

Loppuraportti VMI IV Mallinnus

Kangas, A., Henttonen, H.M., Heikkinen, J., Pitkänen, T., Sarkkola S., & Korhonen, K.T.

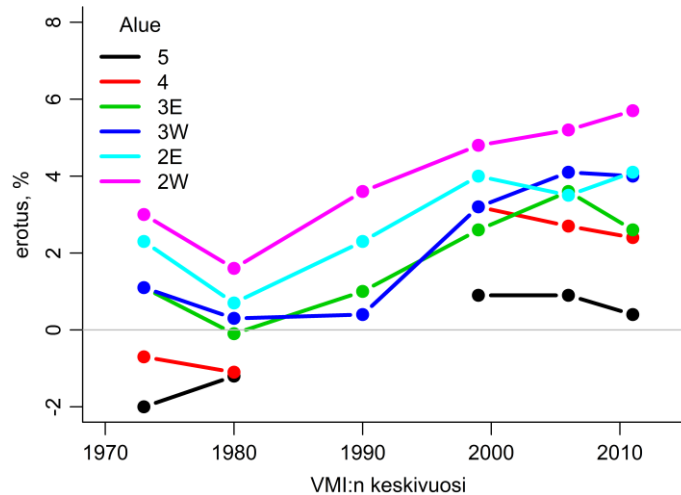
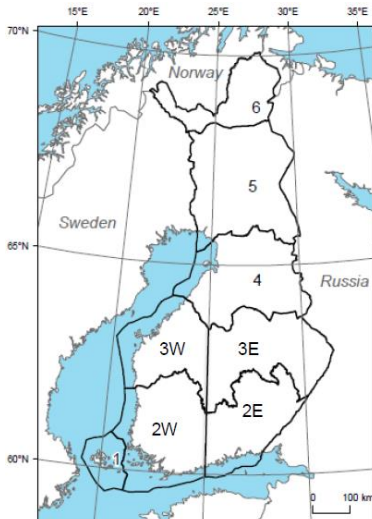
Tiivistelmä

Hankkeessa valittiin aiemmin mitatuista VMI-koealoista otos, joka perustui kolmen koealan muodostamiin rypäisiin. Vuosina 2017-2018 maastoryhmä keilasi valittuja koealoja. Lisäksi koepuiksi valituista puista mitattiin runkokäyrän laskemista tarkentamaan joukko tunnuksia perinteisin menetelmin. Valitusta otoksesta ehdittiin keilata noin 45%, mikä tarkoittaa 253 koealalla ja 2168 puuta. Erityisesti kesän 2017 säät häittäsivät merkittävästi mittausten etenemistä. Vuonna 2018 mitattiin turvemailta lisäksi 76 puun kaatokoepuuaineisto, jonka tavoitteena oli maalaserkeilausaineistosta johdettujen tilavuuksien validointi. Lisäksi kaatokoepuuaineistoa voidaan käyttää turvemaiden biomassamallien aineistona, ja maalaserkeilausaineiston oksahavaintojen validointiaineistona, koska puista mitattiin myös otos oksia. Kaatokoepuiden perusteella Laasasenahon (1982) kolmen selittäjän mallilla (d, d₆, h) ovat edelleen likimain harhattomia, mutta 2 selittäjän malli (d, h) tuottaa maalaserkeilaukseen verrattuna keskimäärin noin 1,7% yliarvioita ja koivuilla jopa 2,9%. Koko aineistosta laskettiin sen jälkeen keilaustilavuuden ja Laasasenahon 2 selittäjän mallilla saatujen tilavuuksien ero. Tulosten perusteella selviä eroja löytyy erityisesti Lounais-Suomessa, jossa yli 5% erot olivat aivan tavallisia. Tämä vahvistaa VMI:n mittauksissa jo aiemmin tehtyjä havaintoja. Vuonna 2019 saatua aineistoa käytetään Laasasenahon mallin uudelleenparametrisointiin. Jatkossa aineistoa käytetään sellaisen tilavuusmallin estimoimiseen, jossa alueelliset erot runkomuodossa voidaan myös huomioida, mikäli aiheeseen on mahdollista saada rahoitus.

1. Tutkimuksen tavoitteet

Suomessa on 1970-luvulta lähtien käytetty runkopuun tilavuuden arvioinnissa Laasasenahon (1982) malleja männylle, kuuselle ja koivulle. Puun tilavuus lasketaan eri malleilla sen mukaan, mitä tunnuksia puusta on mitattu. Useimmin käytetyt mallit antavat puun runkotilavuuden (tilavuus kannosta latvan huippuun) 1) rinnankorkeusläpimitan (d) ja pituuden (h) tai 2) rinnankorkeusläpimitan (d), kuuden metrin korkeudelta mitatun läpimitan (d₆) ja pituuden (h) funktiona.

