

RMK TEADUSPROJEKTI LÕPPARUANNE

1. PROJEKTI NIMETUS: Eesti tingimustesse sobivate valemite leidmine kasvava metsa ja metsamaterjali mahu määramiseks

2. PROJEKTI KESTUS	Algus:	Lõpp:
	01/2012	12/2015

3. PROJEKTI TAOTLEJA (teadusasutus): **Eesti Maaülikool**

Telefon:

Address: Eesti Vabariik, Tartu maakond, Tartu linn, Kreutzwaldi 1

Registrikood: 74001086

Panga rekvisiidid:

4. PROJEKTI JUHT:	Allan Sims	Vanemteadur, PhD
	(Ees- ja perekonnanimi)	(Amet, teaduskraad)

5. PROJEKTI PÕHITÄITJAD

Projekti põhitäitjad:

Ees- ja perekonnanimi	Teaduskraad	Ametikoht
1. Allan Sims	Doktor	vanemteadur
2.		
3.		

Projektiga seotud abitööjõud:

1.		
2.		
3.		

6. PROJEKTI KULUD KOKKU 60 000 eurot	
Kulurida	Kokku
Töötasud (põhitäitjad + abitööjõud)	37 000
Sotsiaalmaks	12 474
Töötuskindlustusmaks	528
Ostetud teenused	
Lähetuskulud	3 197
Materjalid, tarvikud, masinad, seadmed	
Muud kulud	
Üldkululõiv	6 001
Kokku	60 000

7. PROJEKTI TULEMUSED (maksimaalselt 10 lehekülge)

7.1 Projekti lühikokkuvõte (maksimaalselt 500 tähemärki)

Projekti käigus uuriti koore paksust erinevatel puuliikidel ning leiti nende kirjeldamiseks mudelid nii üksikpuule sõltuvalt puu suhtelisest kõrgusest kui ka sõltuvalt mõõtekoha diameetrist ja puistu keskmisest diameetrist (mis osutus oluliseimaks koore paksust mõjutavaks puistu takseertunnuseks).

Projekti tulemusi saab rakendada nii kasvava metsa mõõtmises kui ka harvesterimõõtmisel, kus mõlemal juhul mõõdetakse tüve koore pealt ning mudelitega on võimalik leida puiduosa läbimõõt ning sellest tulenevalt puiduosa maht.

7.2 Projekti tulemused

Sissejuhatus

Puu tüvi koosneb kahest komponendist: koor ja puit. Valdavalt mõõdetakse tüve läbimõõtu koore pealt, mistõttu on vaja mudeleid, millega arvutada puiduosa läbimõõt. Kooremudelid võib selle rakendatavuse järgi jagada kaheks: 1) rakendatakse tüvel, kus on teada mõõtekoha (suhteline) kõrgus või 2) rakendatakse tüvel, kus on teada ainult mõõtekoha läbimõõt. Esimese mudeli puhul väljundiks üldiselt suhteline koore paksus, mida kasutatakse koos tüvemoodustajaga (Ozolins 2002). Teine mudel on kasutusel harvesterides, kus arvestatakse vaid mõõtekoha läbimõõtu ning mudeliga lahutatakse tüve läbimõõdust koore paksus ning sellega leitakse puiduosa läbimõõt (SDC 2014). Viimane

meetod on suurema veaga ning seetõttu on suuremates riikides erinevate piirkondade jaoks leitud erinevad mudelid (SDC 2014).

Käesoleva töö üheks oluliseks eesmärgiks on leida harvestri jaoks takseerkirjelduse põhiselt erinevatele puuliikidele kooreparameetrite leidmine. Hetkel on Eestis kasutusel kaks mudelit: 1) männile (parameetrid 3,8 mm ja 2,4%), 2) teised puuliigid (3,3 mm ja 3,7%).

Materjal ja metoodika

Käesolevas töös kasutati nelja erinevat andmestikku: 1) metsaregistri andmed; 2) Statistilise metsainventeerimise (SMI) proovitükkide andmeid (Adermann 2012); 3) kasvukäigu püsiproovitükkide võrgustiku andmeid (Kiviste jt 2015), millele lisaks mõõdeti proovitükkidel olevate mändide korba kõrgusi; 4) raielankidel langetatud puudel mõõdeti koore paksuseid erinevatelt kõrgustelt.

