salminen & Jalkanen 2004, 2005). Kaksi vuotta aikaisemman marraskuun keskilämpötilalla oli korrelaatioanalyysin mukaan tilastollisesti merkitsevä negatiivinen vaikutus pituuskasvuun, mutta se ei kuitenkaan parantanut pituuskasvun vuosivaihtelua kuvaavan mallin sopivuutta. Mallissa selittäväksi muuttujaksi valikoitui puun iän lisäksi ainoastaan edellisen heinäkuun lämpötila, joka selitti 74 % pituuskasvun vuosivaihtelusta.

Kun mallia sovellettiin ennustamiseen käyttäen tutkimusjakson aikana mitattuja kuukausilämpötiloja, yhden asteen marginaalisen muutoksen vaikutus seuraavan vuoden pituuskasvuun oli 1,8 cm ja keskimääräisen pituuskasvun vaihteluväli 15–32 cm (kuva 4).



Kuva 4. Pituuskasvumallin soveltaminen; edellisen heinäkuun lämpötilan ja puun rinnankorkeusiän vaikutus vuotuisen pituuskasvuun.

Neulastiheys riippuu pääsääntöisesti pituuskasvusta, jonka vaihtelu selitti yhdessä puun iän kanssa noin puolet neulastiheyden vaihtelusta (Salminen ja Jalkanen 2006). Neulastiheyden ja pituuskasvun yhteys on epälineaarinen; huonon pituuskasvun vuosina neulastiheys on korkea, mutta keskimääräisen ja hyvän kasvun vuosina tiheys pysyy samalla tasolla (kuva 5). Myös metsikön sisällä on tasoeroja; hyvin kasvavien puiden neulastiheys on alempi kuin huonommin kasvavien.

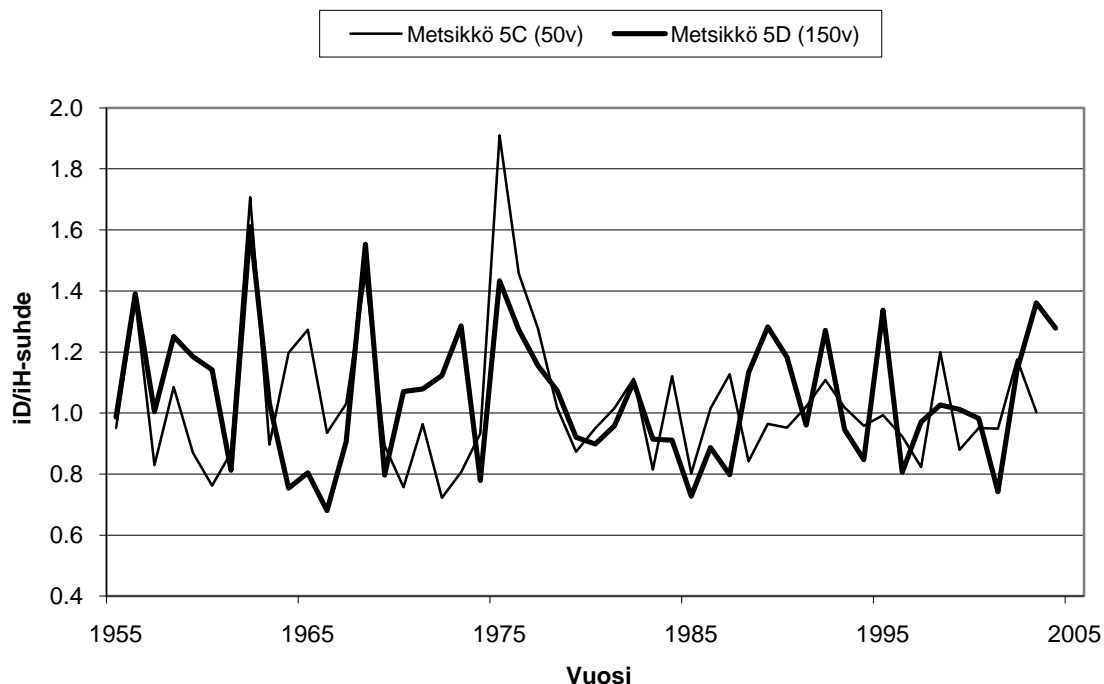


Kuva 5. Neulastiheyden ja pituuskasvun välinen riippuvuus (Salminen ja Jalkanen 2006).

Kun neulastiheydestä poistettiin pituuskasvun vaikutus, jäljelle jäävä indeksi ei juuri korreloinut kuukausitason ilmastomuuttujien kanssa. Korrelaatioanalyysissä ainoastaan

huhti-toukokuun (huhtikuu kolmessa pohjoisimmassa ja toukokuu kahdessa eteläisimmässä metsikössä) sademäärä vastasi neulastiheysin vaihteluun. Sademäärän vaikutus neulastiheyteen oli negatiivinen. Kun sademäärämuuttuja lisättiin neulastiheysmalliin, selitetyn varianssin osuus nousi 50:stä 55 %:iin, mutta mallin sopivuus ei noussut tilastollisesti merkitsevästi.

Pituuskasvun ja edellisen vuoden läpimitan kasvun keskinäinen korrelaatio on tilastollisesti merkitsevä mutta melko alhainen ($r=0,3$). Vaikka vuositasolla kasvut vaihtelevatkin osittain eri tavalla (kuva 6), pituuskasvun ja läpimitan kasvun välillä on pitkän ajan tasapainosuhte, sillä läpimitan kasvu riippuu tilastollisesti merkitsevästi kahden vuoden takaisesta pituuskasvusta.



Kuva 6. Läpimitan kasvun ja pituuskasvun trendipuhdistettujen indeksisarjojen suhde metsiköissä 5C ja 5D vuosina 1953–2004 (Salminen ym. 2009).

Jaksot, jolloin läpimitan ja pituuskasvun suhde on suurimmillaan, ajoittuvat yleensä varsin viileisiin kasvukausiin. Esimerkiksi vuodet 1962, 1968 ja 1975 olivat erittäin kylmiä ja etenkin heinäkuussa lämpötilat olivat selvästi pitkäaikaiskeskiarvojen alapuolella. Kesä 1972 oli poikkeuksellisen lämmin sekä kesät 1973 ja 1974 pitkäaikaiskeskiarvoa selvästi lämpimämmät, minkä seurauksena läpimitan kasvu säilytti tasonsa viileänä kesänä 1975, vaikka seuraavan vuoden pituuskasvu oli hyvin vaatimatonta.

Kalenteripäiviin tai lämpösummakertymään sidotut lämpötilajaksot korreloivat kuukausilämpötiloja voimakkaammin kaikkien kasvukronologioiden kanssa. 50-vuotiaan metsikön (5C) pituuskasvun korrelaatio lämpötilamuuttujiin oli kaikkein korkein (taulukko 5) ja korkein korrelaatiokerroin ($r=0,86$) saatiin 35 % ja 77 % lämpösummakynnysten rajaamalla jaksolla. 150-vuotiaan metsikön pituuskasvu ei korreloinut yhtä voimakkaasti lämpötilamuuttujiin kuin läpimitan kasvu, ja kummankin kasvukronologian lämpötilariippuvuus oli selvästi alempi kuin nuoremmassa metsikössä.

Taulukko 1. Korkeimmat kasvukronologian ja kasvukauden (läpimitan kasvu) tai edellisen kesän (pituuskasvu) lämpötilamuuttujan väliset korrelaatiokertoimet vuosina 1961-2003/2004. Lämpötilamuuttujan aikajakso on määritelty joko kuukausina (MM), päivinä (DD), tai suhteellisina lämpösummakertyminä (GDD). Korkeimman korrelaatiokertoimen tuottava jakso on valittu suorahaku-optimoinnilla.

		Metsikkö 5C (50-v)		Metsikkö 5D (150-v),	
		Läpimitan kasvu (std.err 0.09) ¹⁾	Pituuskasvu (std.err. 0.09)	Läpimitan kasvu (std.err. 0.11)	Pituuskasvu (std.err. 0.11)
MM	Corr. coeff.	0.55	0.77	0.44	0.30
	Month	July	July	July	July
DD	Corr. coeff.	0.61	0.85	0.50	0.45
	From date	27 th June	25 th June	28 th June	9 th July
	To date	26 th July	12 th Aug	23 th July	25 th July
	Period length, days	30	48	26	16
GDD	Corr. coeff.	0.61	0.86	0.56	0.44
	From GDD-%	38	35	28	38
	To GDD-%	53	77	58	52
	Period length, GDD	14	42	30	14
	From average date	5 th July	2 th July	26 th June	5 th July
	To average date	16 th July	5 th Aug	20 th July	16 th July
	Average period length, days (std.dev.)	12 (3.6)	35 (11.4)	25 (6.8)	12 (3.7)

¹⁾keskiarvon keskivirhe

POHDINTA JA PÄÄTELMÄT

Pituuskasvun päättyy, kun noin 40 % lämpösumman pitkän ajan keskiarvosta on saavutettu. On siis oletettavaa, että paikalliset alkuperät ovat sopeutuneet ilmastoon. Jos ilmasto lämpenee, nykyisellä perimällä varustetun puuston pituuskasvu päättyy aikaisemmin, mikä voi lisätä jälkikasvuisuutta. Jälkikasvuisuuden ei ole todettu aiheuttavan merkittävää tuhojen lisääntymistä tai kasvutappioita, mutta poikkeava ja kasvuhäiriöksi luettava ilmiö se joka tapauksessa on.

Kaksi vuotta aikaisemman marraskuun keskilämpötilalla oli negatiivinen vaikutus pituuskasvuun. Tämän johtunee siitä, että loppusyksyn lämmin jakso kuluttaa niitä energiavaroja, jotka muuten käytettäisiin kasvuyksiköiden muodostamiseen seuraavana kesänä.

Keskimääräisinä vuosina neulastiheys määräytyy pituuskasvun tapaan jo edellisen kasvukauden aikana päätesilmun muodostuessa. Jos pituuskasvuyksiköiden venymisessä lopulliseen mittaansa ilmenee häiriöitä tuhojen tai äärevien sääilmiöiden vaikutuksesta, neulastiheys voi nousta korkeaksi. Neulastiheys voi myös laskea niissä tilanteissa, jolloin kasvuvuoden kevään olosuhteet lisäävät pituuskasvuyksiköiden venymistä. Ainoa kuukausitason ilmastomuuttaja, joka korreloi pituuskasvun vaikutuksesta puhdistetun neulastiheyden kanssa, oli huhti-toukokuun sademäärä. Kevään sateet vaikuttavat lumen ja roudan sulamisnopeuteen ja sitä kautta alkukesän kasvuolosuhteisiin, joilla on osassa tutkimuskohteista heikko mutta havaittava yhteys lopulliseen pituuskasvuun.

150-vuotiaan metsikön lämpötilavaste oli alhaisempi ja hieman erilainen kuin 50-vuotiaan; vanhempien puiden läpimitan kasvu reagoi pituuskasvua herkemmin lämpötilan muutoksiin. Tämä voi johtua puiden iän ohella myös kasvun tasosta, joka 150-vuotiaassa metsikössä oli myös nuoruusvaiheessa alhainen. Onkin mahdollista, että 150-vuotiaina poimitut koepuut ovat olleet aikaisemmin sellaisessa asemassa (esim. alikasvoksena), että lämpötilan ohella muutkin tekijät ovat rajoittaneet niiden kasvua.

Pituuskasvu vaihtelee läpimitan kasvua herkemmin ja nuorissa metsiköissä myös lyhyempiä keskikesän lämpötilajaksojen seuraten. Sen vuoksi myös pituuskasvun ja läpimitan kasvun suhde vaihtelee kunkin vuoden säätilojen mukaan. Oman lisänsä tuo pituus- ja läpimitan kasvun fenologinen vaihtelu. Hyvä pituuskasvu tarkoittaa myös runsasta neulastuotantoa. Nuorimmat neulasvuosikerrat ovat merkittävimpiä nettotuottajia, joten runsas neulastuotanto mahdollistaa hyvän kasvun neulasten syntyä seuraavina parina vuotena, mikäli muut olosuhteet ovat suotuisat. Neulasiin on myös sitoutunut energiaa, jota voidaan siirtää etenkin vanhemmista neulasvuosikerroista esimerkiksi läpimitan kasvun tarpeisiin. Läpimitan kasvu korreloikin kahta vuotta aikaisemman pituuskasvun kanssa. Viileän kesän 1975 suhteellisen hyvän läpimitan kasvun syynä lieneekin kolmen aikaisemman keskimääräistä lämpimämmän kesän tuottamat energiavarastot.

Männyn kasvun voidaan ajatella jakautuneen kahdelle vuodelle; läpimitan kasvu ja päätesilmun muodostuminen ajoittuu edelliselle vuodelle ja pituus- ja neulasten kasvu seuraavalle. Puun rakenteen ja toiminnan kannalta tämä on loogista, sillä tuki- ja kuljetusorganit pitää olla valmiina ennen kuin niitä voidaan hyödyntää. Kasvun ohjaaminen tapahtuu hormonien avulla, ja kärkikasvupisteet ovat voimakkaita hormonien tuottajia. Eri kasvupisteiden aktiivisuuden rytmittäminen on tehokasta, sillä näin vältetään puun sisäistä kilpailua. Pituuskasvu ja neulastuotanto sekä kukinta ovat strategisesti tärkeitä toimintoja, joten niiden ajoittuminen kasvukauden alkupuolelle on järkevää, koska silloin olosuhteet ovat yleensä parhaimmillaan ja vettä ja lämpöä on riittävästi.

