Mitä puumalleilla voidaan laskea

Pääkaupunkiseudun metsänomistajat 4.12.2018

Jouko Laasasenaho

1. Hiven historiaa
2. Puun mittaus
3. Suomalaisten puumallien perusteet
4. Tilavuusyhtälöt
5. Runkokäyrät
6. Runkokäyrien soveltaminen
7. Tuoreen puun lämpöarvosta

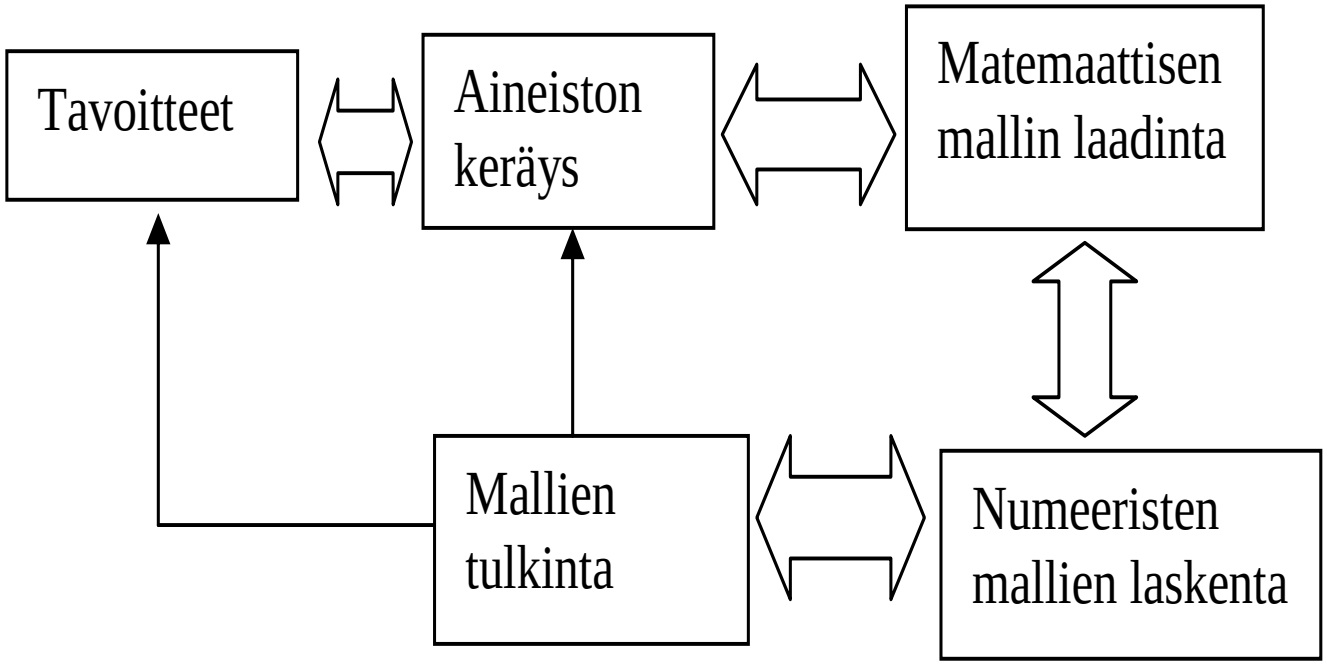
Tämän esityksen sisällössä ennakkotietojakin, joten edelleen levittäminen kielletty (copyright)

Historiallinen tausta

- Vuonna 1969 Suomessa siirryttiin puun mittauksessa kuorelliseen kiintokuutiometrin käyttöön (aikaisemmin tukit jalkoina ja kuutiojalkoina, pinotavara pinokuutioina)
- Puukaupassa yleistyi pystymittaus
- Laskennassa tietokoneet yleistyivät
- VMI:ssä otettiin puun mittauksen lähtöpisteeksi maanpinta (aikaisemmin juurenniska)
- Puun laskentaan kehitettiin tilavuusyhtälöt 1976 ja 1982 runkokäyrät
- Ilvessalon taulukot käytössä vuodesta 1948

Fig. 4.1. Leonardo da Vinci's sketch of tree architecture showing that the transverse-sectional area of the trunk is equal to the sum of branch transverse-sectional areas. Note that Leonardo wrote in mirror image. (Richter 1970)

Runkokäyrän laadinnassa keskeisellä sijalla on matemaattinen mallinnus.



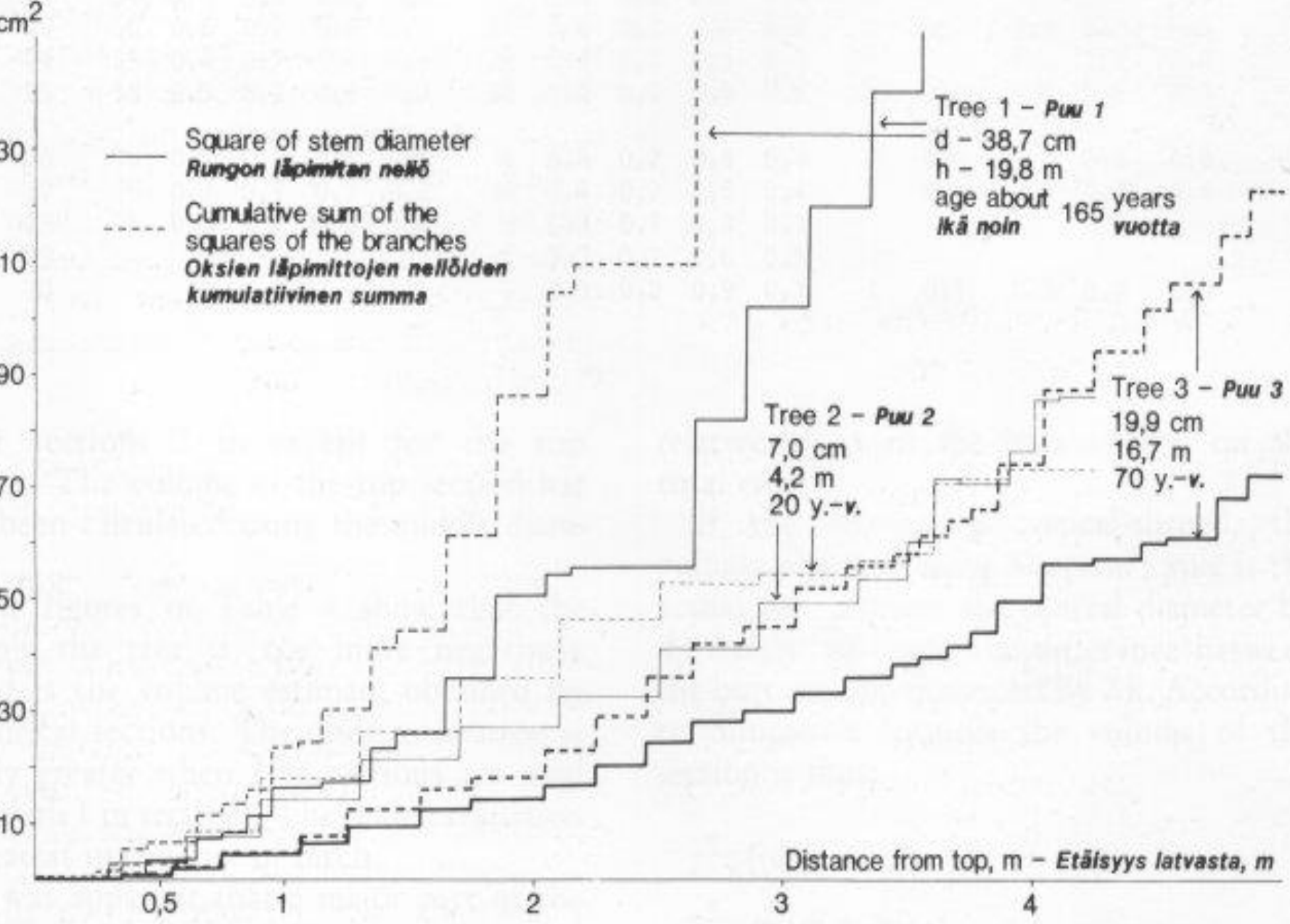


Fig. 5. Square of the stem diameter over bark and cumulative sum of the squares of the diameters of all (living and dead) branches over bark at each branch whorl for three different-aged pines.