Metsaregistri andmete järgi leiti üle-eestiliselt puistu keskmise diameetri ja kõrguse suhe, mille järgi jagati puistu keskmise puu sihvakuse järgi Eesti piirkondadeks. Selleks koostati üle-eestiline mudel, milles puistu keskmine diameter sõltus keskmisest kõrgusest, enamuspuuliigi vanusest, puistu kõrgusindeksist ja täiusest ning selle mudeli alusel arvutati kui palju erineb konkreetse puistu diameeter mudeliga prognoositud diameetrist. Selle järgi jagati Eesti viide piirkonda: 1) Harju- ja Läänemaa, 2) Ida- ja Lääne-Virumaa, 3) Pärnu- ja Viljandimaa, 4) Rapla-, Järva- ja Jõgevamaa, 5) Valga-, Võru-, Põlva- ja Tartumaa.

SMI andmel uuriti männil rinnaskõrgusel koore paksuse sõltuvust puu ja puistu takseertunnustest. Kasvukäigu püsiproovitükkidel mõõdeti 20 proovitüki männi mudelpuudel korba kõrgused, eesmärgiga analüüsida korba kõrguse sõltuvust puu ja puistu takseertunnustest.

Üle-eestiliselt mõõdeti raielankidel harvesteri poolt langetatud ja järgatud puudel koore paksused nottide otstes. Kokku mõõdeti 60 langil puid. Igal langil vähemalt 10 puud.

Andmete statistiliseks analüüsimiseks kasutati statistika programmi R (R Core Team 2015). Esmase tunnuste vaheliste seoste otsimiseks kasutati mitte-parameetrilist üldistatud aditiivset meetodit (GAM), milleks kasutati paketi *mgcv* funktsioone *gam* ja *gamm*. Töö käigus leiti kõikide tunnuste vahel seosed, mis on kirjeldatavad lineaarse mudelina. Sõltuvalt argumenttunnustest kasutati analüüsimiseks kas lineaarset regressiooni (ainult puu takseertunnused) või hierarhilist mudelit (puu ja puistu takseertunnused koos). Esimese puhul kasutati R funktsiooni *lm* ja teise puhul funktsiooni *lmer* paketist *lme4*.

Modelleerimisel kasutati järgmisi valemeid.

Koore suhtelise paksuse mudel sõltuvalt suhtelisest kõrgust puul:

$$ksp = c_0 + c_1 \cdot hs + c_2 \cdot hs^2 + c_3 \cdot hs^3 + c_4 \cdot hs^4 \quad (1)$$

Kus ksp on koore suhteline paksus, hs on mõõtekoha suhteline kõrgus, c_0 - c_4 on mudeli parameetrid.

$$SuhPar = c_0 + c_1 \cdot D \quad (2)$$

Kus $SuhPar$ on koore suhtelise paksuse parameeter, D on puistu keskmine diameeter ning c_0 - c_1 on mudeli parameetrid.

