



## 7.2 Abstract (maksimaalselt 300 tähemärki)

Projekti käigus on analüüsitud ja loodud puu ja puistu tasemel juurdekasvu mudelid. Lisaks katsetati Soome kasvusimulaatorit MOTTI, mis peamiste puuliikide (mänd, kuusk ja kask) puhul küll töötas enam-vähem, kuid haava puhul tekkis juba küsitavusi.

Projekti taotluses oli üheks eesmärgiks testida mudelid SMI andmetel, kuid projekti käigus selgus, et SMI andmed ei ole sobilikud juurdekasvu mudelite analüüsimiseks, kuna 5-aastase intervalliga mõõdetud andmeid ei ole siiski võimalik puu haaval kõrvutada nii, et oleks võimalik määrata viie aasta diameetri ja kõrguse juurdekasv.

Puutasemel loodud mudelite hinnangud ei pruugi olla küll piisavalt täpsed, kuna iga mõõtmine sisaldab vigu ning andmete analüüsimisel selgus, et vahel võivad mõõtmisvead olla suuremad kui perioodi juurdekasvud. Samas puistutasemel tunnuste puhul võib eeldada, et mõõtmisvead tasanduvad ning prognoositavad tulemused on juba ligilähedased reaalsusele. Puistutasemel mudelitesse sai valitud otsesed tunnused, et vähendada vigu tunnuste prognoosimise vigadest (täius, kõrgusindeks).

Töö käigus selgus, et kõrgusindeksi mudel hindab keskealiste puistutele liialt kõrge väärtuse, mistõttu oleks vajalik teha täiendavaid uuringuid mudeli parandamiseks. Samas on seda proovitükkide kõrguste mõõtmiste andmete alusel teha, kuna kõrguste mõõtmiste vead on liialt suured, et hinnata seda lühiajaliselt tehtud mõõtmiste alusel.

Täiendavalt oleks vajalik uurida ja uuendada täiuse mudeli põhimõtteid, kuna hetkel kehtiv vaid ühel tunnusel põhinev mudel ei ole piisavalt adekvaatne. Vajalik on ka tüvemahu ja tüvemoodustaja valemite uurida ja uuendada, kuna hetkel kasutusel olev Ozolinši mudel ei prognoosi tüve kuju õigesti.

## 7.3 Projekti tulemused

### Andmestikud

Empiiriliste metsanduslike andmete haldamiseks ja säilitamiseks on loodud takseermudelite ja andmestike infosüsteem (ForMIS, <http://formis.emu.ee/>), mis võimaldab ka andmesisestuse kontrolli ning erindite diagnostikat. ForMIS sisaldab nelja erinevat moodulit: proovitükkide andmebaas, kasvukäigutabelite andmebaas, dendromeetriliste mudelite andmebaas ja kasvufunktsioonide andmebaas.

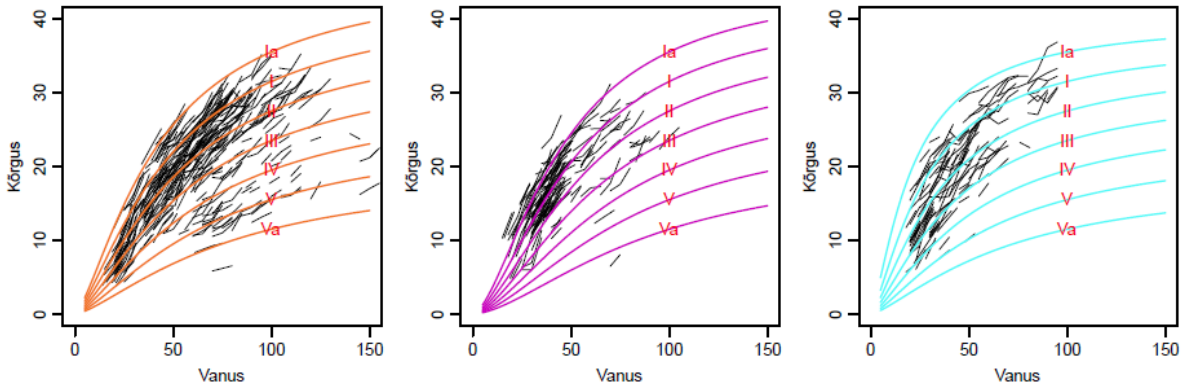
Hetkel on proovitükkide andmebaasi kantud 3 497 proovitüki mõõtmiselt kogutud 514 308 puu andmed. Empiirilistest andmetest on kogutud infosüsteemi ka paljude autorite poolt erinevatel aegadel koostatud kasvukäigutabelid kogu Euroopast. Hetkel on andmebaasis 23 Euroopa riigist 240 tabelite komplekti, milles sisaldub 1 135 kasvukäigutabelit 23 587 andmerekäigutabeliga. Dendromeetriliste mudelite andmebaas on loodud empiiriliste dendromeetriliste mudelite süstematiseerimiseks ning avalikuks kasutamiseks. Andmebaasis on peamiselt mudelid, mida kasutatakse praktilises metsamajanduses. Dendromeetriliste mudelitega töötamise lihtsustamiseks on kasutajatel võimalus kopeerida mudel valemina või laadida alla kasutajafunktsioonina.