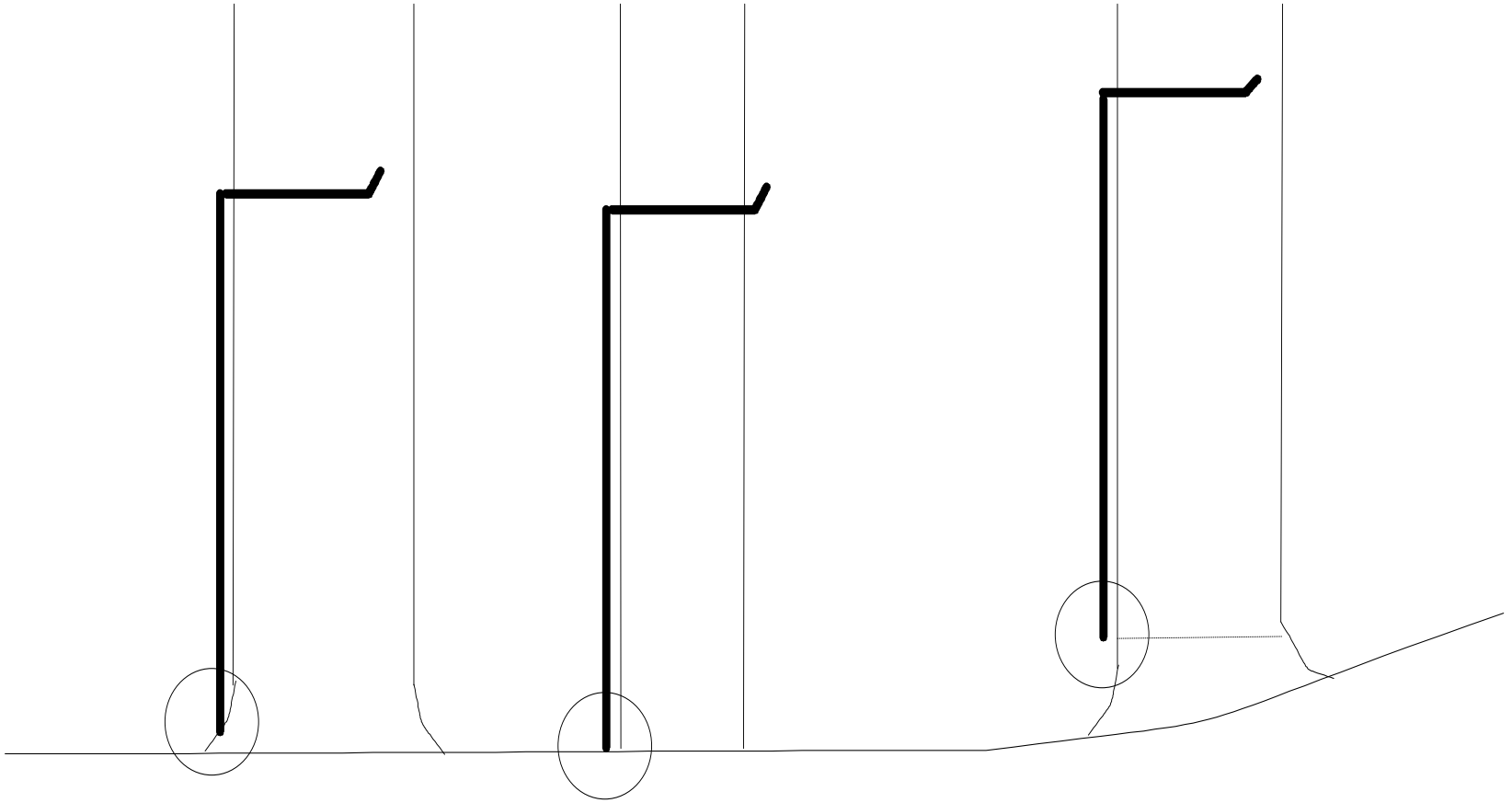
Kuva 5. Rungon kuorellisen läpimitan neliön ja elävien sekä kuolleiden oksakynnysten yläpuolelta mi-

Puumallien aineisto ja mittaus

- Suomen puulajeista on kerätty laaja koepuuaineisto, joka edustaa kattavasti koko maata (Laasasenaho 1982). Eri osista maata alueittain arvottiin valtakunnan metsien inventoinnissa käytettyjä mittauslohkoja, joilta koepuumittaukset tehtiin. Koepuina mitattiin yhteensä 2326 mäntyä ,1864 kuusta ja 863 koivua maan eri osista.
- Koepuiden rinnankorkeusläpimitat vaihtelivat 0,9 ja 50,6 cm:n välillä ja pituudet 1,5 metristä 28,3 metriin. Puista mitattiin läpimitat 14 suhteelliselta korkeudelta, joten puiden tilavuudet voitiin laskea samalla suhteellisella tarkkuudella erikokoisille puille. Käytetyt korkeudet olivat 1, 2,5, 5, 7,5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 ja 90 %:ia. Läpimittoja mitattiin rungon alaosasta tiheämmin sillä rungon muoto vaihtelee ja muuttuu nopeammin tyviosassa ja rungon alaosaan keskittyy puun tilavuus. Näiden läpimittojen kautta laskettiin kolmannen asteen spline-käyrä, jonka avulla voitiin laskea läpimitta mille tahansa korkeudelle ja laskea rungon tilavuus.

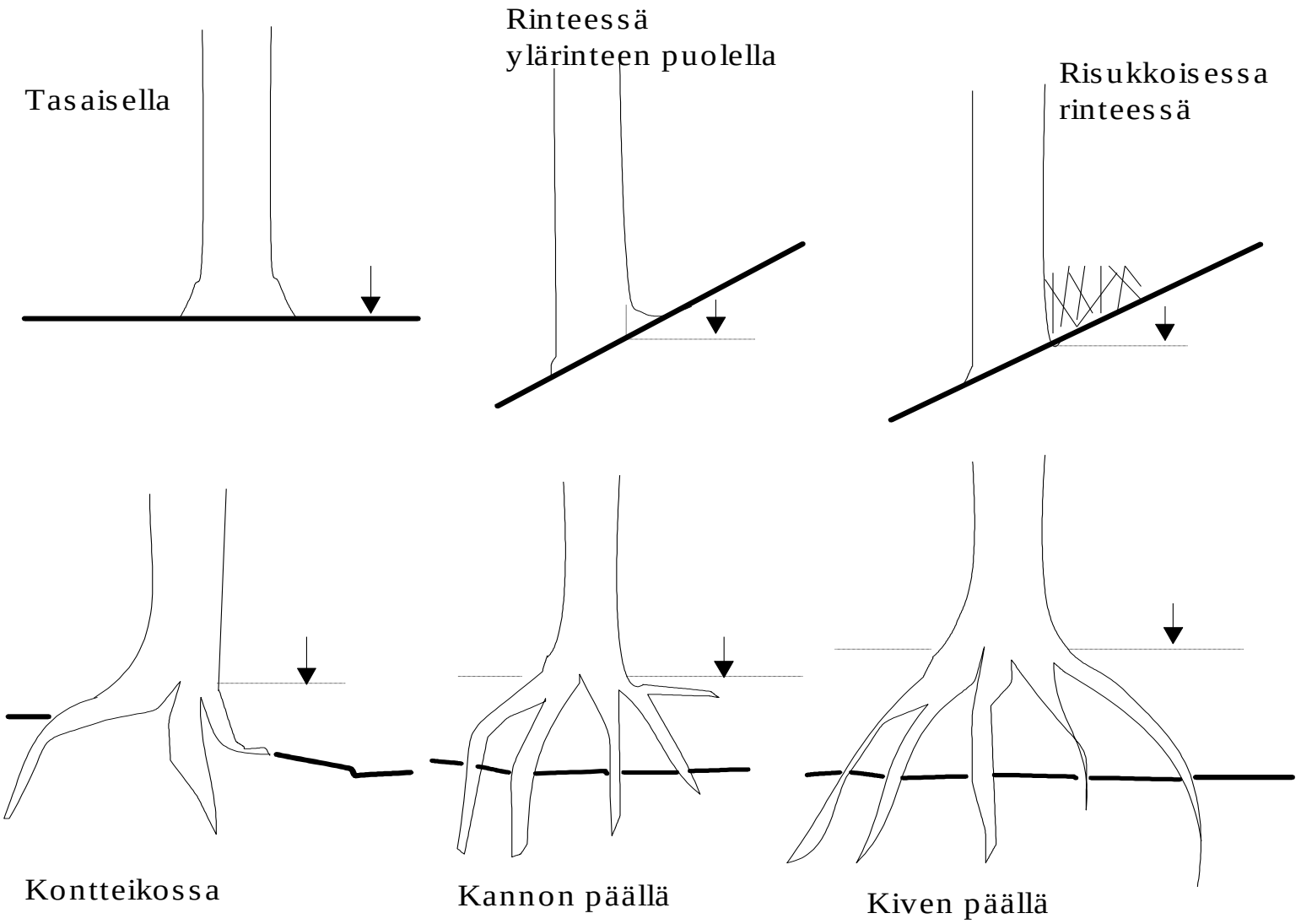
YLIN KAATOA HAITTAAVA JUURENNISKA

Kuva 1 Puunmittauksen lähtöpisteen määrittäminen Ilvessalon taulukoita käytettäessä.



MAANPINNAN TAI SYNTYPISTEEN MÄÄRITTÄMINEN

Kuva 2. Puunmittauksen lähtöpisteen määrittäminen kansainvälisellä mittaustavalla.