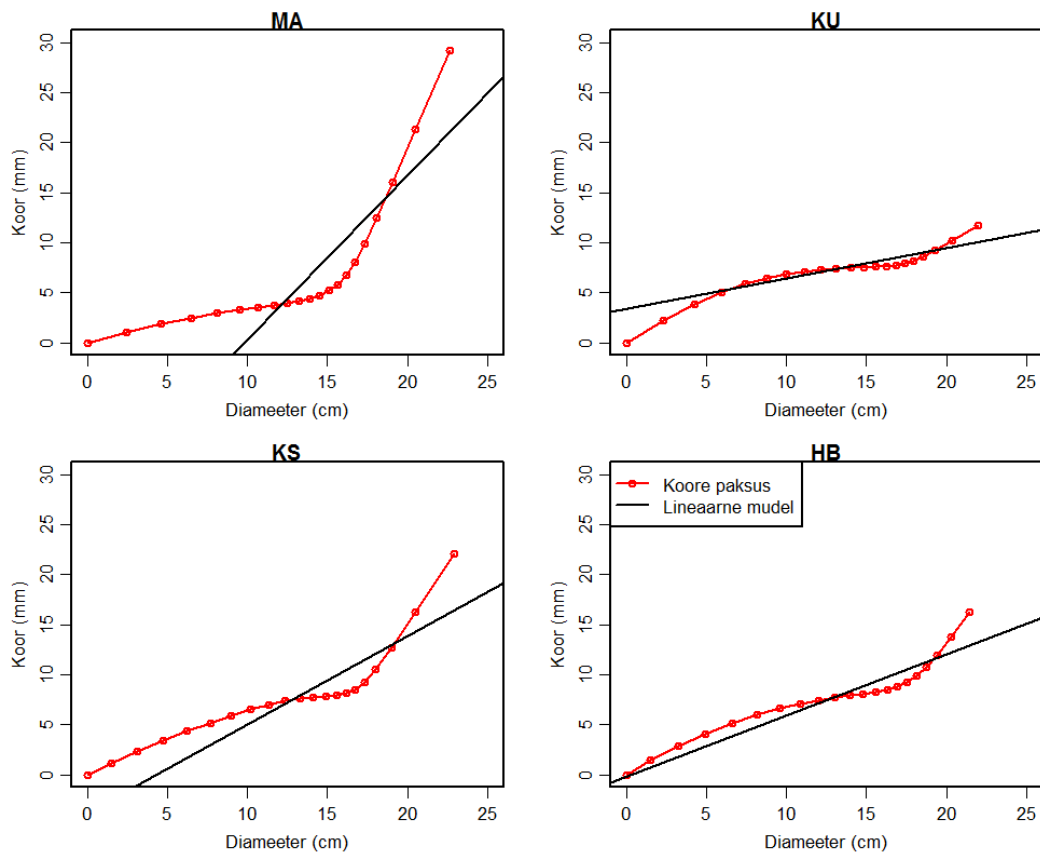
$$kp = c_0 + c_1 \cdot dx + c_2 \cdot D \quad (3)$$

Kus kp on koore paksuse (mm), dx on puu diameeter mõõtekohal, D on puistu keskmine diameeter ning c_0 - c_2 on mudeli parameetrid.

Korbastunud osa suurema varieeruvuse tõttu ei anna harvesteri jaoks vajalik lineaarne regressioon usaldusväärset tulemust (koore paksus saab negatiivse väärtuse), seetõttu kasutati parameetrite leidmiseks võrranditesüsteemi modelleerimise meetodi, kus samaaegselt lähendati nii puu tasemel koore fikseeritud parameeter kui ka puistu takseertunnusest sõltuv koore suhteline parameeter.

Tulemused ja arutelu

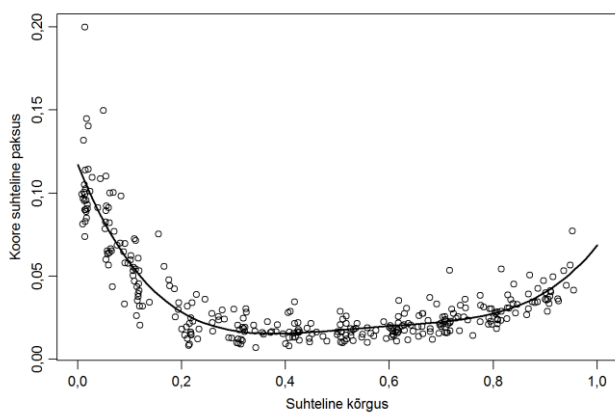
Igale puuliigile tehti eraldi analüüs, kuna koore paksus varieerub puu lõikes puuliigiti erinevalt. Joonisel 1 on illustreerivalt näidatud rinnasdiameetriga 20 cm ja kõrgusega 20 m puu koore paksuse sõltuvus puu diameetrist erinevatel kõrgustel. Joonisel olev must joon on lineaarne regressioon ning sellega on näha, et kuuse ja haava koore paksus on suhteliselt hästi kirjeldatav ka lineaarse seosega, kuid männi ja kase puhul annab selline mudel suurema vea. Lisaks annab selline regressioonimudel männil väiksema diameetri korral isegi negatiivse koore paksuse.



