

HELSINGIN YLIOPISTO

Malli männyn sydänpuun läpimitan ja tilavuuden ennustamiseksi

Metsien ekologian ja käytön pro gradu -tutkielma
maatalous- ja metsätieteiden maisterin tutkintoa varten

Helsingin yliopisto, metsätieteiden laitos
syyskuu 2013

Ville Luoma

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty		Laitos/Institution – Department	
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Metsätieteiden laitos	
Tekijä/Författare – Author			
Ville Luoma			
Työn nimi / Arbetets titel – Title			
Malli männyn sydänpuun läpimitan ja tilavuuden ennustamiseksi			
Oppiaine / Läroämne – Subject			
Metsien ekologia ja käyttö			
Työn laji/Arbetets art – Level	Aika/Datum – Month and year	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages	
Maisterin tutkielma	Syyskuu 2013	48 s.	
Tiivistelmä/Referat – Abstract			
<p>Männyn rungossa kehittyä luontaisilta ominaisuuksiltaan muusta puuaineksestä poikkeavaa sydänpuuta. Männyn sydänpuu on luontaisesti lahonkestävä ja siitä voidaan valmistaa muita puun osia paremmin vaativissakin olosuhteissa käytettäviä erikoistuotteita. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää menetelmä, jonka avulla voidaan ennustaa paremmin puun rungossa olevan sydänpuun läpimitan ja tilavuus. Koska sydänpuun havaitseminen maasto-olosuhteissa puun rungosta ei ole tällä hetkellä mahdollista puuta vahingoittamatta, tarvitaan menetelmä, jolla voidaan luotettavasti ennustaa puiden sisältämän sydänpuun määrä.</p> <p>Sydänpuun läpimittaa puun kahdeksalla suhteellisella korkeudella kuvaavia puun tunnuksia analysoitiin lineaarisen regressioanalyysin avulla. Kun parhaiten sydänpuun muodostumista selittävät muuttujat oli valittu, laadittiin sydänpuun läpimitan ennustamiseksi lineaariset sekamallit, joiden avulla voidaan ennustaa männyn sydänpuun läpimitan kyseisillä korkeuksilla. Ennustettujen läpimittojen avulla voitiin johtaa yksittäisen puun sydänpuun runkokäyrä, joka kuvaa sydänpuun kapenemista puun pituuden suhteen. Laadittua runkokäyrää hyödyntämällä voitiin lopulta ennustaa puulle sydänpuun kokonaistilavuus integroimalla.</p> <p>Puun rinnankorkeusläpimittaa ja pituutta selittävinä muuttujina käyttäneet mallit kykenivät selittämään sydänpuun läpimitan vaihtelusta suhteellisilla korkeuksilla 2,5 % - 70 % laskennallisella selitysasteella 0,84 – 0,95 mallien suhteellisen RMSE:n ollessa 15 - 35 %. Suhteellisille korkeuksille 85 % ja 95 % laaditut ennusteet eivät onnistuneet yhtä hyvin (selitysaste 0,65 ja 0,06 sekä RMSE 74 % ja 444 %). Olennaista on kuitenkin se, että ennusteet onnistuivat parhaiten sillä alueella, jossa esiintyy suurin osa männyn sydänpuusta. Läpimittamallien avulla laadittujen yksittäisten puiden sydänpuun tilavuusennusteiden suhteellisen RMSE:n arvo oli 35 % ja harha -5 %.</p> <p>Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan todeta, että sydänpuun läpimitan ennustaminen tarkasti puun rungon tyviosassa on helpompaa kuin latvaosassa. Vaikeudet johtuvat suuresta puiden välisestä vaihtelusta sydänpuun esiintymisessä tietyillä korkeuksilla puun latvassa. Sydänpuun tilavuusennusteiden hyödyntäminen yksittäisten mäntyjen, mutta myös suurempien kohteiden, kuten metsikkökuvioiden, sydänpuuvarannon kartoittamiseen on mahdollista jo nyt. Tarkempien tulosten saamiseksi tarvittaisiin kuitenkin entistä kattavampia ja yksityiskohtaisempia tutkimusaineistoja, joiden avulla voitaisiin selvittää sydänpuun käyttäytymisessä yhä tuntemattomia asioita.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
Mänty, sydänpuu, läpimita, tilavuus, malli			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Viikin tiedekirjasto ja metsätieteiden laitos			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty		Laitos/Institution – Department
Faculty of Agriculture and Forestry		Department of Forest Sciences
Tekijä/Författare – Author		
Ville Luoma		
Työn nimi / Arbetets titel – Title		
A model for predicting the diameter and volume of the heartwood of Scots pine		
Oppiaine /Läroämne – Subject		
Forest ecology and management		
Työn laji/Arbetets art – Level	Aika/Datum – Month and year	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages
Master's thesis	September 2013	48 p.
Tiivistelmä/Referat – Abstract		
<p>There develops heartwood in the stems of the Scots pines (<i>Pinus sylvestris L.</i>) that differs by its natural characteristics from the other sections of the wood material in the pine stem. Pine heartwood is naturally decay resistant and it can be used in conditions where the normal wood products can't be used. The aim of this study was to develop a method, which can be used for predicting the diameter and volume of heartwood. There is a need for this kind of method, because it still is not possible to estimate the amount of heartwood in a standing tree without damaging the tree itself.</p> <p>The variables measured from single trees describing the diameter of the heartwood on eight relative heights were analysed by using linear regression. When the best explanatory variables were selected, a mixed linear model was created for each of the relative heights. The mixed linear models could also be used for predicting the diameter of pine heartwood at those relative heights. With the help of the predicted diameters a taper curve could be created for the heartwood. The pine heartwood taper curve describes the tapering of the heartwood as function of the tree height. By integrating the taper curve, it was also possible to predict the total volume of the heartwood in a single tree.</p> <p>The models that used tree diameter at breast height and the length of the tree as explanatory variables were able to explain the variation of heartwood diameter on relative heights between 2,5 % and 70 % with coefficient of determination ranging from 0,84 to 0,95 and also recorded a relative RMSE from 15 % to 35 %. Models for relative heights of 85 % and 95 % were not as good as the others (R^2-values 0,65 and 0,06 as well as RMSE-values of 74 % and 444 %). Despite not succeeding on all the relative heights, the most important thing is that the models worked best on that area of the stem where most of the heartwood is located. The volume predictions for single trees based on the heartwood diameter models recorded relative RMSE of 35 % and bias of -5 %.</p> <p>Based on the results of the study it shows that exact prediction of pine heartwood diameter is much easier in the base of the stem than in the top part of it. A great deal of variation could be observed whether there was heartwood or not in the top parts of the stem. The volume of heartwood can already be estimated for single trees, but the amount of heartwood can be predicted also in larger scale, such as forest stands. But to get more accurate results in the future, there is a need for more detailed and comprehensive research data, which would help to determine the still unknown parts of the behaviour of pine heartwood.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords		
Scots pine, heartwood, diameter, volume, prediction, model		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited		
Viikki Science Library and Department of Forest Sciences		
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information		

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty Helsingin yliopiston metsätieteiden laitokselle osana Maa- ja metsätalousministeriön rahoittamaa *Puiden kokonaistilavuuden mallinnus* -tutkimushanketta sekä Marjatta ja Eino Kollin säätiön rahoittamaa *Puiden mallinnuksen ja mittauksen tietopankki* -tutkimushanketta. Haluan kiittää työni ohjaajaa Annika Kangasta tämän projektin aikana saamastani tuesta ja neuvoista. Olen myös kiitollinen Metsäntutkimuslaitokselle tutkimusaineiston luovuttamisesta käyttöni ja siten tämän työn toteuttamisen mahdollistamisesta. Lisäksi haluan osoittaa kiitokseni minut alun perin tämän tutkimusaiheen pariin johdattaneelle Jouko Laasasenaholle sekä Martti Venäläiselle, jotka omalta osaltaan edesauttoivat tämän työn valmistumista.

Helsingissä syyskuussa 2013

Ville Luoma

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	1
1.1 Tutkimuksen aihe.....	1
1.2 Sydänpuun ominaisuudet	2
1.3 Aiheeseen liittyvä aiempi tutkimustieto	6
1.4 Tutkimuksen tavoitteet.....	12
2. Aineisto ja menetelmät.....	12
2.1 Metsäntutkimuslaitoksen VAPU-aineisto	12
2.2 Aineiston käsittely.....	15
2.3 Regressioanalyysi	16
2.4 Lineaarinen sekamalli.....	17
2.5 Mallien luominen	18
2.6 Runkokäyrän interpolointi	21
2.7 Sydänpuun tilavuuden ennustaminen	22
3. Tulokset.....	25
3.1 Sydänpuun läpimittamallit.....	25
3.2 Sydänpuun runkokäyrät.....	29
3.3 Sydänpuun tilavuusennusteet	32
4. Tulosten tarkastelu	34
4.1 Läpimittamallien selittävät muuttujat	34
4.2 Läpimittamallien hyvyyden arviointi ja tulosten tarkkuus.....	35
4.3 Tilavuusennusteiden onnistuminen.....	40
5. Johtopäätökset.....	44
Lähteet	45

1. Johdanto

1.1 Tutkimuksen aihe

Metsien käyttö on monipuolistunut viime vuosikymmeninä ihmisten tietoisuuden ja teknologian kehityksen myötä. Samaan aikaan kiihtyvä kilpailu ja pyrkimykset markkinaosuuksien säilyttämiseksi ajavat metsäteollisuutta kehittämään uusia tuotteita ja menetelmiä puun hyödyntämiseksi. Tuntemus käytettävistä raaka-aineista on tärkeää tehokkaan toiminnan takaamiseksi. Jotta puun käyttöä voidaan suunnitella mahdollisimman tarkasti, tarvitaan menetelmiä, joiden avulla saadaan selville käytettävissä olevan puuaineksen määrä ja laatu koko puun rungossa. Tiettyjä puun ominaisuuksia hyödynnettäessä tarvitaan myös aiempaa tarkempia ennusteita ja malleja, jotka kuvaavat juuri näitä puun ominaisuuksia.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kehittää menetelmä, jonka avulla voidaan ennustaa mahdollisimman tarkasti yksittäisen männyn (*Pinus sylvestris*) sydänpuun paksuus ja kokonaismäärä puun rungossa. Sydänpuulla tarkoitetaan puun rungon sisintä osaa, joka poikkeaa ominaisuuksiltaan sitä ympäröivästä puuaineksesta. Sydänpuun kokonaismäärän ennustamiseksi on ensin kyettävä ennustamaan yksityiskohtaisesti sydänpuun läpimitan vaihtelu koko puun rungon alueella. Kun sydänpuun läpimitan muutosta puun pituuden suhteen kuvaava runkokäyrä on luotu, voidaan sen avulla ennustaa sydänpuun tilavuus puun rungossa tai sen tietyssä osassa. Tunnettaessa yksittäisen rungon sydänpuun tilavuus, voidaan koepuita käyttämällä suorittaa laskelmia kokonaisten metsikkökuvioiden ja suurempien alueiden sydänpuun kokonaismäärän selvittämiseksi.

Metsäteollisuuden viimeaikainen kehitys on viemässä puun käyttöä yhä enemmän suuntaan, jossa tarvitaan tarkempaa tietoa puun yksityiskohtaisemmista ominaisuuksista, jotta puuainesta voitaisiin käyttää mahdollisimman tehokkaasti sen monipuoliset ominaisuudet huomioon ottaen. Eri puulajien puuaineksessa on ainesosia, joiden erikoisominaisuuksia voidaan hyödyntää useiden tuotteiden valmistuksessa. Nämä tuotteet voivat esimerkiksi korvata keinotekoisia materiaaleja teollisuudessa. Lisäksi ulkorakentamisessa perinteisesti käytetyn kyllästetyn puutavaran käyttöä on rajoitettu huomattavasti viime vuosien aikana mm. ympäristön ja ihmisten hyvinvoinnin suojelemiseksi. Kyllästetyn puutavaran korvaaminen esimerkiksi luontaista lahonkestävyyttä omaavalla männyn sydänpuulla voisi olla mahdollista sellaisissa kohteissa, joissa olosuhteet vaativat tavallista parempaa lahonkestävyyttä, mutta eivät vielä edellytä kyllästetyn puun käyttöä. Nykyisessä taloustilanteessa päätöksiä tehdään usein kannattavuuden ja tuottavuuden perusteella. Jotta männyn sydänpuuta voitaisiin käyttää mahdollisimman tehok-

kaasti ja muuta puuainesta haaskaamatta, tarvitaan menetelmiä, joilla voidaan ennustaa sydänpuun määrä rungossa mahdollisimman tarkasti ja näin tehostaa luonnostaan erikoisominaisuuksia omaavan tuotteen käyttöä. Tarkkojen ennusteiden avulla voidaan suunnitella ja optimoida puun käyttö jo hakkuuvaiheessa siten, että puuaines saadaan jaettua monipuolisesti eri käyttömahdollisuuksien perusteella.

1.2 Sydänpuun ominaisuudet

Sydänpuulla tarkoitetaan kaupallisessa kielenkäytössä puun rungon sisintä osaa, joka poikkeaa säännönmukaisesti ulkokehästä tummemman värinsä ja/tai alemman kosteuden vuoksi. Vaa-leampaa rungon osaa kutsutaan pinta- eli mantopuuksi. (Kärkkäinen 2003)

Männyn sydänpuu on havaittavissa puun rungon poikkileikkauksesta värieron perusteella. Kesällä sydän- ja mantopuun raja erottuu auringonvalon vaikuttaessa poikkileikkauspintaan, jolloin poikkileikkauksien tummempi osa on sydänpuuta. Vastaavasti talvella tuoreesta mäntypuutavarasta sydänpuu voidaan erottaa helposti, koska kosteampi pintapuuta erottuu tummempana verrattuna kuivempaan sydänpuuhun.

Sydänpuun sijainti puun sisäosassa tekee sen havaitsemisen paljaalla silmällä puuta kaatamatta tai kairaamatta mahdottomaksi. Sen vuoksi on turvauduttava ennustamiseen pystyvuon sydänpuun määrän selvittämiseksi. Sydänpuun määrän ennustamiseksi on jo kehitetty useita erilaisia menetelmiä, mutta mikään niistä ei ole vielä vakiintunut yleisesti käytettäväksi. Tekniikan kehitys on jo tuonut mukanaan laitteita, joiden avulla puun sisäisiä ominaisuuksia voidaan tutkia. Esimerkiksi tukkien erotteleminen sydänpuun määrän perusteella on mahdollista jatkokäsittelylaitoksilla, joissa on käytössä ns. tukkiröntgenlaitteet. Kuitenkaan tällä hetkellä sydänpuun määrän mittaaminen maasto-olosuhteissa ei ole vielä mahdollista, joten esimerkiksi hakkuukone ei pysty lajittelemaan puuta sydänpuumäärän perusteella, vaikka puun ostaja tai myyjä niin haluaisikin. Niinpä sahateollisuudessa sydänpuun huomioon ottava sahausasete luodaan nykyisin tukkiröntgenin tulosten perusteella. (Rikala 2007)

Sydänpuun määrää puussa tai puutavarassa voidaan kuvata usein eri tavoin. Tässä tutkimuksessa käytettävässä aineistossa sydänpuun määrä on mitattu sen läpimitana puun rungon poikkileikkaukselta. Tämän tutkimuksen tavoitteena on pyrkiä ennustamaan sydänpuun läpimitaa ja tilavuutta puun rungossa, joten absoluuttisten mittojen käyttäminen on perusteltua. Kärkkäisen (2003) mukaan sydänpuun määrää kuvataan tavallisimmin sen osuudella puun poikkileikkauksen pinta-alasta. Sydänpuuosuuden lisäksi voidaan myös ilmoittaa sydänpuun läpimitan prosentuaalinen osuus koko rungon läpimitasta tarkastelukorkeudella. Sydänpuun määrä

poikkileikkauksessa voidaan laskea myös kaksinkertaisen mantopuun paksuuden avulla edellyttäen, että puun kokonaisläpimitta vastaavalla korkeudella on tunnettu. Sydänpuun määrää kuvattaessa ja mitattaessa tulee ottaa huomioon myös se, että toisin kuin puun rungon vaippapinta, sydän- ja mantopuun raja ei poikkileikkauksessa välttämättä noudata tasaisesti esimerkiksi tiettyä vuosilustoa, vaan suuretkin tilapäiset poikkeamat ovat mahdollisia (kuvat 1 ja 2).



Kuva 1. Näyttekiekot männystä 50 % (vas.) ja 7,5 % suhteellisilta korkeuksilta. Sydän- ja mantopuun raja on korostettu mustalla värillä. Kuviin piirretyt valkoiset viivat vastaavat todellisuudessa viiden senttimetrin mittaa ja ne on piirretty pohjois- etelä- ja itä- länsisuunnassa.



Kuva 2. Esimerkkikuva erilaisista männyn manto- ja sydänpuun rajapinnoista. Poikkileikkauspinnat osoittavat, että männyn sydän- ja mantopuun raja voi noudattaa melko tarkasti puun vaippapinnan muotoa, mutta olla myös epätasainen ja esimerkiksi piparin muotoinen. Kuva: Metla/Martti Venäläinen.

Tapa, jolla sydänpuun määrä puun rungossa ilmoitetaan, on kuitenkin syytä valita sen perusteella, mihin tietoa tullaan hyödyntämään. Sydänpuun määrän kuvaaminen osuutena puun kokonaisläpimitasta tai tilavuudesta on todennäköisesti paras tapa, kun tutkitaan sydänpuun syntyprosessia biologisesta näkökulmasta. Tällöin erikokoisten ja -ikäisten puiden vertaileminen on mahdollista. Myös massa- ja paperiteollisuuden kannalta sydänpuun suhteellinen määrä on ensisijaisesti kiinnostava tunnus. Sen sijaan sahateollisuudessa toiminta perustuu läpimittojen absoluuttisiin arvoihin, koska esimerkiksi tietynlaisen sahatavaran tuottaminen vaatii raaka-aineeltaan tarkan pituuden ja läpimitan. (Flæte ja Vadla 2008)

Tutkimusten mukaan männyllä suurin sydänpuuosuus on havaittavissa 20-30 % suhteellisella korkeudella (esim. Lappi-Seppälä 1952, Rikala 2003). Lisäksi tutkimuksissa on havaittu männyn sydänpuun läpimitan pysyvän lähes vakiona tyveltä noin 20 % korkeudelle asti, jonka jälkeen se alkaa kaventua latvaa kohden edettäessä (Tamminen 1962). Tämä havainto tukee näkemystä sydänpuuosuuden suurimman arvon sijoittumisesta aiemmin mainitulle alueelle, sillä sydänpuun läpimitan pysyessä rungon alaosassa lähes vakiona ja puun kokonaisläpimitan kaventuessa samanaikaisesti, kasvaa sydänpuuosuus edettäessä tyveltä latvaan.

Sydänpuuosuuden suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muiden muassa puun ikä ja kasvunopeus. Puiden nopea kasvu, vallitseva asema sekä latvuksen suuri osuus puun pituudesta ovat negatiivisesti korreloituneita sydänpuuosuuden kanssa (Lappi-Seppälä 1952, Ojansuu ja Maltamo 1995). Kärkkäisen (1972) mukaan näiden tekijöiden vaikutusta tulisi kuvata kaksiosaisesti. Läpimitan ollessa sama, nopeakasvuisten puiden sydänpuuosuus on pienempi kuin hitaampikasvuisten, mutta toisaalta iän ollessa sama nopeampikasvuisilla puilla sydänpuuosuus on suurempi kuin hidaskasvuisilla. Sydänpuun absoluuttinen määrä lisääntyy myös puun iän kasvaessa. Sydänpuuosuuden määrään vaikuttaa lisäksi puun maantieteellinen sijainti. Männyn sydänpuuosuuden on havaittu laskevan Suomessa edettäessä pohjoisesta etelään (Hakkila 1968). Selityksenä tälle ilmiölle voidaan pitää puiden erilaista kasvunopeutta, sillä Pohjois-Suomen männyt kasvavat hitaammin kuin samanikäiset männyt Etelä-Suomessa.

Sydänpuun syntymiselle puussa ei ole kyetty antamaan tarkkaa tieteellistä selitystä, vaikka useita erilaisia hypoteeseja onkin esitetty. Kärkkäisen (2003) mukaan ei esimerkiksi tiedetä syntykö sydänpuuta kasvukauden kuluessa vai sen ulkopuolella. On myös mahdollista, että puun ydinsäteiden tylppysolujen toimiminen erilaisten aineiden varastosolukkona voisi liittyä sydänpuun muodostumisen käynnistymiseen. Tutkijat eivät ole myöskään pystyneet määrittämään tarkasti, milloin sydänpuuta alkaa muodostua männyllä. Etelä-Suomessa sydänpuun

muodostumisen on männyllä katsottu alkavan 20-40 ikävuoden kohdalla (Lappi-Seppälä 1952, Uusitalo 2004).