### Olemasolevad mudelid

Olemasolevatest puistu kasvumudelitest testiti käesoleva töö käigus: (1) tagavara, diameetri ja kõrguse muutumise mudel sõltuvalt vanusest ja kasvukoha tingimustest (loodud A. Kiviste poolt 1997), (2) tagavara juurdekasvu mudel (Metsa korraldamise juhend (MKJ), loodud P. Kohava poolt 1992), (3) kõrgusindeksi mudel (MKJ, loodud A. Nilsoni poolt 2005).

A. Kiviste loodud kasvumudel on koostatud riigimetsa takseerkirjelduste andmetel ning sisaldab „keskmist metsamajanduslikku tegevust“, seetõttu sobib kasvava metsa tagavara prognoosimiseks suurema ala jaoks, kuid ei sobi majanduslike tegevuste võrdlemiseks ja raiutava puidu koguse prognoosimiseks.

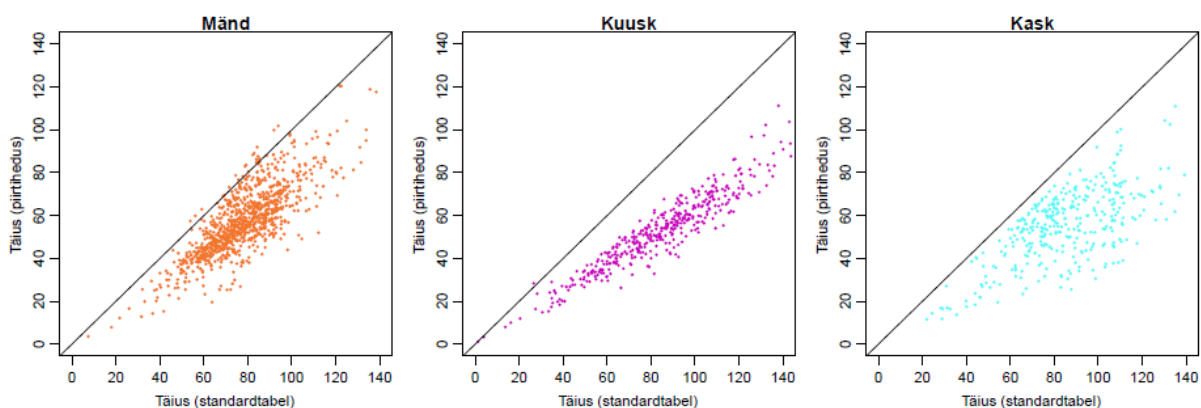
Kõrgusindeksi mudeli järgi on paljud nooremad kuusikud viljakamad kui 1A boniteet (Joonis 1), mida võib lugeda mudeli puuduseks. Kõrgusindeksi mudel on loodud kasvukäigutabelite põhjal, mis on loodud looduslike kuusikute järgi. Kuusikud on suures enamuses kultuurpuistud ning metsaselektiooni ja kultuurpuistute rajamisega on viimaste aastakümnetega nooremate kuusikute kasv kiirenenud, seetõttu vanade kasvukäigutabelite põhjal loodud kõrgusindeksi mudelid ei ole enam adekvaatsed, kuna hindavad boniteeti tegelikust väiksemaks.



Joonis 1. Kõrgusindeks männi, kuuse ja kase proovitükkidega.

Tagavara juurdekasvu mudel prognoosib keskmiselt enam-vähem, kuid üksiku puistu korral on prognoosi viga suur. Üheks mudeli puuduseks on sisendparameetrite vaheline konflikt: arvestades seda, et baasjuurdekasv sõltub boniteedist ja baasjuurdekasvu parand sõltub täiusest, siis konflikt tekib sellest, et täiuse arutamise mudel ei sõltu boniteedist, kuigi analüüs näitab, et peaks sõltuma.

Juurdekasvu mudeli üheks sisendparameetrik on täius, kuid oleme leidnud, et ka täius sellisel kujul ei peegelda tegelikkust. Täius on suhtarv, mis näitab puistu suhtelist tihedust sõltuvalt normaalpuistust. Kasutusel olev normaalpuistu mudel sõltub ainult kõrgusest, kuid varasemad uurimused on näidanud, et seda ei saa kirjeldada vaid ühe takseertunnusega ning seetõttu on uurimistöodes juba kasutusele võetud puude vahelise kauguse ja keskmise diameetri järgi arvatud piirtihedust. Joonisel 2 on toodud võrdlus nende kahe täiuse vahel, kus on näha, kui vähe kirjeldab hetkel metsakorralduses kasutatav täiuse mudel tegelikult reaalsust. Seetõttu ei saa ka pidada ka õige standardtabeli alusel arvatavat täiust juurdekasvu mudel sisendina.



Joonis 2. Standardtabeli ja piirtiheduse järgi arvatud täiuste võrdlus.