Tilavuusyhtälöiden mallitus

Teoreettisen mallin laadinta hyvin tärkeää

1. $v = f(d)$
2. $v = f(d,h)$
3. $v = f(d,d_6,h)$

Tulomuotoinen malli

$v = g \cdot h \cdot f$, missä

g = rinnankorkeuspohjapinta-ala,

h = puun pituus ja

f = rinnankorkeusmuotoluku

Muotoluvun käyttöön perustuvat mallit

Tulomuotoisia tilavuusyhtälömalleja: V=f(d)

$$v = \beta_0 \cdot d^{\beta_1} \cdot \varepsilon$$, missä

ε on virhetekijä, joka voidaan ajatella tulon tekijäksi. Virhe on siis suhteessa puun kokoon.

$$\hat{d}_k = 2{,}0 + 1{,}25 \cdot d$$

$$V = \beta_0 \cdot (2{,}0 + 1{,}25 \cdot d)^{\beta_1}$$

$$Mänty: \ln(v) = -5{,}22553 + 3{,}434904 \cdot \ln(2 + 1{,}25 \cdot d) - 0{,}03526 \cdot d$$

$$Kuusi: \ln(v) = -5{,}39934 + 3{,}46468 \cdot \ln(2 + 1{,}25 \cdot d) - 0{,}0273199 \cdot d$$

$$Koivu: \ln(v) = -5{,}41948 + 3{,}5763 \cdot (2 + 1{,}25 \cdot d) - 0{,}0395855 \cdot d$$

Tulomuotoisia tilavuusyhtälömalleja: V=f(d,h)

$$Perusmalli: V = \beta_0 \cdot d^{\beta_1} \cdot h^{\beta_2}$$

Mallia voidaan parantaa, jos d muunnetaan kantoläpimitaksi d_k suhteella

$$\frac{d_k}{h} = \frac{d}{h-1{,}3} \Rightarrow d_k = h \cdot \frac{d}{h-1{,}3}$$

Malliksi saadaan siten:

$$V = \beta_0 \cdot d^{\beta_1} \cdot h^{\beta_2} \cdot (h-1{,}3)^{\beta_3}$$

$$Vaihtoehtoinen\ malli: v = \beta_0 \cdot (2{,}0 + 1{,}25 \cdot d)^{\beta_1} \cdot h^{\beta_2}$$

$$Mänty: v = 0{,}036089 \cdot d^{2{,}01395} \cdot (0{,}99676)^{d} \cdot h^{2{,}07025} \cdot (h-1{,}3)^{-1{,}07209}$$

$$Kuusi: v = 0{,}022927 \cdot d^{1{,}91505} \cdot (0{,}99146)^{d} \cdot h^{2{,}82541} \cdot (h-1{,}3)^{-1{,}53547}$$

$$Koivu: v = 0{,}011197 \cdot d^{2{,}10253} \cdot (0{,}986)^{d} \cdot h^{3{,}98519} \cdot (h-1{,}3)^{-2{,}659}$$

Muotolukumallit: tunnetaan d, h ja d_6

- Puiden, jotka ovat pitempiä kuin 6 metriä, tilavuus voidaan ajatella muodostuvan kolmesta kappaleesta; tyvikappaleesta kannolta 1.3 metriin (sylinteri), 1.3 ja kuuden metrin välisestä katkaistusta kartiosta ja kuuden metrin yläpuolisesta paraboloidista (kartiosta). Tilavuudelle saadaan siten malli:

$$V = \beta_0 + \beta_1 * d^2 + \beta_2 * (d^2 + d * d_6 + d_6^2) + \beta_3 * d_6^2 * (h - 6{,}0)$$

Rinnankorkeusmuotoluvun f malliksi saadaan siten:

$$f = \frac{\beta_0}{g \cdot h} + \frac{\beta_1}{h} + \beta_2 \cdot \frac{(d^2 + d \cdot d_6 + d_6^2)}{g \cdot h} + \beta_3 \cdot \frac{d_6^2 \cdot (h - 6{,}0)}{g \cdot h}$$

$$\begin{aligned} Mänty: v = {} & 0{,}268621 \cdot d^2 - 0{,}0000478628 \cdot d^3 \cdot h + 0{,}000334101 \cdot d^2 \cdot h^2 \\ & + 0{,}0973148 \cdot (d^2 + d \cdot d_6 + d_6^2) - 0{,}0145543 \cdot d^2 \cdot h + 0{,}0440716 \cdot d_6^2 \cdot (h - 6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Kuusi: \; v = {} & 0{,}208043 \cdot d^2 - 0{,}000114406 \cdot d^3 \cdot h + 0{,}000436781 \cdot d^2 \cdot h^2 \\ & + 0{,}133947 \cdot (d^2 + d \cdot d_6 + d_6^2) - 0{,}0149567 \cdot d^2 \cdot h + 0{,}0374599 \cdot d_6^2 \cdot (h - 6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Koivu: \; v = {} & 0{,}226547 \cdot d^2 - 0{,}000122258 \cdot d^3 \cdot h + 0{,}000438033 \cdot d^2 \cdot h^2 \\ & + 0{,}099162 \cdot (d^2 + d \cdot d_6 + d_6^2) - 0{,}0104691 \cdot d^2 \cdot h + 0{,}0334836 \cdot d_6^2 \cdot (h - 6) \end{aligned}$$

Puun käyttö monipuolistuu

- sahatavara ja kuitupuu sekä vaneripuut tärkeimpiä kaupan kohteita (myös pylväät ja aikais. ratapölkyt sekä kaivospuut)
- puun energiakäyttö lisääntyy jatkuvasti
- tutkimuksen avulla puuaineesta ja siitä jalostetuista tuotteista sekä puun eri ainesosista voidaan tuottaa aivan uusia tuotteita (biodieseliä lääke-aineita, lisäravinteita, nanokuitua, kumia, mahlaa, muovia, kosmetiikka- ja monia muita tuotteita)

Puun laskennan uusia vaatimuksia

- Puun eri osilla erilaiset arvot ja ominaisuudet, esim. kuori, oksaton järeä tyvitukki, sydänpuu, nuorpuu, visapuu, oksat, neulaset/lehdet
- Energiasisältö ja kemiallinen rakenne vaihtelee
- Kuoren rakenne ja määrä vaihtelee rungolla ja oksissa
- Rungon arvoon vaikuttaa oksaisuus, järeys ja myös sydänpuun määrä
- Uudet, tehokkaat mittausmenetelmät antavat läpimittoja eri korkeuksilta ja myös muuta tietoa

Puun laskennan tulisi

- pystyä käyttämään kaikki mittaustieto hyväksi
- tuottaa läpimitat kuorineen ja kuoretta halutuilta korkeuksilta ja jopa oksien määrä eri korkeusväleillä
- määrittää kuoren paksuus rungossa ja oksissa
- antaa kuorellinen ja kuoreton tilavuus halututlta väliltä rungossa ja oksissa latvuksessa
- määrittää rungon oksaisuuslaatu tukeilla
- ennustaa sydänpuun määrä eri osissa runkoa
- antaa puun ominaispaino ja biomassa rungossa ja oksissa jopa halutuilla väleillä

Miten tämä kaikki onnistuu

- mietitään kokonaisvaltainen laskenta, jossa mallinnetaan puu ja sen rakenne
- laaditaan uusia laskentasysteemejä ja täydennetään vanhoja
- mitataan koepuut entistä tarkemmilla, uusilla tavoilla, joita ollaan kehittämässä
- käytetään vanhoja mittauksia, mikäli ne ovat käyttökelpoisia

Puun mallinnus

- Runkokäyrät lähtökohtana, koska puissa on invariantteja ominaisuuksia, joita niissä voi hyödyntää, erikokoiset rungot samanlaisia,
- Mallit: polynomimalli tai yhtälöryhmä
- Kokonaistilavuuskäyrät (runko+oksat), kiinteä yhteys rungon kapenemisella ja oksien määrällä
- Kuoren paksuus rungon eri osissa yhtälöryhmällä
- Kuoren paksuuden tasoitus spline-funktioilla
- Oksille omat mallit (rungon malli ja koko biomassan malli)
- Puiden sydänpuun paksuus mallitettava
- Tarvitaan lukuisia muita tapoja erilaisiin sovelluksiin
- Rungon kapenemisen ja oksaisuuden välillä kiinteä yhteys

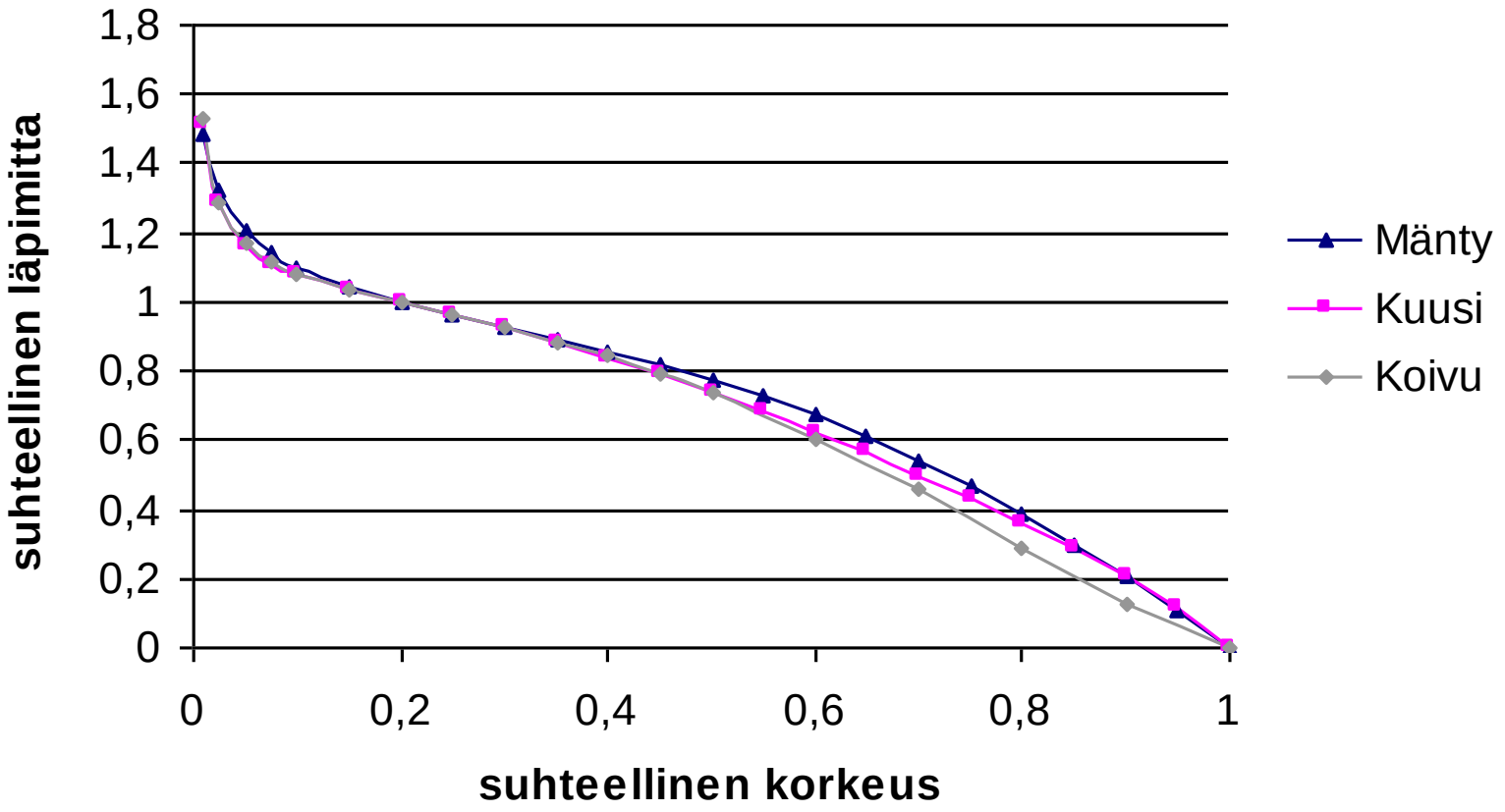
Puiden läpimittojen välillä suuri korrelaatio