Vaikka syytä sydänpuun muodostumisen alkamiselle ei ole pystytty tarkasti määrittelemään, on silti tiedossa, mitä reaktioita esimerkiksi männyn puuaineksessa tapahtuu, kun se muuttuu sydänpuuksi. Puun elintoimintojen kannalta sydänpuu voidaan määritellä sellaiseksi puun osaksi, jossa kaikki solut ovat kuolleita (Panshin ja de Zeeuw 1980). Niinpä mantopuun muuttuminen sydänpuuksi tapahtuu puun sisimpien kerrosten tylppy- ja pitkittäistylppysolujen kuollessa. Myös puun kemiallinen koostumus muuttuu sydänpuun muodostumisessa. Sydänpuuhun kertyy uuteaineita, joista monet ovat myrkyllisiä mikrobeille sekä hyönteisille. Uuteaineiden vuoksi sydänpuun lahonkestävyys on parempi mantopuuhun verrattuna. Myös puun tiheys kasvaa huomattavasti uuteaineiden kertyessä sydänpuuhun. Männyn sydänpuussa tiedetään esiintyvän myös pinosylviinia (Löyttyniemi 1986, Kärkkäinen 2003). Pinosylviini on stilbeeni, joka kuuluu fenolihdisteisiin. Stilbeenien määrä on osoittautunut hyväksi puun lahonkestävyyden selittäjäksi (Venäläinen 2002). Vaikka sydänpuu erottuukin rakenteeltaan mantopuusta, se ei ole kuitenkaan tasakoosteista. Venäläinen ym. (2003) ovat havainneet kestävimmän sydänpuun sijaitsevan sen ulkoreunalla, mantopuun ja sydänpuun rajavyöhykkeellä. Epätasainen koostumus ja lahonkestävyyden vaihtelu eivät edesauta sydänpuun käytön lisäämistä lahonkestävyyttä vaativissa kohteissa, koska haastavissa olosuhteissa käytettävän puutavaran tasaiseen kestävyteen on pystyttävä luottamaan.

Sydänpuun muodostumisilmiötä on pyritty selittämään myös ns. putkimallin avulla. Shinozaki ym. (1964) laativat mallin, jonka mukaan mantopuun pinta-ala olisi verrannollinen mittauskohdan yläpuoliseen neulas- tai lehtimassaan. Putkimalli perustuu puun vedenkuljetusrakenteeseen. Kuollut sydänpuu ei enää osallistu veden kuljettamiseen juurista latvukseen. Näin ollen mantopuun ala olisi verrannollinen vettä haihduttavaan neulas- tai lehtimassaan. Myös Nylinder (1961) on havainnut puun latvukseen kuljetettavan veden määrän korreloivan positiivisesti mantopuun määrän kanssa. Putkimalliteoriaa tukee myös Sellin (1994), jonka mukaan kuusen sydän- ja mantopuun suhde on riippuvainen sen latvuksen koosta. Sen sijaan Steffen ym. (1990) eivät havainneet männyn latvusten koolta ja neulasmäärillä olevan merkittävää vaikutusta sydän- ja mantopuun määrään rungossa. Näiden tutkimustulosten perusteella voidaan tulkita, että puun rungon sydän- ja mantopuun määrän kehitystä ei voida täysin aukottomasti selittää putkimalliteoriankaan avulla.

Tärkeimpiä männyn sydänpuusta valmistettavia tuotteita ovat ovet ja ikkunanpuitteet. Luonnollisesti lahonkestävää männyn sydänpuuta voidaan käyttää ulkorakentamiseen, jossa mate-

riaalilta vaaditaan kohtalaisen pitkää käyttöikää. Esimerkkeinä käyttökohteista voidaan mainita ulkokalusteet, leikkilaineet ja puutarhamajat. Sydänpuutuotteet eivät kuitenkaan kestä jatkuvaa maakontaktia, vaan tällöin on käytettävä kyllästettyä puuta, joka täyttää parhaiten vaatimukset pitkästä käyttöiästä. Ennen sydänpuutuotteen valintaa on syytä varmistua käyttöolosuhteista ja suunnitellusta käyttöiästä. (Rikala 2007)

1.3 Aiheeseen liittyvä aiempi tutkimustieto

Puiden kokonaistilavuutta ja runkomuotoa ovat aiemmin pyrkineet ennustamaan mm. Kilkki ja Varmola (1981), Laasasenaho (1982) ja Lappi (1986). Lisäksi Eerikäinen (2001) on esittänyt mallit khasinmännyn (*Pinus kesiya*) runkokäyrän ja kuorellisen sekä kuorettoman tilavuuden ennustamiseksi. Näiden tutkimusten yhtenä tavoitteena on ollut kuvata yksittäisen puun rungon kapenemista puun pituuden funktiona eli luoda puun runkokäyrä. Runkokäyrän avulla on mahdollista ennustaa puun läpimitta halutulla korkeudella sekä ennustaa puun kokonaistilavuus tai jonkin rungon osan tilavuus. Suomessa lähes kaikissa metsäinventoinnin laskentajärjestelmissä käytetään tällä hetkellä Laasasenahon (1982) runkokäyrämalleja mm. eri puutarjalajien tilavuuksien ennustamisessa. Vaikka edellä mainitut tutkimukset ovatkin keskittyneet koko rungon tilavuuden ja muiden mittojen ennustamiseen, on niissä käytettyjen menetelmien soveltaminen mahdollista ainakin osittain myös sydänpuun määrää tutkittaessa.

Puun käyttöön vaikuttavien ominaisuuksien mallintamiseksi on myös kehitetty menetelmiä, joiden avulla voidaan esimerkiksi ennustaa oksaisuutta tai lahon esiintymistodennäköisyyttä (esim. Tamminen 1985, Kärkkäinen 1986). Lisäksi mäntyjen laatua kuvaamaan on kehitetty puun elintoimintoihin perustuva metsikön kasvumalli (Mäkelä 1997, Mäkelä ym. 2000). Sen sijaan yleiseen käyttöön ei ole vielä vakiintunut omaa menetelmää sydänpuun määrän ennustamiseksi.

Sydänpuun määrän tutkimisesta tekee esimerkiksi puun kokonaistilavuuteen verrattaessa ongelmallisemman jo se seikka, että sydänpuu sijaitsee aina puun rungon sisäosassa. Näin ollen sen havaitseminen paljaalla silmällä ei ole mahdollista puuta vahingoittamatta tai käyttämättä erikoislaitteita kuten tukkiröntgeniä.

Koska männyn sydänpuun synnylle ja määrän lisääntymiselle ei ole vielä löydetty absoluuttista tieteellistä selitystä, on aiheesta tehty useita erilaisia tutkimuksia, joista jokainen pyrkii selittämään sydänpuun syntyä ja määrän kehitystä omalla tavallaan. Yleisimmin ilmiötä on kuvattu joko puun dimensioita tai ikätietoa hyödyntämällä. Myös molempien tapojen yhdistelmää on käytetty varsin yleisesti. Useimmissa tutkimuksissa on myös otettu huomioon niissä luotujen

sydänpuun läpimittaa tai määrää ennustavien menetelmien hyödyntäminen käytännössä. Jotta sydänpuun läpimitan, ja sen avulla myös tilavuuden, ennustaminen olisi järkevää ja tehokasta, ei tutkimuksen kohteena olevista puista ole mahdollista tehdä monia aikaa vieviä tai jopa puulle vahingollisia mittauksia. Erilaisia malleja vertailtaessa onkin syytä ottaa huomioon myös niiden käytännöllisyys ja suhteuttaa se mallin ennustuskykyyn.

Flæte ja Høibø (2009) pyrkivät tutkimuksessaan kuvaamaan varttuneiden mäntyjen sydänpuun läpimitan käyttäytymistä ja loivat samalla useita erilaisia malleja sydänpuun läpimitan ennustamiseksi maastossa mitattavien ominaisuuksien perusteella. Tutkimuksessa esitellyillä malleilla on mahdollista ennustaa sydänpuun läpimittaa käyttämällä yhtä ja samaa mallia tarkastelukorkeudesta riippumatta. Vaikka yhtä ja samaa mallia voi käyttää koko rungolle, on kuitenkin syytä ottaa huomioon, että tekijöiden mukaan mallit on laadittu toimimaan käytännössä vain rungon suhteellisten korkeuksien 5 % - 70 % välillä.

Flæten ja Høibøn (2009) mallit luotiin Norjassa kahdeksalta varttuneelta mäntykuviolta kerätyn aineiston perusteella. Aineisto sisälsi mittauksia 70 männystä, joiden oletettiin olevan päätehakkukypsiä tutkimukseen valittujen metsikkökuvioiden tietojen perusteella. Useita selittäviä muuttujia sisältäneet mallit onnistuivat selittämään sydänpuun läpimittaa varsin hyvin, sillä tutkimuksessa esiteltujen seitsemän mallin selitysasteet vaihtelivat 88,2 % ja 95,3 % välillä, kun mallien toimivuutta testattiin erillisellä validointiaineistolla. Mallien selittäviä muuttujia olivat rinnankorkeusläpimitta kuoren alta, puun pituus, tarkastelukorkeus, latvussuhde, mantopuun säde rinnankorkeudella, sydänpuun säde rinnankorkeudella, puun ikä ja kuoreton läpimitta tarkastelukorkeudella. Paras selitysaste oli malleilla, joissa selittävien muuttujien joukossa oli mittaustietoa manto- ja/tai sydänpuusta. Mutta nekin mallit, joissa selittävien muuttujien arvot olisivat saatavissa mittaamalla vain puun ulkoisia ominaisuuksia, onnistuivat selittämään sydänpuun läpimittaa noin 90 prosenttisesti. (Flæte ja Høibø 2009)

Mallien avulla laaditut sydänpuun läpimittaennusteet olivat mittaustuloksiin verrattuna lieviä aliarvioita. Pieni aliarvio sydänpuun läpimittaennusteessa ei kuitenkaan ole välttämättä huono asia, sillä esimerkiksi lievän aliarvion perusteella laadittu sahaussuunnitelma kestää sydänpuun muodosta johtuvat tilapäiset läpimitan vaihtelut täysin tarkkaa ennustetta paremmin. Flæten ja Høibøn (2009) mallien käyttöä yleisinä männyn sydänpuun läpimittamalleina rajoittaa kuitenkin se, että mallien laadinta-aineisto koostui vain vanhoista puista. Lisäksi mallien käyttökelpoisuus vain tiettyjen suhteellisten korkeuksien välillä estää sydänpuun läpimitan luotettavan ennustamisen koko rungon alueella, mikä vaikeuttaa esimerkiksi sydänpuun kokonaistilavuuden ennustamista. Toisaalta männyllä suurin osa sydänpuusta esiintyy mallien käyttöalu-

een sisällä, eikä alle 5 prosentin korkeudelle sijoittuvan tyviosan mahdollisesti suurempaa sydänpuuosuutta välttämättä kuitenkaan pystyittäisi hyödyntämään käytössä tehokkaammin sen lyhyden vuoksi.

Flæte ja Vadla (2008) julkaisivat Flæten ja Høibøn (2009) kaltaisia tuloksia tutkittuaan sydänpuun läpimittaprofiilia männyillä. 56 puun aineiston perusteella he esittivät mallin, jonka avulla voidaan ennustaa sydänpuun läpimitta pelkän tarkastelukorkeuden kuorettoman läpimitan perusteella. Tämän mallin selitysaste oli 0,86 ja keskineliövirheen neliöjuuren arvo 16,9 millimetriä. Tutkijoiden mukaan tämän kaltaisen mallin käyttäminen sydänpuumäärän ennustamiseen voisi olla mahdollista esimerkiksi hakkuukoneessa tai tulevaisuuden maastoinventoinneissa hyödyntämällä tarkan läpimittatiedon antavaa maastolaserkeilausta. (Flæte ja Vadla 2008)

Kuten Flæten ja Høibøn (2009) myös Flæten ja Vadlan (2008) tutkimuksessa mainitaan seikkoja, jotka vaikuttavat mallien hyödynnettävyyteen. Tutkimusaineisto on kerätty ainoastaan Pohjois-Norjasta napapiirin yläpuolelta alueilta, joita pidetään maantieteellisen sijainnin ja ilmasto-olosuhteiden vuoksi metsänkasvatuksellisesti heikotuohtoisina. Lisäksi sydänpuumittaukset on tehty vain kuudelta korkeudelta (tyvi, 1.3 m, 20 %, 40 %, 60 % ja 80 %), jolloin kaikkea vaihtelua ei ole välttämättä havaittu. Sydänpuun läpimittahavaintojen vähäinen määrä runkoa kohden asettaa osin kyseenalaiseksi myös tutkimuksessa tehdyn havainnon, jonka mukaan suurimmalla osalla tutkituista männyistä sydänpuun läpimitta laskee rungon tyveltä latvaan. Vain seitsemässä koepuussa 56:sta sydänpuun läpimitan enimmäiskohta sijoittui 1-3 metrin korkeuteen. Näin selkeä havainto tasaisesta kapenemisesta on poikkeava verrattuna muihin tutkimuksiin (esim. Lappi-Seppälä 1952, Tamminen 1962, Rikala 2003), joissa on todettu sydänpuun läpimitan pysyvän rungon alaosassa lähes samana. Mallin laatijat suosittelivatkin erillisen testiaineiston käyttämistä mallin ennustuskyvyn arvioimiseksi ja mahdollisesti omien itsenäisten mallien luomista nuorille sekä vanhoille männyille (Flæte ja Vadla 2008).

Edellä mainituissa tutkimuksissa luoduissa malleissa sydänpuun läpimitan määrän muutosta kuvaavina muuttujina on pääasiassa käytetty puun ulkoisten ominaisuuksien tunnuksia. Sen sijaan Wilhelmsson ym. (2002) ovat lähestyneet sydänpuun läpimitan mallintamista muodostamalla mallin, joka käyttää selittävinä muuttujina sekä puun läpimitta- että ikätietoa. Tutkimus laadittiin 120 eri-ikäisen männyn koepuuaineistosta, joka oli kerätty Ruotsissa kattaen sekä ilmastollisesti että maaperällisesti kaikki vallitsevat kasvuolosuhteet. Kuvaavaa myös tälle tutkimukselle oli koepuista eri korkeuksilta leikattujen näytekiekkojen vähäisyys. Sydänpuun määrä mitattiin puun koosta ja iästä riippuen vähintään kahdelta ja korkeintaan seitsemältä eri

korkeudelta. Aineiston pohjalta Wilhelmsson ym. (2002) loivat kaksi mallia, joilla voidaan ennustaa männyn sydänpuun läpimittaa sekä käyttämällä myös mallin lisäosaa sydänpuun osuutta puun poikkileikkauksesta. Tässäkin tutkimuksessa malleilla kyettiin selittämään sydänpuun läpimitan vaihtelua samalla tasolla norjalaistutkimusten kanssa. Malli, jonka selittävinä muuttujina käytettiin puun läpimittaa ja logaritmista vuosilustojen määrää tarkastelukorkeudella, oli selitysteeltaan (92 %) parempi. Myös tämän mallin keskineliövirheen neliöjuuri eli RMSE (14,1 mm) oli pienempi kuin mallin, jossa käytettiin selittävänä muuttujana vain tarkastelukorkeuden läpimittaa ja sen logaritmia (RMSE 16,9 mm ja selityste 88 %). Sydänpuuosuuden ennustaminen mallin lisäosalla tuotti 10 % ennustevirheen männyllä. Wilhelmssonin ym. (2002) mukaan näyttääkin siltä, että sydänpuun läpimitta korreloisi tarkastelukorkeuden kokonaisläpimitan kanssa, mutta sydänpuuosuuden vaihtelu olisi enemmän riippuvainen vuosilustojen määrästä sekä myös joiltain osilta puiden geneettisistä ominaisuuksista.

Tarkastelukorkeuden vuosilustojen määrän huomioon ottava malli saa tukea myös Gjerdrumin (2003) tutkimuksista. Gjerdrum (2003) on luonut omien tutkimustensa perusteella männyn sydänpuun ikä –säännön (kaava 1), jonka avulla voitaisiin ennustaa sekä sydänpuun ikä että läpimitta halutulla korkeudella. Mallin perusmuodossa sydänpuun ikä ($Ikä_{sp}$) eli sydänpuulustojen määrä tarkastelukorkeudella määrittyy vuosilustojen määrän ($Ikä_{kamb}$) eli puun kambiaalisen iän neliöjuuren ja vakion 3 erotuksen neliönä.

$$Ikä_{sp} = (\sqrt{Ikä_{kamb}} - 3.0)^2 \quad (1)$$

Gjerdrumin (2003) mukaan edellä esitelty kaava toimii männyllä maailmanlaajuisesti riippumatta ympäristötekijöistä tai tarkastelukorkeudesta. 1656 havainnon aineistosta tehdyssä tutkimuksessa malli selitti 93 prosenttia sydänpuun iän vaihtelusta. Tutkimuksessa todetaan myös mahdollisuudesta ennustaa puun keskimääräinen vuosilustojen leveys ja sydänpuulustojen leveys, kun vastaavat läpimitat ovat tiedossa. Sydänpuun läpimitan ja määrän ennustaminen rungossa voisi tutkimuksen mukaan olla mahdollista myös käyttämällä puun ikää selittävänä muuttujana.

Suomessa Uusitalo (2004) onkin laatinut tutkimuksessaan Gjerdrumin (2003) sääntöä hyödyntämällä mallit, joiden avulla metsäkone voisi ennustaa esimerkiksi hakkuuvaiheessa männyn sydänpuun kapenemista. Uusitalon (2004) kehittämä menetelmä käyttää useampaa mallia, joiden tuloksia hyödyntämällä edetään puun kambiaalisesta iästä lopulta sydänpuun säteen ennusteeseen. Jotta mallia voidaan käyttää sydänpuun säteen ja läpimitan ennustamiseen, tutkimuksen kohteena olevasta puusta on tiedettävä tarkastelukorkeuksilla sen ikä ja läpimitan

kasvu. Lämpimitan kasvu voidaan laskea, kun tiedetään vuosilustojen määrä sekä puun läpimitta ko. korkeudella. Tekijä raportoi lopullisen sydänpuun sädettä ennustaneen mallin yliarvioivan sädettä pienillä runkolämpimitoilla ja vastaavasti aliarvioivan sitä suurilla. Toisaalta mallin ennusteet olivat vain hieman harhaisia (1,5 mm) ja mallin sydänpuun läpimittaennusteen RMSE oli noin 21 millimetriä. Tutkimuksen toteuttamiseen käytettiin näytekiekkoja 59 männyn aineistosta. Tulosten kannalta on merkittävää, että aineisto ei sisältänyt lainkaan mittauksia puiden kaatoleikkauksen ja neljän metrin korkeuden väliseltä alueelta, jossa sydänpuun määrä on tavanomaisesti suurimmillaan. Tämän kuten muidenkin ikätietoon perustuvien menetelmien hyödyntämistä käytännössä vaikeuttaa sen käyttämiseksi tarvittavan tiedon saatavuus. Männyn ikää ei pystytä arvioimaan vielä puuta käsittelemättä sillä tarkkuudella, että tuloksien perusteella voitaisiin tehdä täysin luotettavia sydänpuuennusteita. Sen sijaan aiempien metsävaratietojen hyödyntäminen ennusteissa voisi olla mahdollista, jos saatavissa on esimerkiksi tarkka tieto metsikön istutusajankohdasta.

Ojansuu ja Maltamo (1995) ovat edenneet männyn sydänpuun tilavuuden ennustamiseen tutkiessaan puun koon sekä runkomuodon vaikutusta männyn sydän- ja mantopuun kokoon ja muotoon. Yksittäisen puun ominaisuuksien lisäksi tutkimuksessa pyrittiin selvittämään metsikkökuvion ominaisuuksien sekä kasvuolosuhteiden vaikutusta sydän- ja mantopuun suhteeseen. Tutkimuksessa sydänpuun runkokäyrä ja lopulta sen tilavuus mallinnettiin napakoordinaatistomenetelmään perustuvalla sekamallilla. Tutkimusaineistonaan Ojansuu ja Maltamo (1995) käyttivät samaa mittausaineistoa, jota käytetään myös tämän työn toteuttamiseen. Sydänpuun läpimitan ennustamisen sijaan Ojansuu ja Maltamo (1995) ennustivat sydänpuun runkokäyrän luomisvaiheessa mantopuun kaksinkertaista paksuutta, josta sydänpuun läpimitan johtaminen oli kuitenkin yksinkertaista, kun tiedettiin myös puun läpimitta kyseisellä korkeudella. Mantopuun paksuuden ennustamiseen käytettyjä muuttujia olivat kuoreton rinnankorkeusläpimitta, pituus, mantopuun kaksinkertainen paksuus rinnankorkeudella sekä latvusrajan korkeus. Käytettyjen mallien RMSE vaihteli noin 15 % ja 20 % välillä siten, että parhaat tulokset saavutettiin, kun selittävien muuttujien joukossa oli mantopuun kaksinkertainen paksuus rinnankorkeudelta. Huonoimmat tulokset saatiin, kun selittävinä muuttujina käytettiin vain rinnankorkeusläpimittaa sekä rinnankorkeusläpimittaa ja pituutta. Toisaalta mallien hyvyttä arvioitaessa on jälleen syytä ottaa huomioon se, että yksinkertaisten muuttujien mallien RMSE:n ero verrattuna huomattavasti vaikeammin toteutettavia mittauksia vaativiin malleihin oli vain noin viisi prosenttiyksikköä.