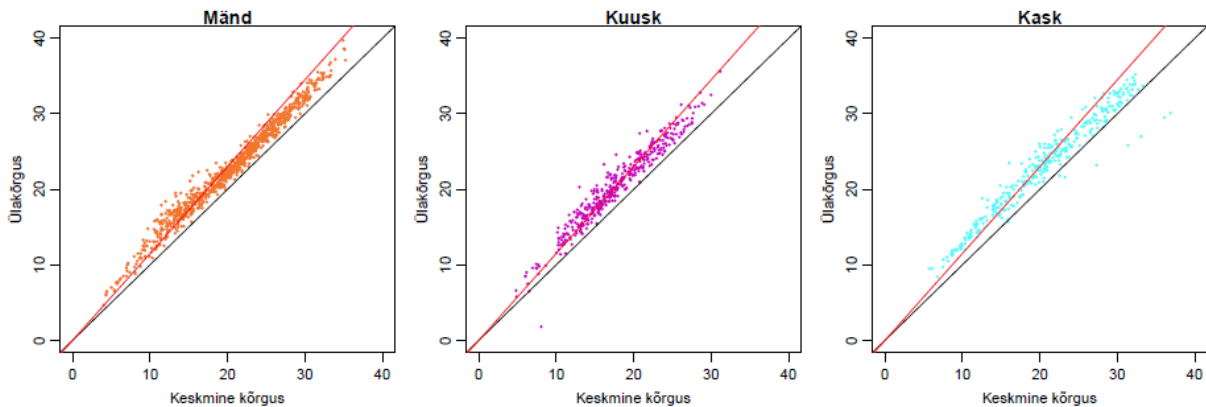
### Rinnete probleem

Metsa mudelite sisenditeks on puistu takseertunnused, mis tavaliselt arvutatakse puistu struktuurielementide ehk rinnete kaupa. Juurdekasvu prognoosimiseks on vajalik määrata puistu takseertunnused võimalikult täpselt. Samas, mitmerindeliste puistute korral ei ole puude rinnetesse jagamine üheselt

määratav, sest puurinnete vahel ei ole alati selget piiri, kuna on vertikaalselt liitunud. Nii võib rinde määramise subjektiivsusest oluliselt alla- või ülehinnata puistu rinnete takseertunnuseid.

Puhtpuistus on keskmiselt ülakõrgus 15% kõrgem keskmisest kõrgusest. Joonisel 3 on näha, kui palju on proovitükke, kus ülakõrgus on rohkem kui 15% ehk joonisel paiknevad punktid punasest joonest üleval pool. Joonisel on näha, et peamiselt just keskealistes puistutes on vertikaalne liitumine suurem ning seetõttu on arvestatud esimese rinde hulka ka sellised puid, mis peaks olema teise rinde hulgas. Kui teise rinde puud on arvestatud esimese rinde hulka, siis väheneb sellega esimese rinde keskmine diameeter ja keskmine kõrgus.

Teise rinde määramisega esimese rinde hulka põhjustab (1) esimese rinde keskmise diameetri ja kõrguse vähenemise; (2) esimese rinde rinnaspindala suurenemise. Selle tulemusena tehakse topelt viga täiuse määramisel, kuna vähendatakse nii kõrgust kui ka suurendatakse rinnaspindala.



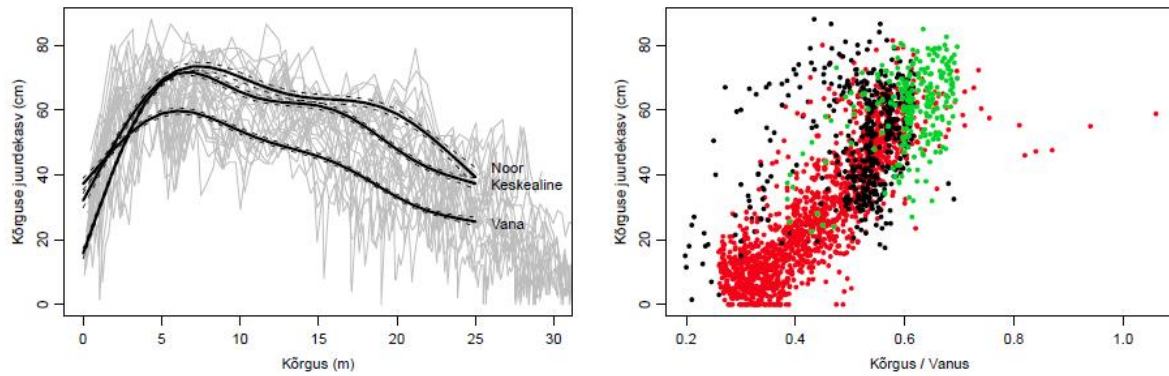
Joonis 3. Kasvukäigu püsiproovitükkidel arvatud keskmise ja ülakõrguse vaheline seos. Must joon on 1:1 joon ning punane on sirge, mis on 15% kõrgemal.

### **Puuliikide koosmõju segapuistus.**

Traditsiooniliselt prognoositakse segapuistu juurdekasvu "puhtpuistuna kasvatamise" põhimõttel, st iga segapuistu elementi (puuliiki) vaadeldakse kui puhtpuistut ning prognoositakse igale metsaelemendile sõltumatult kaaspuuliikidest. Puistu summaarne juurdekasv arvutatakse võrdeliselt puuliikide koosseisukordajale. Analüüsi tulemused näitasid, et männielemendi rinnaspindala juurdekasv mõnevõrra vähenes teiste koosseisupuuliikide osakaalu suurenemisel. Männielemendi kõrguse juurdekasv vähenes kaseelemendi suurenemisel, kuid suurenes kuuseelemendi lisandumisega. Samas olid nimetatud väikesed, mistõttu traditsiooniline meetod segapuistu juurdekasvu praktiliseks arvutamiseks piisava täpsusega.