Yläläpimita d₆ on hidas ja kallis mitata ja lisäksi altis mittausvirheille, joten sen mittauksen tarpeellisuutta on selvitetty vanhojen VMI-aineistojen puumittausten avulla. Tällöin on havaittu ero Laasasenahon kahden selittäjän tilavuusmallin (d,h) ja kolmen selittäjän mallin (d,d₆,h) ennusteiden välillä. Tämä ero on kasvanut ajan mittaan, joten on syytä epäillä että puiden runkomuoto on muuttunut Laasasenahon malleja varten tehtyjen mittausten (1960- ja 1970- lukujen vaihde) jälkeen (Kuva 1). VMI-mittausten perusteella erot vaihtelevat alueittain. Varsinkin Lounais-Suomessa tilavuudelle saadaan yliarvio, jos tilavuusarviot perustuvat vain puulajiin, puun pituuteen ja rinnankorkeusläpimitaan.



Kuva 1. Kahden ($v=f(d,h)$) ja kolmen ($v=f(d,h,d_6)$) tunnuksen tilavuusmallien suhteellinen erotus, % kolmen tunnuksen mallin tuloksesta, Suomen eri osissa.

Myös biomassamalleissa (Repola 2008, Repola 2009) on ongelmia:

1. Nykyisten suomalaisten mallien laadinta-aineisto ei perustu edustavaan otokseen, vaan suurin osa aineistoista on kerätty harvennus- ja lannoituskokeilta. Lisäksi mukana on subjektiivisesti valittuja kivennäismaiden metsiköitä. Suometsät puuttuvat kokonaan männyn ja kuusen biomassamallien aineistoista. Koska aineisto on suurelta osin peräisin käsittelykokeilta, mukana olevat metsiköt ovat tasaisia ja puiden kokojakauma kapeampi kuin esim. ruotsalaisissa Marklundin (1981) malleissa.
2. Ruotsalaisten mallien käyttökelpoisuus Suomen oloihin on kyseenalainen (mm. siksi, että otos kattaa koko Ruotsin ja mukana siten Suomea eteläisemmän ilmastovyöhykkeen puuta)
3. Koivulajeja eli hieskoivua ja rauduskoivua ei ole erotettu mallinnusaineistoissa toisistaan

Tavoitteena oli laatia uudet harhattomat mallit, jotka voidaan välittömästi implementoida kaikkien metsäorganisaatioiden tietojärjestelmiin. Tavoitteena oli myös alueellisen kalibrointimenetelmän rakentaminen, mikäli runkomuoto vaihtelee paljon maan eri osissa. Tätä tarkoitusta varten oli tarkoitus kerätä valtakunnallinen maastoaineisto uusilla teknologioilla. Maastoaineisto tuotettiin maalaserkeilausmenetelmällä (TSL).

Jo hankkeen suunnittelu- ja hakuvaiheessa tiedostettiin riski, että kerättävästä aineistosta nykyisin käytössä olevilla laskenta-algoritmeilla tuotetut tilavuudet ja biomassat eivät välttämättä ole riittävän luotettavia mallinnuksen lähtöaineistoksi. Toiseksi riskinä oli myös, että aineiston keruu osoittautuu ennakoitua hitaammaksi, jolloin tilavuusmallien laadinta-aineistoksi riittävän kokoista aineistoa ei saada kerättyä hankkeen aikana.

Nämä riskit tiedostaen esitettiin, että mikäli ne toteutuvat, hankkeen aikana kerätyllä aineistolla kalibroidaan vanhat tilavuus- ja runkokäyrämallit alueellisesti harhattomiksi. Hankkeessa jatketaan algoritmien kehitystyötä yhdessä alan tutkijoiden kanssa, ja uudet tilavuusmallit laaditaan kun algoritmit on saatu riittävän luotettavalle tasolle. Lisäksi esitettiin, että hanke tuottaa joka tapauksessa metodiikan, jolla nyt kerättävää tilavuus- ja biomassakoepuuaineistoa voidaan päivittää pitkälle tulevaisuuteen.

2. Tutkimusosapuolet ja yhteistyö

Hanke on toteutettu kokonaan Luken sisäisenä työnä. Pistepilviaineiston tulkinassa yhteistyökumppanina on TTY ja erityisesti Pasi Raunonen, joka on kehittänyt analyysiin soveltuvan Matlab algoritmin.