Lämpötilan vaihtelussa on paljon satunnaisia ja pitkillä aikaväleillä vaikeasti ennustettavia piirteitä. Koska lämpötila on merkittävin vuotuisen pituuskasvun vaihtelun selittäjä Lapissa, myös pituuskasvuun sisältyy satunnaisena tai satunnaisen kaltaisena ilmenevää vuosivaihtelua. Seuraavan kasvukauden pituuskasvun suuruus on toisaalta helppo ennustaa hyvin ennalta määräytyneen kasvutavan vuoksi. Voimakas riippuvuus edellisen vuoden heinäkuun lämpötilasta tekee Lapin männyn pituuskasvusta erittäin käyttökelpoisen bioindikaattorin varsinkin yhdessä muiden havaintoaikasarjojen kanssa.

VIITTEET

- Aalto, T. & Jalkanen, R. 1998. The needle trace method. Finnish Forest Research Institute, Research Papers 681. 36 s.
- Cook, E. R. & Kairiukstis, L. A. (toim.). 1990. Methods of dendrochronology: applications in the environmental science. Kluwer Academic Publ. Inc., Dordrecht, The Netherlands, 394 s.
- Doak, C. C. 1935. Evolution of foliar types, dwarf shoots, and cone scales of *Pinus*. 106 s.
- Flewelling, J. W. & Pienaar, L. V. 1981. Multiplicative Regression with Lognormal Errors. *Forest Science* 27(2): 281-289.
- Henttonen, H. 1990. Kuusen rinnankorkeusläpimitan kasvun vaihtelu Etelä-Suomessa. Summary: Variation in the diameter growth of Norway spruce in Southern Finland. Department of forest mensuration and management, Research notes n:o 25 88.
- Hesselman, H. 1904. Om tallens höjdtillväxt och skottbildning somrarna 1900-1903. *Meddelanden från Statens skogsförsöksanstalt* 125-43.
- Hooke, R. & Jeeves, T.A. 1961. Direct search solution of numerical and statistical problems. *Journal of the ACM* 8(2): 212-229.
- Hox, J. 2002. Multilevel analysis. Techniques and applications. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, New Jersey. 304 s.
- Jalkanen, R. 1995. Needle trace method (NTM) for retrospective needle retention studies on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). dissertation *Acta Universitatis Ouluensis* A264, 38 + 40 s.
- Jalkanen, R., Kurkela, T. & Aalto, T. 2002. A review of the needle trace method. katsaus neulasjälkimenetelmään. Julkaisussa: Rautjärvi, H., Ukonmaanaho, L. & Raitio, H. (toim). Forest condition monitoring in finland. national report 2001. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 879. s. 110-117.
- Jalkanen, R. 2000. Needle traces - less known organs of conifer stems as environmental indicators. Julkaisussa: Kim, Y.S. (toim.). New horizons in wood anatomy. Chonnam National University Press, Kwangju. s. 251-255.
- Jalkanen, R., Aalto, T. & Kurkela, T. 1998. Revealing past needle density in *Pinus* spp. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13(3): 292-296.
- Junttila, O. 1986. Effects of temperature on shoot growth in northern provenances of *Pinus sylvestris* L. *Tree Physiology* 1(2): 185-192.
- Kanninen, M. 1990. Havupuiden pituuskasvu. Julkaisussa: Lahti, T. & Smolander, H. (toim). Johdatus metsien perustuotantobiologiaan. University of Joensuu, Faculty of of forestry, Joensuu. s. 183-206.
- Klingbjer, P. & Moberg, A. 2003. A composite monthly temperature record from Tornedalen in northern Sweden, 1802-2002. *International Journal of Climatology* 23(12): 1465-1494.
- Lanner, R. M. 1976. Patterns of shoot development in *pinus* and their relationship to growth potential. Julkaisussa: Cannell, M.G.R. & Last, F.T. (toim). Tree physiology and yield improvement. Academic Press, London, UK. s. 223-243.
- Littell, R. C., Milliken, G. A., Stroup, W. W. & Wolfinger, R. D. 1996. SAS® system for mixed models. Sas Institute, Inc., Cary, NC. 656 s.
- Miina, J. 2000. Dependence of tree-ring, earlywood and latewood indices of Scots pine and Norway spruce on climatic factors in eastern Finland. *Ecological Modelling* 132:259-273.

- Mikola, P. 1950. Puiden kasvun vaihteluista ja niiden merkityksestä kasvututkimuksissa. Summary: On variations in tree growth and their significance to growth studies. 131 s.
- Salminen, H., Jalkanen, R. & Lindholm, M. 2009. Summer temperature affects the ratio of radial and height growth of Scots pine in northern Finland. (manuscript).
- Salminen, H. & Jalkanen, R. 2007. Intra-annual height increment of *Pinus sylvestris* at high latitudes in Finland. *Tree Physiology* 27(9): 1347–1353.
- Salminen, H. & Jalkanen, R. 2006. Modelling variation of needle density of Scots pine at high latitudes. *Silva Fennica* 40(2): 183–194.
- 2005. Modelling the effect of temperature on height increment of Scots pine at high latitudes. *Silva Fennica* 39(4): 497–508.
- Salminen, H. & Jalkanen, R. 2004. Does current summer temperature contribute to the final shoot length on *Pinus sylvestris*? A case study at the northern conifer timberline. *Dendrochronologia* 21(2): 79–84.
- Snijders, T. A. & Bosker, R. J. 1999. Multilevel analysis. SAGE Publications Inc, London. 266 s.

KUIVUUSTUHOJEN INVENTOINTI TALOUSHUHTA-ALUEISSA

Mervi Talvitie¹, Olli Leino² & Markus Holopainen³

JOHDANTO

Perinteisesti monimuotoisuutta on ylläpidetty suojelemalla yksittäisiä uhanalaisia lajeja. Tämä lajikohtainen lähestymistapa on kuitenkin kallista ja eikä sillä saavuteta tehokkaita lopputuloksia lajien monimutkaisten suhteiden ja esiintymisten vuoksi. Ekologiset levinneisyydet ovat hyvin harvoin satunnaisesti jakautuneita (Levin 1992). Biotooppikohtainen lähestymistapa, jossa katetaan suurempi alue ja enemmän lajeja kerrallaan, on nykyisin ollut suosittu tapa tutkia monimuotoisuuden ylläpitämistä.

Metsän perinteisillä inventointimenetelmillä pitäisi kattaa hyvin laaja alue, jotta voitaisiin saavuttaa riittävä tarkkuus arvioitaessa monimuotoisuutta kuvastavien eliöiden esiintyvyyttä (Green ja Young 1993). 2000-luvulla on herännyt mielenkiinto harvinaisten metsällisten ilmiöiden tutkimiseen. Muun muassa sekä lahopuun ja lehtipuiden määrä ja sijoittuminen talousmetsissä että näiden ilmiöiden inventointimenetelmien kehittäminen ovat olleet myös Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen tutkijoiden mielenkiintona.

Monimuotoisuuden ylläpitäminen metsissä on yksi tärkeä syy siihen, että metsässä olevasta kuolleesta puusta on tullut merkittävä tutkimusten kohde (mm. Huston ja Marland 2003, Mielikäinen ja Hynynen 2003). Kuolleella puulla on useita merkityksiä metsän ekologisissa prosesseissa, esimerkiksi se on orgaanisen aineen muodostaja ja monen uhanalaisen lajin elinympäristö (Siitonen 1998).

Vuosina 2002 ja 2003 oli Helsingissä kaksi hyvin kuivaa kesää. Tästä johtuen kaupungin metsissä kuoli paljon puita erityisesti kuivilla ja karuilla kasvupaikoilla. Nyt esitellyn tutkimuksen tavoitteena oli tutkia näistä kuivuusjaksoista peräisin olleen kuolleesta puuston määrää, ja kehittää menetelmiä sen tarkasteluun Helsingin kaupungin metsissä.

Ensimmäisessä kuivuustuhojen inventointitutkimuksessa Helsingin kaupungin aineistoa analysoitiin visuaalisen ilmakuvatulkinnan keinoin, jossa jokainen ruutu tulkittiin visuaalisesti määrittäen sen tuholuokan (Leino 2005). Ilmakuville luotiin 50×50 metrin ruudukko (yhteensä noin 15000 ruutua) kattamaan koko alueen. Lisäksi käytettävissä oli kuvioittainen tieto alueen metsistä. Visuaalinen tulkinta osoittautui tarkaksi menetelmäksi. Tulokset olivat lupaavia, mutta koska työ on työlästä ja hidasta, haluttiin kehittää tehokkaampi inventointimenetelmä.

¹ Tutkija, Metsävarojen käytön laitos, Email: etunimi.sukunimi@helsinki.fi

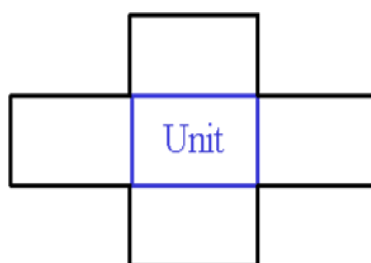
² Tutkija, Metsävarojen käytön laitos, Email: etunimi.pt.sukunimi@helsinki.fi

³ Yliopistonlehtori, Metsävarojen käytön laitos, Puh: +358 9 19158181, Fax: +358 9 19158159, E-mail: etunimi.sukunimi@helsinki.fi

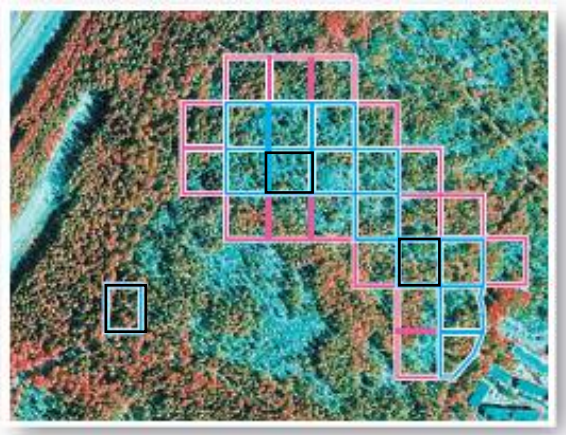
MATERIAALI JA MENETELMÄT

Tutkimuksen aineistona olivat Helsingin kaupungin metsät (3700 ha). Useat Helsingin kaupungin metsäalueet ovat pienialaisia ja sirpaleisia, mikä asetti haasteen sopivan inventointimenetelmän löytämiseksi. Myös tässä tutkimuksessa ruutua käytettiin menetelmän otosyksikkönä.

Osatutkimukset käsittelivät kuivuustuhojen inventointia kohdentuvan ryväotannan (adaptive cluster sampling, ACS) keinoin (lisää aiheesta mm. Thompson 1990, 1991, Roesch 1993, Talvitie ym. 2006). Menetelmässä perusotos valitaan koko aineistosta. Otosta laajennetaan yksittäisen otosyksikön kohdalla, mikäli sovittu kriittinen arvo C ylittyy yksikössä. Otos laajenee kaikkiin pääilmansuuntiin yhden yksikön verran, ja näistä yksiköistä mitataan taas samat tunnuksat kuin perusotoksenkin yksiköistä. Taas jos kriittinen arvo C ylittyy, otosta laajennetaan jne. (Kuva 1). Tätä jatketaan, kunnes kriittisen arvon ylittäviä yksiköitä ei ryppästä enää löydy. Lisäyksiköitä, joissa ei ole tuhoja yli arvon C , kutsutaan reunayksiköiksi (Kuva 2).



Kuva 1. ACS-menetelmän perusyksikkö (sininen) ja lisäyksiköt (musta).



Kuva 2. Ryppään muodostuminen maastossa. Mustat solut ovat ensimmäisen vaiheen perusyksiköitä, siniset ovat toisen vaiheen (lisä-)yksiköitä, jotka sisälsivät tuhoja yli kriittisen arvon. Punaiset yksiköt ovat reunayksiköitä, jotka ovat myös toisen vaiheen (lisä-)yksiköitä, mutta eivät sisällä tuhoja yli kriittisen arvon.

Jokainen otosyksikkö sai molemmissa osatutkimuksissa laholuokakseen arvon, joka kuvasi lahopuun määrää suhteessa kokonaispuuston määrään. Kukin otosyksikkö sai luokakseen arvon väliltä 0-9. Esimerkiksi laholuokka 1 tarkoittaa, että otosyksikössä on kuolleita puita 10-19% kokonaispuuston tilavuudesta. Laholuokan määrittäminen

otosyksikölle tapahtui kuviotietokannasta saadun tilavuuden ja maastossa mitatun lahopuun määrän avulla.

Osatutkimus 1

Osatutkimuksessa 1 vertailtiin ACS-menetelmää satunnaisotantaan selvittäen, tuottaako ACS tarkemman arvion kuivuustuhojen laajuudesta ja kuinka tehokas menetelmä on. Ensimmäisen vaiheen otos vastasi satunnaisotantamenetelmää. Lisäksi tarkasteltiin kahta eri kriittistä arvoa ja miten niiden valinta vaikuttaa lahopuuston kokonaismäärän arvioon. Kriittisinä arvoina käytettiin laholuokkia 1 ja 2. Ensimmäinen vaihe valittiin satunnaisesti ja otoskooksi otettiin 0,5 % alueesta, joka vastasi 61 otosyksikköä.

Osatutkimus 2

Osatutkimuksessa 2 vertailtiin kahta eri ACS-menetelmää ensimmäisen vaiheen otoksen valintaan: satunnaisotantaa (ACS_{SRS}) ja ositettua otantaa (ACS_{ST}). Myös tässä otoskooksi valittiin 0,5 % koko alueesta.

Aineisto jaettiin kolmeen kasvupaikkaluokkaan: 1) korkea tuottavuus (MT ja paremmat kasvupaikat), 2) keskimääräinen tuottavuus (VT) ja 3) heikko tuottavuus (CT ja sitä huonommat kasvupaikat). Ensimmäinen otos otettiin näiden luokkien suhteessa, kunkin luokan sisällä satunnaisesti.