Joonis 1. Koore paksuse sõltuvus puu diameetrist tüvel.

Mänd

Männi koore paksus on tüvel kõige varieeruvam, kuna tüve alaosa korbastub ning selle paksus ajaga suureneb kordades rohkem kui tüve ülemises osas. Joonisel 1 on näha koore suhteline paksus.



Joonis 2. Männi koore suhteline paksus.

Männi koore paksuse muutumise analüüsimiseks uuriti nii rinnaskõrguse koore paksuse kui ka korba kõrguse sõltuvust puu ja puistu takseertunnustest (Sims 2016). Leiti, et rinnaskõrguse koorepaksus on peamiselt sõltuv puu diameetrist, vähemal määral mõjutab puu kõrgus ning järgmisel kohal on puu vanus. Ülejäänud puu ja puistu takseertunnused ei avalda olulist mõju sellele. Korba kõrgus on peamiselt sõltuv puistu vanusest, kasvuheadusest ning puu suhtelisest diameetrist.

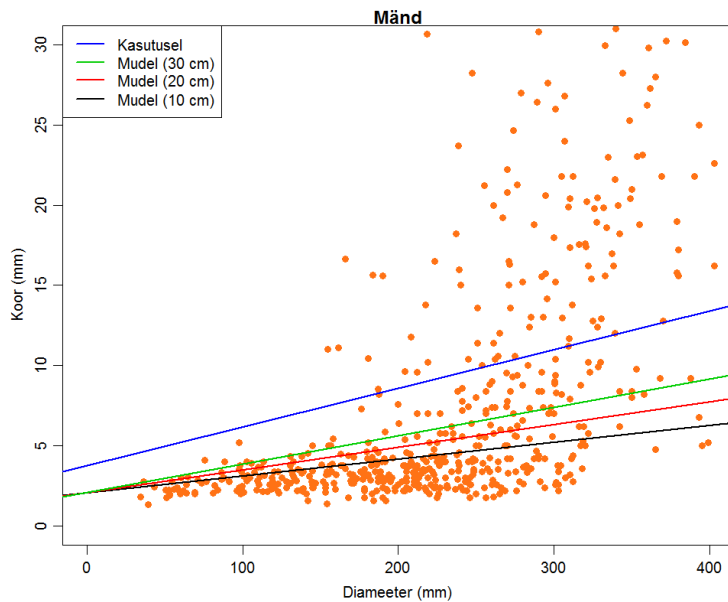
Harvester ei mõõda koore paksust, selleks on vaja kahte kooreparameetrit, millega ta arvutab selle. Üks on fikseeritud suurus millimeetrites (senini männil kasutusel 3,8 mm) ning teine on suhteline koorepaksus sõltuvalt puu diameetrist (senini männil kasutusel 0,024 ehk 2,4%). Joonisel 2 on koore suhteline paksus ning sellel on näha, kui palju see ühe puu lõikes varieerub. Oluliselt paksem on see tüve alaosas, kus tüvi korbastub. Kuna korba kõrgus sõltub erinevatest takseertunnustest, siis on vajalik igale puistule eraldi koore parameetrid välja arvutada.

Koore fikseeritud parameeter osutus analüüsi tulemusena Eestis keskmiselt ühtlaseks 2,1 mm, kuid suhteline parameeter on takseertunnustest sõltuv. Analüüsi tulemusena selgus, et see on peamiselt sõltuv puistu keskmisest diameetrist ning on kirjeldatav lineaarse mudelina:

Tabel 1. Koore suhtelise paksuse mudeli (2) parameetrite hinnangud.

Parameeter	Hinnang	St. viga	P-väärtus
c0	0,6859	0,0166	<0,001
c1	0,0360	0,0006	<0,001

Joonisel 3 on esitatud võrdluseks hetkel kasutusel olev mudel ja keskmisest diameetrist sõltuvad mudelid.