3. Tutkimuksen tulokset

3.1 Tutkimusmenetelmät ja aineisto

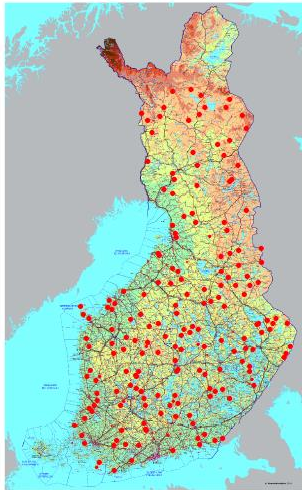
Keväällä 2017 hankkeessa tehtiin mitattavien koealojen otantasuunnitelma. Tavoitteena oli tuottaa mahdollisimman tasapainoinen otos puista erilaisissa olosuhteissa yli koko Suomen lukuun ottamatta Ahvenanmaata ja Ylä-Lappia. Aluksi vuonna 2016 mitatuilta koealarypäiltä poimittiin enintään kolme metsämaan koealaa (1-3 koealaa arvioitiin yhden päivän työksi) ja nämä 1-3 koealan rypäät jaettiin otanta-alueittain (Kuva 1) ositteisiin. Ositteet rajattiin kasvupaikan päätyypin (suo/kangas, MML:n suomaskista) puuston keskiläpimitan ja koivun osuuden suhteen (Taulukko 1). Keskiläpimitat laskettiin pohjapinta-alalla painotettuina ja koivun osuudet puuston pohjapinta-alasta. Ositteiden koot otanta-alueilla on esitetty Taulukossa 2. Otos jaettiin otanta-alueille puuston kokonaistilavuuksien suhteessa (VMII 1 mittaus) ja ositteisiin suhteellista kiintiöintiä käyttäen. Ositteiden rajat oli määritetty siten, että $\frac{1}{4}$ mitattavista rypäistä on 'suuren keskiläpimitan' ositteissa ja $\frac{1}{2}$ kummassakin 'koivun osuus' ositteessa.

Taulukko 1. Ositteet. Taulukossa d_{Q3} = läpimittojen ryväskeskiarvojen yläkvartiili ja p_M koivun osuuden mediaani.

Osite	Sukeskipisteitä rypäällä	Keskiläpimitta rypäällä	Koivun osuus rypäällä
1	ei	$\leq d_{Q3}$	$\leq p_M$
2		$\leq d_{Q3}$	$> p_M$
3		$> d_{Q3}$	$\leq p_M$
4		$> d_{Q3}$	$> p_M$
5	on	$\leq d_{Q3}$	$\leq p_M$
6		$\leq d_{Q3}$	$> p_M$
7		$> d_{Q3}$	$\leq p_M$
8		$> d_{Q3}$	$> p_M$

Taulukko 2. Ositteiden koot otanta-alueilla.

Osite	Otanta-alue				Yhteensä
	2	3	4	5	
1	19	13	4	5	41
2	19	13	4	5	41
3	6	4	1	2	13
4	6	5	1	2	14
5	8	12	8	6	34
6	8	12	9	6	35
7	2	4	3	2	11
8	2	4	3	2	11
Yhteensä	70	70	33	30	200



Kuva 3. Keilattavaksi valitut koealat.

Lopputulos oli VMI12-koealoista valittu koko Suomen kattava otos, johon oli valittu 200 kpl kolmen koealan ryvästä eli yhteensä noin 560 koealaa. Kultakin koealalta valittiin mitattavat ja keilattavat puut relaskoopikertoimella 2. Tavoitteena oli yhteensä n. 4000 puuta (1500 mäntyä, 1500 kuusta ja 1000 koivua). Koealojen valinnan ohella keväällä 2017 laadittiin myös maastotyöoppaat koealapuiden manuaalisiin mittauksiin ja keilausten tekemiseen sekä laadittiin mittaustiedon digitaaliseen maastotallennukseen vaadittava ohjelmisto. Ennen kenttätöiden alkua järjestettiin yhteensä kahden päivän pituinen koulutus maastotyöt tekeville mittausryhmälle ja maastotöiden käyntiinlähtöä ja etenemistä valvottiin säännöllisesti sekä maastossa että ylläpitämällä puhelinpäivystystä teknisten ongelmien ja maastotyöohjeessa ennakoimattomien tilanteiden varalle. Uuden maastotyökauden alkaessa keväällä 2018 mittausryhmän jäsenille pidettiin puolen päivän mittainen kertauskoulutus keilausten tekemisestä.

Samaa mittausryhmää ei ollut mahdollista käyttää koealamittauksiin koko maastotyökautta vaan ryhmien henkilöstössä oli vaihtuvuutta. Uudet mittausryhmän jäsenet koulutettiin tarkoin heidän aloittaessa työnsä. Kaikki mittausryhmien jäsenet olivat kokeneita Lukessa pitkään metsänmittaustöitä tehneitä henkilöitä.

Vuonna 2017 keilattiin yhteensä 102 koealaa ja vuonna 2018 151 koealaa eli hankkeessa keilattiin kaikkiaan 235 koealaa (45 % otoksesta). Lisäksi muutamilla koealoilla käytiin, mutta keilauksia ei toteutettu, koska koealalla ei ollut jäljellä puita pystyssä hiljattain tehtyjen hakkuutoimenpiteiden tai myrskytuhojen vuoksi.