TULOKSET JA TARKASTELU

Osatutkimus 1

Lopulliseksi otoskooksi tuli ACS-menetelmässä pienemmällä kriittisellä arvolla 159 yksikköä ja suuremmalla 81 yksikköä. Kokonaisotoksen suuruus ($C=1$) oli siten noin 2,5 kertaa suurempi kuin satunnaisen otoksen koko. Arvio kuolleen puun tilavuuden määrästä oli menetelmillä jokseenkin sama, mutta pienempi kriittinen arvo oli tarkkuuden suhteen parhain. Vaikka suuremmalla kriittisellä arvolla 2 maastomittaukset sujuivat nopeammin, se ei tuottanut parempaa lopputulosta.

ACS-menetelmä osoittautui tehokkaammaksi inventointimenetelmäksi kuivuustuhojen arvioimiseen kuin pelkkä yksinkertaisella satunnaisotoksella tehty inventointi. ACS-menetelmällä maastotyötä oli noin 20 % enemmän satunnaisotoksen maastotyöhön verrattuna, mutta sillä saavutettiin merkittävästi tarkempi tulos kuivuustuhojen laajuuden arvioimiseksi.

Osatutkimus 2

Korkean tuottavuuden luokassa ei havaittu lainkaan kuivuustuhoja, vaan oletusten mukaisesti niitä tavattiin ainostaan keskimääräisen tuottavuuden ja heikon tuottavuuden luokissa. Näissäkin luokissa suurin osa havaintoyksiköistä oli laholuokassa 0, jolloin lisäyksiköiden mittausta niiden ympäriltä ei tarvittu. Tutkimuksessa mitattiin yhteensä 93 lisäyksikköä ja lopulliseksi otoskooksi muodostui siten 154 yksikköä.

Vertailtaessa ACS_{SRS} - ja ACS_{ST} -menetelmiä huomattiin, että ACS_{ST} -menetelmällä pystyttiin paremmin löytämään enemmän tuhoja. Tämä oli ymmärrettävää, sillä

ensimmäisessä otoksessa oli jo valmiiksi painotettu alueita, jolta todennäköisemmin löytyisi tuhoja. Osituksen avulla on mahdollista painottaa niitä alueita ja kasvupaikkoja, joilla lisäyksiköitä todennäköisesti tulnaisiin ottamaan ja jota kautta myös tarkkuus tuhojen laajuuden arvioinnissa paranisi.

PÄÄTELMÄT

Harvinaisten ilmiöiden inventoinnissa on epävarmuutta enemmän kuin perinteisten metsällisten muuttujien inventoinnissa, minkä vuoksi näitä erityyppisiä ilmiöitä tutkitaan eri menetelmillä. Tässä esitettyjen tutkimusmenetelmien avulla on mahdollista saavuttaa parempi tarkkuus kuivuustuhojen inventoinnissa tehokkain menetelmin. Kuten maastomittauksissa yleisesti, tässäkin tutkimuksessa tulosten tarkkuuteen voivat kuitenkin vaikuttaa muun muassa mahdolliset mittaus- ja paikannusvirheet maastossa.

Ositetulla otannalla tehty ACS havaittiin tehokkaimmaksi menetelmäksi kuivuustuhoja tutkittaessa (Talvitie 2006). Myös muita harvinaisten ilmiöiden inventointimenetelmiä on kehitelty viime aikoina ja mahdollisesti ne osoittautuvat kilpailukykyisiksi tässä artikkelissa kerrottujen menetelmien kanssa. Kohdennettu ryväotanta soveltuu kuitenkin ominaisuuksiensa vuoksi hyvin pirstaloituneisiin metsiin, esimerkiksi kaupunkimetsiin.

VIITTEET

- Green, R.H. ja Young, R.C. 1993. Sampling to detect rare species. *Ecological Applications*, 3, 351-356.
- Huston, M.A. & Marland, G. 2003. Carbon management and biodiversity. *Journal of Environmental Management* 67: 77-86.
- Leino, O. 2005. Visuaalinen ilmakuvatulkinta ja sopeutuva ryväotanta Helsingin kaupungin kuivuustuhojen inventoinnissa. Helsingin yliopisto. Pro gradu –tutkielma.
- Levin, S.A. 1992. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology* 73: 1943-1967.
- Mielikäinen, K. ja Hynynen, J. 2003. Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe - boreal zone: case Finland. *Journal of Environmental Management* 67(1): 47-54.
- Siitonen, J. 1998. Lahopuun merkitys metsäluonnon monimuotoisuudelle – kirjallisuuskatsaus. Julkaisussa: Annala, E. (toim.): Monimuotoinen metsä. Metsäluonnon monimuotoisuuden tutkimusohjelman väliraportti. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 705:132-161.
- Talvitie, M., Leino, O. ja Holopainen, M. 2006. Inventory of sparse forest inventories using adaptive cluster sampling. *Silva Fennica* 40(1): 101-108.

LIDAR SUOEKOLOGISISSA TUTKIMUKSISSA - LYHENNELMÄ

Markku Koskinen¹

JOHDANTO

Tämä artikkeli on lyhennelmä Forest Ecology and Management-lehdessä julkaistavasta artikkelista ”Airborne small-footprint discrete-return LiDAR in the assessment of boreal mire surface patterns, vegetation and habitats” (Korpela ym., 2009)

Laserkeilaus eli LiDAR (Light Detection And Ranging) on kaukokartoitusmenetelmä, jossa mitataan sironneen valon ominaisuuksia etäisen kohteen etäisyyden ja muun informaation saamiseksi (Wehr & Lohr, 1999). LiDAR on metsien kaukokartoituksessa laajalti käytetty työkalu, jolla saadaan tarkkaa tietoa maanpinnan ja puuston kolmiulotteisesta rakenteesta. Lisäksi vasteiden intensiteetti kertoo latvuksen ja pintakasvillisuuden hejastavuudesta käytetyllä aaltopituudella. On kuitenkin huomattava, että yksittäisten lehtien, oksien ja neulasten heijastavuudesta ei saada tietoa, koska ne ovat yleensä pienempiä kuin laserkeilan muodostama jalanjälki (Wagner ym., 2008). Intensiteetti kertookin latvuksen tai pintakasvillisuuden tiheydestä ja rakenteesta. Keilausten tarkkuus on yleensä 0.1–0.5 metriä vaakasuunnassa ja alle 0.2 metriä pystysuunnassa. Laitteet voivat olla joko diskreettejä vasteita tallentavia tai koko aaltomuodon tallentavia. Diskreettejä vasteita tallentavat laitteet mittaavat yleensä 1–4 vastetta (pisteitä) pulssia kohden. Vasteiden lukumäärä riippuu kohdealueen latvuksen korkeudesta ja tiheydestä. Matala ja harva latvus tuottaa vähän vasteita, ja korkea ja tiheä paljon.

Viime vuosiin asti on hyödynnetty lähinnä keilausten antamaa korkeustietoa, koska sen tarkkuuden kehittäminen on ollut laitevalmistajien ensisijainen pyrkimys, kun taas intensiteettitieto on jäänyt taka-alalle. Nytemmin on kuitenkin alettu tutkia vasteiden intensiteetin käytettävyyttä kasvillisuuden piirteiden selvittämisessä. Intensiteettitieto on kuitenkin korkeustietoa heikommin yleistettävissä laitteelta toiselle, mutta myös saman laitteen eri lentojen välillä on ongelmia yleistettävyydessä. Syynä ovat laitteiden erilaiset ominaisuudet ja säädöt, joista jälkimmäinen aiheuttaa eroja samalla laitteella keilattujen lentojen välillä (Wehr & Lohr, 1999; Ahokas ym., 2006; Kaasalainen ym., 2007; Morsdorf ym., 2007).

Laserkeilausten käyttöä metsänkartoituksessa on tutkittu runsaasti. Sitä on käytetty metsän rakenteen kartoittamiseen, puulajien tunnistamiseen ja kasvupaikkojen luokitteluun. Soiden kartoittamiseen sitä ei kuitenkaan ole käytetty.

Suot ovat Suomessa merkittävä elementti. 28 % Suomen maapinta-alasta on suota. Soista noin puolet, yli 5 miljoonaa hehtaaria, on ojitettu lähinnä metsänkasvatusta varten. Paikoin korvista jopa 80 % on ojitettu. Monissa tapauksissa suojelualueisiin on päätyneet luonnontilaltaan muuttuneita soita, mahdollisesti osana laajempaa suokokonaisuutta tai metsäaluetta. Ojituksen aiheuttama luonnon monimuotoisuuden väheneminen on aiheuttanut tarpeen ennallistaa osa ojitetuista soista. Ennallistamis- ja

¹ Tohtorikoulutettava, Metsäekologian laitos, Email: etunimi.sukunimi@helsinki.fi

suojelutoimiin liittyvät kartoitukset ovat kuitenkin työläitä ja kalliita toteuttaa maastotöinä ja ilmakuvatulkitana. Laserkeilauksella voitaisiin mahdollisesti helpottaa soiden kuviointia, arvokkaiden elinympäristöjen rajaamista ja ennallistamisen seuranta.

AINEISTO JA MENETELMÄT

Tutkimus toteutettiin kahdella Hyytiälän lähistöllä sijaitsevalla kohteella, Silmäpäänlamminnevalle ja Lakkasuon luonnontilaisella osalla. Silmäpäänlamminnevalle perustettiin kasvillisuusnäytealoja, jotka paikannettiin Network RTK-menetelmällä. Paikannusmenetelmän tarkkuus on parempi kuin 5 cm vaakasuunnassa. Näytealoilta määritettiin suotyyppejä. Lakkasuon luonnontilainen osa kuvioitiin Annukka Vähäsarjan (1997) pro gradu-työssä luodun kasvillisuusruutuverkoston ja vuoden 2007 ilmakuvien perusteella. Kummankin kohteen yli tehtiin laserkeilauslento. Silmäpäänlamminnevalle lentokorkeus oli noin 809 m ja pistetiheys 6-9 pistettä neliometrillä. Keilan jalanjälki oli 0.25 m². Lakkasuolla lentokorkeus oli noin 1250 m ja pistetiheys 1-3 pistettä neliometrillä. Keilan jalanjälki oli 0.35 m². Silmäpäänlamminnevan kasvillisuusnäytealoille osuneet keilauspisteet kerättiin ja niistä tutkittiin kasvillisuuden vaikutusta vasteiden intensiteettiin. Lisäksi tutkittiin keilausaineiston pohjalta luodun digitaalisen maastonkorkeusmallin (Digital Elevation Model, DEM) tarkkuutta suon pinnanmuotojen mittaamisessa ja sen hyödynnettävyyttä mätäs-painanne-vaihtelun kartoittamisessa. Lakkasuolla tutkimusalue jaettiin 10 metrin hilalla 10×10-m ja 20×20-m ruutuihin, joilta kerätyistä pisteistä laskettiin muuttujien arvot. Lasketut muuttujat on esitetty taulussa 1. Muuttujat perustuivat pisteiden intensiteettiin ja korkeusjakaumaan sekä digitaaliseen maastonkorkeusmalliin. Yhteensä luotiin 63 muuttujaa. Myös Lakkasuolla tutkittiin DEMin hyödynnettävyyttä mätäiden kartoittamisessa. Mätäskartta tehtiin 20×20-m ruuduissa, joihin sovitettiin taso paikallisen kallistuman eliminoimiseksi. Tason yläpuolella olevat alueet tulkittiin mätäiksi ja sen alapuolella olevat painanteiksi.

Lakkasuon ruutujen luokituksiin käytettiin kolmea oppivaa algoritmia: RandomForest (RF), Support Vector Machines (SVM) ja k Nearest Neighbour (kNN). Opetusaineistona käytettiin puolta koko aineistosta, ja toinen puoli muodosti testiaineiston.

RandomForest perustuu suureen määrään (satoja tai tuhansia) luokituspuita, joihin käytettävät muuttujat arvotaan tarjolla olevista. Tapauksen luokitus on luokituspuiden antamien tulosten moodi (Breiman, 2001). RandomForestia voidaan käyttää muuttujien valintaan, koska se kertoo kunkin muuttujan tärkeyden luokitukselle joko niinsanotun Gini-tärkeyden perusteella tai sen perusteella, kuinka monta päätenuodia kukin muuttuja määrittää. Gini-tärkeys määritetään muuttelemalla kunkin muuttujan arvoa hieman ja katsoen, kuinka herkkä luokitus tulos kyseiselle muuttujalle on. Herkimmin tuloksen vääräksi muuttavat muuttujat ovat tärkeimpiä. Tässä tutkimuksessa muuttujien paremmuutta tarkasteltiin niiden määrittämien päätenuodien perusteella.

Support Vector Machines-algoritmi perustuu moniulotteiseen avaruuteen, johon harjoitustapaukset sijoitetaan (Vapnik, 1998). Kahta luokkaa edustavien tapausten väliin sijoitetaan hypertaso, joka erottaa luokat minimoiden väärin luokitusten parametrilla määriteltävissä olevan kustannuksen ja maksimoiden lähimpien eri luokkia edustavien tapausten etäisyyden toisistaan (Bruzzone & Carlin, 2006). Koordinaatiston muoto voidaan määrittää esimerkiksi lineaariseksi tai radiaaliseksi algoritmin ytimen avulla. Koska yksi SVM voi määrittää vain kaksi luokkaa, moniluokitus tehdään luomalla

riittävä määrä SVM:iä, jotta kaikki luokat voidaan testata toisiaan vastaan. Luokitustulos on näiden testien tulosten moodi. Tässä tutkimuksessa käytettiin lineaarista ydintä ja luokitusvirheen kustannusta 1.