Sydänpuun tilavuutta Ojansuu ja Maltamo (1995) ennustivat integroimalla aiemmin luotua sydänpuun runkokäyrää. Tilavuutta ennustettaessa mallien onnistumiserot ovat huomattavasti

suurempia kuin sydänpuun läpimitan osalta. Tilavuusennusteen prosentuaalinen RMSE oli niissä malleissa, joissa selittävänä muuttujana ei ollut käytetty mantopuun paksuutta rinnankorkeudella, 85 % ja 91 % välillä. Noin 33 prosentin RMSE tilavuusennusteessa saavutettiin, kun selittävinä muuttujina olivat ainakin läpimita ja mantopuun paksuus rinnankorkeudelta sekä puun pituus. Vaikka kyseinen tutkimus oli ainoa, jossa ennustettiin myös sydänpuun tilavuutta, voidaan tämän ja muiden tutkimusten tuloksista tehdä johtopäätös, että sydänpuun läpimitaa tai tilavuutta mallinnettaessa puun sisältä tehtävät mittaukset vaikuttavat tulosten hyvyyteen merkittävästi. Esimerkkeinä puun sisältä tehtävistä mittauksista voidaan mainita vuosilustojen tai sydänpuulustojen määrä, sekä sydän-/mantopuun läpimita jollain tietyllä korkeudella.

Erilaisen näkemyksen sydänpuun määrän ennustamiseen männyillä esittää Björklund (1999), jonka mukaan paljon sydänpuuta sisältävien puunrunkojen saamiseksi teollisuuden käyttöön tulisi suosia geneettistä jalostamista metsänarvioinnin menetelmien käytön sijaan. Väitteet perustuvat tutkimukseen, jonka mukaan männyn sydänpuun määrä vaihtelee merkittävästi sekä yksittäisten puiden että metsikkökuvioiden välillä eikä se korreloi hyvin puusto-, kuvio- sekä paikkatietotunnusten kanssa. Tutkimuksensa tulosten perusteella Björklund (1999) toteaa, että männyn sydänpuun muodostumiseen vaikuttaa vain hyvin vähän, missä, ja rajallisesti myös, miten se kasvaa. Tutkimuksen loppuväite on kuitenkin ristiriidassa useiden aiemmin mainittujen tutkimusten kanssa, sillä esimerkiksi Ojansuu ja Maltamo (1995) ovat huomanneet männyn sydänpuuosuuden riippuvan metsikkökuvion pohjapinta-alasta.

Myös tutkittaessa muiden havupuulajien sydänpuun määrää ja muodostumista, on tehty havaintoja olemassa olevista riippuvuussuhteista sydänpuun ja puun muiden ominaisuuksien välillä. Climent ym. (1993) raportoivat havainneensa kanarianmännyllä (*Pinus canariensis*) yhteyttä sydänpuun läpimitan ja vuosilustojen lukumäärän, ensimmäisen 25 elinvuoden kasvunopeuden sekä puun kuorettoman läpimitan välillä. Pinto ym. (2003) ovat sen sijaan tutkineet rannikkomännyn (*Pinus radiata*) sydänpuun määrään vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksen tuloksien perusteella parhaiten rannikkomännyn sydänpuun läpimittaa kuvaa puun rungon läpimita ja sydänpuun tilavuutta puun pituus sekä läpimita rinnankorkeudella.

Männyn sydänpuun läpimittaa ja osittain myös tilavuutta on pyritty mallintamaan sekä ennustamaan useissa tutkimuksissa. Kuitenkaan mikään tutkimuksista ei ole pystynyt täysin selittämään sydänpuun määrän kehittymistä puun rungossa. Sydänpuun määrän osittain epäsäännöllinen lisääntyminen ja käyttäytyminen puun kasvaessa sekä se, ettei vielä kukaan täysin pystytä määrittämään, milloin sydänpuuta todella alkaa puussa muodostua, ovat suurimmat syyt siihen, että yhtä yleispätevää menetelmää ei ole voitu ottaa käyttöön. Edellä mainitut avoimet

kysymykset ovat tuoneet omat haasteensa kaikille sydänpuumallien laatijoille ja niihin on pyritty saamaan ratkaisuja eri lähestymistapoja käyttäen. Vaikka kaikki aiemmat tutkimukset eivät puollakaan sydänpuun määrän ennustamismenetelmien toimivuutta, voidaan useiden tutkimusten tuloksiin nojautuen tehdä johtopäätös, että männyn sydänpuun määrän ennustaminen tarkasti voi olla mahdollista.

1.4 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on laatia menetelmä, jonka avulla voidaan ennustaa mahdollisimman luotettavasti ja tehokkaasti männyn sydänpuun läpimitta millä tahansa rungon korkeudella sekä sydänpuun tilavuus puun rungossa tai sen osassa. Tutkimus toteutetaan kolmessa vaiheessa. Ensin pyritään luomaan kahdeksalle puun suhteelliselle korkeudelle mahdollisimman hyvin sydänpuun läpimittaa ennustavat mallit, joiden avulla voidaan laatia runkokäyrä kuvaamaan sydänpuun läpimitan muutosta puun rungossa. Laaditun sydänpuun runkokäyrän avulla voidaan ennustaa yksittäisen puun sydänpuun tilavuus.

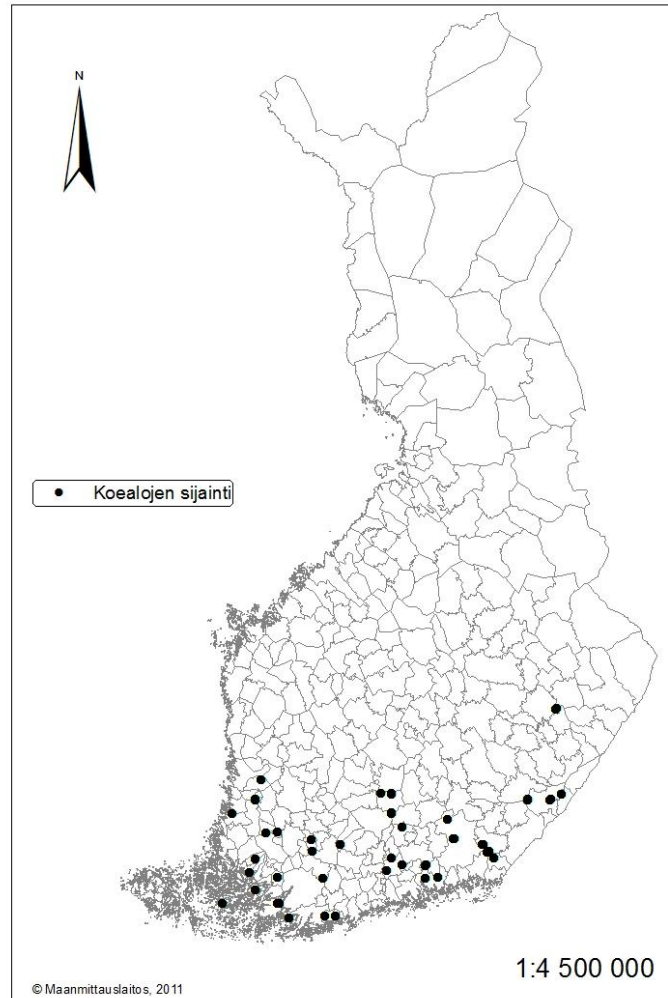
Tutkimuksessa yksittäisen männyn sydänpuun määrän ennustamiseksi kehitettävä menetelmä pyritään laatimaan siten, että sen hyödyntäminen olisi mahdollista myös tulevaisuuden metsävaralaskennoissa. Jotta menetelmää voitaisiin käyttää esimerkiksi Valtakunnan metsien inventoinnin laskentojen yhteydessä, onkin tärkeää ottaa huomioon myös sen tehokkuus. Tässä tapauksessa tehokkuudella tarkoitetaan sellaisten muuttujien käyttämistä sydänpuun määrän ennustamisessa, että niiden mittaaminen maastossa on nopeaa ja yksinkertaista. Ennusteiden luotettavuuden ja tarkkuuden osalta tavoitteena on saavuttaa vähintäänkin yhtä hyviä tai parempia tuloksia, kuin aikaisemmat sydänpuun esiintymistä ennustaneet tutkimukset. Kun tieto sydänpuun määrästä on helpommin saatavilla, paranevat myös metsäteollisuuden mahdollisuudet hyödyntää tuotannossaan sydänpuuaineksen erikoisominaisuuksia.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1 Metsäntutkimuslaitoksen VAPU-aineisto

Tutkimusaineisto on kerätty vuosien 1988 ja 1990 välillä Metsäntutkimuslaitoksen valtakunnallista puututkimusta (VAPU) varten. Aineisto kerättiin koelaloilta, jotka valittiin valtion ja yhteisöjen maille sattuneista Valtakunnan metsien inventointi 8:n (VMI) koelaloista. Koelaloilta kerättiin kolmen tason tietoa: kuvio-/koelamittaukset, pystykoepuu- ja kaatokoepuumittaukset. (Korhonen ja Maltamo 1990)

Metsäntutkimuslaitoksen Valtakunnallisen puututkimuksen aineisto koostui 95 koealasta, joista 51:llä oli tehty mittauksia männyistä. Tutkimuksen tekoon käytetty aineisto, 173 mäntykaatokoepuuta, on kerätty kuvan 3 mukaisesti Etelä-Suomen alueelle sijoittuneilta koealoilta.



Kuva 3. Tutkimusaineiston keräämiseen käytettyjen koealojen sijainti.

VAPU-tutkimuksen koealat perustettiin metsä- ja kitumaalle. Jo VMI-mittauksissa kerätyt koealatiedot tarkistettiin ja mahdolliset muutokset kirjattiin ylös. Koealatietoihin kuuluivat: koealan sijainti, mittausvuosi, koealan lämpösumma, omistajatyyppe, maaluokka sekä sen alaryhmä ja tyyppi, maalaji, ojitustilanne, veroluokka, puuston kehitysluokka, vallitseva puulaji, mahdollinen toisen jakson vallitseva puulaji, vallitsevan puulajin osuus koealan puista, havulehti-puuosuus, mahdollinen sivupuulaji sekä koealan keskiläpimitta ja koealan puuston ikä. (Korhonen ja Maltamo 1990)

Koealamittausten jälkeen suoritettiin kaatokoepuiden valinta. Kaatokoepuiksi hyväksyttiin yli viiden cm:n läpimittaiset haaroittumattomat elävät männyt, kuuset ja koivut. Kaatokoepuiksi

valittiin ensisijaisesti vallitsevan jakson puita VMI8:n ohjeiden mukaisesti. Jokaiselta koealalta kaadettiin yhteensä kolmesta kuuteen puuta. Kaatokoepuiden valintaohjeiden perusteella tämän tutkimuksen käyttöön oli mahdollista tulla 0-5 mäntykaatokoepuuta koealaa kohden. (Korhonen ja Maltamo 1990)

Ennen kaatokoepuiden kaatamista koealoilla tehtiin pystykoepuumittaukset. Pystykoepuumittaus tehtiin koealalla vähintään viiden metrin säteiseltä ympyräkoevalta. Pystykoepuista mitattiin seuraavat tunnuksat: etäisyys ja suunta koealan keskipisteestä, puulaji, rinnankorkeusläpimita kohtisuoraan koealan sädettä vastaan, synty tapa, pituus, latvusrajan korkeus ja puussa näkyneet tuhot sekä puun numero VMI:n koepuulomakkeessa. Joka neljännessä yli 5 cm:n läpimitaisesta männystä, kuusesta tai koivusta kairattiin ytimeen saakka ulottuva ikänäyte. (Korhonen ja Maltamo 1990)

Kaatokoepuista mitattiin vielä ennen kaatoa kantoläpimita ylimmän kaatoa haittaavan juuren korkeudelta. Jos juureniskaa ei ollut, kantoläpimita mitattiin oletetun kaatoleikkauksen kohdalta kahdessa mittaussuunnassa. Lisäksi niiden runkoon merkittiin 1,3 metrin korkeus maanpinnasta sekä suunnat pohjoiseen ja koealan keskipisteeseen. (Korhonen ja Maltamo 1990)

Kaadettujen puiden rungoista mitattiin läpimitat koealan säteen suunnassa ja sitä vastaan kohtisuoraan 1,3 sekä 6,0 metrin korkeudelta. Lisäksi rungon läpimittamittaukset suoritettiin suhteellisilta korkeuksilta: 1; 2,5; 5; 7,5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 ja 95 %. Rungon suhteelliset korkeudet määritettiin maanpinnan tasosta puun latvaan asti ulottuvalta osalta. Runko katkaistiin mittauskohdista, jonka jälkeen leikkauskohdasta mitattiin kuorellinen läpimita. Sen jälkeen mittauskohdista poistettiin kuori ja mitattiin kuoreton läpimita. (Korhonen ja Maltamo 1990)

Varsinaiset sydänpuun määrän mittaukset tehtiin kasvunäytteiden ottamisen yhteydessä. Puun rungosta sahattiin 3 cm:n paksuiset kasvunäytekiekot 1,3 ja 6,0 metrin korkeudelta sekä suhteellisilta korkeuksilta 2,5; 7,5; 15; 30; 50; 70; 85, ja 95 %. Kasvunäytteisiin merkittiin sydänpuun raja. Rajan löytämisessä apuna käytettiin kyseisestä rungon kohdasta sahattua noin puolen cm:n paksuista kiekkoa, josta sydänpuun rajaa etsittiin katsomalla valoa vasten. Kasvunäytekiekoista mitattiin myöhemmin sisätöinä jokaisen luston paksuus ytimeestä pintaan ensin kohti koealan keskipistettä ja sitten vastakkaiseen suuntaan. Etäisyys puun ytimen keskipisteestä ytimen ulkopintaan mitattiin ensimmäisenä lustona ja näin ollen vasta toisessa mittauksessa mitattiin ensimmäisen varsinaisen vuosiluston paksuus. Viimeisenä lustona mitattiin aina mittauskesän kasvu. (Korhonen ja Maltamo 1990)

2.2 Aineiston käsittely

Metsäntutkimuslaitos toimitti tässä tutkimuksessa käytetyn VAPU-aineiston useana erillisenä tiedostona, jotka sisälsivät aineiston keruun eri vaiheissa kerättyä tietoa. Koska aineistoon kuuluvat tiedot eivät olleet yhtenä tiedostona, oli tiedostoja muokattava ja yhdisteltävä yhdeksi kokonaiseksi tiedostoksi, jotta niiden käyttäminen laskennoissa olisi mahdollista. Tiedostojen käsittely ja yhdistäminen suoritettiin Microsoft Excel-ohjelmalla. (Metsäntutkimuslaitos, Valta-kunnallinen puututkimus)

Metsäntutkimuslaitoksen toimittamat tutkimuksen eri työvaiheissa kerätyt aineistot yhdistettiin toisiinsa koepuunumeroinnin perusteella. Yhdistämisen jälkeen käsiteltävä aineisto rajattiin sisältämään vain mäntyjä. Mäntyaineistoa rajattiin vielä käsittämään vain tutkimuksessa kaatokoepuiksi valitut männyt, sillä vain niistä oli tehty tämän sydänpuututkimuksen kannalta tarvittavat sydänpuun läpimittamittaukset. Koealojen, joilla tutkimusaineiston kaatokoepuut sijaitsivat, koealamittaustiedot lisättiin aineistoon, jotta voitaisiin tutkia esimerkiksi puun kasvuolosuhteiden vaikutusta sydänpuun esiintymiseen.

Koska eräissä tutkimuksissa puun iän on katsottu korreloivan selvästi männyn sydänpuun määrän kanssa (esim. Gjerdrum 2003), tuli kaatokoepuille saada tutkimusaineistoon myös ikätieto, jota voitaisiin hyödyntää analysoinnissa ja mallinnuksessa, jos se osoittautuisi merkitseväksi tekijäksi. Metsäntutkimuslaitoksen toimittamassa VAPU-aineistoissa ei kuitenkaan ollut valmiiksi olemassa esimerkiksi yksittäisen puun ikätietoa tietyllä tarkastelukorkeudella. Sen sijaan aineisto sisälsi tiedot kaatokoepuille suoritetuista lustomittauksista. Lustomittauksissa oli laskettu lustojen määrä katkaisukorkeudelta ja mitattu lustojen leveys. Puun jäljen ikänä, eli kambiaalisena ikänä, voidaan pitää vuosilustojen määrää ytimeistä laskettuna (Kärkkäinen 2003), jolloin laskemalla vuosilustojen määrän esimerkiksi rinnankorkeudelta tehdystä mittauksesta, voidaan saada selville puun rinnankorkeusikä kaatohetkellä. Lustomittauksissa puun lustojen määrä oli laskettu kahdessa suunnassa (Korhonen ja Maltamo 1990), joten laskemalla tulosten keskiarvon ja pyöristämällä sen laskusääntöjen mukaisesti lähimpään kokonaislukuun saatiin aineistoon lisättyä kaikille puille vuosilustojen määrään perustuva rinnankorkeusikä.

Aineiston rajauksen ja tiedonsiirtojen lopputuloksena saadulle mäntyaineistolle tehtiin luotettavuustarkasteluja esimerkiksi vertailemalla ristiin eri tiedostoista saatujen puiden pituus- ja läpimitta-arvojen välisiä eroja, jotta voitiin olla varmoja, ettei tiedostojen yhdistämisessä ole tapahtunut virheitä. Näiden ja muiden tarkastelujen perusteella alun perin toimitetusta mittausaineistosta jouduttiin hylkäämään 15 mäntyä todennäköisten mittausvirheiden ja epäloogi-

suuksien vuoksi. Hylättyjen puiden tietojen käyttäminen tutkimuksessa olisi todennäköisesti vaikeuttanut tutkimuksen toteuttamista huomattavasti. (Metsäntutkimuslaitos, Valtakunnallinen puututkimus)

2.3 Regressioanalyysi

Tässä tutkimuksessa sydänpuun läpimittaan rungon suhteellisilla korkeuksilla vaikuttavia tekijöitä arvioitiin lineaarisella regressioanalyysillä. Lineaarinen regressioanalyysi on tilastollinen analyysimenetelmä, jolla pyritään kuvaamaan yhden tai useamman selittävän muuttujan arvojen muutoksen vaikutus selitettävään muuttujaan. Mikäli selittävien muuttujien arvot ovat tiedossa, on selitettävän muuttujan arvon ennustaminen mahdollista analyysin perusteella laaditun regressiomallin avulla.

Regressioanalyysia käyttämällä selvitettiin, mitkä ovat ne muuttujat, jotka ovat tilastollisesti merkitseviä, eli joiden arvot kuvaavat parhaiten tässä aineistossa sydänpuun läpimittaa puun suhteellisilla korkeuksilla. Regressioanalyysin suorittamiseen käytettiin tässä tutkimuksessa R-ohjelmiston lm-funktiota (R Development Core Team 2011). Mallin selittävien muuttujien tarpeellisuutta vertailtiin yksittäisten regressiokertoimien t-testin avulla. Muuttujat, joilla ei havaittu olevan omaa vaikutusta sydänpuun läpimitan arvoon, poistettiin mallista. Käytettävien selittävien muuttujien määrää ei ole regressiomallissa rajoitettu, mutta on syytä muistaa, että regressiomallin tavoitteena on ilmaista muuttujien välistä riippuvuutta mahdollisimman selkeästi. Tämän vuoksi kovin monien selittäjien sisällyttäminen malliin ei ole mielekäästä.

Regressioanalyysillä laaditun mallin hyvyttä voi arvioida esimerkiksi tutkimalla mallin selitystasetta R^2 . Selitystaste on tunnusluku, joka kertoo, miten suuren osuuden selitettävän muuttujan vaihtelusta malli onnistuu kuvaamaan. Selitystaste R^2 voidaan laskea jakamalla mallilla selitetty vaihtelu SSR mallin kokonaisvaihtelulla SST. Kokonaisvaihtelu on selitetyn (SSR) ja selittämättömän (SSE) vaihtelun summa. Mallilla selitetty vaihtelu (SSR) voidaan laskea käyttämällä kaavaa 2

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$

ja selittämätön vaihtelu (SSE) kaavalla 3

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3)$$

jossa \hat{y}_i on ennustettu ja y_i havaittu arvo yksilöllä i sekä \bar{y} havaintojen keskiarvo.

Mallin selitysaste (kaava 4) saadaan laskemalla

$$R^2 = \frac{SSR}{SSR+SSE} \quad (4)$$

Selittävien muuttujien määrällä on vaikutusta myös mallin selitysasteeseen, sillä mallin tavanomainen selitysaste ei voi pienentyä, jos siihen lisätään uusia selittäviä muuttujia, koska lisäselittäjien myötä malli muuttuu joustavammaksi. Sen vuoksi mallien sopivuuden analysointiin suositellaankin käytettävän ns. *Adjusted R²*-selitysastetta (kaava 5), joka ottaa huomioon myös vapausasteiden lukumäärän. *Adjusted R²* voi myös pienentyä, jos malliin lisätään uusia hyödyttömiä selittäjiä. Koska tässä työssä regressioanalyysia käytetään erityisesti mallin muuttujavalinnassa, saattavat mallit sisältää eri määrän muuttujia riippuen siitä, mitkä osoittautuvat tarkastelussa kullakin korkeudella merkitseviksi. Mallien erilaisuus puoltaa *Adjusted R²*:n käyttämistä niiden hyvyyttä ja keskinäistä paremmuutta vertailtaessa.