Esimerkkinä männyn rungon läpimittojen väliset korrelaatiot

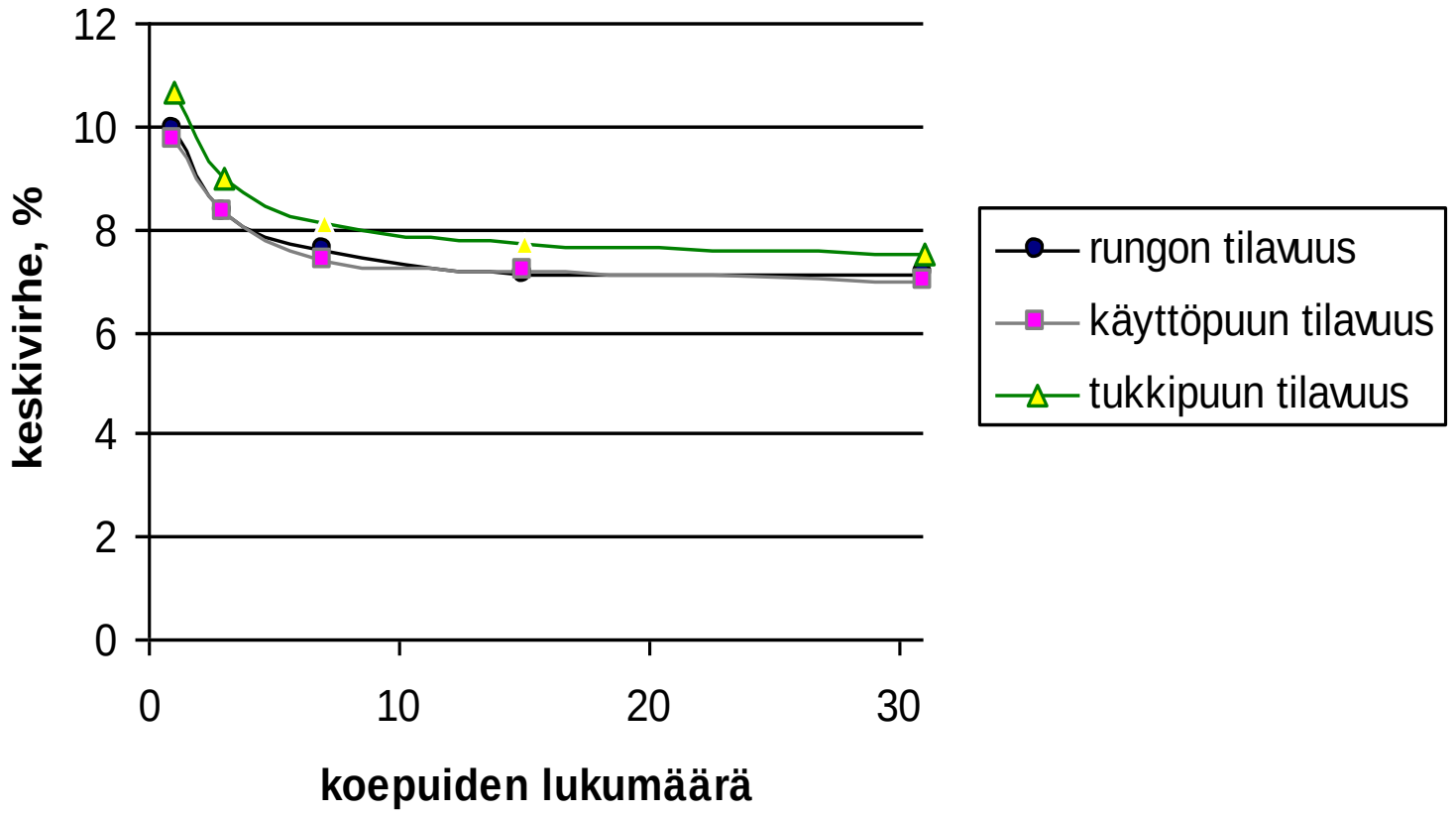
Suht. korkeus	0.01	0.025	0.05	0.075	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.9
0.01	1.0													
0.025	.993	1.0												
0.05	.988	.996	1.0											
0.075	.986	.993	.998	1.0										
0.10	.985	.991	.997	.999	1.0									
0.15	.984	.989	.994	.997	.998	1.0								
0.20	.982	.987	.992	.995	.997	.998	1.0							
0.30	.981	.984	.990	.992	.994	.996	.997	1.0						
0.40	.979	.982	.987	.989	.991	.993	.994	.997	1.0					
0.50	.976	.977	.982	.984	.986	.988	.989	.993	.995	1.0				
0.60	.967	.967	.971	.974	.976	.978	.979	.983	.988	.993	1.0			
0.70	.949	.948	.952	.954	.957	.959	.961	.966	.972	.980	.989	1.0		
0.80	.922	.919	.922	.924	.928	.930	.932	.937	.944	.954	.967	.980	1.0	
0.90	.854	.849	.852	.855	.859	.860	.862	.869	.875	.886	.903	.918	.944	1.0

Puut suhteellisesti samanmuotoisia puulajeittain

Onnistunut mallinnus takaa harhattoman tuloksen myös aineiston ulkopuolella (runkokäyrä voidaan tarkastaa visuaalisesti)



Tarkan mallin avulla saadaan luotettava laskentamenetelmä pienellä aineistolla
-runkokäyrä (peruskäyrä) voidaan määrittää puulajille jo yhdellä puulla



Runkokäyrien laskenta polynomimallilla

.

(1) $\frac{d_l}{d_{.2h}}$ = b1*x + b2*x2 + b3*x3 + b4*x5 + b5*x8

+b6*x13 + b7*x21 + b8*x34 , missä:

dl = läpimitta korkeudella l maasta

d.2h= 20 %:n korkeudella oleva perusläpimitta

X = $1-\frac{l}{h}$ eli suhteellinen etäisyys latvasta

$$\mathrm{d_l} = \hat{\mathrm{d}}_{.2\mathrm{h}} \cdot \mathrm{f_b}(\mathrm{x})$$

Runkokäyrän käyttö

Runkokäyrän avulla voidaan laskea puun tai sen osan tilavuus tai erilaisia rungon dimensioita. Tiedot, joita tavallisimmin halutaan laskea ovat:

1. Mikä on läpimitta tietyllä korkeudella
2. Millä korkeudella on tietty läpimitta
3. Mikä on rungon tai sen osan tilavuus

Rungon tilavuus v voidaan laskea integraalilaskennalla:

Tilavuus v väliltä l_1-l_2:

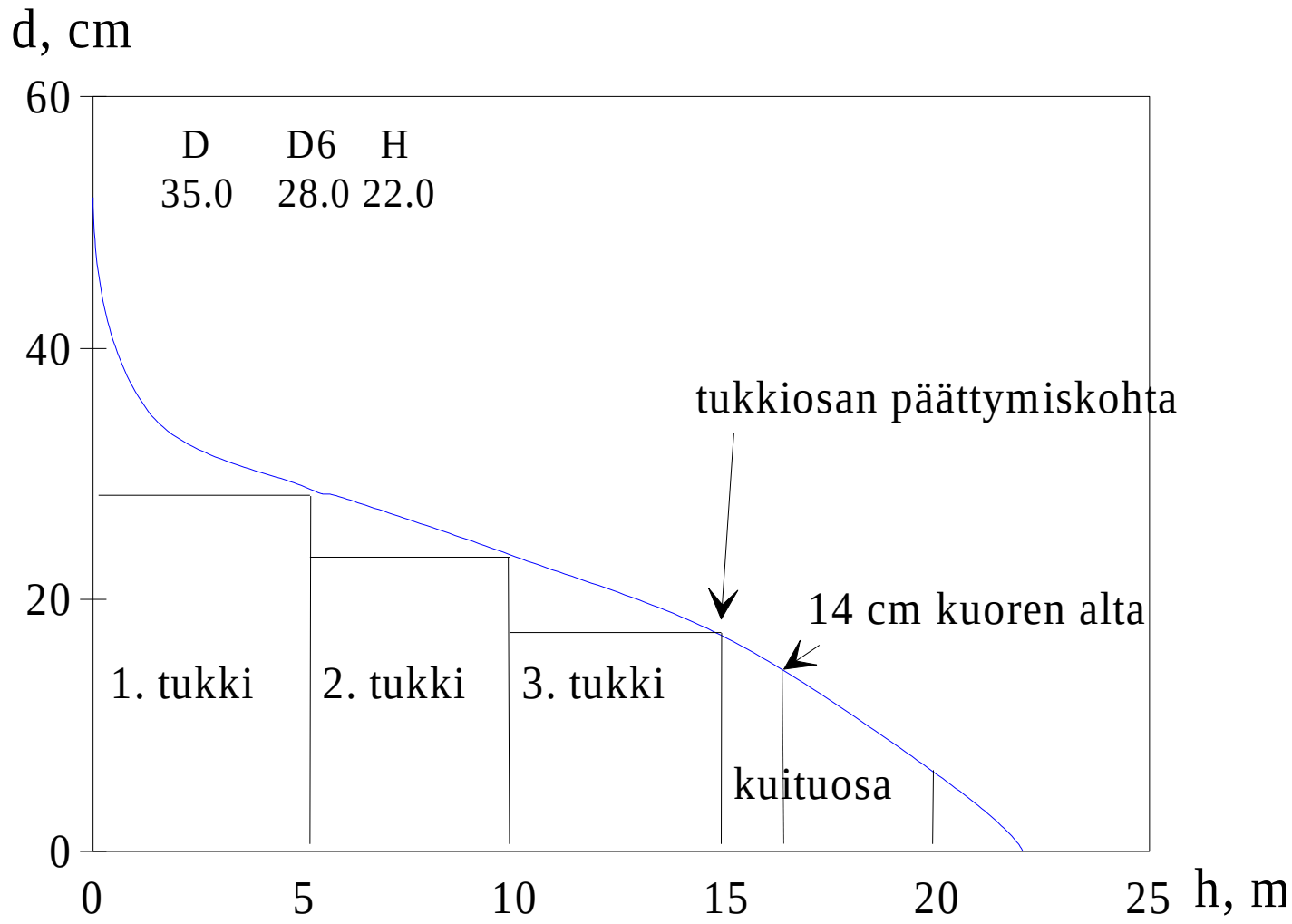
$$V = \frac{\pi}{4}\int_{l_1}^{l_2}(f(l))^2 dl$$

Runkokäyräyhtälössä (1) muuttuja $x = 1 - \frac{l}{h} \Rightarrow l = h(1-x)$.

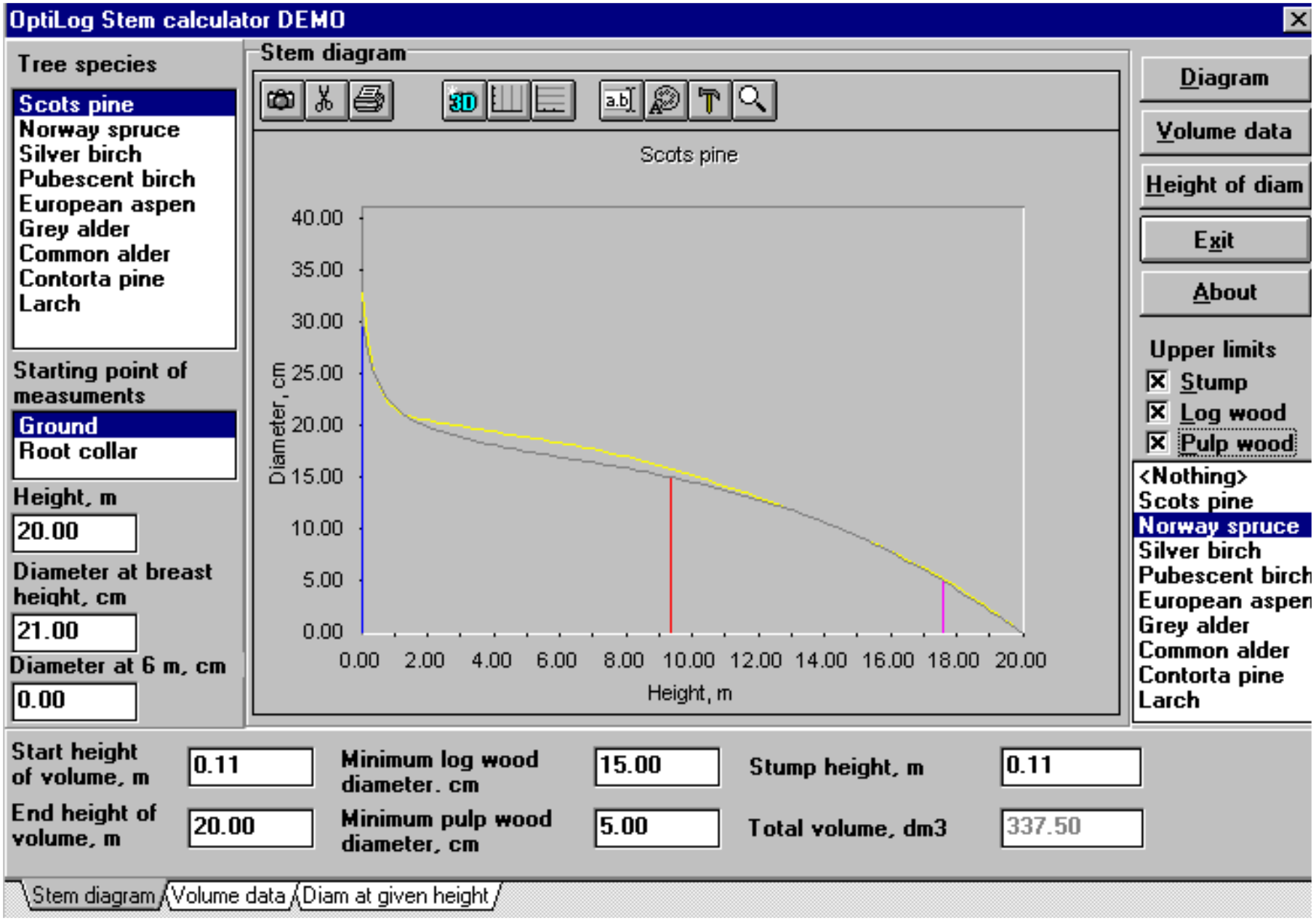
Suorittamalla tämä muuttujan vaihto saadaan:

$$V = \frac{\pi}{4}\cdot \hat{d}_{.2h}^{\,2}\cdot h \cdot \int_{\frac{h-l_2}{h}}^{\frac{h-l_1}{h}}(f_b(x))^2 dx$$

Rungon puutavaralajien määritys eli apteeraus



Modern stem curve visualization software



Yhtälöryhmällä määritetään runkokäyrä

Estimoidaan koepuuaineistosta kaikille suhteellisille korkeuksille i = 1, 2.5, 5, 7,5, 10 % jne. läpimitat mallilla:

$$d_i = \beta_0 + \beta_1 d_{i-1} + \beta_2 d_{i+1} + \beta_3 d + \beta_4 h + \beta_5 h^2$$

Näin saadaan yhtälöryhmä, joka voidaan ratkaista ja saada läpimitat jokaiselle suhteelliselle korkeudelle 1, 2.5, 5 % jne. Sen jälkeen voidaan laskea rungon läpimitta mille tahansa kohdalle ja tilavuus eri väleille Spline- functioilla.

Tämä menetelmä antaa suurin piirtein saman tarkkuuden kuin polynomimalli ja tilavuusfunktiot.

Pääpuulajeilla (mä, ku ko) kuorimallit (yhtälöryhmät) olemassa.

$$b_i = \beta_0 + \beta_1 b_{i-1} + \beta_2 b_{i+1} + \beta_3 b_{1.3} + \beta_4 h + \beta_5 h^2$$

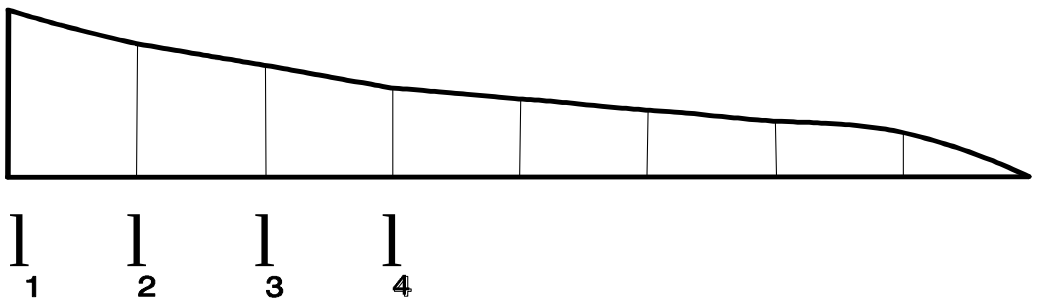
Mallien käyttö edellyttää spline-funktioiden käyttöä, joka tekee ohjelmoinnista monimutkaisemman

Spline on toisen tai yleensä kolmannen asteen polynomeista muodostettu yhtälöryhmä.

$$d_1 = b_0 + b_1 \cdot l + b_2 \cdot l^2 + b_3 \cdot l^3$$

Kullekin mittausvälille li, li+1 lasketaan oma polynomi siten, että viereisillä polynomeilla on yhteisessä pisteessä sama arvo ja yhtä suuret 1. ja 2. derivaatta.