Alkuperäinen tavoite oli keilata ja mitata 1-3 koealaa/työpäivä. Jo heti mittauskampanjan alkuvaiheessa voitiin havaita, että kolmen koealan tavoitteeseen ei ole mahdollista päästä kuin poikkeustapauksissa. Yleisesti päiväkohtainen toteutuma oli n. 1,5 koealaa. Lisäksi keilauksia ei ollut mahdollista tehdä jatkuvana kampanjana. Tärkeimmät syyt suunniteltua pienempään tehtyjen koealojen määrään olivat merkittävyysjärjestyksessä seuraavat:

- **Sääolosuhteet.** Sateella ja jo kohtalaisissa tuuliolosuhteissa keilaukset eivät onnistu sadepisarosta tapahtuvien signaaliheijastumien ja puunrunkojen heilunnan vuoksi. Sääolosuhteilla oli erityistä merkitystä vuoden 2017 toteutumaan, jolloin kasvukausi oli monin paikoin poikkeuksellisen sateinen ja tuulinen. Myös keilausten aloitus keväällä 2017 viivästyi odotettua pidemmälle valmistelutöiden vietyä odotettua enemmän aikaa. Sääriskin kasvu ja valoisan ajan lyheneminen rajoittivat myös keilauskampanjoiden venyttämistä pitemmälle syksyllä ja esimerkiksi marraskuussa suotuisien keilauspäivien määrä oli enää vähäinen.
- **Koealojen saavutettavuus.** Moni koeala sijaitti etäällä ajokelpoisesta tiestä ja painavat keilausvarusteet täytyi kuljettaa ihmisvoimin koealalle ja se vei aikaa suunniteltua keskimääräistä enemmän.
- **Mittaukseen saatavilla oleva henkilöstöresurssi** oli niukka ja työhön ei ollut mahdollista rekrytoida Luken sisältä henkilöstöä niin paljon, että mittaukset olisi voinut jatkua tauotta myös kesälomakauden ulkopuolella. Olennaisena resurssirajoitteena oli myös se, että projektilla oli käytössään vain yksi keilainlaite (ainoa koko Lukessa), jota tarvittiin myös muiden projektien töissä. Pääsääntöisesti laite oli kuitenkin mahdollista pitää tämän projektin käytössä.

Maastotyöt suoritettiin koealoilla seuraavasti: Koealan elävistä pystypuista havainnoitiin tai mitattiin puun suunta ja etäisyys koealan keskipisteestä, puulaji, rinnankorkeusläpimitta, kantoläpimitta, kannonkorkeus, latvuserkos, puun syntytapa, elävän latvuksen alaraja, puun pituus sekä mahdolliset tuhot ja pystykarsintatiedot. Lisäksi kirjattiin metsikkökuvioon liittyviä tunnuksia. Mittausten jälkeen laadittiin keilaussuunnitelma ottaen huomioon mitattujen puiden sijainti ja mahdolliset näkemäesteet, ja tehtiin varsinainen laserkeilaus. Keilaukset tehtiin Luken Leica ScanStation P40-maalaserkeilaimella. Keilaus koostui 3-6 asemapistestä joista tyypillisesti yksi oli koealan keskellä ja loput sen reunoilla. Mitattuja ja keilattuja puita 253 koealalla oli yhteensä 2168, joista mäntyjä oli 971, kuusia 687, koivuja 405 ja muita puulajeja 105.

Vuoden 2016 tehtyjen keilausten testitulosten perusteella päädyttiin siihen, että rinnankorkeuskohta on merkittävä maastossa puihin ilmastointiteipillä, jotta näkyvyysongelmien tai muiden syiden johdosta ei saada virheellisiä keilaustuloksia. Jokaisella koealalla merkittiin teipillä mitattavat puut, ja tehtiin puumittaukset laaditun ohjeen mukaan.

Vuonna 2018 valittiin ja mitattiin myös kaatokoepuita kerätyn keilausaineiston validoimiseksi sekä aiempien puubiomassa-aineistojen täydentämiseksi biomassamallien tarkentamista ajatellen. Koepuut valittiin projektin koeala-aineistosta täsmäotantana kohdistuen turvemaapuustoihin. Tämä painotus tehtiin siksi, että turvemailta kerättyä

biomassa-aineistoa on ollut hyvin vähän, josta syystä turvemaille spesifisiä biomassamalleja ei ole voitu laatia. Toiseksi, tässä projektissa ei ollut resurssien puitteissa mahdollista eikä tarkoituksenmukaistakaan kerätä sellaista biomassa-aineistoa, joka olisi ollut yleistettävissä kaikille kasvupaikoille.