Taulukko 1. Muuttujat

Intensiteettimuuttujat (vain ensimmäiset vasteet)	
<i>imt, isdt</i>	Keskiarvo ja -hajonta. puustokerros, $h > 1$ m.
<i>ims, isds</i>	Keskiarvo ja -hajonta. Pensaskerros, $0.15 \text{ m} < h < 1$ m.
<i>img, isdg</i>	Keskiarvo ja -hajonta. Pohjakerros, $h < 0.15$ m.
<i>int1, int2, int3, int4</i>	Intensiteetin keskiarvo korkeusjakauman kvartiileissa
<i>intc1, intc2, intc3, intc4</i>	Intensiteetin keskiarvo korkeusluokissa: $< 25\%$, $< 50\%$, $< 75\%$ ja $\leq 100\%$.
<i>i1–i10</i>	Intensiteetin desiilit 10, 20, ..., 100%. (Kaikki vasteet).
Piste- ja vastejakaumasta lasketut muuttujat	
<i>pt, ps, pg</i>	Ensimmäisten vasteiden osuudet puusto-, pensas- ja pohjakerroksissa
<i>ps_{NORM}</i>	Normalisoitu ensimmäisten vasteiden osuus pensaskerroksessa, $(1-pt) \times ps$
<i>p1, p2, p3, p4</i>	Ensimmäisten, toisten, kolmansien ja neljänsien vasteiden osuudet.
Korkeusjakaumasta lasketut muuttujat	
<i>h1–h10</i>	Korkeusjakauman desiilit (kaikki vasteet)
<i>hd1–hd10</i>	Suhteellisen korkeusjakauman desiilit (10, 20...100 %), kaikki vasteet
DEM:n ja mätäs-painannemallin avulla laskeutu muuttujat, vain 20×20-m aineisto	
<i>sdz</i>	DEM-arvojen keskihajonta, kun korkeuden lineaarinen muutos on laskettu pois
<i>rangez</i>	DEM-arvojen arvoalue, kun korkeuden lineaarinen muutos on laskettu pois
<i>humnum</i>	Mättäiden lukumäärä
<i>humcomp</i>	Mättäiden muotoluku
<i>hummsize</i>	Mättäiden keskikoko
Kasvillisuusanalyysissä hyödyllisiksi osoittautuneet muunnokset	
<i>hd28, hq48, hq210</i>	$hd2/hd8 \times hq5, hq4/hq8, hq2/hq10$
<i>imgq5, intc24</i>	$img/iq5, int2/int4$
<i>iq25</i>	$iq2/iq5$

K Nearest Neighbours on myös moniulotteiseen avaruuteen perustuva algoritmi, jossa opetustapaukset sijoitetaan n-ulotteiseen koordinaatistoon, ja testitapausten luokitus on samassa koordinaatistossa niiden k:n lähimmän naapurin luokitusten moodi. Tässä tutkimuksessa parhaaksi k:n arvoksi osoittautui kokeilemalla 9.

Luokituksia tehtiin neljässä tasossa: 21 suotyyppiä, karkea suotyyppi puustoisuuden mukaan, pääpuulaji ja ravinteisuustaso puustoisuusluokissa. Luokitustarkkuus määritettiin onnistuneiden luokitusten prosenttiosuutena sekä kappa-muuttujan arvolla. Kappa on ennustustarkkuutta mittaava muuttuja, joka ottaa huomioon luokkien koossa esiintyvän vaihtelun suoraa prosenttiosuutta paremmin. Kun kappa-arvo on lähellä yhtä, mallin antama ennustus on tarkka, ja kun lähellä nolaa, mallilla ei ole juuri tekemistä todellisuuden kanssa (Cohen, 1960). Suotyyppien luokitukseen tehtiin lievien virheiden matriisi, koska monet suotyypit ovat maastossakin vaikeita erottaa toisistaan ja niiden väliset erot saattavat joskus olla osin tulkintakysymyksiä. Esimerkiksi puolukkakorven luokittaminen kangasrämeeksi katsottiin pieneksi virheeksi.

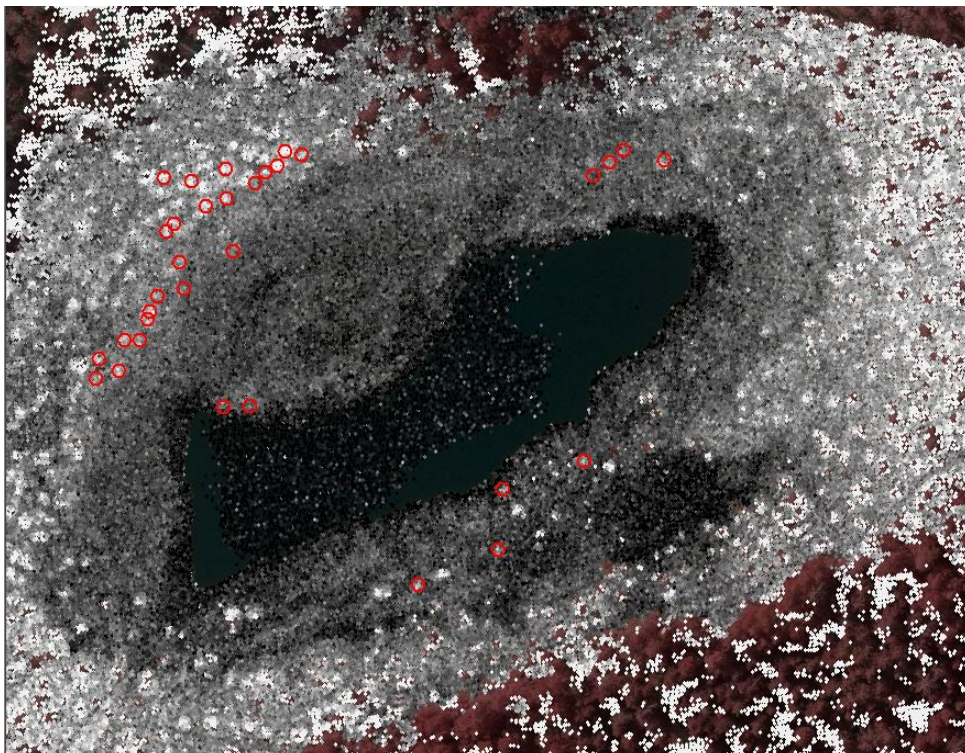
Muuttujista tehtiin erilaisia ryhmiä luokittimien käyttöön. Ryhmät olivat kaikki muuttujat, RandomForestilla valitut 15 parasta muuttujaa, PCA:n avulla valitut 15 parasta muuttujaa, 15 pääkomponenttia sekä asiantuntijavalinnalla valitut muuttujat. PCA:n avulla valittuihin muuttujiin valittiin R:n FactoMineR-ohjelman tuottaman kahden merkittävimmän pääkomponentin korrelaatioympyrän perusteella merkittäviä ja vähiten keskenään korreloivia muuttujia. Asiantuntijavalinta perustui korrelaatiokaavioon, suoekologiseen tietämykseen sekä siihen, että pyrittiin valitsemaan muuttujia, jotka olisivat mahdollisimman hyvin yleistettävissä. Esimerkiksi puuston valtipituus on muuttuja, joka on hyvin riippuvainen kohdealueen käsittelyhistoriasta ja on sen vuoksi häirityillä alueilla huono muuttuja. Intensiiteetti- ja korkeusmuuttujat taas ovat sellaisenaan hyvin riippuvaisia lentokorkeudesta ja laserkeilauslaitteen säädöistä. Asiantuntijavalintaa varten kehitettiin muunnoksia intensiteetti- ja korkeusmuuttujista, koska esimerkiksi maksimi-intensiiteetin ja mediaani-intensiiteetin suhteen voi olettaa olevan helpommin yleistettävissä laitteelta ja lennolta toisella kuin maksimi-intensiiteetin tai mediaani-intensiiteetin sinänsä. RF:ia ja SVM:ia testattiin kaikilla muuttujilla. SVM:ia ja kNN:ia testattiin RF:n valitsemilla, PCA:n avulla valituilla muuttujilla sekä 15 pääkomponentilla. Kaikkia luokittimia kokeiltiin asiantuntijavalinnalla valituilla muuttujilla.

TULOKSET

Silmäpäänlamminneva

Silmäpäänlamminnevan intensiteettikokeissa paljastui, että intensiteettiin vaikutti kasvillisuutta enemmän näytealan kosteus. Kosteiden ja kasvillisuudesta paljaiden näytealojen intensiteetti oli kuivia ja peitteisiä aloja pienempi. Voimakkain intensiteetti mitattiin ruohoista saranevaa edustaneelta näytealalta, jossa isolehtiset kasvit, kuten raate, luultavasti aiheuttivat voimakkaan vasteen.

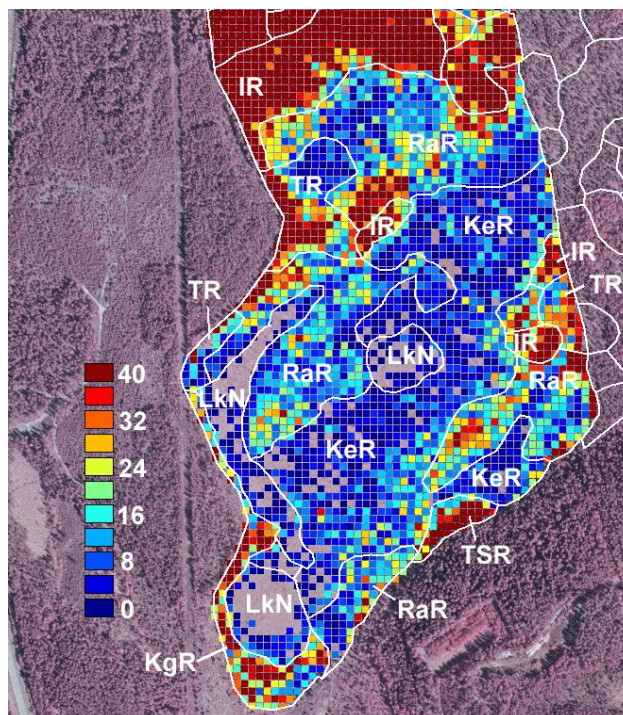
Mätäs-painannemallin luominen DEMin pohjalta osoittautui toimivaksi. 1–2 metrin kokoiset mätäät erottuivat korkeusmallista hyvin (kuva 1), ja Network RTK-järjestelmällä mitattuun korkeustietoon verrattuna LiDARin suon pinnalle antamat korkeudet erosivat kasvillisuudesta riippuen 3-7 cm, mikä on pieni virhe LiDARia käytettäessä.



Kuva 1. Silmäpäänlamminnevan mätäs-painannemalli. Mättäät on merkitty punaisilla ympyröillä.

Lakkasuo

Mikään yksittäinen muuttuja ei erottanut kaikkia suotyyppejä toisistaan. Merkittävin muuttuja oli *hq10*, joka vastaa puuston valtapituutta. Lakkasuolla, jossa puuston kehitysluokka suotyyppien sisällä ei juuri vaihtelee, puuston valtapituus kertoo ravinteisuustasosta ja kosteudesta. Se ei kuitenkaan liene hyvin yleistettävä muuttuja, koska Lakkasuo voi olla käsittelyhistorialtaan poikkeuksellinen kohde. *Hd*-muuttujien avulla kyettiin luokittelemaan puustoiset suot ja sekatyypin suot: pieni- ja harvapuustoisilla kohteilla suuri osa pisteistä oli alhaisella suhteellisella korkeudella, ja suuri- ja tiheäpuustoisilla kohteilla pisteet olivat jakautuneet tasaisemmin. Intensiteetti- ja piirteet olivat varsin kohinaisia eikä niiden perusteella pystynyt määrittelemään suotyyppejä. Ainoastaan erityisen kosteat kohteet erottuivat *img*-muuttujan matalana arvona. Maastonkorkeusmallin avulla luodut muuttujat käyttäytyivät loogisesti, eli yhtenäisten, laajojen mättäiden luonnehtimilla keidasrämeillä *hummcomp*-muuttujan arvo oli matala mutta kohinainen. Pisteiden suhteellisista osuuksista eri kerroksissa kertovista muuttujista *pt* osoittautui hyödyllisimmäksi. Sen avulla kyettiin erottamaan puustoiset ja sekatyypin suot toisistaan (kuva 2).



Kuva 2. *Pt*-muttujan %-arvot Lakkasuon eteläpään ombrotrofisilla suotyypeillä

Lakkasuon luokitustulokset on koottu taulukkoon 2. Suotyyppien luokitustarkkuus vaihteli 10×10-m aineistolla 31 ja 52 % välillä ja 20×20-m aineistolla 33 ja 66 % välillä. Molemmissa tapauksissa kNN asiantuntijavalinnalla valituilla muuttujilla tuotti heikoimman tuloksen ja RF kaikilla muuttujilla parhaan tuloksen. Kun lievät virheet otettiin huomioon, 20×20-m aineiston luokitustarkkuus oli 53–72 %, paremmuusjärjestyksen säilyessä samana.

RF-algoritmin valitsemat muuttujat olivat enimmäkseen korkeuteen liittyviä, *hq*- ja *hd*-muuttujia (taulukko 3). Tämä johtunee siitä, että siinä missä kentällä suotyyppien määrittämisessä pääpaino on pohjakerroksen lajistolla, ilmasta käsin tapahtuva laserkeilaus ei kykene sitä erottelemaan, jolloin puuston koko- ja tilarakenne jää tärkeimmäksi suotyyppijä erottavaksi tekijäksi. Samasta asiasta kertoo *pt*-muuttujan korkea sijoitus muuttujavalikoimassa.

Asiantuntijavalinnassa pyrittiin välttämään puhtaita *hq*- ja intensiteettimuuttujia yleistettävyyden maksimoimiseksi. Tämän vuoksi valittiin laskettuja muuttujia, kuten *iq25* ja *hd28*. Asiantuntijavalinnalla valituilla muuttujilla ei kuitenkaan päästy samaan luokitustarkkuuteen kuin kaikilla muuttujilla. RF oli paras luokitin myös näillä muuttujilla.