Adjusted R² lasketaan

$$Adj. R^2 = \frac{SSR/(p-1)}{SST/(n-1)} \quad (5)$$

jossa p on selittävien muuttujien ja n vapausasteiden lukumäärä.

Mallin hyvyyttä voidaan arvioida myös laskemalla mallin keskivirhe (RMSE). Se saadaan laskemalla neliöjuuri mallin keskineliövirheestä (MSE).

Mallin keskineliövirhe (MSE) lasketaan kaavalla 6

$$MSE = SSE/(n - p) \quad (6)$$

Mallin keskivirheestä saadaan suhteellinen keskivirhe jakamalla mallin RMSE joko selitettävän muuttujan havaittujen tai ennustettujen arvojen keskiarvolla. Lisäksi mallin hyvyyttä tarkasteltaessa olennaista on mallin loogisuus, esimerkiksi tässä tapauksessa sydänpuun läpimitta ei voi saada negatiivisia arvoja.

2.4 Lineaarinen sekamalli

Sydänpuun läpimittaa puun rungon suhteellisilla korkeuksilla analysoitiin tutkimuksessa ensin lineaarisen regressioanalyysin avulla. Tutkimuksessa luotiin myös regressiomallit, joiden avulla voitaisiin ennustaa sydänpuun läpimitta ko. suhteellisella korkeudella. Regressiomallien tuloksia, residuaaleja ja muita ominaisuuksia tarkasteltaessa havaittiin, että sydänpuun läpimitan ennustaminen kyseisellä menetelmällä ei tuottanut aivan tutkimuksen tavoitteita toteuttaneita tuloksia. Koska tutkimusaineiston puut olivat peräisin koealoilta, joilta tutkimukseen oli

otettu mukaan yhdestä viiteen mäntyä, voitiin koepuiden riippumattomuus toisistaan kyseenalaistaa. On esimerkiksi mahdollista, että koealatasen erilaiset kasvuolosuhteet tai samalla koealalla sijaitsevien puiden geeniperimä vaikuttavat sydänpuun määrään kehitykseen juuri koealatasolla. Myös aikaisemmissa tutkimuksissa (esim. Ojansuu ja Maltamo 1995, Eerikäinen 2001) esiteltyjen mallien laadinnassa oli otettu huomioon koealavaikutus. Tämän vuoksi sydänpuun läpimittaa päätettiin yrittää mallintaa käyttämällä lineaarista sekamallia, jossa selittävänä muuttujina käytettäisiin edelleen samoja muuttujia kuin lineaarisessa regressiomallissa, mutta nyt malliin otettaisiin mukaan satunnaistekijäksi tieto koealasta, jolta puu oli peräisin.

Mallin selittävien muuttujien ulkopuolelle jäävien muiden tekijöiden huomioon ottaminen mallinnuksessa on mahdollista käyttämällä lineaarista sekamallia, jossa havaintojen kokonaisuuden vaihtelu voidaan jakaa koealojen sisäiseen ja niiden väliseen vaihteluun. Tässä tutkimuksessa käytetty lineaarinen sekamalli (kaava 7) sisältää sekä kiinteitä että satunnaisia parametreja.

$$y_{ki} = b_0 + b_1 x_{ki} + \dots + b_p x_{pki} + a_k + e_{ki} \quad (7)$$

Lineaarisen sekamallin kiinteä osa, joka sisältää mallin vakion (b_0) sekä selittävät muuttujat (x_{pki}) ja niiden kertoimet (b_p), voidaan tulkita samoin kuin lineaarisen mallin kiinteä osa. Sen sijaan sekamallin satunnainen osa $a_k + e_{ki}$ jakaa mallin jäännösvirheen kahteen toisistaan riippumattomaan osaan, jotka ovat ryhmän k satunnaisvaikutus (a_k) sekä yksilön i satunnainen jäännös ryhmässä k (e_{ki}). Ryhmävaikutus ja jäännös voidaan olettaa riippumattomiksi ja normaaliksi jakautuneiksi satunnaisluvuiksi. (Pinheiro ja Bates 2000)

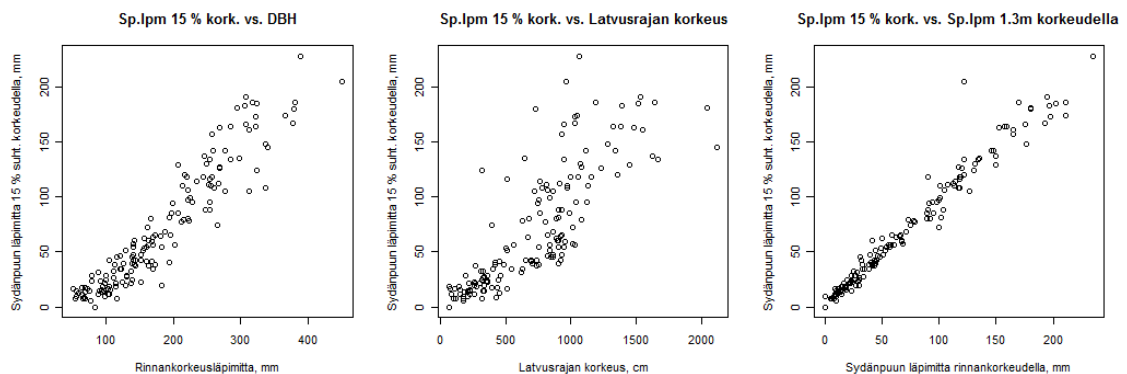
Tässä tutkimuksessa lineaariset sekamallit laadittiin R-ohjelmiston lme-funktiolla (R Development Core Team 2011). Lineaarisen sekamallin hyvyyden arvioimiseen käytettiin empiirisesti sydänpuun läpimittahavaintojen ja -ennusteiden avulla laskettua selitysastetta R^2 . Myös mallin keskineliövirheen neliöjuuri voitiin laskea edellä mainittujen tunnusten avulla. Näiden lisäksi voitiin tarkastella lineaarisen sekamallin satunnaisen osan jakautumista koealojen sisäiseen ja niiden väliseen vaihteluun jakamalla koealavaikutuksen arvo koko satunnaisosan arvolla.

2.5 Mallien luominen

Sydänpuun läpimittaa pyrittiin ennustamaan kahdeksalla puun rungon suhteellisella korkeudella. Ennen varsinaista mallien laatimisen aloittamista oli otettava huomioon aineiston ja mallien tulevan käytön mahdollisesti asettamat rajoitukset. Käytössä oleva aineisto sisälsi kattavasti mittaustietoa useista eri muuttujista sekä koealan että puun tasolla, eikä se asettanut rajoituksia mallin laadintaan. Sen sijaan mallien tulevalla käytöllä oli vaikutusta siihen, miten

niiden luominen oli aloitettava. Jotta sydänpuun läpimittaa ennustavista malleista olisi suurin mahdollinen hyöty tulevaisuuden metsänarvioinnissa, täytyy laadittavien mallien sisältää sellaisia selittäviä muuttujia, joiden mittaaminen on käytännössä mahdollista ja kustannustehokasta. Tavallisimmin ja helpoimmin puusta mitattavia tunnuksia ovat pituus, rinnankorkeusläpimitta ja muiden korkeuksien läpimitat. Sen sijaan esimerkiksi puun iän tai lustojen paksuuden määrittäminen ikäkairauksen tai näytekiekon avulla vaatii huomattavasti enemmän työtä ja lisäksi se vahingoittaa tutkittavaa puuta. Toisaalta tulevaisuudessa metsiköistä kerättyä tietokantatietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi tutkittavan männikön tarkan syntyiän määrittämiseen.

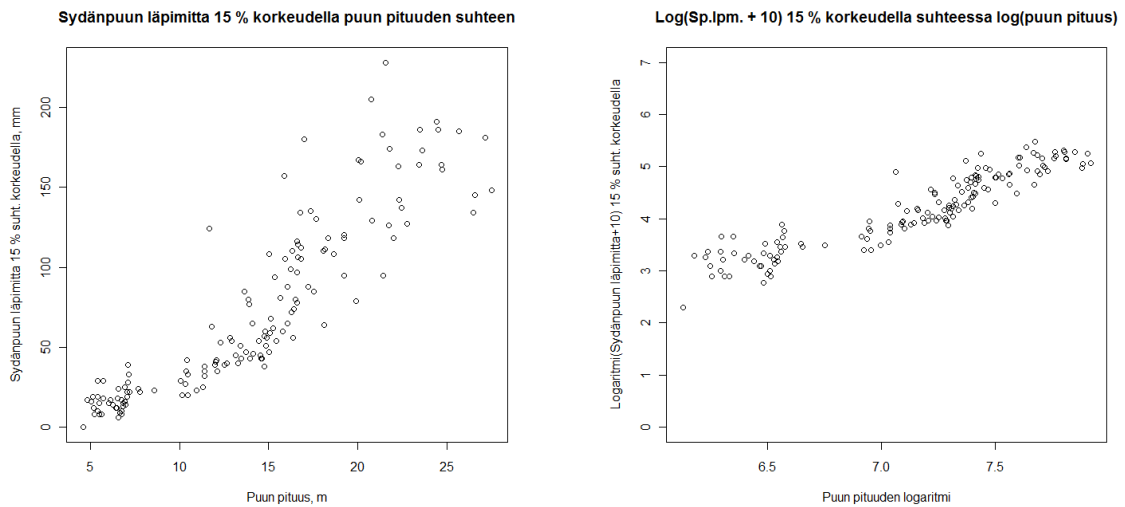
Tämän vuoksi ja tästä huolimatta mallien muuttujavalinnan alkuasetelman selittäviksi muuttujiksi kaikille mallinnuskorkeuksille otettiin puun rinnankorkeusläpimitta, pituus, rinnankorkeusikä sekä latvusrajan korkeus. Selittävien muuttujien sopivuutta sydänpuun läpimitan mallintamiseen arvioitiin kaikilla tarkastelukorkeuksilla erikseen. Mahdollisten selittävien muuttujien hyvyttä ja selityskykyä suhteessa selitettävään muuttujaan vertailtiin sekä tilastollisesti regressioanalyysin avulla että visuaalisesti (kuva 4).



Kuva 4. Esimerkkikuvia sydänpuun läpimitan ja sitä mahdollisesti selittävien muuttujien (rinnankorkeusläpimitta, latvusrajan korkeus ja sydänpuun läpimitta rinnankorkeudella) suhteesta.

Mallinnuksen ensimmäisessä vaiheessa kävi ilmi, ettei sydänpuun läpimitan mallinnus ja ennustaminen onnistu käyttämällä lineaarisen mallin perusmuotoa, sillä lineaarisen mallin perustilanteessa tietyillä selittävien muuttujien arvoilla mallit ennustivat negatiivisia sydänpuun läpimittoja. Lisäksi visuaalisesta tarkastelusta oli havaittavissa, ettei selitettävän ja selittävien muuttujien välinen riippuvuus ollut kaikissa tapauksissa lineaarista (kuva 5). Vaikka muuttujien välinen riippuvuus oli epälineaarista, se oli mahdollista linearisoida käyttämällä muuttujamuunnosta. Sydänpuun läpimittamallien osalta päädyttiin käyttämään selitettävän ja selittävien muuttujien logaritmuunnosta. Logaritmin laskusääntöihin perustuen myös mallin ennustusvaiheen riski negatiivisten tulosten saamisesta hävisi muunnoksen myötä. Selitettävän ja

selittävien muuttujien muuntaminen luonnolliseen logaritmijärjestelmään mahdollisti lineaarisen mallin käyttämisen.



Kuva 5. Sydänpuun läpimitan ja logaritmisen läpimitan riippuvuus suhteessa puun pituuteen ja puun pituuden logaritmiin.

Logaritmimuunnoksen käyttöönoton vuoksi oli otettava huomioon männyn sydänpuun esiintymisen aiheuttama muunnoksen muotovaatimus. Sydänpuun läpimitta pienenee pääsääntöisesti puun tyveltä latvaa kohti edettäessä, eikä sydänpuuta yleensä ole kehittynyt vielä puun viimeisimpien 10-20 vuosikasvun alueelle (esim. Uusitalo 2004). Tämän vuoksi aineistossa oli paljon ns. nolla-havaintoja, joissa sydänpuuta ei ole vielä ollut lainkaan. Koska nollan logaritmia ei ole määritelty, on selittävään muuttujaan lisättävä jokin luku, jotta logaritmimuunnosta voidaan käyttää mallintamiseen. Lisättävä luku valittiin vertailemalla visuaalisesti eri lisättävien lukujen vaikutusta. Parhaat tulokset saatiin lisäämällä mallinnusvaiheessa vakio 10 kaikkiin sydänpuun läpimittahavaintoihin. Näin ollen selitettävä muuttuja oli muotoa *sydänpuun läpimitta suhteellisella korkeudella + 10*.

Varsinaisten mallien laatiminen oli mahdollista aloittaa, kun selitettävän muuttujan logaritmimuunnos oli saatu määriteltyä. Kaikkien suhteellisten korkeuksien osalta mallinnuksen alkutilanteessa oli käytössä neljä selittävää muuttujaa: puun pituus, rinnankorkeusläpimitta, rinnankorkeusikä ja latvusrajan korkeus. Selittävien muuttujien sopivuutta eri suhteellisten korkeuksien sydänpuun läpimitan ennustamiseen tutkittiin logaritmimuunnoksen jälkeen lineaarisen regressioanalyysin avulla. Mallinnuksessa kokeiltiin erilaisia selittävien muuttujien yhdistelmiä, mutta lopulta kaikille korkeuksille valittiin samat selittävät muuttujat sisältävä malli. Eri korkeuksille tarkoitetuissa malleissa haluttiin pitää samat selittävät muuttujat mallien yksinkertaisuuden ja niiden käytön helpottamiseksi. Lopullisiin malleihin selittäviksi muuttujiksi valittiin puun rinnankorkeusläpimitta sekä pituus, jotka kuuluvat puista maastossa yleisimmin mitatta-

viin tunnuksiin. Mallinnusvaiheessa kokeiltujen lisämuuttujien, kuten latvusrajan korkeuden tai puun iän tuoma lisähyöty malleihin ei ollut niin merkittävä, että niiden lisääminen mallin selittäviksi muuttujiksi olisi ollut perusteltua. Selittävien muuttujien pientä määrää tukee myös Ranta ym. (2005) todetessaan, että regressiomallin selittävien muuttujien määrää valitessa, tulee ottaa huomioon tavoite ilmaista mahdollisimman selkeästi eri muuttujien välisiä riippuvuussuhteita. Tämän vuoksi kovin monien selittäjien mukaanotto malliin ei ole mielekästä.

Selitettävään muuttujaan tehty vakion 10 lisäys tulee ottaa huomioon malleja käytettäessä siten, että mallin avulla ennustetusta millimetriasteikollisesta läpimitasta vähennetään luku 10. Vähennettäessä luku 10 sydänpuun läpimitan ennusteesta on mahdollista, että vähennyslaskun tulokseksi tulee negatiivinen arvo. Koska sydänpuun läpimita voi saada arvokseen vain 0 tai sitä suurempia lukuja, vastaa negatiivinen läpimitan arvo nollaa. Ennusteen ja vakion välinen negatiivinen erotus ilmenee todennäköisimmin puun latvaa lähellä olevilla suhteellisilla korkeuksilla. Mallien ennusteina saadut negatiiviset sydänpuun läpimitan arvot muunnetaan automaattisesti laskentavaiheessa nollassi, eli vastaamaan pienintä mahdollista sydänpuun läpimitan arvoa.

2.6 Runkokäyrän interpolointi

Suhteellisten korkeuksien sydänpuun läpimittojen ennustamisen lisäksi tässä tutkimuksessa oli tarkoitus pyrkiä kuvaamaan sydänpuun läpimitan käyttäytymistä runkokäyrämallin avulla. Puun runkokäyrä tarkoittaa rungon kapenemista tyvestä latvaan. Sen sijaan sydänpuun runkokäyrällä kuvataan vain rungon sydänpuuta sisältävän osan kapenemista puun pituuden suhteen. Sydänpuun määrää voidaan kuvata esimerkiksi suhdeasteikolla mitattuna läpimitana tai prosenttiosuutena puun poikkileikkauspinnasta. Tässä tutkimuksessa runkokäyrän laatimiseen käytetään sydänpuun mitattuja ja ennustettuja läpimittoja sekä niiden avulla laskettuja poikkileikkauspinta-alan arvoja. Runkokäyrien laatimiseen käytetyt sydänpuun läpimitan ennusteet on laadittu logaritmuotoisilla malleilla. Niiden suora muuntaminen aritmeettiseen muotoon aiheuttaa ennusteiden harhaisuutta, jos harhankorjausta ei suoriteta (esim. Flewelling ja Piekaar 1981). Tämän tutkimuksen laskennoissa käytettyjä sydänpuun läpimittamallien ennusteita korjattiin kaavan 8 mukaisesti.

$$D_{sp_enn} = \exp(\log(d_{sp_enn}) + (\sigma_{kok}^2/2)) - 10 \quad (8)$$

Kaavassa D_{sp_enn} on harhakorjattu sydänpuun läpimitaennuste, d_{sp_enn} on sydänpuun läpimitan estimaatti ja σ_{kok}^2 mallin jäännösvarianssien summa.

Runkokäyrämallin avulla on myös mahdollista ennustaa esimerkiksi puun rungon kokonaistilavuus tai rungon läpimitta jollain tietyllä korkeudella. Suomessa puun tilavuutta runkokäyrämalleilla ovat ennustaneet mm. Kilkki ja Varmola (1981), Laasasenaho (1982) ja Lappi (1986). Sydänpuun runkokäyrämallia on tarkoitus hyödyntää tässä tutkimuksessa samalla tavalla esimerkiksi männyn sydänpuun tilavuuden määrittämiseen.

Runkokäyrämalleja voidaan laatia kahta erilaista tapaa noudattaen. Nämä tavat ovat jatkuvat yhtälöt ja läpimittayhtälöt. Kun käytetään jatkuvia yhtälöitä, puun rungon läpimitta pyritään kuvaamaan suhteessa tarkastelukorkeuteen jatkuvalla tai paloittain jatkuvalla yhtälöllä (esim. Höjer 1903). Käytettäessä läpimittayhtälöitä malleilla ennustetaan eri korkeuksien läpimittoja, joista muodostetaan jatkuva runkokäyräyhtälö esimerkiksi interpoloimalla. Interpolointi on matemaattinen menetelmä, jolla voidaan etsiä vielä tuntemattomia funktion arvoja jo tunnettujen pisteparien perusteella.

Tässä tutkimuksessa runkokäyrämallin luominen sydänpuun läpimitoista tehtiin splini-interpoloinnilla käyttäen R-ohjelmiston spline-funktiota (R Development Core Team 2011). Jokaiselle puulle interpoloitiin oma runkokäyrä pisteparien, eli tässä tapauksessa sydänpuun läpimittojen ja niitä vastaavien korkeuksien avulla. Ennen varsinaisen runkokäyrän laatimista R-ohjelmiston spline-funktiolla estimoitiin mitattujen ja tutkimuksessa luoduilla malleilla ennustettujen sydänpuun läpimittojen perusteella lisää havaintopisteitä koko rungon alueelle. Lopullisista havaintopisteistä tuotettiin spline-funktiolla puun runkokäyrä kuutiospliniä käyttäen. Pisteet yhdistävän funktion, eli tässä tapauksessa sydänpuun runkokäyrän, sovittamiseen ohjelma käytti Forsythen, Malcolmin ja Molerin spliniä (R Development Core Team 2011).

2.7 Sydänpuun tilavuuden ennustaminen

Männyn sydänpuun tilavuuden ennustaminen tehdään puusta mitattujen sekä ennustettujen sydänpuun läpimittojen perusteella laadittujen sydänpuun runkokäyrien avulla. Tässä tutkimuksessa sydänpuun runkokäyrämallien laatimiseen käytettiin suhteellisille korkeuksille aiemmin laadittuja läpimittayhtälöitä, vaikka polynomimuotoiset jatkuvat runkokäyräyhtälöt ovatkin osoittautuneet puun kokonaistilavuuden ennustamisessa hieman paremmiksi kuin simultaaniseen yhtälöryhmään perustuvat (Laasasenaho 1982). Edellisen perusteella johtopäätösten tekeminen eri menetelmien soveltuvuudesta männyn sydänpuun runkokäyrämallien laatimiseen on vaikeaa, sillä vastaavanlaista tutkimusta ei ole tehty sydänpuun tilavuuden ennustamisesta. Läpimittayhtälöiden käyttämistä sydänpuun runkokäyrämallien laadinnassa ja tilavuuden ennustamisessa puolsi kuitenkin sydänpuun läpimitan epäsäännöllinen käyttäytyminen. Mittausaineistoa tarkasteltaessa löytyi useita puita, joilla sydänpuun läpimittahavainto

oli suurempi kuin edellisessä, kyseisen mittauskohdan alapuolelta tehdyssä, läpimittamittauksessa. Yleisintä tämä ilmiö oli suhteellisten korkeuksien 2,5 % ja 30 % välillä. Lisäksi puun rungon läpimitasta poiketen sydänpuun läpimita saavuttaa usein nolla-arvon jo ennen puun latvaa. Näin ollen mittausaineisto sisälsi paljon sydänpuun läpimitan ns. nollihavaintoja.