Esim. läpimitat:



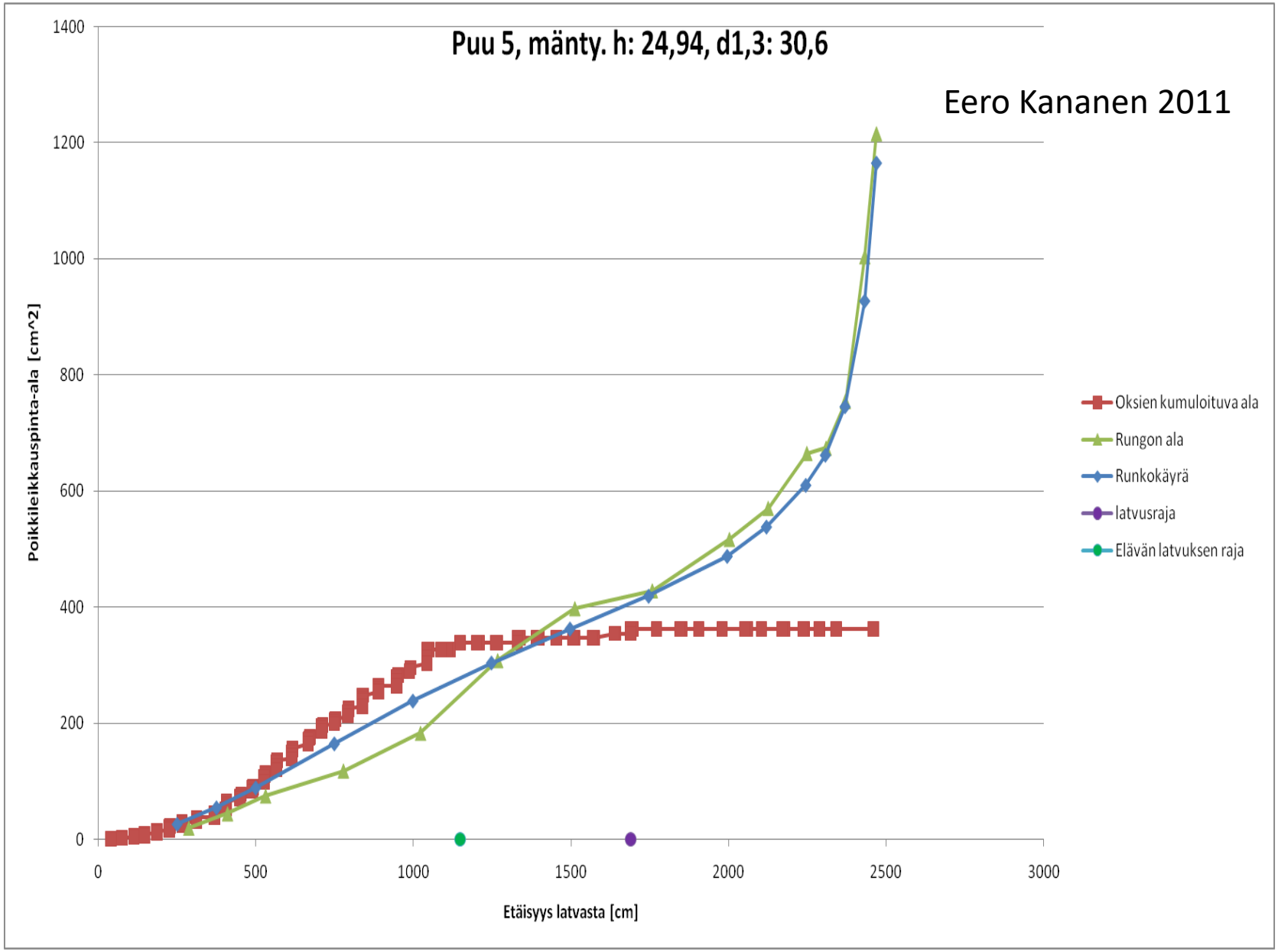
Runkokäyrän käyttö (jatkoa)

Runkokäyrien avulla voidaan selvittää:

1. Rungon tilavuus
2. Rungon puutavaralajit ja rungon arvo
3. Rungon massa
4. Rungon muoto
5. Rungon oksaisuus
6. Rungon kasvu

Laskettaessa rungon tilavuutta tarvitaan juurenniskan korkeus h_r :

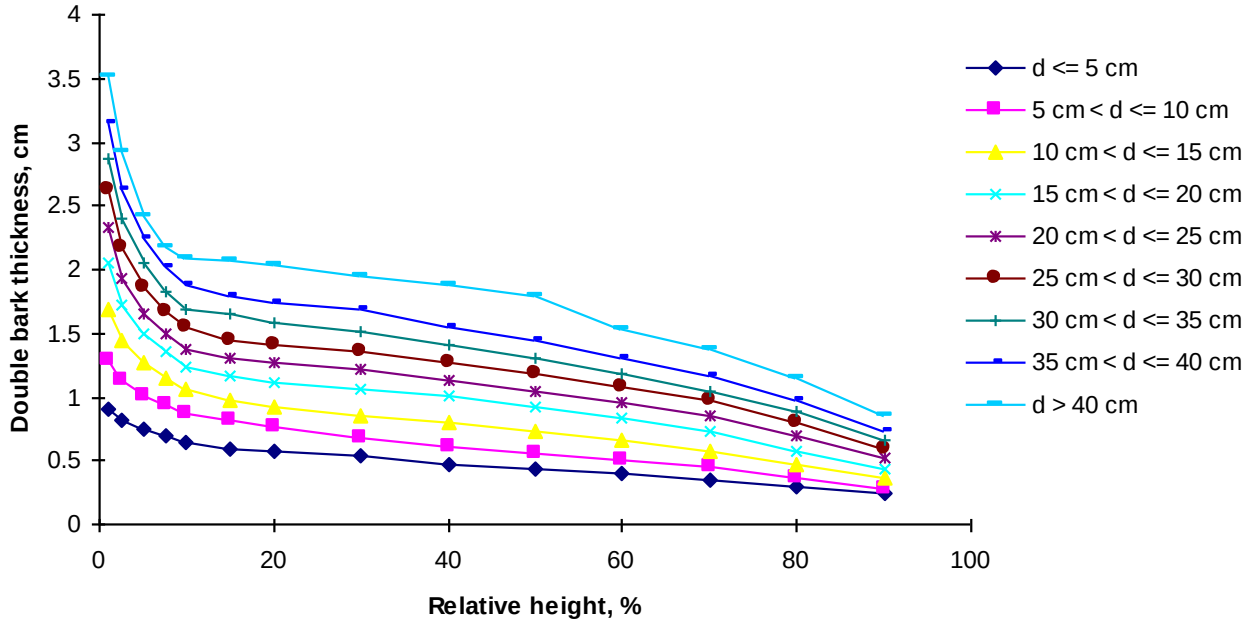
Mänty: $h_r(cm) = 0.4456 \cdot d + 0.0952 \cdot h$
Kuusi: $h_r(cm) = 0.5089 \cdot d + 0.5600 \cdot h$
Koivu: $h_r(cm) = 0.4862 \cdot d + 0.4979 \cdot h$
Yhtälöissä d on cm ja h metriä.


Puu 5, mänty. h: 24,94, d1,3: 30,6
Eero Kananen 2011
Poikkileikkauspinta-ala [cm^2]
Etäisyys latvasta [cm]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
Oksien kumuloituva ala
Rungon ala
Runkokäyrä
latvusraja
Elävän latvuksen raja

Puun kuoren laskenta

- Kuori on eri puulajeilla erilainen, josta seuraa mallinnuksen monimutkaistuminen

Kuusella kuori näyttää hyvin säännönmukaiselta, kts alla



Lopuksi

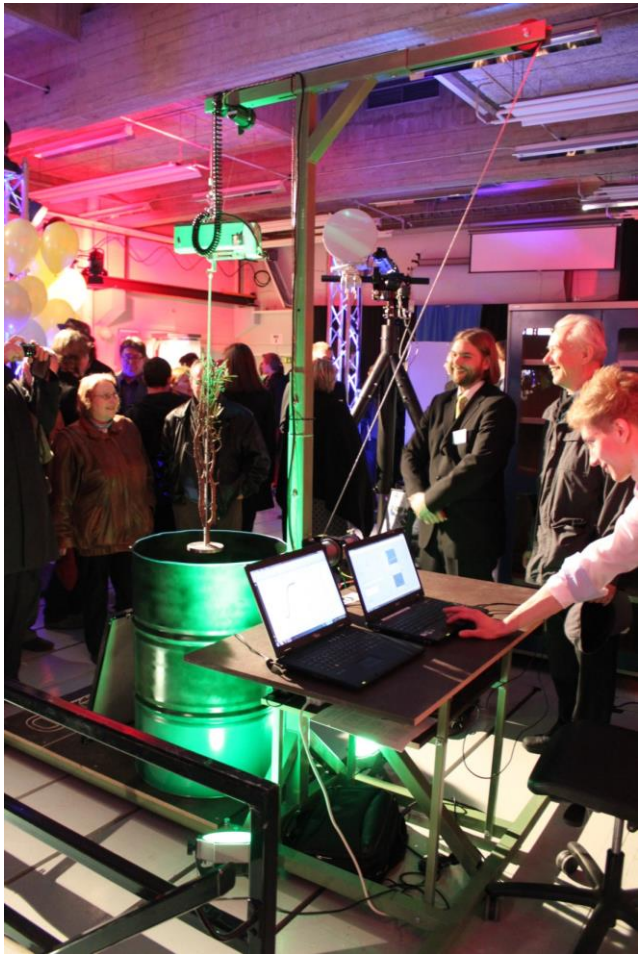
Tehdään yksi systeemi, josta saa kaiken tiedon