Taulukko 2. Lakkasuon luokitustulokset. Vasemmalla 20×20-m aineistolla saadut tulokset, oikealla 10×10-m aineistolla saadut tulokset

Menetelmä ja muuttujavalikoima	Karkea suotyyppi				Suotyyppi				Pääpuulaji			
	%	κ	%	κ	%	κ	%	κ	%	κ	%	κ
SVM kaikki	70	0.50	67	0.45	60	0.56	51	0.46	90	0.76	88	0.72
RF kaikki	80	0.67	74	0.57	66	0.62	52	0.46	92	0.81	90	0.75
kNN rf-valinta	65	0.42	60	0.32	45	0.39	33	0.24	88	0.72	88	0.70
SVM rf-valinta	61	0.36	61	0.35	52	0.47	45	0.38	90	0.71	87	0.69
kNN PCA-valinta	66	0.48	62	0.37	45	0.39	37	0.30	88	0.69	87	0.67
SVM PCA-valinta	61	0.35	61	0.34	47	0.41	42	0.35	88	0.70	88	0.70
kNN asiantuntijavalinta	59	0.32	59	0.31	33	0.25	31	0.23	89	0.72	87	0.69
SVM asiantuntijavalinta	65	0.42	62	0.37	50	0.44	45	0.38	88	0.71	87	0.67
RF asiantuntijavalinta	75	0.59	71	0.51	59	0.55	48	0.42	90	0.75	89	0.72
kNN pääkomponentit	70	0.51	66	0.43	49	0.43	42	0.36	88	0.72	86	0.66
SVM pääkomponentit	63	0.37	61	0.35	50	0.45	34	0.27	87	0.69	87	0.67
Ravinteisuustaso	Puustoiset suot				Sekatyyppin suot				Avosuot			
	%	κ	%	κ	%	κ	%	κ	%	κ	%	κ
SVM kaikki	79	0.72	75	0.66	86	0.74	78	0.59	77	0.65	69	0.53
RF kaikki	83	0.77	75	0.66	86	0.75	79	0.61	81	0.71	75	0.62
kNN rf-valinta	72	0.63	69	0.59	72	0.47	68	0.41	65	0.47	65	0.47
SVM rf-valinta	74	0.64	71	0.61	81	0.66	76	0.55	79	0.66	72	0.57
kNN PCA-valinta	72	0.62	67	0.55	70	0.43	65	0.33	67	0.50	62	0.42
SVM PCA-valinta	75	0.66	72	0.63	76	0.54	69	0.39	78	0.67	67	0.50
kNN asiantuntijavalinta	68	0.56	64	0.50	69	0.41	66	0.33	66	0.48	59	0.38
SVM asiantuntijavalinta	70	0.59	67	0.55	77	0.56	74	0.51	68	0.50	71	0.56
RF asiantuntijavalinta	77	0.69	71	0.61	81	0.66	75	0.53	76	0.63	69	0.53
kNN pääkomponentit	71	0.60	68	0.57	76	0.53	75	0.54	77	0.65	64	0.45
SVM pääkomponentit	74	0.65	64	0.51	79	0.61	66	0.39	78	0.66	69	0.53

Taulukko 3. RF:n valitsemat ja asiantuntijavalinnalla valitut muuttujat

Luokitus	RF:n valitsemat muuttujat tärkeysjärjestyksessä (20×20-m aineisto)
Karkea suotyyppi	<i>pt, hq10, hq1, hq48, imt, p1, hd6, hd5, p2, hq9, intc24, hq7, sdz, hq6, hd4</i>
Suotyyppi	<i>hq10, hq9, hq1, sdz, hq5, hd28, hq2, hq4, hq8, hq3, pg, hq6, img, hq48, pt</i>
Pääpuulaji	<i>hd28, hq5, hq4, p3, hd1, hq3, pg, hd2, hq6, hq9, hq8, hq2, hq7, img, int1</i>
Puustoiset suot	<i>hq10, hq9, p3, hq5, pg, hq6, hq8, hd28, hq7, hd1, hd2, iq1, hq4, hd3, hq48</i>
Sekatyyppin suot	<i>hq1, ps, hd28, hq3, hq2, ps_{NORM}, hq5, hq4, hq6, pg, hq48, hq10, hq7, sdz, int1</i>
Avosuot	<i>hq1, hq2, hq4, hq3, hq5, hq6, ps, hq7, hq8, ps_{NORM}, hq9, pg, intc4, hq48, intc2</i>
Asiantuntijavalinta (20×20-m aineisto)	
Karkea suotyyppi	<i>hummsize, sdz, pg, ps, pt, p1, p2, hd1, hd5, hd28, hq48, intc24, hq210, iq25, imgq5</i>
Suotyyppi	<i>hummsize, sdz, pg, ps, pt, p1, p2, hd1, hd5, hd28, hq48, intc24, hq210, iq25, imgq5</i>
Pääpuulaji	<i>hd1, hd3, hd5, imt, int4, hq210, hd28</i>
Puustoiset suot	<i>pt, imt, intc24, hq210, iq25, hq48, hd28</i>
Sekatyyppin suot	<i>pt, ps, pg, imt, intc24, hq20, iq25, hq48, hd28</i>
Avosuot	<i>ps, pg, p1, p2, hummnum, imgq5, iq25, intc24</i>

Luokitustuloksia tarkastellessa on huomattava, että käytetty harjoitusaineisto oli epärealistisen laaja. Todellisessa tilanteessa harjoitusaineisto pitäisi koota jonkinlaisella näytteenotolla, jolla saataisiin mahdollisimman suuri osa suolla esiintyvistä suotyyppien vaihtelusta mukaan, mutta joka ei kuitenkaan olisi maastossa tapahtuvaa täydellistä kuviointia työläämpi. Tällaista tilannetta simuloitiin käyttämällä Vähäsarjan (1998) pro gradu-työn 265:ttä Lakkasuon luonnontilaisella osalla olevaa kasvillisuusruutua harjoitusaineistona. Tällä harjoitusaineistolla RF:n luokitustarkkuus kaikilla muuttujilla oli 46 % ja kNN:n RF:n valitsemilla muuttujilla 34 %.

Pääpuulajin määrittäminen onnistui useimmissa tapauksissa kaikilla luokitusmenetelmillä. Tämä liittyy paitsi siihen, että luokkia oli vähän, myös siihen, että puuston rakenne on korpi- ja rämekehteillä erilainen. Lisäksi etenkin rehevempien kohteiden tervalepät erottuivat puustokerroksen intensiteetin perusteella muista.

Karkean suotyyppin luokittaminen onnistui tarkkaa suotyyppiä paremmin. Suhteutettuna luokkien vähyteen karkean suotyyppin luokittaminen ei kuitenkaan onnistunut huomattavasti paremmin kuin tarkan suotyyppin luokittaminen Kappa-arvon mukaan karkea suotyyppi määritettiin osin jopa tarkkaa suotyyppiä huonommin. Etenkin avosuot ja sekatyypin suot menivät usein keskenään sekaisin.

Ravinnetason määrittely onnistui melko hyvin. Tuloksia tulkitessa pitää ottaa huomioon, että ravinnetasoa luokiteltaessa aineisto oli jaettu etukäteen puustosiin, sekatyypin, ja avosoihin. Tämä oli perusteltua, koska ilmakuvan perusteella jako olisi oikeassakin tilanteessa mahdollista tehdä.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Ilmasta käsin tapahtuva laserkeilaus (Airborne laser scanning, ALS) osoittautui lupaavaksi soiden kartoituksen apuvälineeksi. Kasvilisuuden kolmiulotteiseen rakenteeseen liittyvät muuttujat osoittautuivat intensiteettimuuttujia tärkeämmiksi luokittelussa. Sen sovellukset puuston rakenteen kartoittamisessa tekevät siitä mahdollisesti hyödyllisen työkalun esimerkiksi puustoisten soiden ennallistamisen seurantaan. Suon pinnanmuotojen kartoittamiseen LiDAR osoittautui hyvin käyttökelpoiseksi. Lisää tutkimusta kuitenkin tarvitaan etenkin muuttujien kalibroimisen kannalta. Lisäksi koko aaltomuodon tallentava keilain voi erottaa kasvillisuuden piirteitä diskreettejä vasteita tallentavaa laitetta paremmin.

VIITTEET

- Ahokas, E., Kaasalainen, S., Hyypä, J., Suomalainen, J., 2006. Calibration of the Optech ALTM 3100 laser scanner intensity data using brightness targets. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(A1) CD-ROM, 6 sivua.
- Kaasalainen, S., Hyypä, J., Litkey, P., Hyypä, H., Ahokas, E., Kukko, A. 2007a. Radiometric calibration of ALS intensity. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36, 201–205.
- Korpela, I., Koskinen, M., Vasander, H., Holopainen, M., Minkkinen, K., 2009. Airborne small-footprint discrete-return LiDAR in the assessment of boreal mire surface patterns, vegetation and habitats. *Forest Ecology and Management* 258 (7) ss. 1549-1566.
- Morsdorf, F., Frey, O., Koetz, B., Meier, E. 2007. Ray tracing for modeling of small footprint airborne laser scanning returns. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36, 294–299.
- Vähäsarja, A., 1997. Kasvillisuuden vaihtelu viettokeittaalla Pohjois-Hämeessä. Soiden ekologian ja suometsätieteen pro gradu-työ. Helsingin yliopisto, metsäekologian laitos.
- Wagner, W., Hyypä, J., Ullrich, A., Lehner, H., Briese, C., Kaasalainen, S., 2008. Radiometric Calibration of Full-Waveform Small-Footprint Airborne Laser Scanners. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII (B1), Beijing 2008, 163–168.
- Wehr, A., Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, 68–82.

ENNAKKORAIVAUKSEN MERKITYS NUOREN METSÄN HOITOKOHTEELLA

Jussi Laurila¹ & Risto Lauhanen²

JOHDANTO

Nuorten metsien osuus on suuri maassamme ja niiden hoito on tärkeää tulevaisuuden puuntuotannon kannalta (Metsätilastollinen... 2008). Nuoren metsän hoitokohteet ovat merkittäviä metsäenergian lähteitä, joita hyödyntämällä voidaan edistää myös bioenergian käytön lisäämistavoitteita. Ennakkoraivauksen merkitystä nuoren metsän hoitokohteilla käsitteleviä tutkimuksia on tehty niukasti. Kärhä ym. (2006) selvittivät ennakkoraivauksen merkitystä ensiharvennuskohteilla. Käytännössä ennakkoraivauksen positiivinen vaikutus hakkuun tuottavuuteen ja työn laatuun tiedostetaan. Koneurakoitsija hyötyy ennakkoraivauksen ansiosta parantuneesta näkyvyydestä, joka lisää hakkuutyön tuottavuutta. Myös metsänomistaja hyötyy ennakkoraivauksesta, koska se vaikuttaa metsänhoitotyön laatuun.

Seinäjoen ammattikorkeakoulu selvitti ”Bioenergian tuotannon ja käytön kehittäminen”-hankkeella ennakkoraivauksen taloudellista merkitystä tapaustutkimuksen avulla nuoren metsän hoitokohteella vuonna 2007. Päättyneen hankkeen rahoitus oli peräisin pääosin EAKR:sta. Ennakkoraivaustutkimuksen toimeksianto tuli metsäalan käytännön toimijoilta ja tutkimus toteutettiin yhteistyössä Metsäliiton kanssa. Tapaustutkimuksen päädyttiin, koska käytettävissä olevat resurssit olivat rajalliset ja tutkimuksen tuloksia tarvittiin nopeasti. Tulokset esitettiin vuonna 2007 ja 2008 ainoastaan kalvosarjana sekä artikkelina Koneyrittäjä ja Tidningen Skogsteknik -lehdessä (Lauhanen & Laurila 2007, Lauhanen & Laurila 2008).

Varsinainen käsillä oleva tutkimusraportti kirjoitettiin Etelä-Pohjanmaan metsäkeskuksen ja Seinäjoen ammattikorkeakoulun maa- ja metsätalouden yksikön yhteisen ”Kehittyvä metsäenergia”-hankkeen toimesta. Hanketta rahoittaa Manner-Suomen maaseutuohjelma ja rahoituksen ovat myöntäneet Etelä-Pohjanmaan ja Pohjanmaan TE-keskukset. Hanke on kolmivuotinen ja sen tavoitteena on selvittää kokonaisvaltaisesti metsäenergian mahdollisuuksia, ongelmia ja tietotarpeita Etelä-Pohjanmaan metsäkeskuksen toimialueella.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ennakkoraivauksen vaikutus hakkuutyön tuottavuuteen sekä kustannuksiin. Lisäksi tavoitteena oli selvittää ennakkoraivauksen vaikutusta hakkuutyön ja energiapuun laatuun. Tutkimuksen tuloksia yleistettäessä on huomioitava, että tulokset pätevät ainoastaan tapaustutkimuksen kaltaisilla kohteilla.

¹ Tutkija, Seinäjoen ammattikorkeakoulu, Maa- ja metsätalouden yksikkö, Tuomarniementie 55, 63700 Ähtäri, Puh: +358 40 8681208, Fax: +358 20 1245801, E-mail: etunimi.sukunimi@seamk.fi

² T&K-päällikkö, Seinäjoen ammattikorkeakoulu, Maa- ja metsätalouden yksikkö, Tuomarniementie 55, 63700 Ähtäri, Puh. +358 40 8304150, Fax: +358 20 1245801, E-mail: etunimi.sukunimi@seamk.fi

AINEISTO JA MENETELMÄT

Aineisto kerättiin kesällä 2007 Jalasjärvellä. Tutkimusalueeksi valittiin Metsäliiton kanssa yhteistyössä 3,0 hehtaarin kokoinen työmaa mahdollisimman tasaikäistä ja -rakenteista nuorta kasvatusmetsää. Kohteella oli kiireellinen nuoren metsän hoidon tarve ja pääpuulajina oli mänty. Metsätyypiltään kuvio oli hieman soistunut tuore kangas.