### **Kliimamuutuse ja metsa majandamise mõju.**

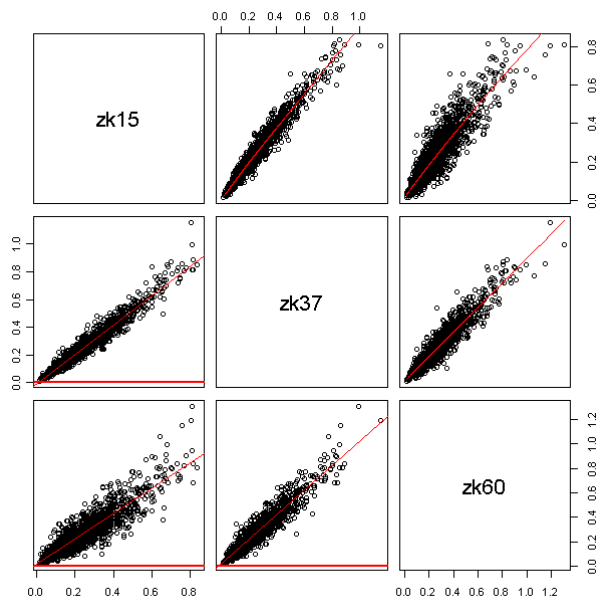
Projekti käigus on võetud üle 30 analüüsipuu ning on tehtud nende täppismõõtmised nii diameetri kui ka kõrguse aastajuurdekasvude saamiseks. Puud valiti lähedastest kasvukohtadest, kuid erineva vanusega puistutest, mis annab võrrelda erinevatest perioodidest pärinevate puude kasvukiirust. Analüüsi tulemusena selgus, et viimase 100 aasta jooksul on puude kasvukiirus statistiliselt usaldatavalt suurenenud. Seetõttu ei pruugi varem koostatud kasvumudelid enam sobida noorema metsa kasvu prognoosimiseks, mis komplitseerib puistu kasvukäigu modelleerimist. Töö jätkub endiselt väetamise katsealalt võetud puude täppisanalüüsiga.



Joonis 4. Kõrguskasvud erinevates põlvkondades.

**Kalendriaasta lokaalne mõju.** Kasvukäigu püsiproovitükkide vahetust naabrusest on diameetri kasvu täpsemaks analüüsiks võetud 1070 männilt puursüdamikke ning nendel on radiaalne juurdekasv mõõdetud 1/100 mm täpsusega. Selline andmestik annab võimaluse analüüsida kliimast tekkivat juurdekasvu varieeruvust, mis võimaldab hinnata puu ja puistu takseertunnustel põhinevate juurdekasvu mudelite prognoositäpsust. Analüüsiks sai arvatatud puu rinnasdiameetri viie aasta juurdekasv ning võrreldud sedasi kolme erinevat juurdekasvu (Joonis 5): konkreetsest aastast järgmised viis aastat (aastad 1-5), kahe aasta võrra nihkes viis aastat (aastad 3-7) ning viie aasta võrra nihkes (aastad 6-10).

Analüüsi tulemusena leidsime, et kahe järjestikuse viieaastase perioodi juurdekasvude vaheline korrelatsioon on 0,83, mis näitab juurdekasvu prognoosi minimaalseks võimalikuks veaks (suhteline jääkdispersioon) ligikaudu 35%.



Joonis 5. Naaberaastate vaheliste juurdekasvude võrdlus.

**Naabermaade mudelite rakendatavus Eestis.** Katsetasime Eesti kasvukäigu püsiproovitükkide andmetel Soome Metsainstituudis loodud puutasemel kasvumudelitel põhinevat puistu kasvusimulaatorit MOTTI. Esialgsed tulemused on paljulubavad männi, kuuse ja kase osas, kus süstemaatilisi prognoosi erinevusi ei tuvastanud. Haava osas prognoosis MOTTI-simulaator kasvu väiksemaks võrreldes tegeliku kasvuga.

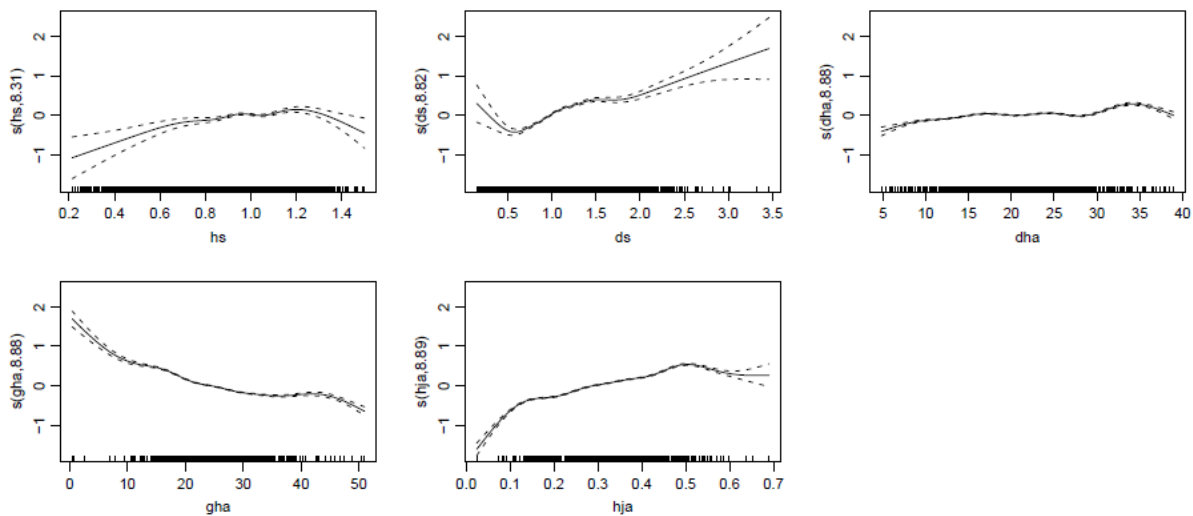
## Loodud juurdekasvu mudelid

Kasvumudelite loomisel selgus, et hetkel kasutatav kõrgusindeksi mudel ei ole kasvuheaduse tunnuse-na mudelite sisendina piisavalt täpne. Seetõttu kasutatakse mudelites võimalikult palju otseselt mõõdetavaid takseertunnuseid ning võimalusel välditakse tuletatud tunnuseid. Üksikpuu kõrguskasvu analüüsimisel selgus, et kasvuheaduse näitajana on kõrguse ja vanuse suhe hea otsene tunnus, mida kasutada mudelite sisendina.