Yksi tutkimuksen tavoitteista oli mitata, kuinka hyvin yksittäisen puun sydänpuun tilavuuden ennustaminen on mahdollista. Koska tutkimuksessa käytetty aineisto sisälsi tietoa vain sydänpuun läpimittamittauksista suhteellisilta korkeuksilta sekä 1,3 ja 6,0 metrin korkeudelta, vertailuaineistonkin tilavuushavainnot oli ennustettava. Näin ollen tutkimuksessa vertailtavat sydänpuun tilavuushavainnot ovat vain mitattujen ja aiemmin luotujen läpimittamallien ennustamisen sydänpuun läpimittojen perusteella ennustettuja tilavuuksia.

Sydänpuun tilavuuden ennustamiseen käytetään tässä tutkimuksessa integrointia. Integroimalla voidaan laskea sydänpuun runkokäyrän kuvaaman puun rungon sydänpuuosuuden tilavuus. Integroimista varten sydänpuun mitatut ja ennustetut läpimittatiedot oli muutettava suhteellisten korkeuksien sydänpuun poikkileikkauspinta-aloiksi. Sydänpuun poikkileikkauspinta-alan oletettiin laskentavaiheessa käytännön syistä olevan pyöreä, vaikka tutkimukset osoittavatkin, ettei sydänpuun raja ole aina niin tasainen kuin rungon vaippapinta (mm. Kärkkäinen 2003). Puun poikkileikkauksen sydänpuukuvio saattaa olla esimerkiksi enemmän piparin kuin ympyrän muotoinen (kuva 2). Koska männyn sydänpuun muodolle poikkileikkauksessa ei ole kuitenkaan pystytty esittämään mitään yksiselitteistä sääntöä, jonka perusteella ennusteen voisi tehdä, on ympyrän pinta-alan kaavan käyttö poikkileikkauspinta-alan laskemiseen perusteltua. Poikkileikkauspinta-ala (kaava 9) laskettiin mitatuista ja ennustetuista sydänpuun läpimitoista ympyrän pinta-alan kaavalla

$$A = \frac{1}{4} \pi d_{sp}^2 \quad (9)$$

jossa d_{sp}^2 on sydänpuun läpimitan neliö.

Sydänpuun läpimitan ennusteille oli tehtävä normaalisuusoletusten perusteella harhankorjaus muunnettaessa logaritminen ennuste aritmeettiseen muotoon (esim. Flewelling ja Pienaar 1981). Tämän vuoksi sydänpuun tilavuuden ennustamisessa hyödynnettyjen puun poikkileikkauspinta-alojen laskemiseen käytetylle sydänpuun läpimitan neliölle oli myös tehtävä harhankorjaus. Sydänpuun läpimitan neliön harhan korjaamiseen käytettiin kaavaa 10 (Juha Lappi, henkilökohtainen kommentti), joka on muunnos jo ennustetun sydänpuun läpimitan harhankorjauksessa käytetystä kaavasta. Käytetty kaava ottaa huomioon myös selitettävän muuttujan muodon *sydänpuun läpimita + 10*.

$$D_{sp_enn}^2 = \exp(2 * (\log(d_{sp_enn}) + \sigma_{kok}^2)) - 10^2 - 20 * (\exp(d_{sp_enn} + \sigma_{kok}^2/2) - 10) \quad (10)$$

Kaavassa $D_{sp_enn}^2$ on harhakorjattu sydänpuun läpimittaennusteen neliö, d_{sp_enn} on sydänpuun läpimitan estimaatti ja σ_{kok}^2 mallin jäännösvarianssien summa.

Poikkileikkauspinta-alojen laskemisen jälkeen suhteellisten korkeuksien pinta-aloja käytettiin uusien pinta-ala-pituus parien ennustamiseen. Uusien parien ennustamiseen käytettiin R-ohjelmiston spline-funktiota (R Development Core Team 2011). Ennustaminen tehtiin, jotta sydänpuun tilavuutta integroitaessa olisi käytettävissä useampia havaintopareja vain kahdeksan suhteellisilta korkeuksilta olevan havainnon lisäksi. Tutkimusaineiston puista tehdyt mittaukset määrittivät sydänpuun tilavuuden integroimisalueen. Integrointi aloitettiin 2,5 % suhteelliselta korkeudelta ja se lopetettiin kohtaan, jossa sydänpuun poikkileikkauspinta-alan runkokaikä leikkasi x-akselin eli saavutti arvon 0. Sydänpuun tilavuus integroitiin numeerisesti puille käyttämällä R-ohjelmiston sintegral-funktiota (R Development Core Team 2011). Sintegral-funktiolla voidaan laskea esimerkiksi pisteparien rajaaman alueen pinta-alaa tai tilavuutta. Käytetty integrointimenetelmä perustuu ns. Simpsonin sääntöön. Simpsonin sääntö on yleisesti käytetty numeerinen integrointimenetelmä, joka laskee määrätyn integraalin likiarvon käyttämällä kvadraattisia polynomeja (kaava 11). Simpsonin sääntöön perustuva integrointi suoritetaan jakamalla väli [a,b], joka voi olla esimerkiksi puun pituus, kooltaan tasaisiin alaluokkiin, joille kaikille tehdään integrointi kyseistä sääntöä soveltaen. (Davis ja Rabinowitz 1975)

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{6} \left[f(a) + 4 * f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right] \quad (11)$$

Maastomittauksien tuloksista estimoituihin tilavuuksiin verrataan läpimittamalleilla ennustettujen sydänpuun läpimittojen perusteella laskettuja tilavuuksia. Koska tässä tutkimusaineistosta ei ole mitattu sydänpuun tilavuutta, oletetaan, että näytekiekoista mitattujen läpimittojen perusteella lasketut sydänpuun tilavuudet ovat kyseisten puiden ns. oikeita tilavuuksia. Tilavuusennusteen onnistumista voidaan arvioida keskineliövirheen neliöjuuren (RMSE) avulla, kuten läpimittamallien tapauksessa. Lisäksi voidaan tarkastella myös ennusteen virheiden keskiarvoa eli harhaa (kaava 12). Harha (b) saadaan laskemalla

$$b = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) / n \quad (12)$$

Tilavuusennusteen suhteellinen harha voidaan laskea jakamalla harhan arvo joko ennustettujen tai havaittujen arvojen keskiarvolla. Tässä tutkimuksessa suhteellisen harhan laskemiseen käytettiin läpimittamallien avulla ennustettujen sydänpuun tilavuuksien keskiarvoa.

3. Tulokset

3.1 Sydänpuun läpimittamallit

Puun suhteellisille korkeuksille 2,5 % - 95 % laaditut kahdeksan sydänpuun läpimittaa kuvaavaa mallia olivat lopulliselta muodoltaan seuraavat:

$$\log(\widehat{d_{sp_{2,5\%}}} + 10) = -3,929 + 0,785 * \log(DBH_{ki}) + 0,578 * \log(PITUUS_{cm_{ki}}) + \hat{a}_k \quad (13)$$

$$\log(\widehat{d_{sp_{7,5\%}}} + 10) = -4,339 + 0,665 * \log(DBH_{ki}) + 0,719 * \log(PITUUS_{cm_{ki}}) + \hat{a}_k \quad (14)$$

$$\log(\widehat{d_{sp_{15\%}}} + 10) = -4,712 + 0,702 * \log(DBH_{ki}) + 0,740 * \log(PITUUS_{cm_{ki}}) + \hat{a}_k \quad (15)$$

$$\log(\widehat{d_{sp_{30\%}}} + 10) = -5,380 + 0,592 * \log(DBH_{ki}) + 0,892 * \log(PITUUS_{cm_{ki}}) + \hat{a}_k \quad (16)$$

$$\log(\widehat{d_{sp_{50\%}}} + 10) = -5,505 + 0,561 * \log(DBH_{ki}) + 0,893 * \log(PITUUS_{cm_{ki}}) + \hat{a}_k \quad (17)$$

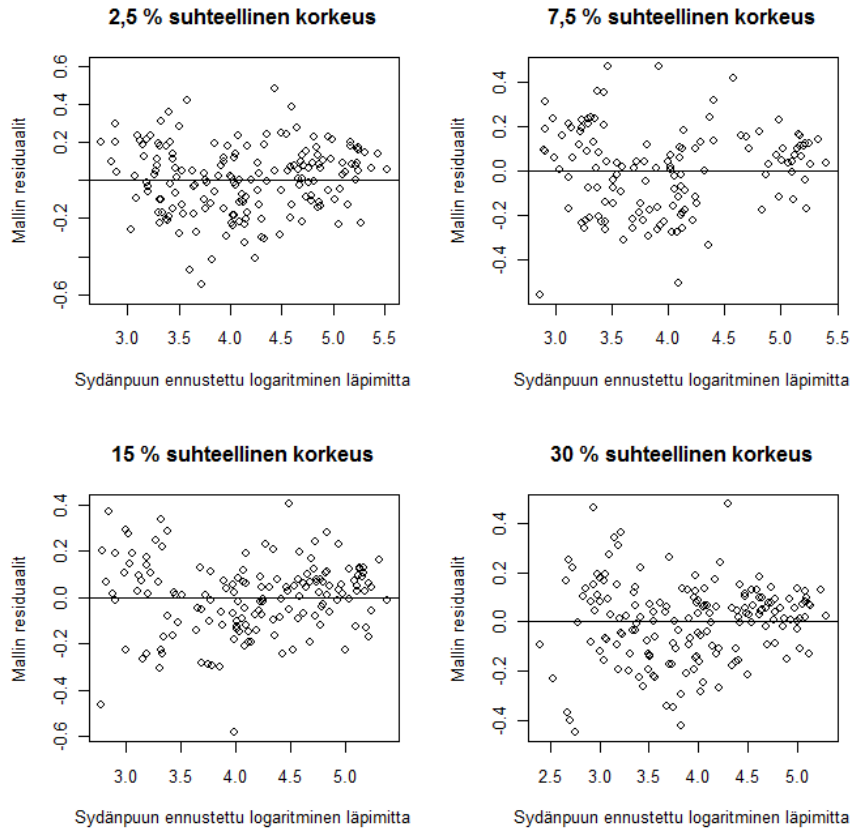
$$\log(\widehat{d_{sp_{70\%}}} + 10) = -4,414 + 0,498 * \log(DBH_{ki}) + 0,713 * \log(PITUUS_{cm_{ki}}) + \hat{a}_k \quad (18)$$

$$\log(\widehat{d_{sp_{85\%}}} + 10) = -0,938 + 0,270 * \log(DBH_{ki}) + 0,311 * \log(PITUUS_{cm_{ki}}) + \hat{a}_k \quad (19)$$

$$\log(\widehat{d_{sp_{95\%}}} + 10) = 1,970 - 0,023 * \log(DBH_{ki}) + 0,067 * \log(PITUUS_{cm_{ki}}) + \hat{a}_k \quad (20)$$

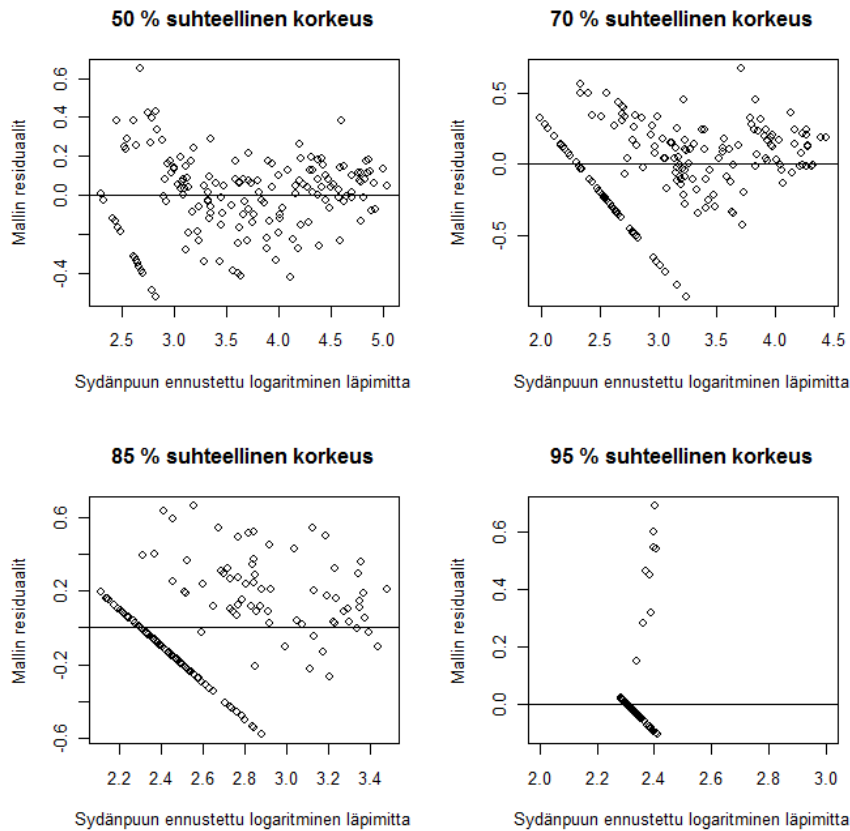
Lineaarisen sekamallin perusoletus on mallin vakiovarianssisuus. Oletuksen toteutumista voidaan tutkia esimerkiksi visuaalisesti kuvaamalla mallin residuaaleja, eli sydänpuun läpimittahavaintojen ja ennusteiden erotusta, suhteessa mallin ennustamiin arvoihin. Koska tutkimuksessa laaditut läpimittamallit ovat logaritimuotoisia, myös residuaalikuviissa käytetään logaritmissa asteikkoa.

Kuvassa 6 suhteellisten korkeuksien 2,5 % - 30 % läpimittamallien residuaalit osoittautuvat tasaisesti jakautuviksi, eikä malleissa ole havaittavissa trendiä, joka viittaisi mallin epälineaarisuuteen ja kumoaisi oletuksen selitettävän ja selittävien muuttujien lineaarisesta suhteesta.



Kuva 6. Logaritmistien läpimittamallien residuaalikuvat suhteellisilla korkeuksilla 2,5 % - 30 %.

Suhteellisten korkeuksien 50 % - 95 % läpimittamallien residuaalit on kuvattu kuvassa 7, myös näiden mallien osalta oletus residuaalien vakiovarianssisiuudesta toteutuu. Puun yläosiin laadittujen mallien residuaalikuvisa on kaikissa havaittavissa peräkkäisten residuaalipisteiden muodostama laskeva suora. Tämä suora johtuu tutkimusaineiston puun latvaosan mittauksissa tehdyistä lukuisista sydänpuun läpimitan ns. nollahavainnoista.



Kuva 7. Logaritmistien läpimittamallien residuaalit suhteellisilla korkeuksilla 50 % - 95 %.

Suhteellisille korkeuksille laadituille lineaarisille sekamalleille laskettiin R^2 -selitysasteet empiirisesti mallien ennusteiden ja mittauksissa tehtyjen havaintojen perusteella. Mallien selitysasteet vaihtelivat 95,4 % ja 5,7 % välillä (taulukko 1), mutta kuitenkin siten, että 2,5 % - 50 % suhteellisilla korkeuksilla malleille laskettu selitysaste oli vähintäänkin 93 %. Heikoin selitysaste oli lähes puun latvassa, eli 95 % suhteellisella korkeudella.

Tulosten tarkastelun kannalta alempien korkeuksien hyvät selitysasteet ovat erittäin tärkeitä, sillä näillä korkeuksilla sijaitsee myös suurin osa männyn sydänpuusta. Sen sijaan aivan puun latvassa on hyvin harvoin sydänpuuta, koska sitä alkaa yleensä syntyä puuhun vasta noin 10-20 ikävuoden jälkeen (esim. Uusitalo 2004). Tutkimusaineistossa vain yhdeksässä puussa havaittiin sydänpuuta 95 % suhteellisella korkeudella, suurimman paksuushavainnon ollessa 12 millimetriä. 95 % suhteelliselle korkeudelle laaditussa mallissa selitettävän muuttujan havaintoarvon ollessa lähes kaikissa tapauksissa nolla, ei selittävien muuttujien arvojen muutoksilla ole lähes minkäänlaista vaikutusta sydänpuun läpimittaan kyseisellä korkeudella.

Taulukko 1. Sydänpuun läpimittaa suhteellisilla korkeuksilla ennustavien mallien parametrien kerroin, keskivirhe ja p-arvo sekä mallien selittämän vaihtelun osuus.

			mallin parametrit			selitetyn vaihtelun osuus, %
			vakio	log(DBH)	log(pituus_cm)	
Suhteellinen korkeus	2,50 %	kerroin	-3,929	0,785	0,578	93,34 %
		keskivirhe	0,443	0,085	0,103	
		p-arvo	0,000	0,000	0,000	
	7,50 %	kerroin	-4,339	0,665	0,719	93,33 %
		keskivirhe	0,429	0,093	0,105	
		p-arvo	0,000	0,000	0,000	
	15,00 %	kerroin	-4,712	0,702	0,740	95,23 %
		keskivirhe	0,375	0,078	0,090	
		p-arvo	0,000	0,000	0,000	
	30,00 %	kerroin	-5,380	0,592	0,892	95,36 %
		keskivirhe	0,435	0,078	0,098	
		p-arvo	0,000	0,000	0,000	
	50,00 %	kerroin	-5,505	0,561	0,893	93,15 %
		keskivirhe	0,482	0,094	0,113	
		p-arvo	0,000	0,000	0,000	
	70,00 %	kerroin	-4,414	0,498	0,713	83,77 %
		keskivirhe	0,628	0,125	0,149	
		p-arvo	0,000	1,00E-04	0,000	
	85,00 %	kerroin	-0,938	0,269	0,311	65,37 %
		keskivirhe	0,575	0,112	0,000	
		p-arvo	0,045	0,001	0,134	
	95,00 %	kerroin	1,97	-0,023	0,067	5,70 %
		keskivirhe	0,173	0,042	0,046	
		p-arvo	0,000	0,580	0,143	

Selitysasteen lisäksi kaikille malleille laskettiin keskivirhe eli keskineliövirheen neliöjuuri RMSE (taulukko 2). Mallien tarkkuutta kuvaava keskivirhe lasketaan malleilla ennustettujen ja aineistosta havaittujen sydänpuun läpimittojen avulla. Sen yksikkö on sama kuin sydänpuun läpimitan, eli millimetri. Eri korkeuksille laadittujen mallien keskivirhe vaihteli 14,07 ja 1,62 millimetrin välillä. Absoluuttinen virhe oli suurimmillaan puun tyvipään malleissa ja pienin latvassa. Sydänpuun läpimittamallien keskivirheen kehitys vastaa sydänpuun läpimitan käyttäytymistä puun rungossa, sillä tavallisesti myös sydänpuun läpimitta pienenee puun tyveltä latvaan edettäessä, vaikka tilapäiset vaihtelut ovatkin mahdollisia.

Eri suhteellisille korkeuksille tarkoitettuja malleja voidaan vertailla paremmin suhteellisen keskivirheen avulla. Mallin suhteellinen keskivirhe laskettiin jakamalla keskivirhe ko. suhteellisen

korkeuden sydänpuun läpimittaennusteiden keskiarvolla. 2,5 % - 50 % suhteellisilla korkeuksilla mallien suhteellinen keskivirhe oli 15,3 % ja 19,7 % välillä. Suurin suhteellinen keskivirhe 443,8 % oli 95 % korkeudella. Vaikka sydänpuun läpimittaennusteiden prosentuaalinen keskivirhe olikin huomattavan iso 95 % suhteellisella korkeudella, oli absoluuttinen RMSE vain 1,62 millimetriä eli noin yhden tai kahden vuosiluston paksuuden verran.

Lineaarisen sekamallin tuloksista saatiin myös selville laaditun mallin satunnaisvaihtelu. Koealan osuus mallin satunnaisvaihtelusta voitiin laskea jakamalla koealan aiheuttama satunnaisvaihtelu koko mallin satunnaisvaihtelulla. Mallien laadinnassa käytetty vakion 10 lisäys selitettävään muuttujaan aiheutti vääristymää suhteellisten korkeuksien 85 % ja 95 % satunnaisvaihtelun arvoon. Muiden korkeuksien osalta tulokset osoittavat, että hieman alle puolet mallin jäännösvaihtelusta johtuu koealan vaikutuksesta.