Alueen keskimääräiset puustotunnukset kantoläpimitaltaan yli 4 cm puiden osalta ennen toimenpiteitä olivat: keskiläpimitta 11 cm, valtapituus 9 m, pohjapinta-ala 22 m² ja ikä 27 vuotta. Puuston runkoluku mitattiin erikseen kantoläpimitaltaan alle 4 cm ja yli 4 cm rungoille, koska käytännössä ennakkoraivauksessa poistetaan kaikki kantoläpimitaltaan alle 4 cm puut. Alle 4 cm runkojen lukumäärä oli noin 18 000 kpl/ha ja niistä suurin osa oli hieskoivua. Kantoläpimitaltaan yli 4 cm runkoja oli 4 400 kpl/ha.

Aluksi työmaa jaettiin kahteen yhtä suureen osaan, joista toinen puoli ennakkoraivattiin ja toinen puoli jäi raivaamatta. Alue merkittiin maastoon värillisellä kuitunauhalla. Molempien puoliskojen puustotunnukset mitattiin, ennen ja jälkeen toimenpiteitä (raivaus ja/tai hakkuu). Puusto inventoitiin koealoittain tasaväliotannalla. Ennen toimenpiteitä molemmilta puoliskoilta mitattiin 5 koealaa ja toimenpiteiden jälkeen 6 koealaa. Ennakkoraivauksen tekivät raportin kirjoittajat sekä ohjelmapäällikkö Tapio Sivula Etelä-Pohjanmaan TE-keskuksesta. Raivaukseen kuluneesta ajasta pidettiin tuntikirjanpitoa, jonka perusteella laskettiin ennakkoraivauksesta aiheutuneet kustannukset.

Hakkuutyö tehtiin yrittäjä Jukka Virnalan Ponsse Wisent Dual -koneella, jossa oli EH25 -joukkokäsittelykoura (kuva 1). Kone oli vuoden 2006 mallia, ja sillä oli ajettu noin 4 500 tuntia. Koneen massa oli työvarustuksessa 15 tonnia, ja koneen puomin ulottuvuus 10 metriä. Puut korjattiin kokopuuna ja ne käytettiin energiantuotantoon. Hakkuutyö ja metsäkuljetus tehtiin erikseen. Ennakkoraivattu ja raivaamaton kuvion osa käsiteltiin myös erikseen ja kuljettaja piti työhön kuluneesta ajasta tuntikirjanpitoa koneen tuntimittarin mukaan.



Kuva 1. Hakkuu tehtiin Ponsse Wisent Dual -koneella, jossa oli EH25 -joukkokäsittelykoura (kuva: Jussi Laurila).

Aineisto analysoitiin syksyllä 2007 ja laskennat tehtiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Tuottavuus- ja kustannuslaskelmissa käytettiin yrittäjän ilmoittamaa koneen työmaa-aikaa. Hakkuun ja raivauksen taksoina käytettiin Seinäjoen ammattikorkeakoulun ja Metsäntutkimuslaitoksen yhteisjulkaisussa esitettyjä keskimääräisiä tuntitaksoja: hakkuu 67 €/h ja raivaus 160 €/päivä (Lauhanen ym. 2007).

Mittausten ja laskelmien lisäksi tutkimuksessa haastateltiin jalasjärveläistä koneyrittäjää Jukka Virmalaa, jolla on vuosien kokemus metsäkonealasta. Haastattelulla selvitettiin ennakkoraivauksen tuomia etuja ja raivaamattomuuden haittoja koneyrittäjän näkökulmasta. Yrittäjän näkemykset esitetään tiivistetysti tulosten lopussa.

TULOKSET

Puustotunnukset

Ennen ennakkoraivausta työmaan runkoluku oli noin 15 500 kpl/ha raivattavalla kohteella ja ennakkoraivaamattomalla kohteella noin 20 500 kpl/ha kantoläpimitaltaan alle 4 cm puiden osalta. Hakkuun jälkeen raivaamattoman alueen runkoluku oli noin 8 000 kpl/ha ja raivatun alueen 0 kpl/ha kantoläpimitaltaan alle 4 cm puiden osalta. Raivaamattomalta alueelta poistui hakkuussa alle 4 cm runkoja noin 12 500 kpl/ha.

Kantoläpimitaltaan yli 4 cm puiden määrä raivatulla alueella ennen hakkuuta oli noin 4 000 kpl/ha ja raivaamattomalla alueella noin 4 900 kpl/ha. Hakkuun jälkeen molempien alueiden runkoluku oli noin 1 200 kpl/ha.

Kantoläpimitaltaan yli 4 cm puiden keskiläpimitta raivatulla alueella ennen hakkuuta oli 12 cm ja raivaamattomalla 10 cm. Hakkuun jälkeen keskiläpimitta oli sekä raivatulla että raivaamattomalla alueella 12 cm.

Puuston valtapituus oli ennakkoraivatulla alueella ennen hakkuuta 10 metriä ja raivaamattomalla alueella 9 metriä. Hakkuun jälkeen valtapituus oli raivatulla ja raivaamattomalla alueella hieman yli 9 metriä.

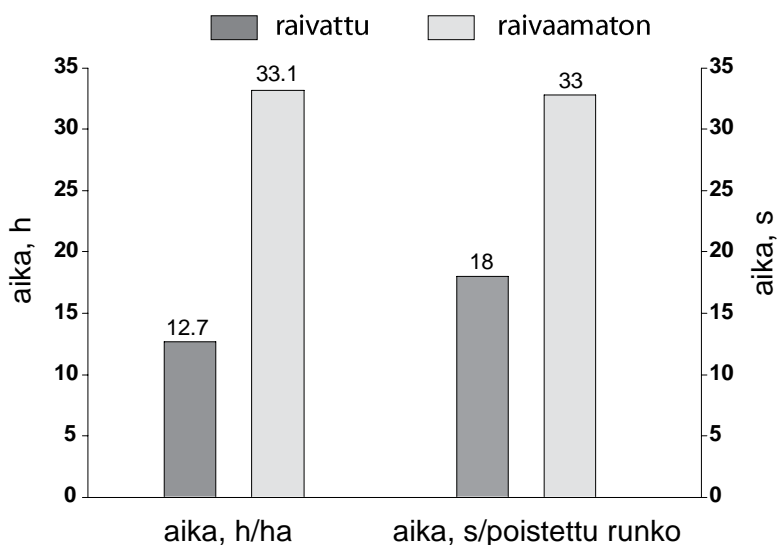
Ajourat ja korjuuvauriot

Tutkimuksen mukaan nuoren metsän hoitokohteen ennakkoraivauksella ei ollut vaikutusta ajouran leveyteen eikä ajouraväliin. Keskimääräinen ajouraleveys oli ennakkoraivatulla sekä raivaamattomalla alueella noin 4 metriä ja ajouraväli noin 18 metriä.

Koealamittausten perusteella runkoihin kohdistuneet korjuuvauriot olivat samat sekä ennakkoraivatulla että raivaamattomalla alueella ja niitä oli noin 70 kpl/ha (5,8 %). Sen sijaan silmämääräisen arvion perusteella koealojen ulkopuolella raivaamattomalla alueella oli runkovauriota huomattavasti raivattua aluetta enemmän. Juuristovaurioita oli raivatulla alueella noin 40 kpl/ha (3,3 %) ja raivaamattomalla alueella niitä ei ollut lainkaan.

Hakkuutyön tuottavuus

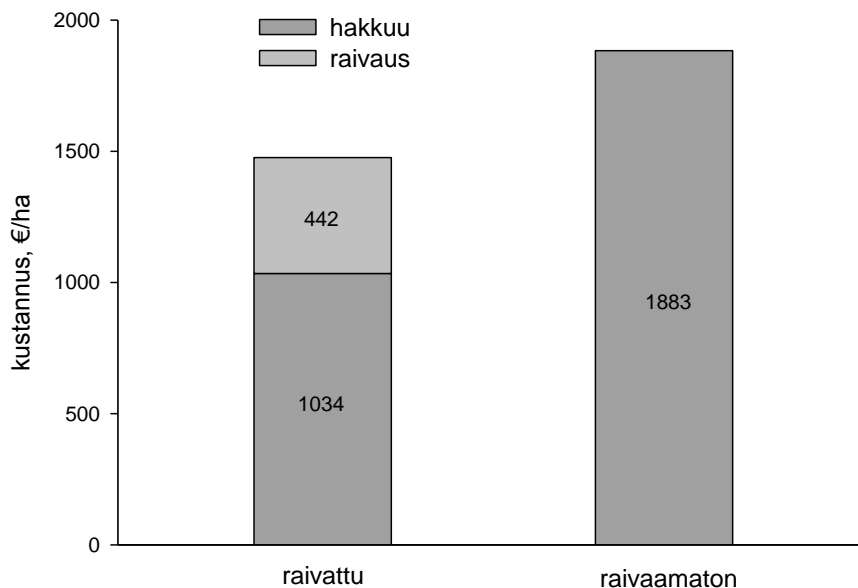
Ennakkoraivatulla alueella hehtaarin hakkuutyöhön kului aikaa noin 13 tuntia ja raivaamattomalla alueella noin 33 tuntia (kuva 2). Hakkuutyön tuottavuus ennakkoraivatulla alueella oli siis 2,6 kertaa suurempi kuin raivaamattomalla alueella. Poistettua runkoa kohti tarkasteltuna ajanmenekki raivatulla alueella oli 18 s/runko ja raivaamattomalla 33 s/runko. Työn tuottavuuden ero oli tällöin 1,8-kertainen.



Kuva 2. Hakkuutyön tuottavuus ennakkoraivatulla ja raivaamattomalla alueella, h/ha ja s/poistettu runko.

Kustannukset

Ennakkoraivatun ja raivaamattoman alueen kustannuslaskelmat tehtiin runkoluvulla painottaen hieman erilaisista puustotiheyksistä johtuen. Ennakkoraivatun alueen työkustannukset olivat yhteensä 1476 €/ha (kuva 3) ilman metsäkuljetusta. Kustannukset aiheutuivat ennakkoraivauksesta 442 €/ha ja hakkuusta 1034 €/ha. Raivaamattomalla alueella hakkuun kustannukset olivat 1883 €/ha. Ero raivatun ja raivaamattoman alueen välillä oli 407 €/ha ennakkoraivatun alueen eduksi.



Kuva 3. Raivauksen ja hakkuun kustannukset ennakkoraivatulla ja raivaamattomalla alueella, €/ha.

Koneurakoitsijan näkemys ennakkoraivauksesta

Ennakkoraivaus parantaa merkittävästi näkyvyyttä maastossa. Raivatulla kohteella hakkuutyön tekeminen on mielekästä, ja kuljettajan motivaatio pysyy hyvänä koko työvuoron ajan. Myös koneen toimintaedellytykset ovat hyvät ennakkoraivatulla alueella. Ihannetapauksessa ennakkoraivaus tulisi tehdä vuotta ennen hakkuutta. Tällöin näkyvyys olisi paras mahdollinen, koska raivatussa puustossa ei olisi lehtiä ja rungot olisivat painuneet maata vasten muun muassa lumikuorman vaikutuksesta.

Koneyrittäjän mukaan metsätöissä kuljettajan tavoitteena on aina hyvä työnjälki, mutta ennakkoraivaamattomalla alueella tavoitteen saavuttaminen on vaikeaa. Ennakkoraivaamattomalla alueella hakkuutyön laatu kärsii helposti, koska kuljettajalla ei ole riittävästi näkyvyyttä tiheästä pieniläpimittaisesta puustosta johtuen. On tärkeää, että kuljettajalla on esteetön näkyvyys hakkuukoneen kaatopäähän.

Ennakkoraivaus vaikuttaa myös energiapuun laatuun. Mikäli raivausta ei suoriteta, niin pieniläpimittaiset rungot nousevat hakkuun yhteydessä helposti maasta juurinen tuoden energiapuukasoihin maa-ainesta ja mahdollisia muita epäpuhtauksia. Tämä aiheuttaa energiapuun haketuksessa hakkurin terien tylsymistä ja vaurioitumista. Raivaamattomalla alueella työskentely vaati kuljettajalta suurempaa keskittymistä kuin raivatulla alueella työskentely. Kuljettajan motivointi raivaamattomalle kohteelle on vaikeaa.

TULOSTEN TARKASTELU

Tulosten perusteella ennakkoraivauksen merkitys nuoren metsän hoitokohteella on suuri ja siitä aiheutuvat kustannukset saadaan takaisin hakkuutyön tuottavuuden parantumisen

johdosta. Ennakkoraivauksen positiivinen merkitys perustuu hakkuutyön nopeutumiseen työmaan parantuneen näkyvyyden ansiosta. Kokeneen metsäkoneyrittäjän näkemykset ennakkoraivauksen merkityksestä vahvistavat työntutkimuksen tuloksia.

Ennakkoraivatun ja raivaamattoman alueen puustotunnukset (runkoluku, keskiläpimitta ja valtapituus) poikkesivat hieman toistaan. Tämä saattaa vaikuttaa jonkin verran tuloksiin. Hakkuutyön jälkeen sekä raivatun että raivaamattoman alueen puusto oli harvennettu metsänhoitosuosituksen mukaiseen tavoitetiheyteen. Ennakkoraivauksella ei havaittu olevan vaikutusta jäävän puuston tiheyteen, ajouraleveyteen eikä ajouraväliin.

Raivatun ja raivaamattoman alueen pienestä runkoluvun erosta johtuen kustannuslaskelmat tehtiin hakkuupoistuman runkoluvulla painottaen. Näin saatiin eliminoitua alueiden välisen runkoluvun eron vaikutus tuloksiin. Kustannuslaskelmissa käytettiin Seinäjoen ammattikorkeakoulun ja Metsäntutkimuslaitoksen yhteisjulkaisussa esitettyjä keskimääräisiä tuntitaksia (Lauhanen ym. 2007). Käytännössä koneyritykselle kuitenkin maksetaan usein joko tilavuuden tai massan perusteella urakkaperusteisesti. Tällöin raivauksen merkitys oletettavasti poikkeaisi tämän tutkimuksen tuloksista.