Biomassakoepuut valittiin projektin koeala-aineistosta seuraavin kriteerein: 1) koeala on luokiteltu turvemaaksi (vähintään ½ alasta), 2) koeala on VMI kertakoeala (pysyvät koealat rajattu ulkopuolelle) ja 3) koepuiden ottoon on saatu maanomistajan lupa. Koealojen sijaintikiinteistöjen omistajat selvitettiin, ja lupaa koepuiden ottoon pyydettiin, mikäli heihin saatiin yhteyttä. Vaikka maanomistajille tarjottiin korvausta kaadetuista puista, lähes joka kolmas yksityinen maanomistaja ei antanut lupaa puiden kaatoon. Lopullinen koepuualojen otoksen koko oli 38 koealaa. Kultakin koealalta pyrittiin ottamaan viisi kaatokoepuuta, mutta mikäli koealalla oli yksikin tiettyjen kriteerien mukaisesti kaatokoepuuksi soveltuva puu, se valittiin koepuiksi. Koepuut valittiin koealalta satunnaisotannalla. Koepuut kaadettiin vasta niiden keilausten jälkeen. Mikäli keilauksesta oli kuitenkin kulunut pidemmän aikaa kasvukaudella (yli kolme viikkoa nopeimman kasvun aikana touko-kesäkuussa), keilaukset tehtiin uudestaan puiden kasvuun liittyvien virheiden minimoimiseksi.

Biomassakoepuista tehtiin mittaukset erillisen tätä työtä varten laaditun mittausohjeen mukaisesti. Mittausohjeen sisältö noudatti pitkälti aiempien vastaavien biomassa-aineistojen mittauksia (mm. VAPU-aineisto). Koepuista mitattiin kaadon jälkeen tyven katkaisukohdan ja rinnankorkeuden välinen etäisyys, kannonkorkeus, puun pituus, elävän latvuksen alaraja, kuivaoksaraja (männyllä), mittausvuoden pituuskasvu ja edeltävä 10 vuoden pituuskasvu sekä rungon läpimitat 16 suhteelliselta korkeudelta sekä lisäksi läpimitta rungon tyven katkaisukohdasta, 6 m:n korkeudelta ja latvusrajalta. Rungoista mitattiin kaikki elävät oksat, joista kirjattiin oksan sijainti (etäisyys latvusrajalta), oksan läpimitta sen tyveltä sekä oksan kokonaispituus. Lisäksi latvus jaettiin neljään yhtä suureen suhteelliseen ositteeseen, joista kustakin valittiin yksi näyteoksa. Näyteoksat säilöttiin ja kuljetettiin laboratorioon, jossa niiden biomassajakeet analysoitiin tarkemmin. Myös rungosta otettiin biomassanäytteitä sahaamalla kultakin mitatulta korkeudelta näytekiekko. Runko- ja oksabiomassanäytteitä analysoitiin vuoden 2018 jälkipuoliskolla Luken laboratorioissa Viikin, Parkanon, Suonenjoen ja Punkaharjun toimipaikoissa.

Kaatokoepuiden mittaus ja biomassanäytteiden otto alkoi koeluontoisesti 2.7. ja jatkui täyspäiväisesti 1.9. alkaen. Kaatokoeputa mitattiin yhteensä 76 kpl 17:lta koealalta. Kahden puun osalta mittaustulosten todettiin jälkikäteen olevan keilausaineistossa heikkolaatuisia, joten vertailuaineistona käytettiin 74 puuta.

Kaatokoepuiden avulla hienosäädettiin maalaserkeilauksen (TLS) analytiikkaa ja selvitettiin, miten luotettavasti puiden runkotilavuus voidaan mitata. Tilavuuden laskentaa kokeiltiin sekä käyttämällä pelkästään laserkeilattua pistepilveä että hyödyntämällä analysoinnin aputietoina maastossa mitattuja tietoja, kuten läpimittaa, pituutta, ja kannonkorkeusläpimittaa. Mitattuihin puihin kiinnitettyä teippiä käytettiin korkeustason määrittämisessä, jonka avulla puun oikea syntypiste ja rinnankorkeustaso saatiin varmistettua. Lisäksi aiemmissa tutkimuksissa kaadettuja ja mitattuja puuta hyödynnettiin siten että kullekin puulle laskettiin referenssirunkokäyrä, jonka avulla keilausaineiston mallinnuksessa tyypillisiä läpimittojen yli- ja aliennusteita saatiin vähennettyä.

Runkotilavuudet laskettiin TLS-aineiston perusteella myös kaikille vuosina 2017-18 keilatuille ja mitatuille puille, ja verrattiin näitä Laasasenahon (d,h) yhtälön antamiin

tuloksiin. Tarkoituksena oli selvittää kattavampaa otosjoukkoa käyttäen tilavuuksien erot ja mahdolliset alueelliset painotukset. TLS-mallin aputietoina käytettiin syntypistettä, kannonkorkeutta, puun pituutta, rinnankorkeuslähimittaa, kantolähimittaa ja puulajia; ylälähimittaa ei laajemmissa maastotöissä mitattu. Eron merkittävyys laskettiin yhdistämällä mitatut koealat 50 x 50 km ruuduissa, ja vertaamalla kahden logaritmiseksi muunnetun tilavuuden erotusta nolnaan. Logaritmimuunnoksen tarkoituksena oli huomioida puun koon merkitys tilavuuserotuksissa.