### Puu diameetri juurdekasv

Diameetri juurdekasvule eeldasime ning leidsime ka olulised olevad järgmised tunnused (Joonis 6):

- suhteline kõrgus (hs) – varjus olevad puud kasvavad aeglasemalt;
- suhteline diameeter (ds) – suhteliselt peenemad puud on allasurutud ning kasvavad aeglasemalt;
- puistu keskmine diameeter (dha) – mida jämedam on keskmiselt puistu, seda suurem on ka üksikpuu kasv;
- puistu rinnaspindala (gha) – rinnaspindala näitab puude kasvuruumi ning sama keskmise diameetriga puistus kuid suurema rinnaspindala on keskmiselt vähem ruumi üksikpuule ning kasv on aeglasem;
- kõrguse keskmine juurdekasv (hja) – see asendab kõrgusindeksit kui kasvukoha kasvuheaduse näitajat (mis on tuletatud tunnus), suurema keskmise juurdekasvu korral on ka üksikpuu kasv kiirem.



Joonis 6. Puu diameetri juurdekasvu mõjutavate tunnuste mõju.

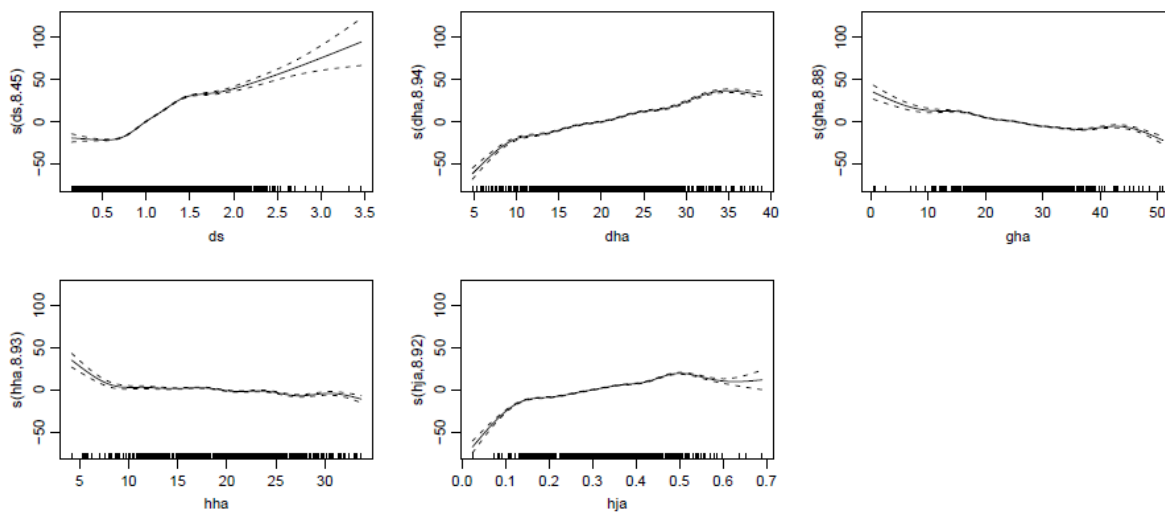
Männi puhul osutusid kõik tunnused olulisteks, kuusel osutusid kõik peale puistu keskmise diameetri, kasel samuti kõik peale puistu keskmise diameetri ning haaval osutusid kõik peale kõrguse ja vanuse suhte.

### Puu rinnaspindala juurdekasv

Puu rinnaspindala eeldame järgmist mõju (Joonis 7):

- suhteline diameeter - suhteliselt peenemad puud kasvavad aeglasemini;
- puistu keskmine diameeter - puistu keskmine diameeter avaldab mõju üksikpuu kasvule.
- puistu rinnaspindala - puistu rinnaspindala näitab puude kasvuruumi ning sama keskmise diameetri juures suurema rinnaspindalaga puistus on üksikpuu kasv aeglasem.

- puistu keskmine kõrgus -
- kõrguse keskmine juurdekasv - näitab puistu kasvuheadust, suurema keskmise juurdekasvu korral on ka üksikpuu kasv kiirem;