Puustovaurioita ilmeni syksyllä toteutetulla soistuneen kankaan työmaalla. Juuristovaurioita oli ennakkoraivatulla alueella enemmän kuin raivaamattomalla alueella. Ilmiölle on vaikea löytää selitystä. On mahdollista, että tämä johtuu satunnaisvaihtelusta ja että suuremmalla aineistolla tulos olisi ollut toinen. Suurempi koealojen määrä olisi niin ikään saattanut vaikuttaa tuloksiin. Runkovaurioiden määrään ennakkoraivauksella ei havaittu olevan eroa.

JOHTOPÄÄTÖKSET

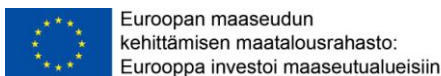
Tämän tapaustutkimuksen perusteella ennakkoraivaus oli nuoren metsän hoitokohteella kannattava toimenpide ja se lisäsi hakkuutyön tuottavuuden noin kaksinkertaiseksi raivaamattomaan tilanteeseen verrattuna. Ennakkoraivatulla kohteella työskentely on mielekästä hyvästä näkyvyydestä johtuen.

Kyseessä oli tapaustutkimus eikä tuloksia voida yleistää koskemaan kaikkia nuoren metsän hoitokohteita. Tulokset pätevät ainoastaan tutkimuskohteen kaltaisissa olosuhteissa. Myös koneella ja koneen kuljettajalla on todennäköisesti suuri vaikutus tuottavuuteen ja hakkuutyön laatuun. Jokaisen yrittäjän kannattaa tehdä aina itse omat kannattavuus- ja kustannuslaskelmat päätöksenteon tueksi. Toki ennakkoraivaus on ensisijaisesti metsänomistajan asia.

Tämän tutkimuksen perusteella voitaisiin tehdä laajempi selvitys ennakkoraivauksen merkityksestä erilaisilla kohteilla. Lisätutkimuksessa työajan seuranta kannattaisi tehdä tehotunteihin perustuen. Näin voitaisiin selvittää ennakkoraivauksen vaikutusta koneen toiminnalliseen käyttöasteeseen. Lisäksi olisi tärkeää määrittää raja-arvot ennakkoraivauksen kannattavuudelle.

Kiitokset

Tutkimusta on rahoittanut Euroopan unioni.



VIITTEET

- Kärhä, K., Keskinen, S., Kallio, T., Liikkanen, R. & Lindroos, J. 2006. Ennakkoraivaus osana ensiharvennuspuun korjuuta. Metsätehon raportti 187.
- Lauhanen, R. Laitila, J., Laurila, J. & Asikainen, A. 2007. Pienpuuhakkeen hankintakustannukset Etelä-Pohjanmaan tavoite 2 –alueella. Teoksessa: Lauhanen, R. & Laurila, J. (toim.) Bioenergian hankintalogistiikka. Tapaustutkimuksia Etelä-Pohjanmaalta. Seinäjoen ammattikorkeakoulun julkaisu B33.
- Lauhanen, R. & Laurila, J. 2007. Nuoren metsän hoitokohteen ennakkoraivaus: Työn tuottavuus parani selvästi. Koneyrittäjä 10/2007.
- Lauhanen, R. & Laurila, J. 2008. Markant produktionsförbättring. Tidningen Skogsteknik 2/2008.
- Metsätilastollinen vuosikirja 2008. Metsäntutkimuslaitos. Suomen virallinen tilasto.

MATEMAATTINEN MALLINTAMINEN SOVELLETUISSA TIETEISSÄ

Mikko Havimo¹

JOHDANTO

Luonnontieteissä on historiallisesti hyvin pitkä tutkimusmenetelmien ja metodologioiden perinne, jonka pohjalle varsinkin nykyaikainen fysiikan tutkimus rakentuu. Sovelletuissa tieteissä - olivat ne sitten metsäntutkimus tai paperinvalmistus - tutkimusmenetelmät eivät välttämättä ole yhtä vankalla perustalla kuin vanhemmissa luonnontieteissä. Erityisesti ilmiöiden mallinnuksen metodologiasta näyttää olevan kirjallisuutta vain vähän. Tilastollisia malleja tosin käsitellään useissa alan teoksissa, ja aihealue on laaja ja syvä, mutta tämä mallinnuksen osa ei pysty vastamaan kaikkiin sovellettujen alojen ongelmiin.

Fysiikan tutkimuksessa käytetään mallinnukseen menetelmää, jota paremman puutteessa voi kutsua matemaattiseksi mallinnukseksi. Tämän artikkelin tavoitteena on käsitellä matemaattista mallinnusta sovelletun tutkimuksen työvälineenä. Tavoitteena ei ole tehdä mitään lopullisia päätelmiä menetelmän käytöstä, vaan herättää keskustelua niistä tavoista, joilla sovellettua tutkimusta tehdään.

Matemaattinen mallintaminen on hieman keinotekoinen nimi sellaiselle kvantitatiiviselle tutkimukselle, jonka työkaluna käytetään erilaisia matemaattisia menetelmiä. Logan (2006) on määritellyt matemaattisen mallin olevan ”yhtälö tai yhtälöryhmä, joka on kuvaus jostain fysikaalisesta ongelmasta tai ilmiöstä jonka alkuperä on luonnontieteissä, insinööritieteissä tai ekonomiassa”. Määritelmä on hyvin laaja, sillä lähes kaikissa luonnon- ja insinööritieteiden tutkimuksissa pyritään ilmiöitä esittämään matemaattisesti. Tarkka määrittelemine ei ole välttämättä ole edes kovin hedelmällistä, joten esimerkiksi Howison (2005) on todennut matemaattisen mallin olevan ”jonkinlainen matemaattinen ilmaus ongelmasta, joka on alun perin esitetty epämatemaattisin termein”.

Mallintamisen tavoitteena on tavallisesti teoreettinen ymmärrys tutkittavasta ilmiöstä. Matemaattinen mallintaminen on usein eksplikaatiivista, eli mallit selittävät jotain ilmiötä yksinkertaisempien ja perustavampien prosessien avulla (Howison 2005). Malleja voidaan tehdä myös deskriptiivisesti, jolloin mitattuun dataan sovitetaan tilastollisilla menetelmillä sopiva yhtälö. Esimerkiksi jos eläimen kokoa mitataan koko sen elinajan, ja mittauksiin sovitetaan regressioyhtälö, saadaan tilastollinen malli. Se antaa tietysti hieman uutta tietoa eläimen kehityksestä, mutta kasvudynamiikan mallintaminen differentiaaliyhtälöiden avulla, jotka sisältävät kuvaukset ravinnon kulutuksesta ja eläimen tarvitsemasta energiasta, kertovat enemmän niistä rajoitteista ja mahdollisuuksista joita eläimen koon kasvulla on. Siksi eksplikaatiivinen mallintaminen antaa tukevamman teoreettisen pohjan tutkimukselle, kuin tilastollisiin menetelmiin

¹ Tohtorikoulutettava, Metsävarojen käytön laitos, PL 27, FI-00014 Helsingin yliopisto, Puh: +358 9 191 58183, Fax: +358 9 1915 8159, E-mail: etunimi.sukunimi@helsinki.fi

perustavat deskriptiiviset mallit. Ikävä kyllä eksplikaatiiviset mallit ovat myös huomattavasti vaikeampia luoda ja hankalampia ratkaista.

MATEMATIIKAN MAHDOLLISUUDET

Malleja voidaan rakentaa mitä erilaisimmista perustarpeista. Lentokoneesta tehty pienoismalli, joilla tutkitaan aerodynamiikka tuulitunnelissa, on yksi tapa mallintaa lentämistä. Abstraktit mallit voivat yhtä hyvin olla verbaalisia kuvauksia ilmiöstä kuin matemaattisia yhtälöryhmiä. Verbaalisten mallien hankaluutena on kuitenkin se, että ne eivät tuota kvantitatiivisia tuloksia kuvattavasta ilmiöstä. Siksi matemaattiset mallit ovat huomattavasti tavallisempia kuin verbaaliset.

Toinen matematiikan etu mallintamisessa on sen luonne formaalina kielenä. Matematiikassa muotoillaan uusia otaksunia ja osoitetaan ne todeksi deduktiivisella päättelyllä, joka lähtee asianmukaisesti valituista aksioomista ja määrittelyistä (Davis & Hersh 1981). Esimerkiksi dynaamisten mallien ytimessä oleva differentiaalilaskenta on kehitetty lähtien liikkeelle muutamasta aksioomasta ja määrittelystä. Deduktiivisen päättelyketjun lopputuloksena on saatu aikaan joukko työvälineitä, joiden avulla dynaamisia systeemejä pystytään mallintamaan.

Formalismissa piilee matematiikan käyttökelpoisuus mallintajalle: matemaatikot ovat todistaneet, että differentiaalilaskenta on sisäisesti looginen ja täsmällinen rakennelma. Mallintajan, joka käyttää differentiaalilaskentaa, ei itse tarvitse miettiä käyttämänsä päättelyketjun loogisuutta, niin kauan kuin hänen tutkimansa ilmiö ei ole ristiriidassa differentiaalilaskennan aksioomien ja määrittelyjen kanssa. Tosin kysymys ilmiön ja differentiaalilaskennan aksioomien ja määrittelyjen ristiriidattomuudesta ei ole mitenkään triviaali tai helppo.

Matematiikka on siis mallintajalle keino viedä loogista päättelyä eteenpäin, ja tuottaa kvantitatiivisia tuloksia joita voidaan verrata mittauksiin. Jotta matematiikan sisäistä logiikkaa voitaisiin soveltaa, täytyy ensin pystyä muotoilemaan alkutilanne, josta matemaattinen ratkaiseminen voi lähteä liikkeelle.

MISTÄ LÄHTEÄ LIIKKEELLE

Matematiikan käyttämistä mallintamisen työkaluna voi havainnollistaa parhaiten esimerkin avulla. Sellaiseksi käy hyvin lämmön johtuminen, sillä se on tyypillinen ongelma erilaisissa teollisuusprosesseissa. Esimerkiksi paperikoneen kuivatusosan telojen lämmönjohtumisen hallitseminen on tärkeää paperin laadun ja energiankulutuksen kannalta.

Oppikirjoissa lämmönjohtumisen käsittely aloitetaan toteamalla että ”*Energian siirtyminen johtumalla on seurausta lämpötilagradientista aineessa*” (ks. esimerkiksi Baehr & Stephen 2006). Tästä sanallisesti esitetystä hypoteesista muotoillaan alkuyhtälö, josta edetään matematiikan avulla. Jotta hypoteesi olisi helpompi ymmärtää, kannattaa se kirjoittaa hieman toisella tavalla

1. Lämpöenergia virtaa suuremmasta lämpötilasta pienempään.
2. Energiavuon nopeus riippuu lämpötilaeron suuruudesta.

Kun kohta yksi muotoillaan matemaattisesti, tarvitaan muuttujat lämpötila, lämpövuoto, paikka ja aika. Lämpötila ja -vuoto ovat riippuvia muuttujia, kun taas aika ja paikka ovat

riippumattomia. Muuttujia voi ilmaista vaikka kirjaimilla U (lämpötila), v (lämpövuoto), t (aika) ja x (paikka). Oletetaan vielä että mallinnetaan lämpövuotoa tangossa, jonka ala on A . Mittaushavainnon kohdassa kaksi puhutaan energiavuon nopeudesta. Energian yksikkö on Joule ja vuo tarkoittaa energian virtaamista tietyn pinta-alan läpi aikayksikköä kohti, eli energiavuon v yksiköksi tulee $J/s \cdot m^2$. Se riippuu mittaushavaintojen toisen kohdan mukaan lämpötilaeron suuruudesta. Ero tai muutos voidaan matemaattisesti esittää derivaatan avulla. Jos $U(x,t)$ on funktio, joka kertoo lämpötilan paikassa x ajanhetkellä t , niin lämpötilan muuttuminen kahden pisteen välillä suhteessa niiden etäisyyteen on

$$\frac{U(x,t) - U(x + \Delta x, t)}{\Delta x} \quad (1)$$

Kun Δx lähestyy nollaa, eli etäisyys kahden pisteen välillä käy hyvin pieneksi, tulee yhtälöstä 1 funktion U derivaatta. Yhtälön $\frac{dU}{dx}$ yksikkö on nyt hieman erikoinen: C/m .

Termi $\frac{dU}{dx}$ siis verrannollinen lämpövuon nopeuteen v , mutta koska termeillä on erilaiset yksiköt, tarvitaan vakio K [$J/m \cdot s \cdot C$] jolla kertomalla saadaan relaatio

$$v = -K \frac{dU}{dx} \quad (2)$$

Miinusmerkki yhtälössä tulee havainnon osasta 1, jonka mukaan lämpö virtaa suuremmasta lämpötilasta pienempään.

Yhtälö 2 on nyt sellaisessa muodossa, että siitä voidaan jatkaa eteenpäin tavallisilla matemaattisilla työkaluilla. Mallintamistakin matkan varrella tarvitaan vielä melkoisesti, sillä yhtälöstä puuttuu esimerkiksi differentiaaliyhtälöissä tarvittavat alkutilat ja reunaehdot. Yhtälön 2 eteenpäin johtaminen löytyy esimerkiksi Kreyszin (1993) kirjasta.

Mallintamisen henkeen kuuluu, että vakiosta K ei tässä vaiheessa olla huolissaan. Vakioiden tarkempi määrittely on harvemmin kiinnostavin osa mallinnusta. Ne yleensä mitataan jollain sopivalla keinolla, tai johdetaan jostain toisista vakioista.

Esimerkki osoittaa miten sanallisesta kuvauksesta muotoillaan matemaattinen yhtälö. Siinä ei kuitenkaan vielä käsitelty miten sanalliseen kuvaukseen on päädytty. Tämä kohta itse asiassa ohitetaan useimmissa lämpöopin oppikirjoissa; hypoteesi annetaan niissä yleensä ikään kuin ylhäältä, eikä sen alkuperää pohdita.