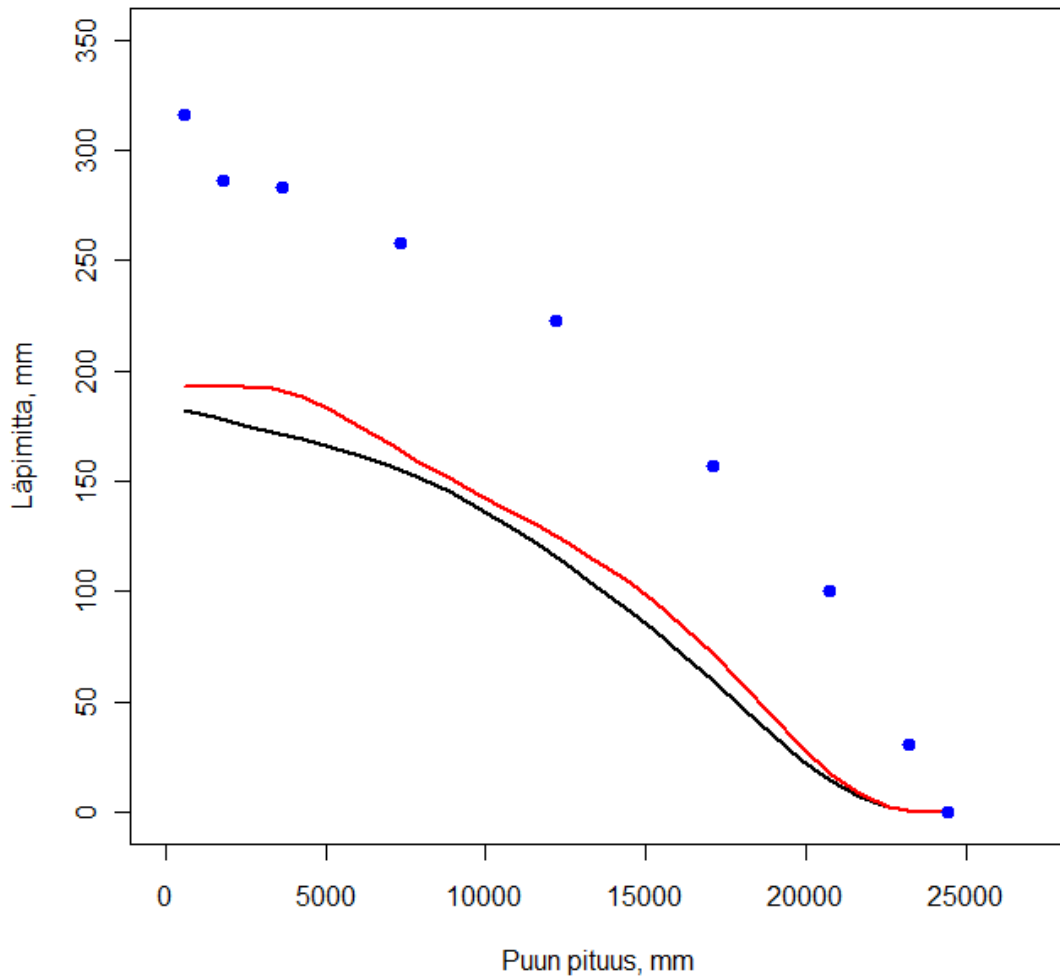
Taulukko 2. Sydänpuun läpimittamallien RMSE ja suhteellinen RMSE eri suhteellisilla korkeuksilla sekä mallin logaritimuotoinen satunnaisvaihtelu ja koealavaikutuksen osuus satunnaisvaihtelusta.

	Suhteellinen korkeus							
	2,5 %	7,5 %	15 %	30 %	50 %	70 %	85 %	95 %
Laskennallinen RMSE, mm	14,07	12,08	11,49	8,76	8,59	7,28	4,27	1,62
Suhteellinen RMSE, %	19,7 %	19,6 %	15,9 %	15,3 %	19,7 %	34,5 %	73,9 %	443,8 %
Mallin satunnaisvaihtelu	0,37	0,35	0,31	0,36	0,40	0,53	0,48	0,15
Koealan osuus satunnaisvaihtelusta	44,5 %	40,3 %	43,2 %	49,4 %	44,3 %	41,8 %	43,8 %	22,8 %

3.2 Sydänpuun runkokäyrät

Yksittäisen puun sydänpuun runkokäyrän kuvaajalta voidaan tarkastella esimerkiksi mitattujen ja läpimittamalleilla ennustettujen sydänpuun läpimittojen perusteella luotujen runkokäyrien eroavaisuuksia. Puu 104 (kuva 8) edustaa aineiston suurimpia puita, sen pituus on 24,4 metriä ja rinnankorkeusläpimitta 30,8 senttimetriä. Sen mittauksiin perustuva sydänpuun runkokäyrä ei laske täysin tasaisesti puun runkoa pitkin edettäessä, sillä ensimmäisten metrien alueella sydänpuun läpimitta näyttää pysyvän lähes vakiona. Tämän jälkeen sydänpuu kapenee tasaisesti päättymiskohtaan asti. Läpimittamallien ennusteisiin perustuva runkokäyrä on muodoltaan hieman tasaisempi ja se muodostuu aivan mittauksiin perustuvan runkokäyrän alapuolelle. Tästä voidaan päätellä ennustetun runkokäyrän olevan hienoinen aliarvio sydänpuun läpimitasta.

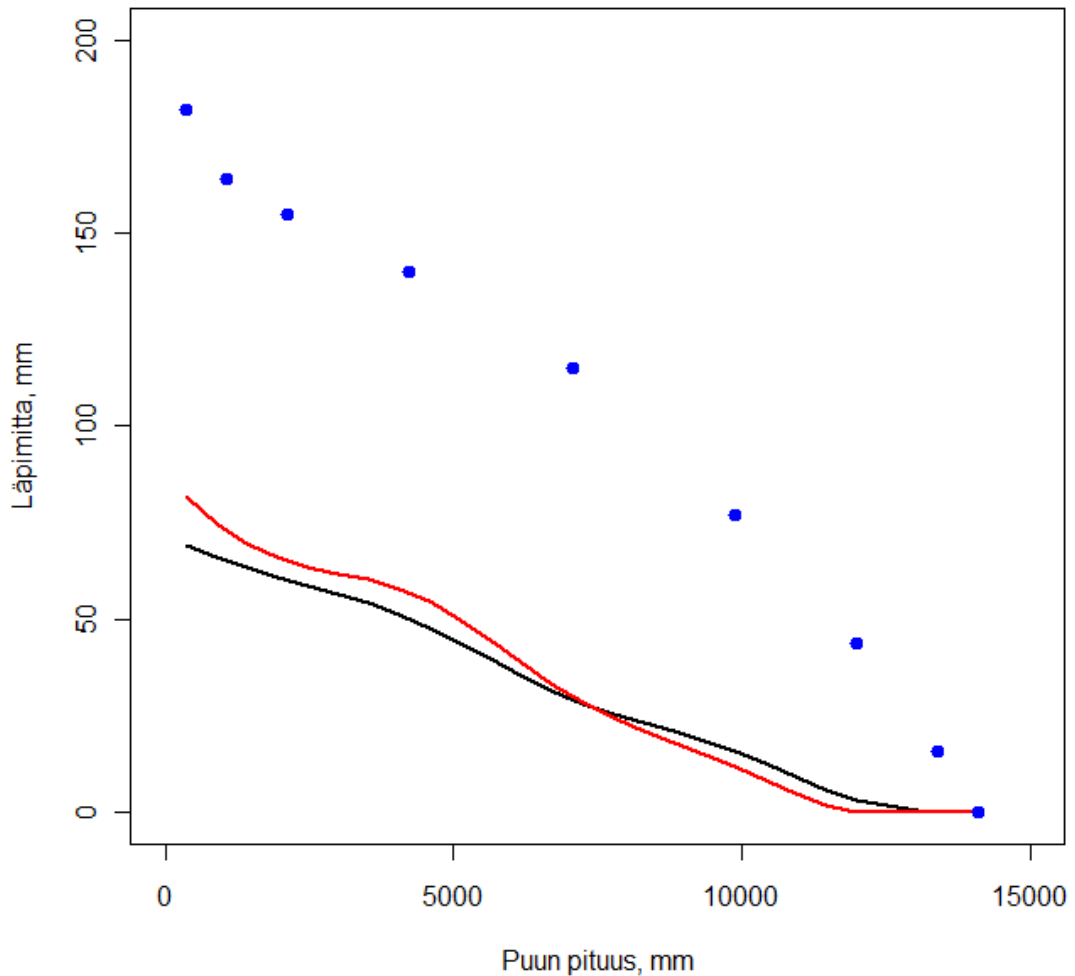
Puu 104, Pituus: 24,4 metriä, DBH: 30,8 senttimetriä



Kuva 8. Puulle 104 läpimittamalleilla laadittu sydänpuun runkokäyrä (musta viiva), näytekiekoista mitattujen läpimittojen perusteella laadittu sydänpuun runkokäyrä (punainen viiva) sekä rungon kokonaisläpimitan arvot mittauskohdissa (siniset pisteet).

Puu 133 (kuva 9) edustaa kooltaan tutkimusaineiston keskiarvoa. Sen pituus on 13,6 m ja rinnankorkeusläpimitta 17,2 cm. Myös puun 133 osalta eroavuudet sydänpuun paksuutta kuvaavissa runkokäyrissä ovat vain joitain millimetrejä. Ennusteisiin ja mittauksiin perustuvat runkokäyrät leikkaavat toisensa noin rungon puolivälissä, jolloin mitatun sydänpuun läpimitan kapeeneminen on erittäin voimakasta. Sen sijaan malleilla ennustetuista läpimitoista laadittu runkokäyrä laskee tasaisemmin kohti sydänpuun päättymiskohtaa, joka on sillä ennustettu ylemmäs puun rungossa kuin mittauksiin perustuvassa runkokäyrässä. Mittauksiin perustuva sydänpuun runkokäyrä noudattelee myös hieman tarkemmin puun ulkoläpimitan kapenemista.

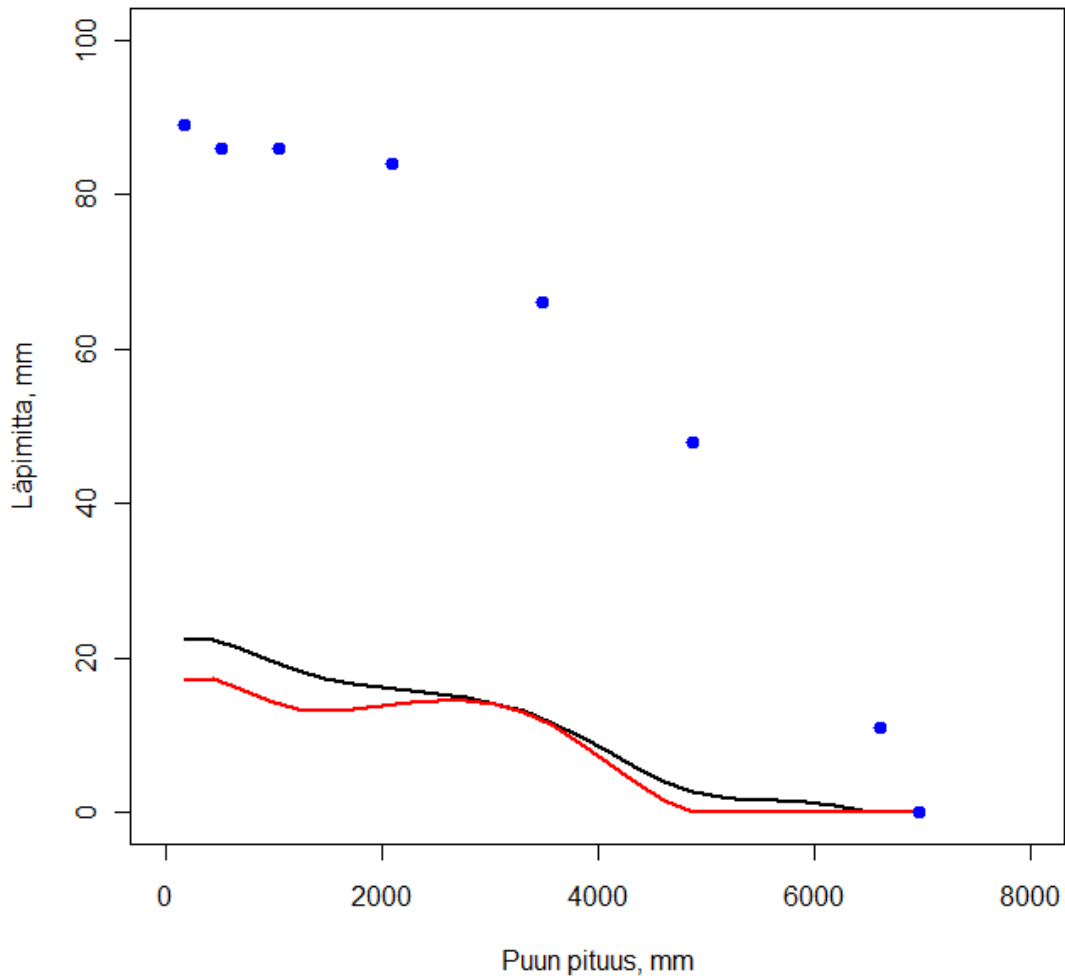
Puu 133, Pituus: 13,6 metriä, DBH: 17,2 senttimetriä



Kuva 9. Puulle 133 läpimittamalleilla laadittu sydänpuun runkokäyrä (musta viiva), näytekiekoista mitattujen läpimittojen perusteella laadittu sydänpuun runkokäyrä (punainen viiva) sekä rungon kokonaisläpimitan arvot mittauskohdissa (siniset pisteet).

Aineiston pieniä puita edustaa kuva 10 puusta 149, sen pituus on 9,5 m ja rinnankorkeusläpimitta 7,6 cm. Koska kyseessä on pieni puu, myös sydänpuun määrä puussa on vähäinen. Mittauksiin perustuvan runkokäyrän aaltoilu osoittaa, ettei sydänpuun läpimitta ole kaventunut tasaisesti edettäessä latvaa kohti. Tosin tässä tilanteessa on syytä ottaa huomioon myös se tekijä, että alle 20 millimetrin paksuisen sydänpuuvyöhykkeen havaitseminen vain muutamia senttejä paksusta näytekiekosta voi olla vaikeaa ja näin ollen mittausvirheiden mahdollisuus lisääntyy. Sydänpuun päättymiskohta on mallien avulla ennustetulla sydänpuun runkokäyrällä ylempänä latvassa kuin mittauksiin perustuvassa. Selityksenä tälle ilmiölle voidaan pitää läpimittamallien laadinta-aineistoa, jossa on samalta korkeudelta paljon sekä sydänpuuhavaintoja, että ns. nollahavaintoja.

Puu 149, Pituus: 9,5 metriä, DBH: 7,6 senttimetriä



Kuva 10. Puulle 149 läpimittamalleilla laadittu sydänpuun runkokäyrä (musta viiva), näytekiekoista mitattujen läpimittojen perusteella laadittu sydänpuun runkokäyrä (punainen viiva) sekä rungon kokonaisläpimitan arvot mittauskohdissa (siniset pisteet).

3.3 Sydänpuun tilavuusennusteet

Näytekiekoista mitattujen sydänpuun läpimittahavaintojen perusteella ennustetut männyn sydänpuun tilavuudet vaihtelivat 0,003 ja 414,8 kuutiodesimetrin eli litran välillä (taulukko 3). Keskimääräinen sydänpuun tilavuus oli 53,71 litraa. Neljäsosa puista oli sydänpuun tilavuudeltaan 1,34 litraa tai sen alle. Vastaavasti viimeisen neljänneksen muodostivat puut, joiden sydänpuun tilavuus oli 69,34 litraa tai enemmän.

Tutkimuksessa laadittujen läpimittamallien ennustamien sydänpuun läpimittojen perusteella tehdyt sydänpuun tilavuusennusteet sen sijaan vaihtelivat 0,082 ja 388,1 litran välillä. Sydänpuun tilavuusennusteen keskimääräinen arvo aineistolla oli 56,63 litraa. Tilavuudeltaan puu-

joukon pienimpään neljäsosaan kuuluivat puut, joiden sydänpuun tilavuus oli 1,77 litraa tai sitä vähemmän. Neljäsosalla tutkituista puista sydänpuun tilavuus oli ennusteen mukaan 69,53 litraa tai suurempi.

Taulukko 3. Yhteenveto sydänpuun tilavuusennusteiden tuloksista.

	Sydänpuun tilavuusennusteet, dm³					
	minimi	1. neljännes	mediaani	keskiarvo	3. neljännes	maksimi
Mitatut sp:n läpimitat	0,003	1,340	9,902	53,710	69,340	414,800
Ennustetut sp:n läpimitat	0,082	1,766	12,700	56,630	69,530	388,100

Tätä tutkimusta tehtäessä ei ollut käytettävissä yhtään puuta, josta olisi täydellisesti mitattu sydänpuun tilavuus esimerkiksi käyttämällä tukkiröntgenlaitetta. Tämän vuoksi tulosten analysoinnissa todellista sydänpuun tilavuutta kuvaavat koepuista sydänpuun läpimittamittauksien perusteella lasketut tilavuudet. Läpimittamallien avulla ennustetuissa tilavuuksissa saattaa olla havaittavissa harhaisuutta. Sydänpuun tilavuusennusteen harha oli tässä tutkimuksessa negatiivinen eli -2,92 litraa ja suhteellinen harha -5,16 % (taulukko 4).

Sydänpuun tilavuusennusteiden keskivirhe laskettiin samoin perustein kuin ennusteiden harha vertaamalla läpimittayhtälöiden avulla estimoituja mitattujen läpimittahavaintojen tilavuusennusteisiin. Sydänpuun tilavuusennusteiden keskivirhe oli 19,99 litraa. Jakamalla keskivirhe mallien avulla ennustettujen sydänpuun tilavuuksien keskiarvolla saatiin suhteelliseksi keskivirheeksi 35,30 %.

Taulukko 4. Sydänpuun tilavuusennusteiden keskivirhe ja harha verrattaessa läpimittayhtälöiden perusteella tehtyjä ennusteita mitattujen läpimittojen tilavuusennusteisiin.

Sydänpuun tilavuusennusteet	
Keskivirhe (RMSE)	19,99 dm ³
Virheiden keskiarvo (harha)	-2,92 dm ³
Suhteellinen RMSE	35,30 %
Suhteellinen harha	-5,16 %

4. Tulosten tarkastelu

4.1 Läpimittamallien selittävät muuttujat

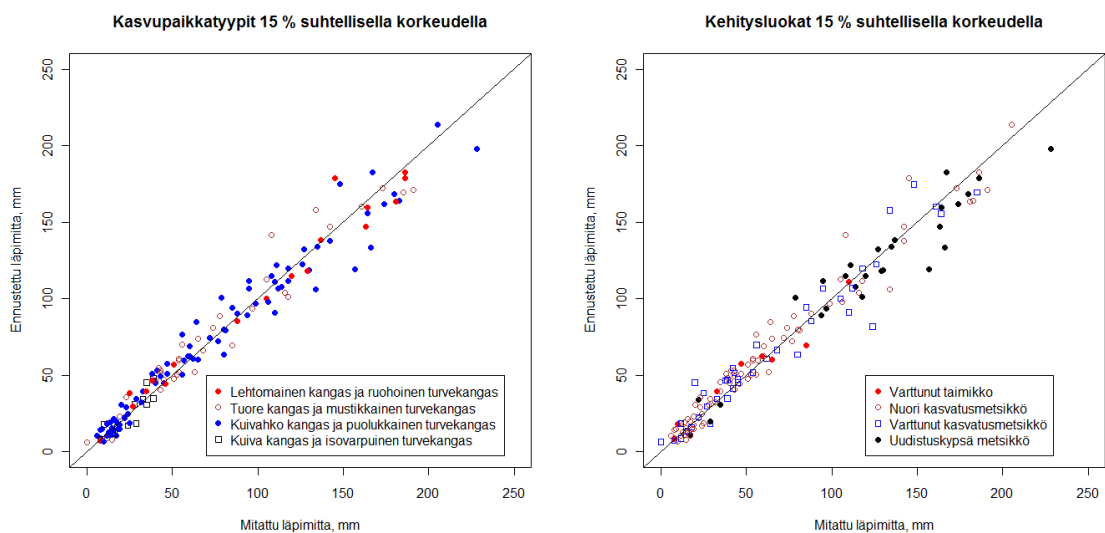
Sydänpuun läpimittaa suhteellisilla korkeuksilla ennustaviin malleihin valittiin kaikkiin selittäviksi muuttujiksi puun rinnankorkeusläpimitta sekä pituus. Mallit ennustivat sydänpuun läpimitan logaritmista arvoa ja myös selittävät muuttujat olivat logaritmisella asteikolla.