- puulajeittain eri parametrit
- mittaustieto voi vaihdella
- laskentamenetelmät samat kullakin puulajilla
- tulosten tarkkuus riippuu mittaustiedoista

Mitä hyötyä olisi yhdestä systeemistä

- takaisi vertailukelpoiset tulokset kaikkialle
- säästäisi valtavasti tutkijatyötä
- siihen voisi kehitellä jatkuvasti lisää ominaisuuksia
- tulisi yhteisesti tarkastettu menetelmä
- voisi käyttää kaikkialla esim. internetin avulla
- tuloksia voisi esittää havainnollisessa muodossa

Koepuiden tarkka mittaus upottamalla



Puun biomassan ja lämpöarvon määritys

- Puun biomassa voidaan määrittää runkokäyrätekniikalla
- Puun osien lämpöarvo riippuu osan kemiallisesta rakenteesta ja osien tiheydestä kunakin hetkenä
- Puun rakenneosien kosteus ja lämpöarvo tunnetaan vaillinaisesti ja ne (myös kemiallinen rakenne) vaihtelee säätilanteen ja vuodenajan (mm. kasvun) mukaan
- Puusta saatavaan energiamäärään vaikuttaa hyvin monet tekijät: puulaji, polttokattilan rakenne, miten palamisen energia otetaan talteen, polttolämpötila, miten palamista säädellään, savukaasujen lämpötila savupiipussa jne

Puun osien lämpöarvosta

- Marjatta ja Eino Kollin säätiö antoi v 2015 22305 € lämpöarvojen tutkimiseen ja 7.3.2016 17100 € jatkotutkimukseen. Näiltä osin tulokset on julkaistu Metsätieteen Aikakausikirjan Tiedonantoja-sarjassa (2017) ”Tuoreen puun lämpöarvosta” Tekijät: Jouko Laasasenaho, Raimo Timonen ja Heikki Poso

Tutkimustuloksia lämpöarvosta tuoreen puun lämpöarvosta

- Männyn sydänpuun lämpöarvo noin 8 % korkeampi kuin mantopuun, kuusella ero noin 4 %
- Sydänpuun kosteus vaihtelee, ei ole vakio
- Kuusen pihkan lämpöarvo 32,4 - 36,8 MJ/kg
- Puun kosteuden määrityksessä ongelmia, koska kuivatuksessa haihtuu muutakin kuin vettä, etenkin energiapitoisia terpeenejä

Lämpöarvot samaa suuruusluokkaa kesällä ja talvella

Taulukko 3. Hyytiälästä 28.6.2015 ja 15.–16.3.2016 rinnankorkeudelta (1,3 m) otettujen kairanlastujen lämpöarvojen keskiarvot, hajonnat ja havaintojen määrät kuivapainosta männyllä ja kuusella.

			Mänty			Kuusi	
		MJ kg–1	Hajonta	n, kpl	MJ kg–1	Hajonta	n, kpl
Mittausaika 28.6.2015	Mantopuu	20,73	1,37	8	19,87	2,48	7
	Sydänpuu	22,47	1,95	8	20,22	1,09	9
Mittausaika 15.–16.3.2016	Mantopuu	20,31	3,32	8	19,78	2,49	8
	Sydänpuu	**21,82**	**2,63**	**8**	**20,74**	**0,63**	**8**

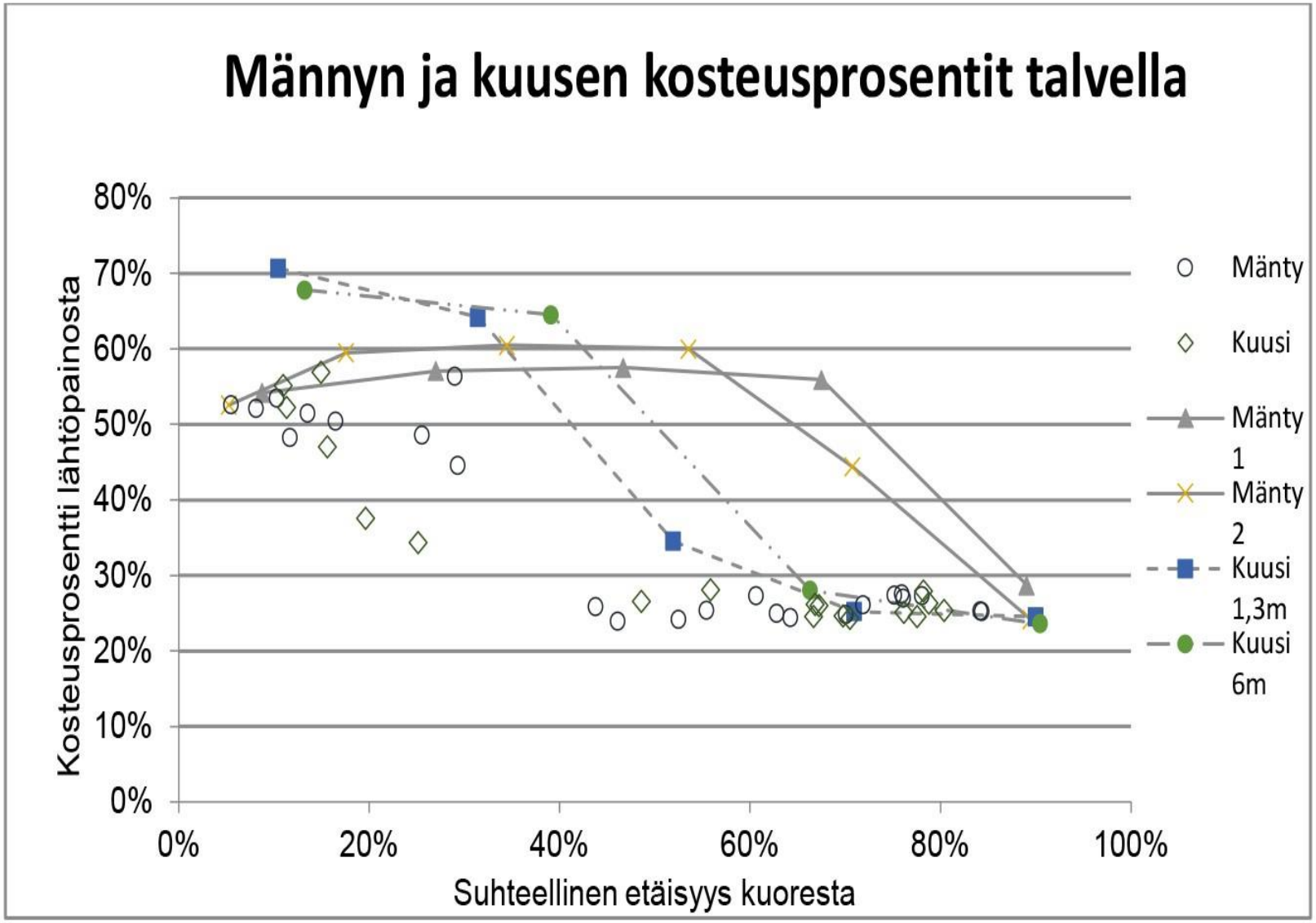
Taulukko 2. Hyytiälästä 28.6.2015 otettujen kairanlastujen lämpöarvot, niiden hajonnat ja havaintojen lukumäärät eri korkeuksilta ilman kuivausta.

Korkeus	MJ kg–1	Hajonta	n, kpl	MJ kg–1	Hajonta	n, kpl
	Mänty, mantopuu			Kuusi, mantopuu		
1,3 m	12,88	0,93	8	10,34	1,03	7
50%	11,15	1,12	7	8,92	0,70	2
70%	10,31	1,25	7	8,69	1,72	3
	Mänty, sydänpuu			Kuusi, sydänpuu		
1,3 m	17,17	1,61	8	15,63	0,96	9
50%	17,39	1,35	7	15,98	0,73	3
70%	13,92	2,69	5	16,08	0,61	4