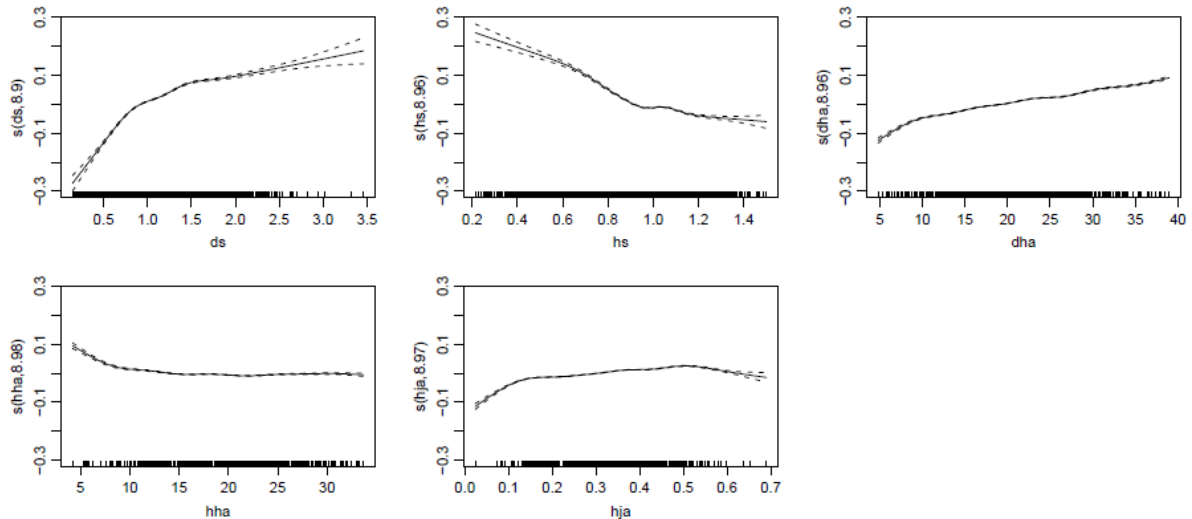
Joonis 7. Puu rinnaspindala juurdekasvu mõjutavate takseertunnuste mõju.

Männil osutusid kõik tunnused peale puistu keskmise kõrguse olulisteks. Kuusel osutusid kõik argument-tunnused olulisteks. Kasel ei osutunud puistu rinnaspindala olulisteks, kõik teised on. Haaval ei osutunud (nagu ka diameetri juurdekasvu puhul) keskmise kõrguse ja vanuse suhe olulisteks, teised tunnused on mudelis olulised.

#### *Puu tüvemahu juurdekasv*

Puu tüvemahu juurdekasvule eeldame järgmiste takseertunnuste mõju (Joonis 8):

- suhteline diameeter - suhteliselt peenemad puud kasvavad aeglasemini;
- suhteline kõrgus - varjus kasvavad puud aeglasemini;
- puistu keskmine diameeter - puistu keskmine diameeter avaldab mõju üksikpuu kasvule;
- puistu keskmine kõrgus - kõrgemate puude kõrguskasv on väiksem, seega sama diameetri juures on kõrgemate puude kasv ka väiksem;
- kõrguse keskmine juurdekasv - näitab puistu kasvuheadust, suurema keskmise juurdekasvu korral on ka üksikpuu kasv kiirem.



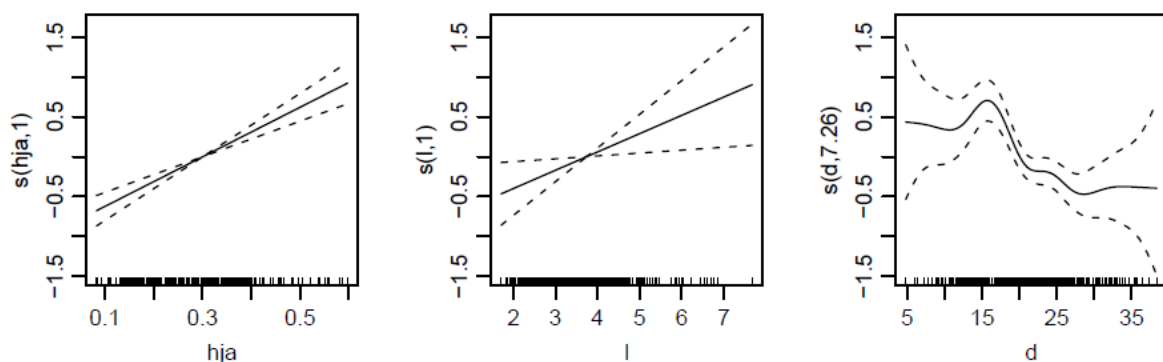
Joonis 8. Puu tüvemahu juurdekasvu mõjutavate takseertunnuste mõju.

Männil mudelis ei osutunud oluliseks puistu keskmine kõrgus, teised tunnused on kõik olulised. Kuuse tüvemahu juurdekasvu mudelis osutusid oluliseks kõik takseertunnused. Kase tüvemahu juurdekasvu mudelis osutusid kõik tunnused oluliseks. Haaval ei osutunud järjekordselt oluliseks keskmine kõrguse ja vanuse suhe nagu ka teiste tunnuste juurdekasvude puhul.

#### *Puistu keskmise diameetri juurdekasv*

Puistu keskmise diameetri juurdekasvule eeldame järgmiste takseertunnuste mõju (Joonis 9):

- keskmine kõrguse juurdekasv (hja) - viljakamates kasvukohtades on kasv kiirem;
- puude vaheline kaugus (l) - mida tihedam on puistu seda rohkem on ressursi kasutavaid puid ning puud kasvavad aeglasemini;
- diameeter (d) - mida jämedam on keskmine puu, seda suurem on kambiumi pind, mis kasutab toitaineid, seetõttu eeldame jämedama puu korral väiksemat juurdekasvu.



Joonis 9. Puistu diameetri juurdekasvu mõjutavate takseertunnuste mõju.