Tilastollisen merkitsevyyden tarkastelun lisäksi yhtenä sydänpuun läpimittaa ennustavien mallien muuttujavalinnassa vaikuttavana tekijänä oli otettava huomioon mallien käytännöllisyys. 2,5 % - 70 % suhteellisten korkeuksien läpimittayhtälöissä sekä puun rinnankorkeusläpimitta että pituus alittavat muuttujille t-testissä asetetun riskitason 0,05, jonka perusteella malliin valittuja muuttujia voidaan pitää tilastollisesti merkitsevinä. 85 % korkeudelle tehdyssä mallissa pituuden p-arvo oli 0,134, joka ylittää yleisesti käytetyn riskitason. Mallin ennustusvoima ei kuitenkaan parantunut merkittävästi pituuden mallista poistamisen myötä, joten muutoksia ei tehty. Sen sijaan lähinnä latvaa sijaitsevassa 95 % suhteellisen korkeuden mallissa sekä rinnankorkeusläpimitta että pituus ylittävät muuttujille asetetun riskitason. Koska muutkaan mahdolliset muuttujat eivät tuoneet parempia tuloksia, pitäydyttiin alkuperäisessä muuttujaparissa myös tämän korkeuden osalta. Kahden ylimmän suhteellisen korkeuden sydänpuun läpimitan mallintamista regressioanalyysillä vaikeutti lukuisten ns. nollahavaintojen määrä. Aivan männyn latvaosassa sydänpuuta esiintyy vain hyvin harvoin, sillä sen muodostumisen on todettu alkavan vasta aikaisintaan noin 20 ikävuoden kohdalla (mm. Lappi-Seppälä 1952). Niinpä sydänpuuta ei ole myöskään esiintynyt kuin muutamissa 95 % korkeudelta leikatuissa näytekiekoissa. Näiden tulosten perusteella sydänpuun läpimitan ennustaminen ylimmälle korkeudelle on hyvin vaikeaa. Toisaalta kyse on suurimmillaankin vain muutamien millien paksuisesta osasta puun latvassa, joten virheellinen tieto ei ole haitallista esimerkiksi sydänpuuta käyttävän sahan kannalta, sillä latvassa mahdollisesti olevaa pientä sydänpuuosaa ei pystytä hyödyntämään kuitenkaan. Lopulta yksinkertaisuuden vuoksi kaikkiin malleihin valittiin samat selittävät muuttujat.

Sydänpuun läpimittaa ennustavissa malleissa selittävinä muuttujina käytettiin vain yksittäisen puun ominaisuuksia kuvaavia muuttujia eli pituutta ja rinnankorkeusläpimittaa. Lisäksi lineaarisessa sekamallissa voitiin ottaa huomioon koealan vaikutus sydänpuun läpimittaan. Koealavaikutuksella voidaan olettaa, että saman koealan puut ovat enemmän toistensa kuin muiden koealojen puiden kaltaisia. Koealavaikutuksen huomioon ottaminen mallissa vaikuttaa myös siihen, että käytettäessä mallia metsiköissä, joiden koealavaikutukset ovat tuntemattomia,

saadaan heikompia tuloksia kuin vaikutusten ollessa tunnettuja. Malli voidaan kuitenkin kalibroida mittausten avulla toimimaan paremmin myös ns. uusissa metsiköissä.

Vaikka koealan ja sitä kautta esim. kasvuolosuhteiden vaikutus sydänpuun läpimittaan onkin otettu huomioon mallissa, on kuitenkin syytä tarkastella mallien ennusteiden onnistumista esimerkiksi eri kasvupaikoilla ja metsikön kehitysluokissa. Kasvuolosuhteiden merkityksen tarkastelua tukee myös se, että niillä on todettu olevan vaikutusta esimerkiksi puiden pituus- ja paksuuskasvuun. Kärkkäisen (1972) mukaan kasvunopeudella on kaksisuuntainen vaikutus myös sydänpuun määrään männyllä. Sen sijaan Björklundin (1999) mukaan mm. kuvion, jolla mänty sijaitsee, ominaisuuksista ei voi tehdä johtopäätöksiä sydänpuun määrästä. Tämän tutkimuksen aineistoa hyödyntämällä oli mahdollista testata, onko tietyillä tekijöillä vaikutusta sydänpuun läpimittaennusteiden onnistumiseen. Kuvassa 11 on esitetty eri kasvupaikkatyypeittäin ja kehitysluokittain 15 % suhteelliselle korkeudelle mitatut ja läpimittamalleilla ennustetut sydänpuun läpimitat. Kasvupaikkatyyppien sirontakuvaan tasaisesti lyhyen etäisyyden päähän regressiosuoran molemmille puolille sijoittuvat havainnot osoittavat, että läpimittamalli onnistuu yhtä hyvin ennustamaan sydänpuun läpimitan kaikilla tutkimusaineistossa esiintyneillä kasvupaikkatyypeillä. Vastaava havainto mallin toimivuudesta voidaan tehdä myös eri kehitysluokkiin kuuluvien puiden osalta.



Kuva 11. Mitattu ja ennustettu sydänpuun läpimitta 15 % suhteellisella korkeudella kuvattuna kasvupaikkatyypeittäin sekä kehitysluokittain.

4.2 Läpimittamallien hyvyyden arviointi ja tulosten tarkkuus

Suhteellisille korkeuksille sydänpuun läpimitan ennustamiseksi luotujen lineaaristen sekamallien hyvyyttä voi vertailla niille laskettujen eri tunnusten avulla. Mallin selitysaste kuvaa tässä

tapauksessa sen kykyä selittää sydänpuun läpimitan vaihtelua kyseisellä korkeudella. Tässä tutkimuksessa laadittuja malleja vertaillaan mitattujen ja läpimittamalleilla ennustettujen sydänpuun läpimittojen arvojen avulla empiirisesti lasketulla R^2 -selitysasteella.

Tässä tutkimuksessa laaditut mallit voidaan jakaa selitysasteensa perusteella hyvin ja huonosti toimiviin. Suhteellisten korkeuksien 2,5 % ja 70 % välille tehdyt mallit onnistuvat kuvaamaan sydänpuun läpimitan vaihtelua varsin hyvin. Selitysasteeltaan paras malli on 30 % suhteelliselle korkeudelle laadittu malli, joka onnistuu selittämään hieman yli 95 % sydänpuun läpimitan vaihtelusta kyseisellä korkeudella. Yli 93 % selitysasteeseen pääsevät myös muut mallit 2,5 % ja 50 % suhteellisten korkeuksien välillä. Mallien toimivuus on erityisen tärkeää juuri näillä korkeuksilla, sillä suurin osa sydänpuun tilavuudesta on niiden alueella. 70 % suhteellisen korkeuden selitysaste 83,77 % on vielä varsin hyvä, mutta 85 % suhteellisen korkeuden malli (65,37 %) kykenee selittämään enää noin kaksi kolmasosaa sydänpuun läpimitan vaihtelusta. 95 % suhteelliselle korkeudelle laaditun mallin selitysaste 5,70 % kertoo, etteivät mallin muuttujat selitä sydänpuun läpimittaa lähes lainkaan. Suurimpana syynä kahden puun tyveltä latvaan edettäessä ylinnä olevan mallin selitysasteen heikkouteen voidaan pitää sitä, että tutkimusaineiston puista suuressa osassa ei havaittu enää sydänpuuta näillä korkeuksilla. Kun selitettävän muuttujan arvo on nolla lähes kaikilla mahdollisilla selittävien muuttujien arvoilla, eivät kyseiset muuttujat kykene selittämään sydänpuun läpimitan vaihtelua.

Verrattaessa sydänpuun läpimittaa suhteellisilla korkeuksilla ennustavien mallien hyvyttä muissa tutkimuksissa esitelyihin malleihin, havaitaan, että 50 % korkeudelle asti tässä tutkimuksessa laaditut mallit ovat niiden kanssa selityskyvyltään samalla tai lähes samalla tasolla. Mallien selitysasteen ollessa yli 93 % ne vastaavat hyvin mm. Flæten ja Høibøn (2009) esittelemien mallien noin 90 % selitystasetta, kun otetaan lisäksi huomioon, että malleissa on käytetty yhtä lukuun ottamatta selittävinä muuttujina ainakin viittä eri tekijää. Wilhelmsson ym. (2002) raportoi mallin, jossa sydänpuun läpimittaa selitettiin tarkastelukorkeuden kuoretto-malla läpimitalla, selitysasteeksi 88 %. Myös Flæten ja Vadlan (2008) sydänpuumalli selittää sydänpuun läpimittaa koko rungossa tämän tutkimuksen parhaiten onnistuneiden mallien veroisesti selitetyn vaihtelun osuuden ollessa 86 %. Kaikki edellä vertailut mallit perustuvat eri aineistoihin, jotka eivät ole kooltaan ja laadultaan täysin toistensa kaltaisia. Esimerkiksi tasaisesti myös nuoria ja pieniä puita sisältävästä aineistosta voi olla vaikeampaa laatia yhtä hyvin toimivaa sydänpuumallia kuin pääasiassa hakkuukypsiä puita sisältävästä homogeenisemmasta koepuuaineistosta. Lisäksi mallien selitysasteita vertailtaessa tulee ottaa huomioon, että tässä tutkimuksessa ja edellä mainituissa muissa tutkimuksissa selitettävän muuttujan muoto ei ole

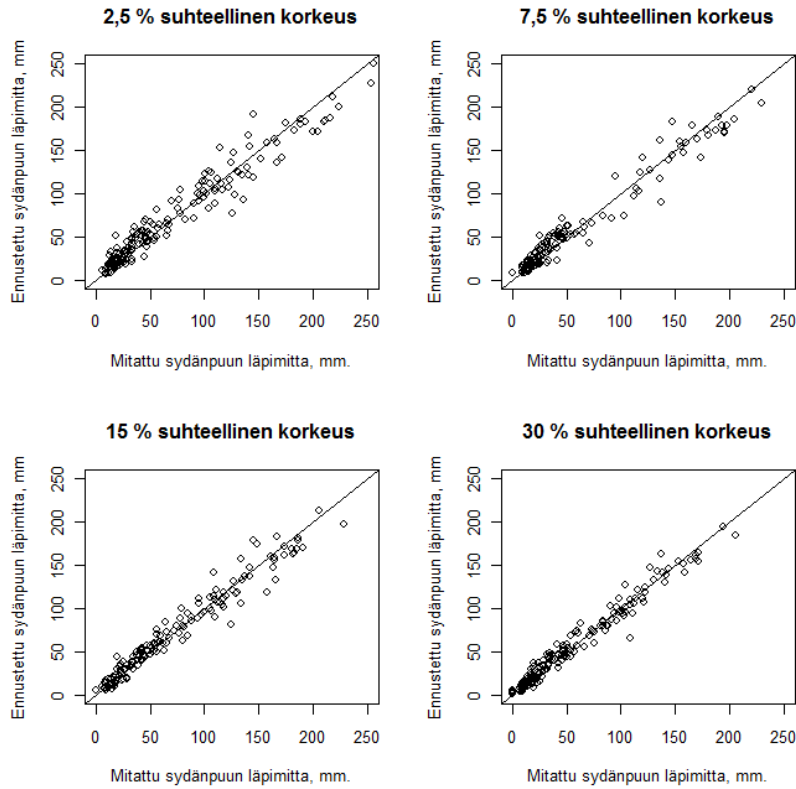
kaikissa ollut täysin sama. Tämän vuoksi selitysteiden vertaaminen toisiinsa ei välttämättä kerro mallien absoluuttista paremmuutta.

Vaikka tässä tutkimuksessa laadituista malleista suhteellisten korkeuksien 85 % ja 95 % malleja ei voi pitää selitysteensa perusteella hyvinä, on syytä ottaa huomioon myös se, että esimerkiksi Flæten ja Høibøn (2009) laatimien mallien käytölle on suositeltu ylärajaksi 70 % suhteellista korkeutta. Tämän päätöksen voi tulkita kuvastavan sydänpuun läpimitan mallintamisen vaikeutta puun latvaosassa. Lisäksi on muistettava, että saha- ja selluteollisuus hyödyntää yleensä puusta vain sen osan, jonka paksuus täyttää kuitupuun minimiläpimitalle asetetun vaatimuksen. Männyllä kuitupuun minimiläpimita on Suomessa yleisesti kuusi senttimetriä (Hujo ja Poikela 2008), jota ei esimerkiksi täyttänyt 95 % suhteellisella korkeudella noin 99 % tämän tutkimuksen aineistona käytetyistä männyistä. Vastaavasti 85 % ja 70 % suhteellisilla korkeuksilla mäntykuidun aläläpimitaa ei täyttänyt noin 68 % ja 30 % koepuista. Kokonaisläpimitan puunkäytölle asettamien rajoitusten lisäksi sydänpuun pääasiallisten käyttökohteiden kannalta puussa havaittavilla pienillä sydänpuun läpimitoilla ei ole suurta merkitystä, sillä niiden hyödyntäminen tuotannossa ei ole kannattavaa. Vaikka puun ominaisuuksia mallinnettaessa tulee pyrkiä mahdollisimman hyvään ja kokonaisvaltaiseen lopputulokseen, voi edellä mainittujen argumenttien perusteella todeta tämän tutkimuksen läpimittamallien luomisen onnistuneen riittävän hyvin niistä tulevaisuudessa mahdollisesti saatavan hyödyn kannalta oleellisimmissa osissa männyn runkoa.

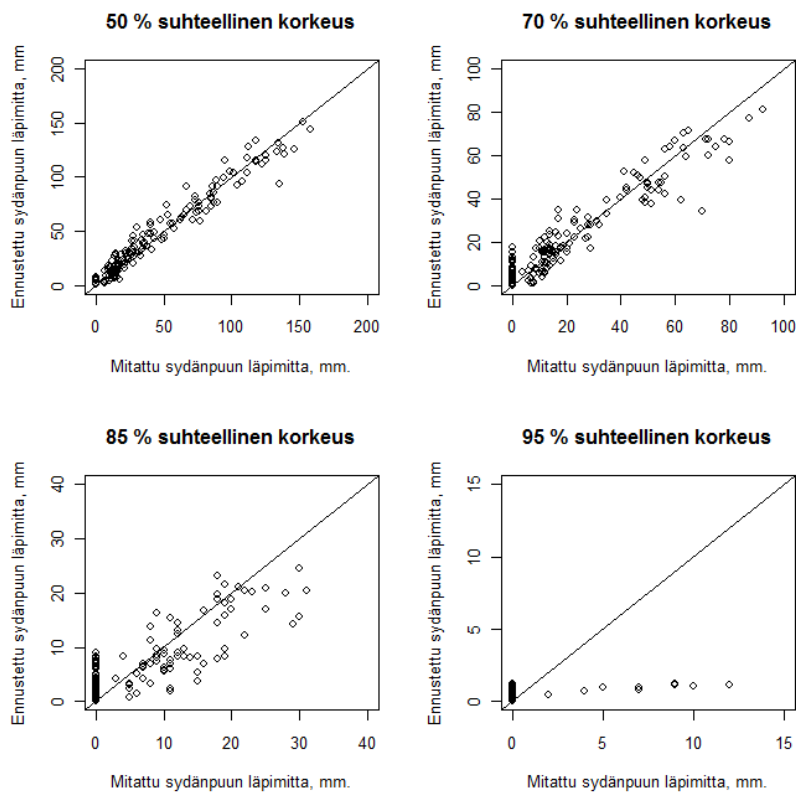
Tutkimuksessa luotujen suhteellisten korkeuksien sydänpuun läpimittamallien sopivuutta käytäntöön voidaan tutkia myös visuaalisesti. Laatimalla sirontakuvat mallilla ennustetuista ja koepuista havaituista sydänpuun läpimitoista voidaan tarkastella niiden välistä korrelaatiota.

Kuvan 12 perusteella on havaittavissa, että 2,5 % suhteelliselle korkeudelle laaditun mallin ennusteet jakautuvat tasaisesti regressiosuoran molemmille puolille riippumatta havaitun sydänpuun läpimitan paksuudesta. Tämän perusteella voidaan todeta, mallin onnistuvan hyvin sydänpuun läpimittojen ennustamisessa. Sirontakuvien perusteella voidaan tehdä havainto mallien toimivuudesta aina 70 % korkeuteen asti (kuvat 12 ja 13).

Suhteellisille korkeuksille 85 % - 95 % laadittujen mallien ennustetun ja koepuista mitatun sydänpuun läpimitan suhdetta voi tarkastella kuvasta 13. Runsas ns. nollahavaintojen määrä sekä mallien heikko kyky ennustaa sydänpuun läpimita oikein niille puille, joista sydänpuuta on näillä korkeuksilla havaittu, käyvät ilmi kuvista. Toisaalta tarkastelemalla kuvien x- ja y-akseleiden mitta-asteikoita saadaan tukea johtopäätökselle, että näillä korkeuksilla on kyse vain hyvin pienistä sydänpuun läpimitoista.



Kuva 12. Sirontakuvat mitatuista ja mallilla ennustetuista sydänpuun läpimitoista suhteellisilla korkeuksilla 2,5 % - 30 %.



Kuva 13. Sirontakuvat mitatuista ja mallilla ennustetuista sydänpuun läpimitoista suhteellisilla korkeuksilla 50 % - 95 %.

Myös RMSE:tä eli mallien ennusteiden keskivirheitä tulkitsemalla voidaan todeta sydänpuun mallinnuksen kannalta tärkeimmän osan sijaitsevan rungon alaosassa. Absoluuttisesti mitattuna suurin mallin ennusteen laskennallinen keskivirhe on 14,07 millimetriä 2,5 % suhteellisella korkeudella. RMSE:n arvo laskee edettäessä kohti puun latvaa siten, että vielä 70 % korkeudella se on 7,28 mm (taulukko 2). Eri korkeuksien välillä ennusteiden onnistumista on helpompi verrata suhteellisella keskivirheellä, jossa RMSE on jaettu selitettävän muuttujan ennustettujen arvojen keskiarvolla. Suhteellisia RMSE:tä tulkittaessa voidaan vahvistaa jo mallien selityksasteiden perusteella tehty havainto siitä, että 30 % korkeudelle laadittu malli on onnistunut parhaiten, sillä sen avulla laaditun ennusteen suhteellinen keskivirhe on kaikista pienin 15,3 %. Myös muut 50 % suhteelliselle korkeudelle tai sen alapuolelle laadittujen mallien ennusteet saavuttivat suhteellisen keskivirheen arvon, joka oli korkeintaan 20 %. Rungon ylimpiin osiin laaditut ennusteet eivät ole onnistuneet yhtä hyvin, sillä suhteelliset keskivirheet ovat 85 % ja 95 % korkeuksilla noin 74 % ja 444 %. Suhteellisina arvoina ennusteiden keskivirheet ovat todella suuria, mutta kun tarkastellaan samojen korkeuksien absoluuttisten keskivirheiden arvoja, havaitaan että kyse on vain noin 4,3 ja 1,6 millimetristä. Yleisellä tasolla mallin toimintaa ei voida pitää hyvänä, jos sen avulla tehty ennuste on jopa lähes viisinkertainen yli- tai aliarvio. Silti tässä tapauksessa, kun ennusteen kohteena on sydänpuun läpimitta sellaisella korkeudella, jossa se useimmiten on todellisuudessa vain muutamien millimetrin paksuinen, ei virheen merkitys ole lopputuloksen eli yksittäisen puun sydänpuun kokonaismäärän mallintamisen kannalta suuri.