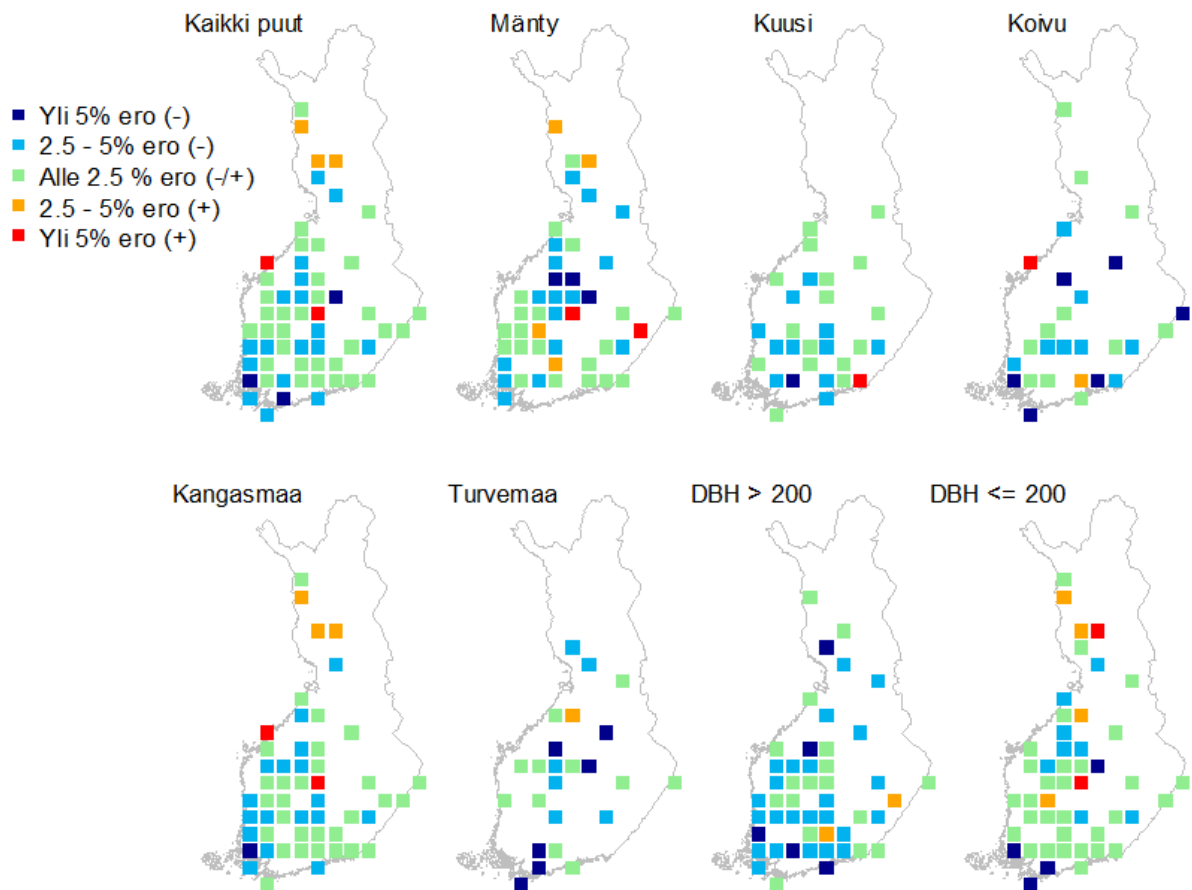
3.2 Tutkimustulokset

Kaatokoepuuaineiston perusteella Laasasenahon mallit tuottavat 6-7% rms-tilavuusvirheen ja tulokset tukevat aiempia havaintoja kahden selittäjän tilavuusmallin (d,h) taipumuksesta yliennusteisiin (taulukko 3). Tilavuuslaskenta pelkän TLS-pistepilven avulla tuottaa Laasasenahon (d,h) mallin kanssa vastaavansuuruisia virheitä, mutta aliennustaa tilavuuksia paljolti syntypisteen ja puun pituuden määrittäsvaikeuksien vuoksi. Kuusten osalta pelkän pistepilven käyttöön liittyvä yliennuste selittyy yhden yksittäisen puun selvästi liian suureksi mitatulla pituudella, jolla pienessä aineistossa on suuri merkitys. Kun kenttämittauksia käytetään pistepilven aputietoina, saadaan tuloksista selvästi Laasasenahon yhtälöitä tarkempia. Puulajikohtaisesti etenkin koivuun liittyvä harha pienenee merkittävästi kun puulaji tunnetaan. Tämä selittyy sillä että koivun runkokäyrä poikkeaa selvästi kuusesta ja männystä. Siten puulaji lähtötietona annettuna auttaa muodostamaan oikeanlaisen referenssirunkokäyrän mittausten tueksi. Pienin rms-virhe saadaan kaikkia saatavilla olevia aputietoja käyttämällä, ja pienin harha ilman ylälähimittan käyttöä. Harhoja vertaillen tulee kuitenkin huomioida käytetyn aineiston pienuus ja siten yksittäisten mittausten suuri vaikutus lopputulokselle.