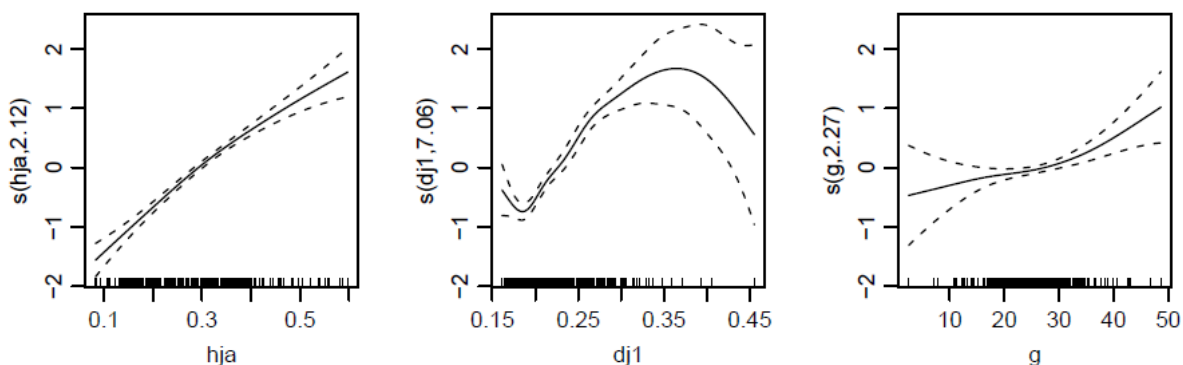
#### *Puistu rinnaspindala juurdekasv*

Rinnaspindala juurdekasvule eeldame järgmist mõju (Joonis 10):

- keskmine kõrguse juurdekasv (hja) - viljakamates kasvukohtades on kasv kiirem;



- diameetri pöördväärtus ( $dj1$ ) - mida jämedam on keskmine puu, seda suurem on kambiumi pind, mis kasutab toitaineid, seetõttu eeldame jämedama puu korral väiksemat juurdekasvu, kuid pöördväärtuse korral on matemaatiline käitumine tunnusel vastupidi;
- rinnaspindala ( $g$ ) – sama keskmise diameetri korral, kuid suurem rinnaspindalaga puistus on rohkem puid, mille summaarne rinnaspindala kasv on suurem võrreldes jämedamate kui vähe- mal hulgal olevate puude korral.

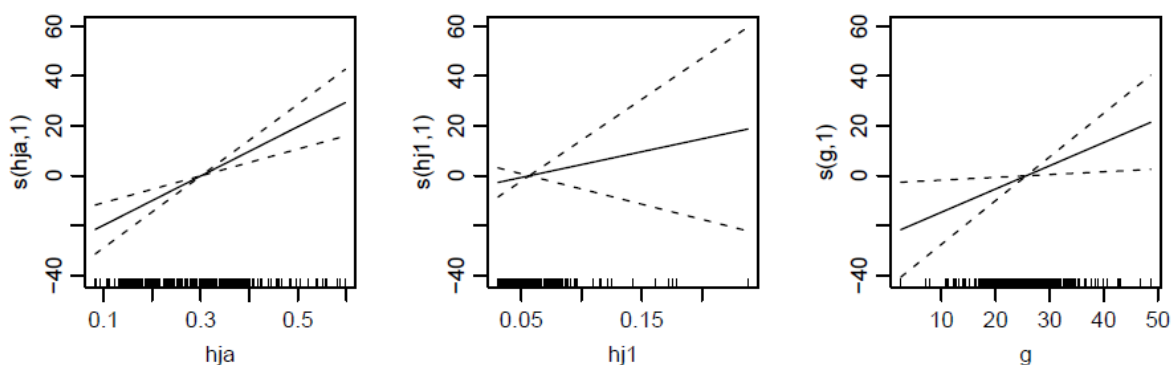


Joonis 10. Puistu rinnaspindala juurdekasvu mõjutavate tunnuste mõju.

Üldiselt osutusid tunnused olulisteks, v.a. kasel puistu rinnaspindala.

#### *Puistu tagavara juurdekasv*

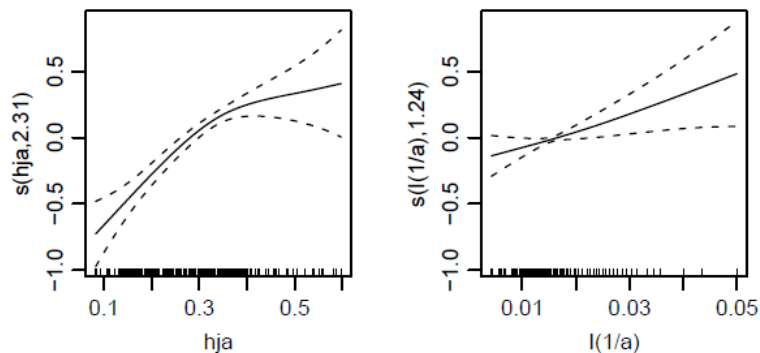
Puistu tagavara juurdekasvu peamiseks mõjutajateks (Joonis 11) võib lugeda keskmist aastast juurdekasvu ( $hja$ ), kõrguse pöördväärtust ( $hj1$ ) ning puistu rinnaspindala ( $g$ ). Kuigi kõrguse pöördväärtus ei osutunud mudelis just oluliseks, parandas see siiski mudeli prognoosivõimet ning sobib bioloogiliselt siiski mudelisse. See näitab nii puistu keskmist kõrgust kui ka täiendab kõrguse keskmist juurdekasvu ning joonisel 11 on näha, et üldiselt on käitumine sirgjooneline.