Joonis 3. Langil mõõdetud männi nottidega võrreldes hetkel kasutusel olevat mudelit ning käesoleva töö käigus leitud puistu keskmisest diameetrist sõltuvana leitud mudelid.

Tabel 2. Männi koore parameetrid harvesterile sõltuvalt puistu takseertunnusest.

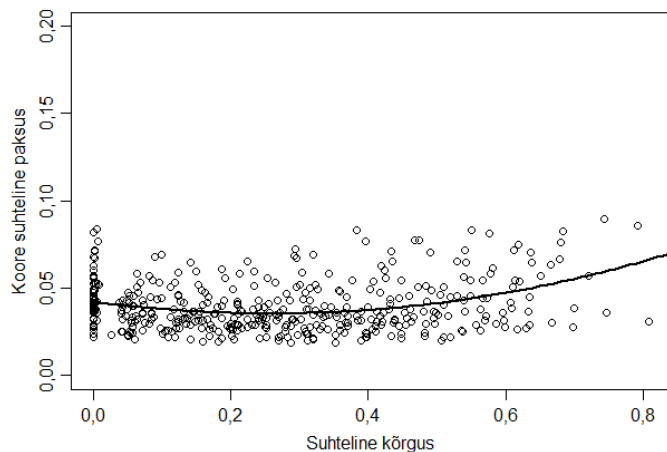
Fikseeritud parameeter (mm)	2,1
Suhteline parameeter (%)	$0,6859+0,0360*D$

Kuusk

Kuuse koor on tüve lõikes kõige ühtlasem võrreldes teiste puuliikidega (joonis 4) ning seetõttu on ka selle mudel neljanda astme polünoomi (valem 1) esimesed kaks astet vaid olulised ning parameetrid c_3 ja c_4 on nullid (tabel 3).

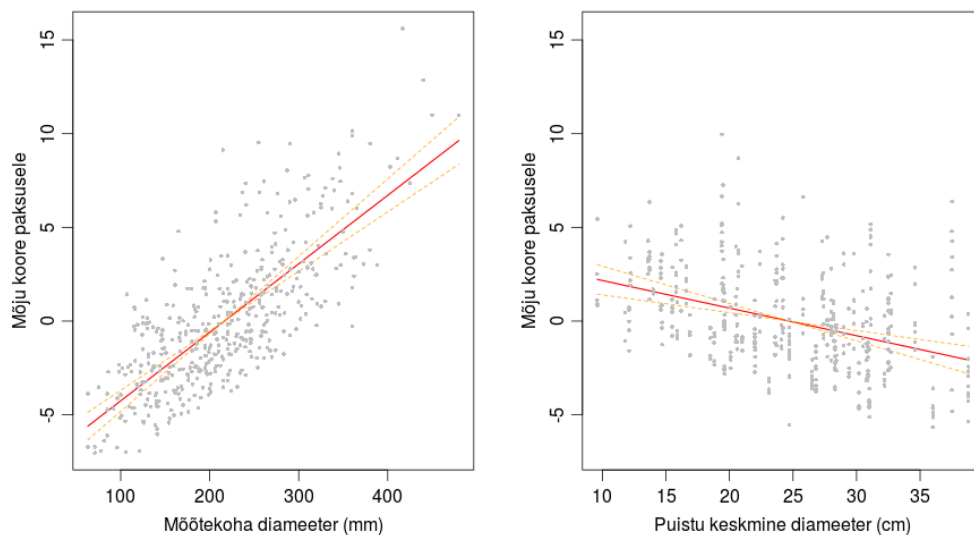
Tabel 3. Kuuse koore suhtelise paksuse mudeli (3) parameetrid.

Parameeter	Hinnang	St. viga	P-väärtus
c_0	0,0421	0,0013	<0,001
c_1	-0,0526	0,0103	<0,001
c_2	0,1022	0,0160	<0,001
c_3	0		
c_4	0		



Joonis 4. Kuuse koore suhtelise paksuse sõltuvus suhtelisest kõrgusest.