Taulukko 3. Laasasenahon tilavuusyhtälöiden ja maalaserkeilauksen tuottamien kuorellisten runkotilavuuksien vertailu kaatokoepuuaineiston mittauksiin.

Käytetty yhtälö tai malli	Kaikki puut (n=74)	Vain männyt (n=53)	Vain kuuset (n=9)	Vain koivut (n=12)	Pienet puut (d < 100 mm) poistettu (n=58)
Laasasenahon f(d, h); RMSE (%)	7	6,4	7,3	8,8	6,7
"-", harha (%)	1,7	1,4	2	2,9	1,6
Laasasenahon f(d, h, d6); RMSE (%)	5,9	6,1	5,6	4,8	4,4
"-", harha (%)	0,2	0,6	-0,3	-1,4	-0,9
TLS-malli, vain pistepilvi; RMSE (%)	6,8	5,4	11,7	7,5	6,2
"-", harha (%)	-1,2	-2	2,8	-0,6	-1,4
TLS-malli jonka aputietoina syntypiste, kannonkorkeus ja puun pituus; RMSE (%)	5,3	4,5	4,8	8	4,4
'"-', harha (%)	0,9	0,5	0,6	2,6	0,4
TLS-malli jonka aputietoina syntypiste, kannonkorkeus, puun pituus, rinnankorkeusläpimitta, kantoläpimitta ja puulaji; RMSE (%)	4,1	3,9	3,6	5,3	3,9
'"-', harha (%)	0	0,3	-0,3	-0,7	0
TLS-malli jonka aputietoina syntypiste, kannonkorkeus, puun pituus, rinnankorkeusläpimitta, kantoläpimitta, yläläpimitta (6 m) ja puulaji; RMSE (%)	3,5	3,7	2,8	2,7	3,3
'"-', harha (%)	-0,6	-0,5	-1	-1,2	-0,6

Kuvassa 2 on esitetty runkotilavuuksien suhteelliset erot Laasasenahon (d,h) yhtälön ja TLS-mittausten välillä. Erot on laskettu 50 x 50 km ruuduissa sellaisista ruuduista joiden alueelta on mitattu vähintään viisi ositteeseen kuuluvaa puuta. Negatiiviset erot tarkoittavat että TLS-malli antaa Laasasenahon yhtälöä pienempiä tilavuustuloksia, ja positiiviset päinvastoin. Kuvan perusteella on havaittavissa kaatokoepuuvertailua vastaavasti se, että Laasasenahon yhtälö antaa keskimäärin TLS-mallinnusta suurempia runkotilavuuksia. Erot painottuvat alueellisesti etenkin lounaiseen ja läntiseen Suomeen, ja puuositteiden suhteen isoihin puihin. Turvemailla yli viiden prosentin negatiivisia eroja on suhteellisesti kankaita enemmän, mutta otos tosin on melko pieni.



Kuva 2. Tilavuusvertailu TLS-mittauksen ja Laasasenahon (d,h) yhtälön välillä.

3.3 Toteutusvaiheen arviointi

Työ eteni vuonna 2017 noin 1,5 koalaa päivässä, kun tavoitteeksi asetettiin koko kolmen koalan rypään mittaaminen päivässä. Se kuitenkin onnistui vain helpoimmissa kohteissa, koska mittausten valmistelutyöhön kului oletettua enemmän aikaa ja lisäksi hankalat sääolosuhteet rajoittivat tehokasta keilaustyöaikaa, koska sateella ja kovissa tuuliolosuhteissa keilaaminen ei ole mahdollista. Vuonna 2018 mittaukset ja keilaustyö jatkui ja työssä päästiin lähemmäs tavoiteltua työnopeutta. Keilaustyöhön päästiin edellisvuotta aikaisemmin ja sääolosuhteet olivat suotuisimmat (ks. keilaustyöhön vaikuttaneet tekijät tarkemmin luku 3.1.).

Kerätyistä kaatokoepuiden biomassanäytteistä ehdittiin vuoden 2018 loppuun mennessä analysoida projektin puitteissa vasta noin neljännes, koska työ on hyvin työvoimaintensiivistä ja vei arvioitua enemmän aikaa. Lisäksi viimeiset koepuunäytteet kerättiin vasta marraskuussa 2018. Koko näyteaineiston analysoinnin loppuunsaattaminen edellyttäisi jatkoprojektia eli lisärahoitusta. Koska näytteiden analysointi on vielä kesken, myöskään biomassamallien laadintaa ei päästä tekemään ennen analyysien valmistumista.

3.4 Julkaisut

Hankkeen tuloksia on esitelty kärkihankkeen loppuseminaarissa (22.1. Helsinki) sekä DIABOLO hankkeen loppuseminaarissa (Koli).