ALKUHYPOTEESI

Hypoteesia, josta mallinnus lähtee liikkeelle, voidaan nimittää vaikka alkuhypoteesiksi. Sen lisäksi mallinnuksessa tarvitaan myöhemminkin erilaisia oletuksia ilmiöstä, kuten esimerkiksi oletusta energian häviämättömyydestä. Entä mistä alkuhypoteesi saadaan? Tässä ilmeisesti vain lopputulos ratkaisee, ja kaikki keinot ovat sallittuja. Mukaan lukien arvaaminen. Kerrotaan että Paul Dirac, joka oli yksi kvanttimekaniikan keskeisimpiä kehittäjiä, arvasi tutkimiaan ilmiöitä kuvaavat yhtälöt (Feynman 1983). Arvaaminen on kuitenkin melko epävarma tapa tuottaa malleja, sillä yksinkertaisimmastakin systeemistä voi saada aikaan lukemattomia muuttujien välisiä kombinaatioita, joista yhtälöt voi muodostaa.

Yksi tapa alkuhypoteesin muotoilemiseksi on lähteä liikkeelle muutamasta mitatusta havainnosta, jotka kuvaavat tutkittavaa ilmiötä. Näin on tehty myös lämmönjohtumisen malleja kehitettäessä. Mittauksissa on havaittu kuuman kappaleen jäähtymisen riippuvan kappaleen ja ympäristön välisestä lämpötilaerosta. Jäähtyminen on sitä nopeampaa, mitä suurempi lämpötilaero on. Näistä havainnosta voidaan muotoilla edellä esitetyt alkuhypoteesit.

Mittauksien käyttäminen on siis yksi tapa muotoilla alkuhypoteesi, mutta myös muita tapoja on olemassa. Esimerkiksi Einstein oli hyvin kuuluisa erilaisten ajatuskokeiden (Gedankenexperiment) tekijä. Kuvittelemalla valonsäteen kulun liikkuvassa hississä, Einstein kehitti ajatuskokeen, joka puolestaan toimi pohjana Yleiselle suhteellisuusteorialle (Brown 1991).

Ajatuskokeita on erityyppisiä, mutta mallintamisen kannalta mielenkiintoisin on niin sanottu Platoninen ajatuskoe. Brown (1991) määrittelee sen seuraavalla tavalla:

"A platonic thought experiment is a single thought experiment which destroys an older and existing theory and simultaneously generates a new one; it is *a priori* in that it is not based on new empirical evidence nor is it merely logically derived from old data; and it is an advance in that the resulting theory is better than the predecessor theory."

Brownin mukaan Galileon ajatuskoe eripainoisten kappaleiden tippumisnopeuksista on hyvä esimerkki platonisesta ajatuskokeesta. Ensiksikin se tuhosi vanhan Aristoteleen teorian, jonka mukaan raskaammat kappaleet tippuvat nopeammin. Toiseksi se loi kokonaan uuden teorian vanhan tilalle. Kolmanneksi ajatuskoe ei perustu uuteen mitattuun *a priori* tietoon. Tämä on mallintajan kannalta mielenkiintoisin osa platonisessa ajatuskokeessa. Toki platonisessakin ajatuskokeessa on mukana empiiristä tietoa, mutta siinä ei ole uutta tietoa, josta kehitettäisiin uusi teoria.

Mallinnusta auttaisi paljon, jos ajatuskokeiden tekemiseen olisi valmis resepti. Vaikka erilaisia ajatuskokeita voidaan taksonomisesti luetteloida, ja löytää niistä yhteisiä piirteitä, ei mitään valmista ohjenuoraa niiden kehittämiseen ole (Brown 1991). Loppujen lopuksi ajatuskokeet perustuvat tutkijan omaan mielikuviin ja tutkittavan ilmiön tuntemukseen.

KAKSI TODELLISUUTTA

Edellä kerrottiin kuinka mallintaminen lähtee liikkeelle jostain tehdystä havainnosta, tässä tapauksessa kappaleen mitatusta jäähtymisestä. Lisäksi mallinnuksen apuna käytettiin muutamaa implisiittistä oletusta, kuten energian säilymlakia. Matematiikasta puolestaan otettiin avuksi derivaatan määritelmä, jonka avulla mittauksien yksi osa muunnettiin formaaliksi lausumaksi. Tällä tavoin etenemällä päädyttiin lopulta yhtälöön 2, josta ilmiön matemaattinen ratkominen alkaa. Tästä eteenpäin mallintamista vie eteenpäin matematiikan sisäinen logiikka, joskin muutamassa kohdassa, kuten reunaehtojen ja alkutilan määrittelyissä, täytyy reaalimaailman havainnot muuntaa matemaattisiksi lausumiksi tai termeiksi.

Jos mallintaja ei käytä ajatuskokeita alkuhypoteesin muotoilemiseen, tarvitsee hän *a priori* tietoa tutkittavasta ilmiöstä. Sitä saadaan mittauksista, mutta ongelmaksi muodostuu tavallisesti se, että etukäteen ei tiedetä mitä ilmiöstä kannattaa mitata. Toisaalta mittauksissa on aina mittausvirhettä, joten ilmiöstä ei välttämättä saada luotettavaa kuvaa.

Ongelmana on myös se, että todellisuudessamme fysikaalisia objekteja ja prosesseja on päällekkäin niin paljon, että emme pysty erottelemaan niitä toisistaan. Erilaiset prosessit, kuten lämmönsiirtymisen tapauksessa johtuminen, säteily ja konvektio, muuttavat luonnossa yhtä aikaa kappaleen lämpötilaa. Johtumisilmiön irrottaminen säteily- ja konvektioilmiöistä, niin että pelkkää kappaleen lämpötilaan vaikuttavaa johtumista voidaan tutkia, on luonnossa hankalaa. Laboratorio-oloissa säteilyn ja konvektion vaikutus voidaan pienentää erilaisilla koejärjestelyillä niin pieniksi, että johtuminen on tärkein lämpötilaan vaikuttava ilmiö. Tutkittaessa kokeellisesti erilaisissa teollisia valmistusprosesseja - tai metsäluontoa - säteilyn ja konvektion vaikutusta voi kuitenkin olla vaikeaa eliminoida.

Matematiikan voi ajatella muodostavan oman, mittauksista ja havainnoista erillisen todellisuuden. Siinä erilaiset objektit ja niiden väliset suhteet on täsmällisesti määritelty. Myös reaalityodellisuudessa fysikaalisten objektien ja prosessien välillä on täsmällisesti määritellyt suhteet, mutta erilaisten prosessien ja objektien suuri määrä haittaa kykyämme määritellä näitä suhteita.

Matematiikan maailmassa lämmön johtumista voidaan tutkia täysin omana ilmiönään, johon muut lämmönsiirtymismekanismit eivät vaikuta. Johtuminen on matematiikan todellisuudessa täsmällisesti määritelty tapahtuma, jota energian karkaaminen vaikkapa säteilemällä ei sotke. Tässä on yksi matematiikan voimavaroista: käyttämällä matematiikkaa luonnon tutkimiseen, joudutaan pakosta käyttämään abstraktia kuvailua, jossa erilaiset häiriötekijät poistetaan täysin.

Entä jos johtumisilmiön tutkimiseen käytetään pelkästään mittauksia? Suorittamalla laajan koesarjan, jossa muutetaan kaikkia mahdollisia lämpötilan johtumiseen vaikuttavia tekijöitä, saadaan aikaan hyvä käsitys lämmönjohtumisilmiöstä. Mutta tällä on hintansa, sillä erilaisia koejärjestelyjä joudutaan tekemään lukemattomia, jotta kokeellisesti voitaisiin selvittää kaikki lämmönjohtumiseen vaikuttavat tekijät.

MATEMATIIKAN AIHEUTTAMAT RAJOITTEET

Muotoiltaessa alkuhypooteesia joudutaan ottamaan huomioon myös matematiikan aiheuttamat rajoitteet. Esimerkiksi lämmönjohtumisen mallintaminen kappaleessa, jossa kahden pallon väliin on liitetty pyöreä sylinteri, on äärimmäisen haastava matemaattinen tehtävä. Lämmön johtuminen palloissa voidaan helposti ratkaista pallokoordinaatiston avulla, kun taas sylinteriin voidaan soveltaa sylinterikoordinaatistoa. Pallo-tanko-pallo kappaleeseen ei kuitenkaan sovi kumpainkaan koordinaatisto, joten lämmönjohtumisen analyttinen ratkaisu on joko mahdoton tai vie kohtuuttomasti aikaa.

Alkuhypooteesia muotoiltaessa kannattaa siis tutkimuskohteeksi ottaa kappale, jolla on hyvin yksinkertainen muoto. Kirjallisuudesta löytyykin lämmönjohtumisen yhtälöt muutamalle yksinkertaiselle kappaleelle kuten pallolle, sylinterille ja levyille (esim. Baehr & Stephan 2006). Perustutkimuksessa matematiikan kannalta yksinkertaisten kappaleiden valitseminen tutkimuskohteeksi on helposti perusteltavissa. Soveltavassa tutkimuksessa ei kuitenkaan yleensä olla kiinnostuneita yksinkertaisista hypoteettisista kappaleista, vaan niiden sijaan haluttaisiin tuntea lämmönjohtuminen esimerkiksi rakenteeltaan monimutkaisessa jauhinlaitteessa. Numeeriset ratkaisumenetelmät, kuten niin kutsuttu Elementtimenetelmä (FEM, finite element method), auttavat jossain määrin tähän ongelmaan. Mallinnuksessa kuitenkin tullaan aina törmäämään siihen, että reaali maailman kannalta tärkeille kappaleille ei välttämättä löydy kätevää ja

yksinkertaista matemaattista esitystapaa. Tämä ei koske pelkästään kappaleiden geometriaa, vaan tulee vastaan myös monissa muissa ongelmissa, joissa reaali maailman objekteille ei löydy helppoa matemaattista esitystapaa.

Matematiikan rajoitteet tulevat vastaan myös toisella tavalla. Aaltojen ja värähdysten liikettä kappaleessa mallinnetaan melko samalla tavalla kuin lämmönjohtumista. Kun mallinnuksen kohteena on tanko, määritellään se aaltoliikkeen alkuhypoteesissa kappaleeksi, jonka pituus on paljon suurempi kuin sen poikkipinta-ala. Toisaalta aaltoliikkeelle levyssä on omat mallinsa, joiden alkuhypoteesissa määritellään levy kappaleeksi jonka leveys on paljon suurempi kuin korkeus. Näille kahdelle kappaleelle on siis olemassa toimivat mallit. Mutta entä kun sovelletun tutkimuksen kohteeksi tulee kappale, jonka koko on jossain tangon ja levyn välimailla? Tällaiselle tilanteelle ei ole olemassa valmista teoriaa, vaan se jää ikään kuin kahden teorian väliselle harmaalle alueelle. Tangon malli voi toimia tilanteessa kohtuullisen hyvin, mutta se ei ole ennakoita varmaa.

Jääminen kahden perustutkimuksen luoman mallin väliselle harmaalle alueelle on soveltajan kannalta ongelmallista. Yleispätevää ratkaisua tällaiseen tilanteeseen ei ole. Helpointa voi olla muokata ongelman lähtökohtaa niin, että ratkaisu sijoittuu selkeästi jollekin perusteorian osa-alueelle. Tekniikan kehittämisessä tämä on toisinaan mahdollista, sillä laitteiden ja tekniikoiden tutkimuksessa tutkimuskohteen rakennetta ja reunaehtoja voidaan helposti muuttaa. Valitaan esimerkiksi jauhimessa oleva osa niin, että se on selkeästi tanko tai levy, eikä jokin kappale niiden väliltä. Biologislähtöisessä tutkimuksessa tutkimuskohteen rakenne on kuitenkin osa ongelmaa, jota ei voida sormeilla.

PÄÄTELMÄT

Sovellettua tiedettä harjoittava tutkija voi joutua matemaattisen mallintamisen kanssa tekemisiin kahdella tavalla. Joko hän käyttää sen luomia malleja oman tutkimusongelmansa ratkaisemiseen, tai sitten hän yrittää luoda sen avulla kokonaan uuden mallin. Esimerkiksi lämmönjohtumisen yhtälöitä käyttävä tutkija soveltaa perustutkimuksen matemaattisen mallinnuksen tuloksia. Sovellettaessa perustutkimuksen tuloksia on kuitenkin hyvä olla perillä mallinnuksen periaatteista, jotta ymmärtää mihin ja miten mallinnuksella kehitettyä työkalua voi käyttää.

Soveltava tutkija voi myös joutua itse kehittämään matemaattisia malleja. Tällöin tutkimus on jo lähellä perusfysiikkaa, sillä suurin osa teknisistä ja metsällisistä ongelmista kuitenkin on puhdasta fysiikkaa. Matemaattisen mallintamisen keskeinen kysymys on alkuhypoteesin luominen. Siihen ei ole olemassa valmista reseptiä, mutta aikaisempia tutkimuksia lukemalla voi saada ideoita hypoteesin muotoilemisesta. Alkuhypoteesin voi muotoilla joko lähtien mitatusta *a priori* tiedosta, tai ajatuskokeella ilman empiiristä ennakkotietoa.

VIITTEET

- Aris, S. 1994. *Mathematical Modelling Techniques*. Dover Publications
 Baehr, H. D. & Stephan, K. 2006. *Heat and Mass Transfer*. 2. painos. Springer-Verlag

- Davis, P. J. & Hersh, R. 1981. The Mathematical Experience. BirkHäuser
- Feynman, R. 1983. Character of Physical Law. M.I.T Press
- Howison, S. 2005. Practical Applied Mathematics – Modelling, Analysis, Approximation. Cambridge University Press
- Kreyszig, E. 1993. Advanced Engineering Mathematics, 7. painos, John wiley & Sons
- Logan, J. D. 2006. Applied Mathematics. 3. painos. John Wiley & Sons