Kuuse koore väikese varieeruvuse tõttu oli võimalik koore paksuse modelleerimiseks kasutada ühe lähendamisega mitmetasemelise regressiooni meetodit (*lmer*). Joonisel 5 on esitatud puu mõõtekoha diameetri ja puistu keskmise diameetri mõju koore paksusele ning regressioonanalüüsi parameetrite hinnangud on esitatud tabelis 4. Sellest lähtuvalt tuletatud harvesteri jaoks tuletatud koore parameetrid on esitatud tabelis 5.



Joonis 5. Mõõtekoha diameetri ja puistu keskmise diameetri mõju koore paksusele.

Tabel 4. Kuuse koore paksuse (mm) mudeli (3) parameetrite hinnangud.

Parameeter	Hinnang	St. viga	P-väärtus
c1	3,6272	0,8500	<0,001

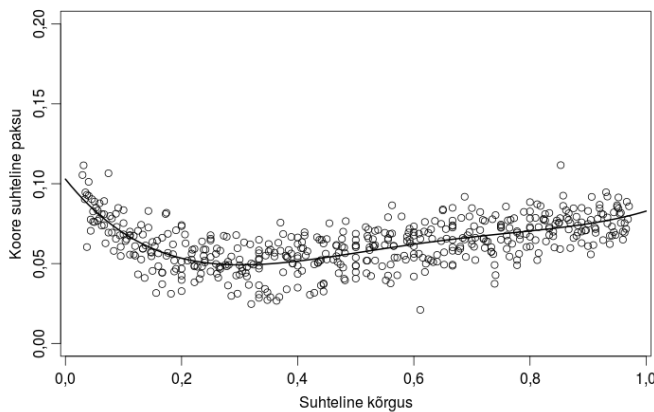
c2	0,0401	0,0162	<0,001
c3	-0,1735	0,0370	<0,001

Tabel 5. Kuuse koore parameetrid harvesterile sõltuvalt puistu takseertunnusest.

Fikseeritud parameeter (mm)	3,62-0,173*D
Suhteline parameeter (%)	4,01

Kask

Kase koore kasv ja korbastumine toimuvad sarnaselt männiga, kuid vähemal määral (joonis 1, joonis 5) ning seetõttu kasutati koore paksuse modelleerimiseks samu meetodeid.

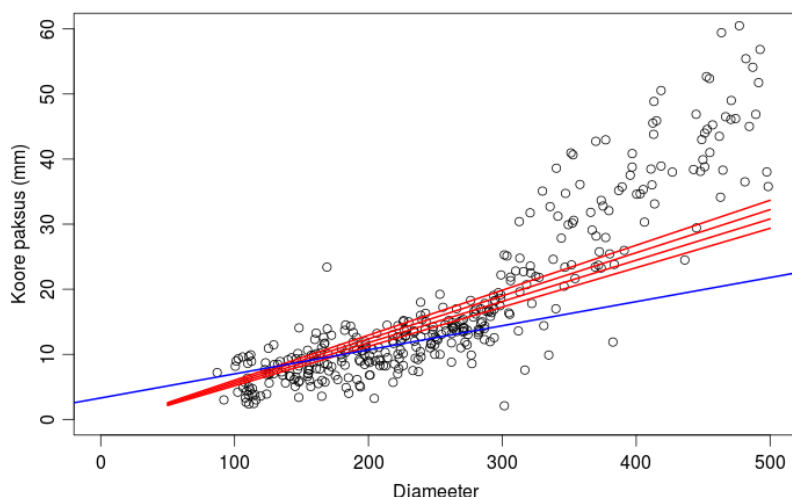


Joonis 6. Kase koore suhtelise paksuse sõltuvus suhtelisest kõrgusest.

Tabel 6. Kase koore suhtelise paksuse mudeli (3) parameetrid.

Parameeter	Hinnang	St. viga	P-väärtus
c0	0,1029	0,0033	<0,001
c1	-0,4516	0,0446	<0,001
c2	1,2758	0,1755	<0,001
c3	-1,3854	0,2609	<0,001
c4	0,5412	0,1295	<0,001

Kasel kasutati sarnaselt männiga võrranditesüsteemi modelleerimise meetodit ning selle tulemusena leitud harvesterile vajalikud koore parameetrid on esitatud tabelis 7 ning mudel on esitatud ka visuaalselt joonisel 7.