4. Tulosten arviointi

4.1 Tulosten käytännön sovellutuskelpoisuus

Aiempien VMI-aineistoon perustuvien vertailujen perusteella on selvää, että puuston muodossa on tapahtunut muutoksia, koska Laasasenahon kolmen selittäjän ja kahden selittäjän mallien välinen ero kasvaa. Mikäli muutosta ei olisi tapahtunut, mallien välisen eron pitäisi olla keskimäärin hyvin lähellä toisiaan. Lisäksi on selvää, että puuston muodossa on alueellista vaihtelua. Osittain tämä alueellinen vaihtelu voi ilmetä myös vanhemmassa Laasasenahon aineistossa, mutta ainakin osittain runkomuodon muutoksessa on alueellista vaihtelua.

Tilavuuserot Laasasenahon (d,h) yhtälön ja TLS-pohjaisten mittausten välillä eivät suoraan tarkoita sitä että TLS-malli antaisi selkeästi parempia tilavuusarvioita, mutta negatiivisten erojen suuri määrä vahvistaa VMI-aineistojen vertailuista saatuja tuloksia. Kun lisäksi tiedetään kaatokoepuuaineiston avulla tehdystä vertailusta että TLS-mittaukset antavat Laasasenahon (d,h) yhtälöä tarkempia ja harhattomampia tuloksia, voidaan tilavuusyhtälön uudelleen parametrisoinnilla parantaa runkotilavuusarvioita. Yhtälön parametrien tarkastelu aloitetaan lähitulevaisuudessa, ja tuloksena kaikki toimijat saavat nykyistä paremmat tilavuusennusteet.

4.2 Tulosten tieteellinen merkitys

Vastaavia hankkeita tilavuusmallien uusimiseksi maalaserkeilausaineiston avulla on maailmalla useita, esimerkiksi Ranskassa ja Virossa. Siten kärkihankkeen avulla Suomi on noussut tässä aihepiirissä tutkimuksen eturintamaan. Algoritmeja aineiston käsittelyyn on kehitelty toisessa hankkeessa (Teho). Merkittävää ja uutta tämän hankkeen puitteissa tehdyssä keilaustyössä on kuitenkin se, että varsinaisen pistepilven tukena on käytetty maastomittauksia ja referenssirunkokäyriä. Tämä vaatii erikseen tehtyjä puumittauksia keilattavilta koealoilta, mutta auttaa selvästi tarkentamaan tuloksia.

Tässä hankkeessa tieteellisesti merkittävä havainto on, että tilavuudessa on selviä alueellisia eroja, ja että uusiin malleihin tämä alueellinen ulottuvuus pitäisi saada mukaan. Missään muualla tilavuuden alueellisesta vaihtelusta ei ole toistaiseksi tehty analyysyjä, huomio on keskitetty lähinnä puulajien välisiin eroihin.

Koska aineisto jäi aiottua vaatimattomammaksi, ja erityisesti koska aineistoon jäi Itä-Suomeen aukkoja, olisi tarpeen saada keilattua vielä lisää koealoja. Muussa tapauksessa Itä-suomen osalta malleihin voi jäädä alueellista harhaa, jota on mahdotonta analysoida tai poistaa. Aineiston pienuus asettaa myös vaatimuksia aineiston käyttöön mallinnukseen: aineistoa on tarpeen vahvistaa sekä Laasasenahon vanhalla aineistolla, että uudemmalla

VAPU-aineistolla. Koska mittausvirheet kiipeämällä mitatuissa (Laasasenaho), kaadetuista puista mitatuissa (VAPU) ja maalaserkeilauksella mitatuissa aineistoissa ovat erilaisia, havaintojen optimaalinen painotus analyysissä vaatii vankkaa tilastotieteellistä osaamista mittausvirheiden huomioonottamisesta mallinnuksessa. Sellaista osaamista ei ole valmiina rekrytoitavissa, vaan osaajat täytyy kouluttaa. Lisäksi vanhojen aineistojen hyödyntäminen edellyttää, että aineiston mittausajankohdan vaikutus voidaan mallissa neutraloida (mallintamalla se niin sanottuna nuisance parametrina). Myös tämä tarkoittaa selvästi monimutkaisempaa mallinnusongelmaa kuin Laasasenahon 1982 julkaisuissa käytetty menetelmä. Lisäksi malleihin täytyy sisällyttää alueellinen komponentti, esimerkiksi siten että mallin parametrit vaihtelevat alueittain. Tämä vaatii vielä runsaasti kehitystyötä.

Kirjallisuus

- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Commun. Inst. For. Fenn. 108.
- Marklund, L.G. 1988. Biomassfunktioner för tall, gran och björk i Sverige. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogstaxering. Rapport 45. 73 s.
- Repola, J. 2008. Biomass equations for birch in Finland. *Silva Fennica* 42(4): 605-624.
- Repola, J. 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica* 43(4): 625-647.