Joonis 11. Puistu tagavara juurdekasvu mõjutavate tunnuste mõju.

#### *Puistu keskmise kõrguse juurdekasv*

Kuna töö käigus leidsime, et kõrguse kasv on viimasel ajal kiirenenud, siis on selle modelleerimine ras- kendatud. Leidsime, et peamiselt võib kirjeldada (Joonis 12) kõrguse juurdekasvu kõrguse ja vanuse suhtena ( $hja$ ) ning vanuse pöördväärtusega ( $1/a$ ). Nende tunnuste käitumine on üldiselt lineaarne.



Joonis 12. Kõrguse juurdekasvu mõjutavate takseertunnuste mõju.

### Jätkuvad vajalikud uuringud

Jätkata tuleks uuringuid kõrgusindeks parandamiseks ning korrigeerimiseks muutuvate kliimatingimuste tõttu, et muuta kõrgusindeksi mudel vähem sõltuvaks kliimatingimustest.

Käesoleva töö käigus leiti, et kasutatav täiuse mudel ei kirjelda puistu tegelikku suhtelist kasvuruumi ning vajab uuendamist. On tehtud uuringuid piirtiheduse leidmiseks ning sellest sõltuva täiuse leidmiseks ning selleks on kasutatud naabermaade kasvukäigutabeleid. Siiski on vajalikud täiendavad analüüsid, et saada kohalikele tingimustele vastav piirtiheduse mudel. Lisaks piirtihedusele ehk maksimaalse tihedusele on vajalik uurida ka optimaalset kasvu tihedust.

Käesoleva töö käigus kasutati tagavara arvutamiseks Ozolinši tüvemoodustajat, kuid täpsemate tagavara juurdekasvude prognoosimiseks on siis vajalik luua Eesti puistutele sobilik tüvemoodustaja ja sellega koos tüvemahu mudelid.

### 8. PROJEKTIGA HAAKUVAD DOKTORI- JA MAGISTRITÖÖD:

Allan Sims. 2009. Takseermudelite ja andmestike infosüsteem puistu kasvukäigu modelleerimiseks. Doktoritöö. Eesti Maaülikool.

Maris Hordo. 2011. Dendroklimatoloogiliste meetodite kasutamine puistu kasvukäigu modelleerimisel. Doktoritöö. Eesti Maaülikool.

Ando Lilleleht. 2010. Puistu juurdekasvu ja koosseisu vahelisi seoseid. Magistritöö. Eesti Maaülikool.

Loetleda projekti raames kaitstud teadustööd.

### 9. PROJEKTI RAAMES AVALDATUD PUBLIKATSIOONID:

Lilleleht, A., Sims, A., Kiviste, A., Gadow, K. von. Relationships between Stand Volume Growth and Species Composition in Estonian Pine Dominated Mixed Forests. *European Journal of Forest Research*. (Käsikiri).

Lilleleht, A. 2011. Seoseid puistu juurdekasvu ja koosseisu vahel hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) enamusega segametsades. *Metsanduslikud Uurimused*. 54: 18-27.

Kiviste, A., Kaar, E., Sims, A. 2010. Karjääripuistute kasvukäik. *Kaar, Elmar; Kiviste, Külliki (Toim.). Maavarade kaevandamine ja puistangute rekultiveerimine Eestis*. 164 - 184. Tartu.

Metslaid, S., Sims, A., Kangur, A., Hordo, M., Jõgiste, K., Kiviste, A., Hari, P. 2011. Growth patterns from different forest generations of Scots pine in Estonia. *Journal of Forest Research*. 16(3): 237-243

Schmidt, M., Kiviste, A., Gadow, K. von. 2011. A spatially explicit height–diameter model for Scots pine in Estonia. *European Journal of Forest Research* 130: 303-315.

Padari, A., Metslaid, S., Kangur, A., Sims, A., Kiviste, A. 2009. Modelling stand mean height in young naturally regenerated stands - a case study in Järvelja in Estonia. *Baltic Forestry*. 15 (2):226-236.

Laarmann, D., Korjus, H., Sims, A., Stanturf, J.A., Kiviste, A., Köster, K. 2009. Analysis of forest naturalness and tree mortality patterns in Estonia. *Forest Ecology and Management*. 258S. S187–S195.

Hordo, M., Metslaid, S., Kiviste, A. 2009. Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) radial growth to climate factors in Estonia. *Baltic Forestry* 15 (2): 195–205

Sims, A., Kiviste, A., Hordo, M., Laarmann, D., Gadow, K.v. 2009. Estimating Tree Survival: a Study based on the Estonian Forest Research Plots Network. *Annales Botanici Fennici*. 46:336-352.

Anda viited projekti raames avaldatud teadusartiklite kohta (terviktekstid esitada aruande lisadena)

<b>10. Projekti juht</b> (nimi): Allan Sims	<b>Allkiri:</b>	<b>Kuupäev:</b> 24.11.11
---	-----------------	--------------------------

<b>11. Taotleja esindaja kinnitus aruande õigsuse</b> (nimi, amet):	<b>Allkiri:</b>	<b>Kuupäev:</b>
--	-----------------	-----------------

NB! Aruanne esitada elektrooniliselt e-posti aadressil: [kristjan.tonisson@rmk.ee](mailto:kristjan.tonisson@rmk.ee)