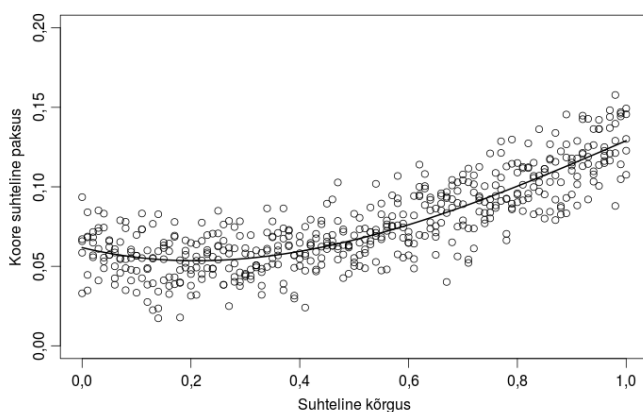
Joonis 7. Langil mõõdetud kase nottidega võrreldes hetkel kasutusel olevat mudelit ning käesoleva töö käigus leitud puistu keskmisest diameetrist sõltuvana leitud mudelid.

Tabel 7. Kase koore parameetrid harvesterile sõltuvalt puistu takseertunnusest.

Fikseeritud parameeter (mm)	-0,878
Suhteline parameeter (%)	5,76+0,029*D

Haab

Haavale korraldi kasega tehtud analüüsi ja modelleerimise meetodeid. Koore suhtelise paksuse mudel on esitatud joonisel 8 ja parameetrite hinnangud tabelis 8. Harvesterile vajalikud koore parameetrid on esitatud tabelis 9 ning graafiliselt on see esitatud joonisel 9.

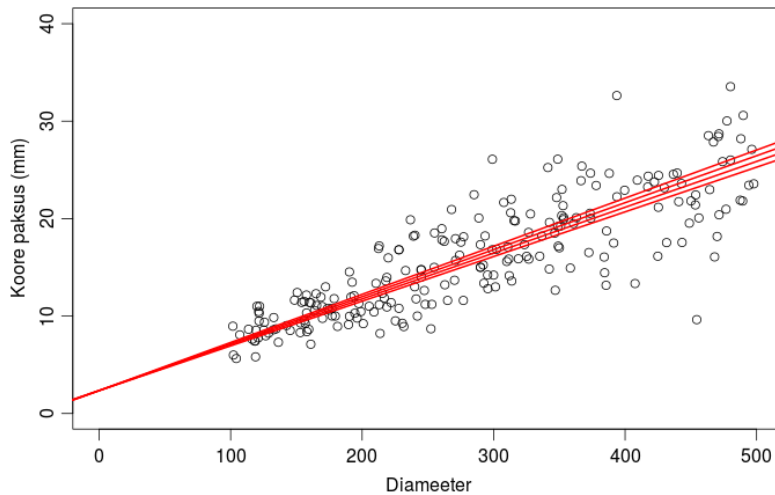


Joonis 8. Haava koore suhtelise paksuse sõltuvus suhtelisest kõrgusest.

Tabel 8. Haava koore suhtelise paksuse mudeli (3) parameetrid.

Parameeter	Hinnang	St. viga	P-väärtus
c0	0,0618	0,0026	<0,001
c1	-0,0820	0,0222	<0,001

c2	0,2176	0,0517	<0,001
c3	-0,0684	0,0340	0,045
c4	0		



Joonis 9. Langil mõõdetud haava nottidega võrreldes käesoleva töö käigus leitud puistu keskmisest diameetrist sõltuvana leitud mudelid.

Tabel 9. Haava koore parameetrid harvesterile sõltuvalt puistu takseertunnusest.