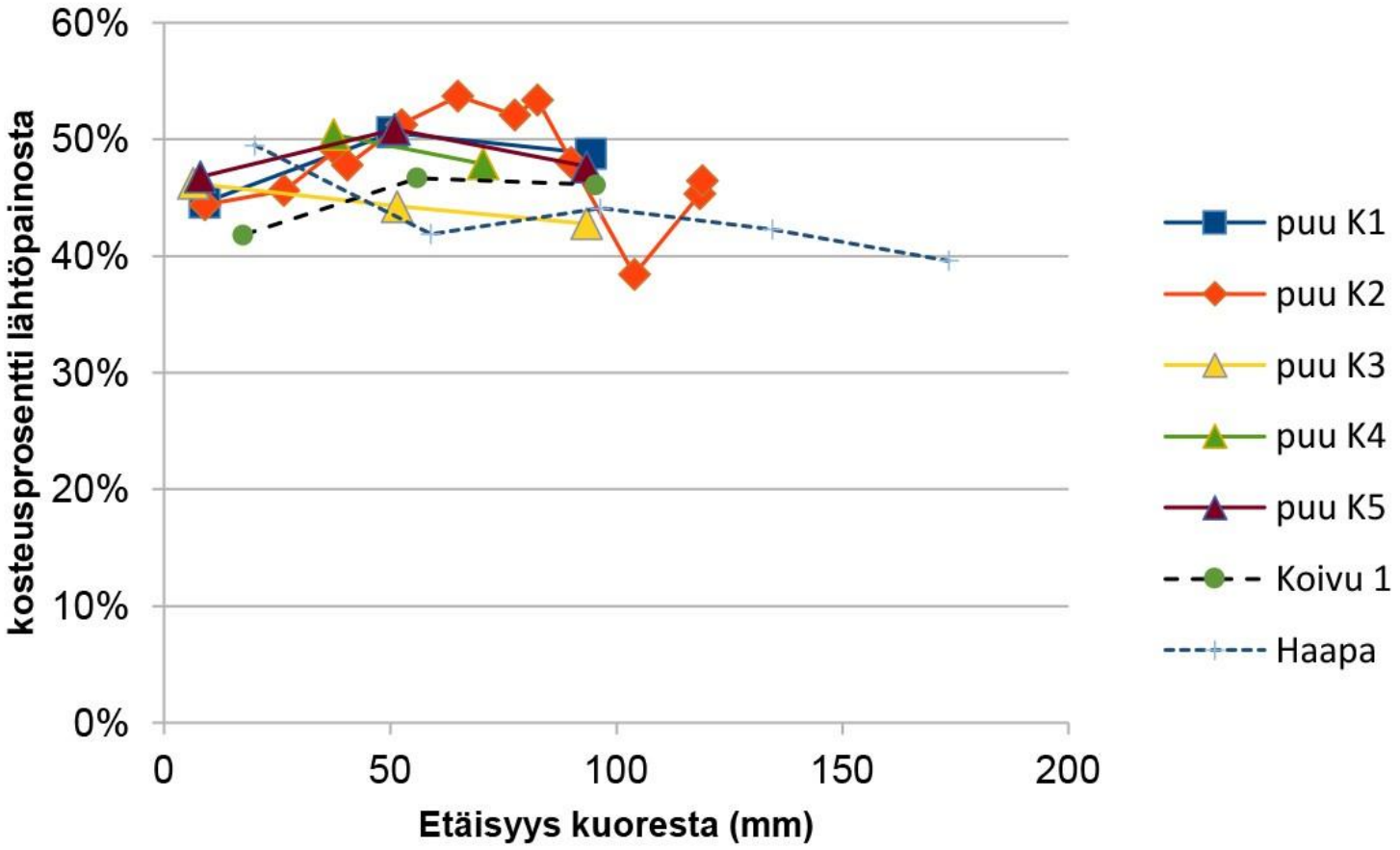
Taulukko 4. Kosteusprosentti näytteiden lähtöpainosta ja prosenttien hajonta 28.–29.6.2015 kairattujen puiden eri korkeuksilla.

Korkeus	Kosteus-%	Hajonta	n, kpl	Kosteus-%	Hajonta	n, kpl
	Mänty, mantopuu			**Kuusi, mantopuu**		
1,3 m	38	7	8	48	3	**7**
50%	47	5	7	54	6	**2**
70%	53	6	7	57	5	**3**
	Mänty, sydänpuu			**Kuusi, sydänpuu**		
1,3 m	25	3	8	24	3	**9**
50%	23	4	7	22	1	**3**
70%	**43**	**12**	**5**	**28**	**9**	**4**

Männyn ja kuusen kosteusprosentit talvella



Koivun runkojen kosteusprosentit talvella



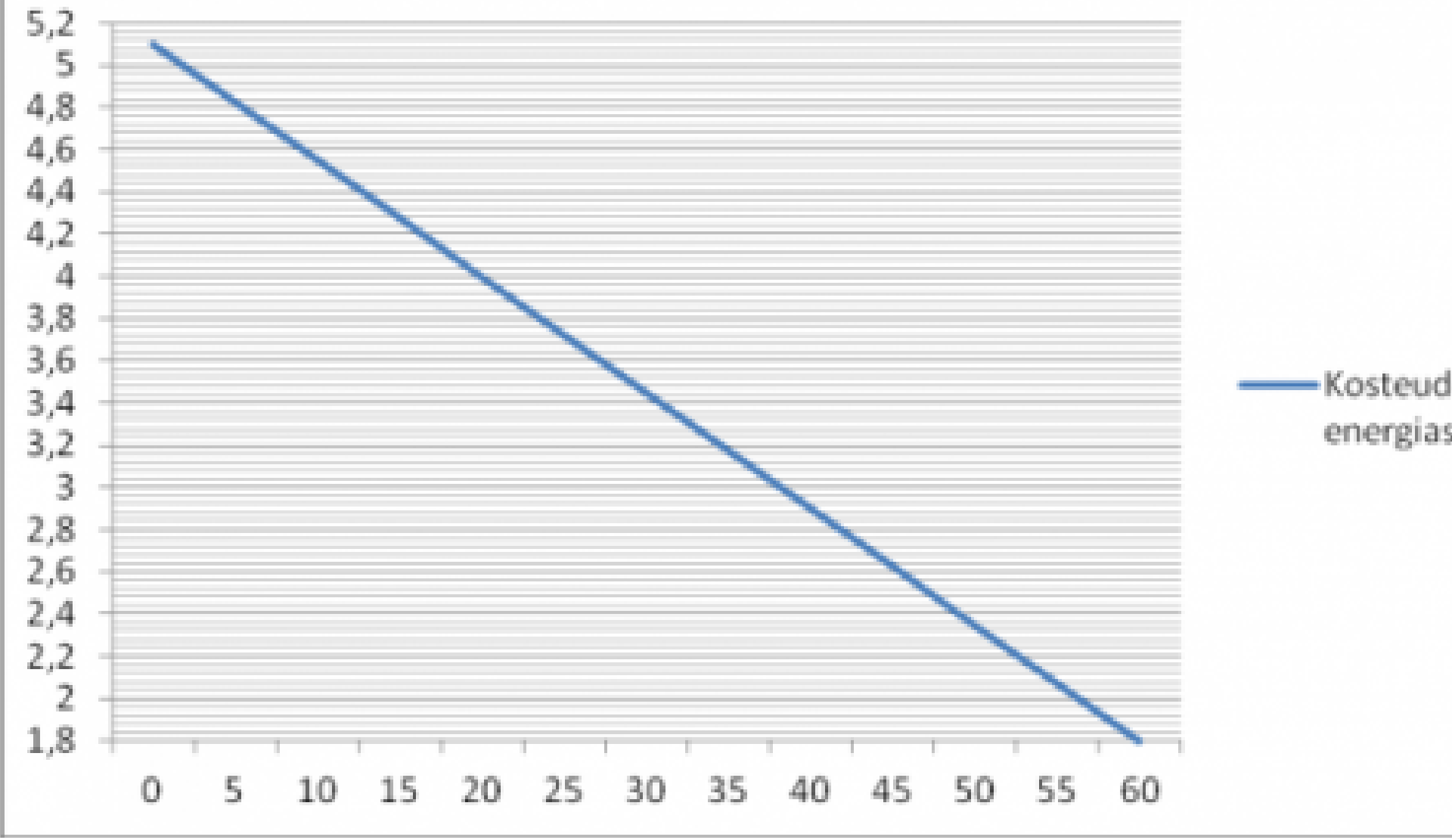
- Puiden eri osissa paljon erilaisia energiapitoisia ja arvokkaita kemiallisia yhdisteitä, joita ei vielä ole hyödynnetty
- Puun poltossa saavutettavissa selvää tuottavuuden lisäystä
- Panostusta tutkimukseen ja menetelmien kehittelyyn pitää lisätä
- Kuusen ja koivun kuoren ainesosat sisältävät hyvin energiapitoisia aineita
- Koivun kuori sisältää paljon betuliinia, jolla hyödyllisiä ominaisuuksia
- Kuusen kuoressa runsaasti stilbeeniä, samoin männyn sydänpuussa
- Havupuissa erilaisia terpeenejä runsaasti
- Tarvitaan tietopankkia ja yleistä laskentamenetelmää
- Puun ja sen osien käyttöarvo voidaan hakkuukoneen mittaustietojen pohjalta laskea melko tarkasti
- Näitä menetelmiä pitäisi kehittää siten, että tietoja voivat käyttää kaikki
- Tarvitaan asioiden hoitamiseksi EU-vetoinen kärkihanke jo ilmastosyiden takia

Mitä palamisessa tapahtuu ?

- Paljonko vettä hajoaa ja mitä katalyyttejä on?
- Paljonko puukaasussa on vetyä, jonka energia-pitoisuus on suuri 119/142 MJ/kg
- Vedyn palaessa syntyy vesihöyryä ja siksi latentin energian talteenotto tärkeää
- Polttokokeissa koivulla ja männyllä 33 %
- Mikä merkitys uuteaineilla on vedyn muodostumiseen?

Kauhavan polttokokeet

- Kauhavan kokeissa kosteus-% erilainen männyllä 57,96 ja koivulla 44,98
- Energian saanti MJ/kg männyllä 19,6 ja koivulla 18,6 kuiva-aine/kg kohti
- Latenttia lämpöä männyllä 5,3 MJ/kg ja koivulla 4,3 MJ/kg kuiva-aine/kg kohti
- Paljonko häviää haihtuvia energiapitoisia aineita kuivatuksessa eri puulajeilla?
- Paljonko muodostuu vetyä/kg eri puulajeilla poltettaessa ja sitä kautta höyrystynyttä vettä?



Pystylukemat taulukossa kuvaavat puun energiamäärää suhteessa painoon (kWh/kg).
*Vaakanumerot kuvaavat kosteusprosenttia (%)**. Lähde VTT***