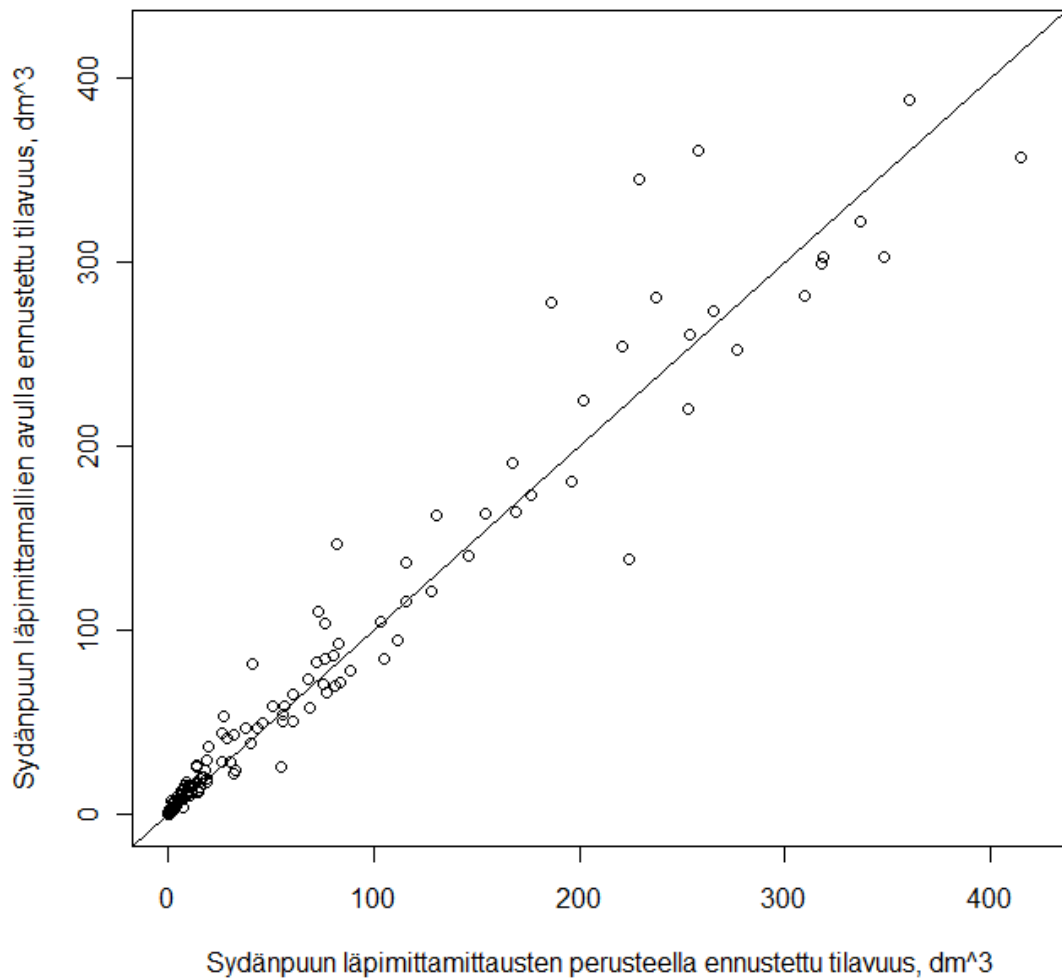
Eri tutkimuksissa raportoitujen sydänpuun läpimittaa ennustaneiden mallien keskivirheiden arvojen vertaamista tämän tutkimuksen arvoihin vaikeuttaa se, että osassa tutkimuksista on ilmoitettu vain RMSE:n absoluuttinen arvo. Esitettyjen tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että mallien keskivirheiden välillä ei ole suuria eroja. Tässä tutkimuksessa päästiin tärkeimpien suhteellisten korkeuksien läpimittamallien RMSE:n osalta samalle tasolle kuin Ojansuu ja Maltamo (1995), jotka saavuttivat noin 19 % RMSE:n mallilla, jossa käytettiin samoja selittäviä muuttujia kuin tämän tutkimuksen malleissa. Lisämuuttujien avulla RMSE pieneni vielä noin 15 % tasolle. Absoluuttisesti ilmoitetuista RMSE:n arvoista Flæten ja Vadlan (2008) 16,9 mm sekä Wilhelmssonin ym. (2002) 16,9 mm ovat enemmän kuin tämän tutkimuksen suurin RMSE 14,07 mm 2,5 % suhteellisella korkeudella. Myös sydänpuun iän neliöjuuren sääntöön perustuneen Uusitalon (2004) sydänpuun sädetä ennustavan mallin RMSE 10,7 mm, on läpimitaksi muutettuna suurempi kuin tämän tutkimuksen mallien. Erilaisista esitystavoista huolimatta tutkimuksissa laadittujen mallien keskivirheiden välisten erojen perusteella ei voida

tehdä selvää jakoa hyviin ja huonoihin malleihin, vaan on todettava eri menetelmien ja mallien ennusteiden olevan tällä osa-alueella mitattuna lähes samantasoisia.

4.3 Tilavuusennusteiden onnistuminen

Sydänpuun läpimittamallien suhteellisten korkeuksien läpimittaennusteista laadittujen runkokäyrien avulla ennustettiin sydänpuun tilavuus puun rungossa. Läpimittaennusteista luotiin puun sydänpuun poikkileikkausalan runkokäyrä, jonka x- ja y-akseleiden kanssa muodostaman alueen koko laskettiin integroimalla koepuun sydänpuun tilavuudeksi. Toisin kuin läpimittamalleja arvioitaessa, tilavuusennusteiden vertaaminen todellisiin sydänpuun tilavuushavaintoihin ei ollut mahdollista, sillä koepuista ei ollut mitattu tilavuutta. Sen vuoksi tässä työssä ennustettiin sydänpuun tilavuus sekä havaittujen että malleilla ennustettujen sydänpuun läpimittojen avulla. Vertailtaessa koko aineiston sydänpuun tilavuusennustetta (taulukko 3) voidaan havaita, että mitattujen ja ennustettujen sydänpuun läpimittojen perusteella laadittujen tilavuusennusteiden keskiarvojen välinen ero on vain noin kolme kuutiodesimetriä eli litraa. Koepuista tehtyjen läpimittahavaintojen perusteella luodun tilavuuden vertailuennusteen pienin tilavuus on noin 29 kertaa pienempi kuin mallinnettujen läpimittojen vastaava. Vaikka suhteellinen ero on suuri, ennuste on vain 83 millilitraa vertailutilavuutta suurempi. Vastaavasti mallien avulla ennustettu yksittäisen puun suurin sydänpuun tilavuus on noin 27 litraa pienempi kuin vertailuaineistossa. Kuvassa 14 on nähtävissä mitattuihin ja ennustettuihin läpimittoihin perustuvien tilavuuksien välinen suhde.

Sydänpuun kokonaistilavuus koeputissa



Kuva 14. Sydänpuun kokonaistilavuuden sirontakuva.

Tilavuusennusteet jakautuvat tasaisesti regressiosuoran molemmille puolille, eikä kuvaajasta ole havaittavissa selvästi erottuvaa kaarevuutta millään alueella. Aivan suurimpien tilavuuksien osalta malleihin perustuvat tilavuusennusteet ovat hieman useammin ali- kuin yliarvioita, mutta varsinaista trendiä ei kuitenkaan esiinny.

Malleilla ennustetuista sydänpuun läpimitoista laaditun sydänpuun tilavuusennusteen laskennallinen keskivirhe oli noin 20 kuutiodesimetriä ja suhteellinen RMSE noin 35,3 % (taulukko 4). Keskivirheen arvo on melko suuri, kun sitä vertaa tutkimuksessa käytetyn aineiston sydänpuun tilavuusennusteen keskiarvoon, joka oli noin 51 kuutiodesimetriä.

Malleilla ennustettujen sydänpuun läpimittojen perusteella laadittujen sydänpuun tilavuusennusteen harha oli noin -2,92 kuutiodesimetriä. Harhan negatiivinen arvo tarkoittaa sitä, että ennusteen tilavuus on keskimäärin noin kolme litraa suurempi kuin havainnon, eli tässä tapa-

uksessa mitattujen läpimittojen perusteella lasketun sydänpuun tilavuuden. Suhteutettaessa sydänpuun tilavuusennusteen harha tutkimuksessa laaditun ennusteen vaihteluväliin 0,1 – 388,1 litraa voidaan todeta, että harhan vaikutus tuloksen oikeellisuuteen riippuu hyvin paljon puun koosta. Tarkasteltaessa visuaalisesti läpimittamalleihin ja mittauksiin perustuvista koepuiden tilavuusennusteista laadittua sirontakuvaa (kuva 14) voidaan todeta, että ennustetut tilavuudet asettuvat tasaisesti regressiosuoran molemmille puolille ja käytetty menetelmä toimii yhtä hyvin sekä pienille että isoille puille.

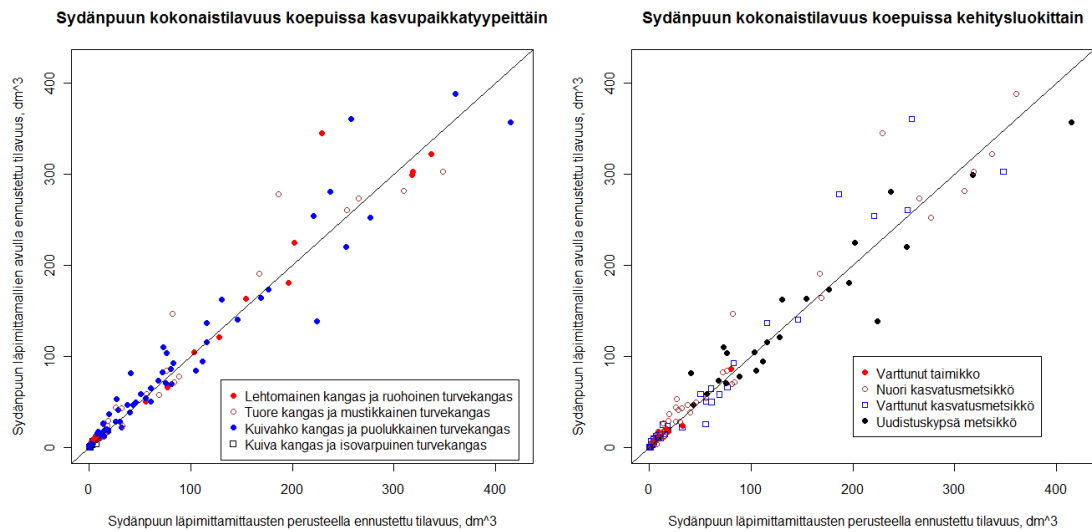
Tässä tutkimuksessa tehtyjen tilavuusennusteiden tunnuslukuja voidaan vertailla myös muiden tutkimusten tulosten kanssa. Ojansuu ja Maltamo (1995) ennustivat tutkimuksessaan sydänpuun tilavuutta muun muassa puun kuorettoman rinnankorkeusläpimitan ja pituuden avulla, jolloin sydänpuun tilavuusennusteen suhteelliseksi keskivirheeksi raportoitiin 88,35 %. Mielenkiintoinen yksityiskohta tutkimusten välisessä vertailussa on se, että molemmat edellä mainitut tutkimukset on laadittu saman tutkimusaineiston perusteella, mutta eri menetelmiä käyttäen. Ojansuu ja Maltamo (1995) määrittivät mm. sydänpuun loppumiskorkeudeksi viimeisen sydänpuuhavainnon ja ensimmäisen ns. nollahavainnon puolivälin. Sen sijaan tässä tutkimuksessa sydänpuun loppumiskohta määräytyi sydänpuulle ennustetun runkokäyrän ja x-akselin leikkauspisteeseen.

Vaikka sydänpuun läpimitan ennustamista on käsitelty useissa artikkeleissa, suuressa osassa näistä tutkimuksista ei ole enää jostain syystä pyritty ennustamaan sydänpuun kokonaistilavuutta. Näin ollen tutkimusten välinen vertailu jää varsin suppeaksi. Sydänpuun läpimitan ennustamiseen keskittyneiden tutkimusten tuloksista voidaan kuitenkin tehdä arvio, että läpimitaennusteista johdetut tilavuusennusteet olisivat tarkkuudeltaan samalla tasolla olemassa olevien tutkimusten kanssa. Ennusteiden keskivirheen suuret arvot osoittavat, että sydänpuun kokonaistilavuuden ennustaminen tarkasti on vaikeaa. Eikä vielä ole onnistuttu laatimaan sellaista menetelmää, joka olisi yhtä aikaa erittäin tarkka ja toteutettavissa tehokkaasti ilman laajoja ja työläitä mittauksia yksittäisestä puusta.

Läpimittamallien muuttujavalinnan onnistumista sekä mallien sopivuutta käytettäväksi eri olosuhteissa tarkasteltiin visuaalisesti tutkimalla mm. kasvuolosuhteita kuvaavien muuttujien mahdollista vaikutusta ennusteisiin. Vastaavanlainen visuaalinen tarkastelu suoritettiin myös sydänpuun tilavuusennusteelle.

Kuvan 15 sirontakuvien perusteella voidaan todeta, että kasvupaikkatyypillä tai kehitysluokalla ei ole selkeästi havaittavissa olevaa vaikutusta sydänpuun tilavuusennusteen onnistumiseen. Eri kasvupaikkatyypeiltä peräisin olevat koepuut jakautuvat kuvassa tasaisesti regressiosuoran

molemmille puolille riippumatta siitä, sijoittuuko puu sydänpuun tilavuuden perusteella suurten tai pienten puiden joukkoon. Suuren sydänpuun tilavuuden omaavien puiden osalta kasvu- paikkatyyppin vaikutuksen arvioiminen on kuitenkin hieman vaikeampaa, sillä aineistossa ei ole kovin monia yli 200 kuutiodesimetrin puita ja johtopäätösten tekeminen yksittäisten havaintojen perusteella on varsin riskialtista. Samaan tulokseen päädytään tutkittaessa sydänpuun tilavuusennusteita koepuiden koelan kehitysluokan suhteen. Sydänpuun tilavuus noudattaa regressiosuoraa kehitysluokasta riippumatta, eikä menetelmän toimivuutta ole tarve kyseenalais- taa.



Kuva 15. Mittauksiin ja läpimittamalleihin perustuvat sydänpuun tilavuusennusteet esitettyinä kasvu- paikkatyypeittäin sekä kehitysluokittain.

5. Johtopäätökset

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli luoda menetelmä, jolla voidaan ennustaa männyn sydänpuun läpimitta kaikilla rungon korkeuksilla ja sen avulla ennustaa myös sydänpuun tilavuus puun rungossa tai sen osassa. Jo aiempien tutkimusten tulosten perusteella oli mahdollista ennakoita, että sydänpuun läpimittaennusteet onnistuvat sydänpuun kokonaistilavuusennusteita paremmin. Omat haasteensa menetelmän laatimiseen tuovat yhä epävarmuus siitä, miksi ja miten paljon sydänpuuta muodostuu sekä se, että suuretkin vaihtelut toistensa kaltaisten mäntyjen sydänpuun määrässä ovat mahdollisia. Silti tässä tutkimuksessa käytetyillä menetelmillä pystyttiin ennustamaan puusta helposti ja tehokkaasti mitattavissa olevien tunnusten avulla myös sydänpuun kokonaistilavuutta tarkkuudella, joka on vähintäänkin aikaisempien tutkimusten tasolla. Edellä mainituista epävarmuuksista huolimatta tutkimuksessa laadittua menetelmää voitaisiin hyödyntää käytännössä jo pienten muokkausten jälkeen yksittäisten puiden, mutta myös suurempien kokonaisuuksien, kuten metsikkökuvioiden, sydänpuun kokonaismäärän arvioinnissa. Mikäli männyn sydänpuun käyttäytymistä puun rungossa ja sen määrän ennustamista halutaan vielä tutkia, tarvittaisiin tämänkin tutkimuksen aineistoa laajempi koepuuaineisto, jossa yksittäisestä puusta tehtäisiin aikaisempaa useampia sydänpuumittauksia. Tiheämmin suoritettujen sydänpuun läpimittamittausten avulla voitaisiin saada entistä parempi kuva sydänpuun kapenemisesta puussa ja näin ollen pystyttäisiin ennustamaan aiempaa tarkemmin männyn sydänpuun paksuus ja tilavuus. Parantuvan ennustettavuuden myötä voitaisiin myös lisätä luonnostaan erikoisominaisuuksia omaavan sydänpuun arvoa ja käyttömahdollisuuksia.

Lähteet

- Björklund, L. 1999. Identifying heartwood-rich stands or stems of *Pinus sylvestris* by using inventory data. *Silva Fennica* 33(2): 119-129.
- Climent, J. Gil, L. & Pardos, J. 1993. Heartwood and sapwood development and its relationship to growth and environment in *Pinus canariensis* Chr. Sm ex DC. *Forest Ecology and Management* 59:165-174.
- Davis, P.J. & Rabinowitz, P. 1975. *Methods of numerical integration*. Academic Press Inc. New York. 459 s.
- Eerikäinen, K. 2001. Stem volume models with random coefficients for *Pinus kesiya* in Tanzania, Zambia, and Zimbabwe. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 879-888.
- Flewelling, J.W. & Pienaar, L.V. 1981. Multiplicative regression with lognormal errors. *Forest Science* 27(2): 281-289.
- Flæte, P.O. & Høibø, O. 2009. Models for predicting vertical profiles of heartwood diameter in mature Scots pine. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 527-536.
- Flæte, P.O. & Vadla, K. 2008. Predicting Vertical Heartwood Diameter Profiles of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Based on Data from the Forest. *Julkaisussa: Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology*, 8 s. Marraskuu 10-12, 2008 Concepción, Chile. Saatavissa: http://www.skogoglandskap.no/filearchive/predicting_vertical_heartwood_diameter_profiles.pdf. [Viitattu 3.7.2013].
- Gjerdrum, P. 2003. Heartwood in relation to age and growth rate in *Pinus sylvestris* L. in Scandinavia. *Forestry* 76(4): 413 -424.
- Hakkila, P. 1968. Geographical variation of some properties of pine and spruce pulpwood in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 66(8): 1-60.
- Hujo, S. & Poikela, A. 2008. Puutavaralajien laatuvaatimukset. *Julkaisussa: Rantala, S. (toim.). Tapion taskukirja. Metsäkustannus, Helsinki. s. 379-383.*
- Höjer, A.G. 1903. Tallens och granens tillväxt. Bihang till FR. Lovén: Om våra barrskogar. Stockholm. (Ruotsiksi.)
- Kilki, P. ja Varmola, M. 1981. Taper curve models for Scots pine and their applications. *Acta For. Fenn.* 174: 60 s.
- Korhonen, K. T. & Maltamo, M. 1990. Männyn maanpäällisten osien kuivamassat Etelä-Suomessa. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 371.

Kärkkäinen, M. 1972. Kuusen ja männyn sydänpuuosuudesta. *Silva Fennica* 6(3): 193-208.

- 1986. Malli männyn, kuusen ja koivun puuaineen oksaisuudesta. *Silva Fennica* 20(2): 108-116.

- 2003. Puutieteen perusteet. Metsälehti Kustannus, Helsinki. 451 s.

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108: 1-74.

Lappi, J. 1986. Mixed linear models for analyzing and predicting stem form variation of Scots pine. Seloste: Männyn runkomuodon analysointi ja ennustaminen lineaaristen sekamallien avulla. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 134: 1-69.

Lappi-Seppälä, M. 1952. Männyn sydänpuusta ja runkomuodosta. Referat: Über Verkernung und Stammform der Kiefer. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 40(25): 1-26.

Löyttyniemi, K. 1986. Männyn sydänpuu- luonnon kestopuuta. Männyn sydänpuun luontaisen lahon- ja hyönteiskestävyuden hyväksikäytöstä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 231: 1-50.

Mäkelä, A. 1997. A carbon balance model of growth and self-pruning in trees based on structural relationships. *Forest Sciences* 43(1): 7-24.

-, Mäkinen, H., Vanninen, P., Hynynen, J., Kantola, A. ja Mielikäinen, K. 2000. Männiköiden tuotoksen ja laadun ennustaminen. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 794. 89 s.

Nylinder, P. 1961. Influence of tree features and wood properties on basic density and buoyancy. I. Scots pine. Report 35. Department of Forest Products. Royal College of Forestry, Stockholm, Sweden. 36 s. (Ruotsiksi, englanninkielinen tiivistelmä.)

Ojansuu, R. & Maltamo, M. 1995. Sapwood and heartwood taper in Scots pine stems. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 1928-1943.

Panshin, A.J & de Zeeuw, C. 1980. *Textbook of Wood Technology*. 4. painos. McGraw-Hill Book Company. 722 s.

Pinheiro, J.C. & Bates, D.M. 2000. *Mixed-effects models in S and S-plus*. Springer-Verlag, New York, USA. 501 s.

Pinto, I., Pereira, H. & Usenius, A. 2004. Heartwood and sapwood development within maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems. *Trees* 18:284-294. [Verkköjulkaisu] Saatavissa: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00468-003-0305-8> [Viitattu 5.8.2013]

- R Development Core Team. 2011. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Ranta, E., Rita, H. & Kouki, J. 2005. Biometria – Tilastotiedettä ekologeille. Yliopistopaino, Helsinki. 569 s.
- Rikala, J. 2003. Spruce and pine on drained peatlands- wood quality and suitability for the sawmill industry. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management Publications 35: 1-135.
- 2007. Scots pine heartwood – formation, characteristics and utilization: a review. Julkaisussa: Rikala, J. & Sipi, M. (toim.). Proceedings of the 3rd meeting of the Nordic-Baltic network in wood material science and engineering (WSE). University of Helsinki, Department of Forest Resource Management Publications 40: 5-10.
- Sellin, A. 1994. Sapwood-heartwood proportion related to tree diameter, age, and growth rate in *Picea abies*. Canadian Journal of Forest Research 24: 1022-1028.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. & Kira, T. 1964. A quantitative analysis of plant form – The pipe model theory. I. Basic analyses. Japanese Journal of ecology 14: 97-105.
- Steffen, A., Frühwald, A., Tamminen, Z. & Puls, J. 1990. Biological, chemical, and physical properties of Scots pine from Sweden under special consideration of crown defoliation. Report 217. Department of Forest Products. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden. 312 s.
- Tamminen, P. 1985. Butt-rot in Norway spruce in southern Finland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 127: 1-52.
- Tamminen, Z. 1962. Moisture content, density and other properties of wood and bark. I. Scots pine. Report 41. Department of Forest Products. Royal College of Forestry, Stockholm, Sweden. 46 s. (Ruotsiksi, englanninkielinen tiivistelmä.)
- Uusitalo, J., 2004. Heartwood and Extractive Content of Scots pine in Southern Finland: Models to Apply at Harvest. Wood and Fiber Science 36(1): 3-8.
- Venäläinen, M. 2002. Decay resistance of heartwood timber as a quality characteristic in Scots pine breeding. Seloste: Sydänpuutavaran lahonkestävyys laatuominaisuutena männynjalostuksessa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 880. Finnish Forest Research Institute, Research Papers 880. Academic dissertation. 53 + 69 s.
- , Harju, A.M., Kainulainen, P., Viitanen, H. & Nikulainen, H. 2003. Variation in the decay resistance and its relationships with other wood characteristics in old Scots pines. Annals of Forest Science 60(5): 409-417.

Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Spångberg, K., Lundqvist, S-O., Grahn, T., Hedenberg, Ö. & Olsson, L. 2002. Models for predicting wood properties in stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17:330-350.