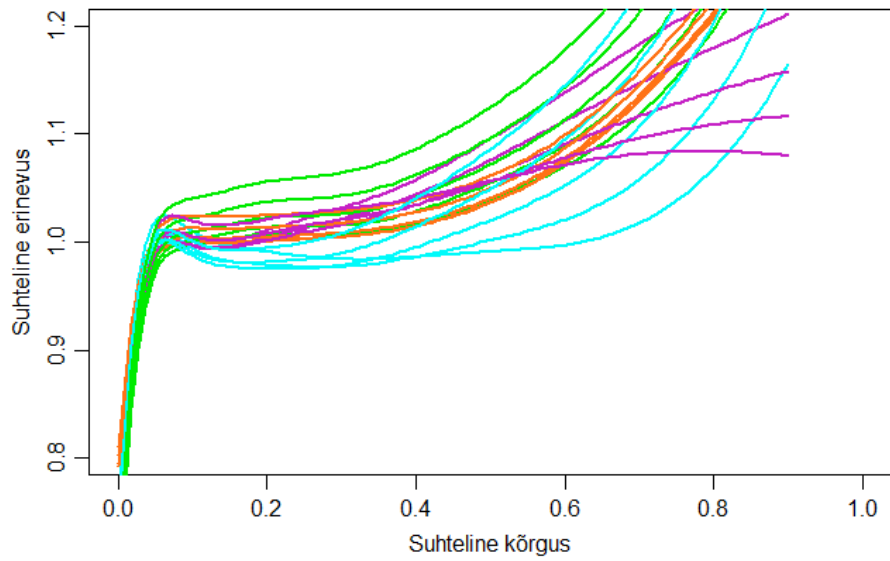
Fikseeritud parameeter (mm)	2,36
Suhteline parameeter (%)	5,76-0,012*D

Edasine töö

Tööd oleks vaja jätkata tüvekuju analüüsimiseks ning sellega koos Eestile sobiva tüvemoodustaja loomine. Koore varieeruvus on vanusest sõltuvana väiksem kui tüve kuju, mistõttu tüvekuju analüüsimiseks on vajalik koguda suurem andmestik kui käesoleva projekti raames koguti.

Eestis kasutatakse hetkel Ozolinsi (2002) tüvemoodustajat, kuid mitmed uurimused on näidanud, et see annab Eesti puudel süstemaatilisi vigu. Soome jaoks on loonud Laasasenaho (1982) tüvemoodustaja mudelid.

Joonisel 10 on esitatud võrdlus, kui palju suhteliselt erineb Ozolinsi mudel Laasasenaho mudelis. Samade mõõtmetega puud annavad piisavalt erinevad tulemused, mistõttu oleks vaja Eestile oma tüvemoodustaja mudelit.



Joonis 10. Ozolinsi ja Laasasenaho tüvemoodustajate suhteline erinevus.

Kasutatud kirjandus

- Adermann, V. 2012. Eesti Metsad 2010. Metsavarude hinnang statistilisel valikmeetodil. Keskkonnateabe keskus. 159 p.
- Kiviste, A., Hordo, M., Kangur, A., Kardakov, A., Laarmann, D., Lilleleht, A., Metslaid, S., Sims, A., Korjus, H. (2015). Monitoring and modeling of forest ecosystems: the Estonian Network of Forest Research Plots. Metsanduslikud uurimused = Forestry studies, 62, 26–38.
- Laasasenaho, J. 1982 Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Comm. Inst. For. Fenn. 108, 74.
- Ozolins, R. 2002. Forest stand assortment structure analysis using mathematical modelling. – Metsanduslikud uurimused XXXVII, 33–42. ISSN 1406-9954.
- R Core Team, 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Sims, A. 2016. Männi koore paksuse modelleerimine. Käsikiri.

8. PROJEKTIGA HAAKUVAD DOKTORI- JA MAGISTRITÖÖD:**9. PROJEKTI RAAMES AVALDATUD PUBLIKATSIOONID:**

Sims, A. 2016. Mäni koore paksuse modelleerimine. Käsikiri. Aruande lisa 1.

10. Projekti juht (nimi): Allan Sims	Allkiri:	Kuupäev: 31.12.2015
---	-----------------	----------------------------

11. Taotleja esindaja kinnitus aruande õigsuse kohta (nimi, amet): Toomas Timmusk, direktor	Allkiri:	Kuupäev: 31.12.2015
--	-----------------	----------------------------

NB! Aruanne esitada elektrooniliselt e-posti aadressil: teadus@rmk.ee