

Eesti Maaülikool  
Metsakasvatuse ja metsaökoloogia õppetool

**Riigihanke 191205**  
**Eesti puistute biomassi mudelite väljatöötamine**  
**2017-2020**

**LÕPPARUANNE**

**Veiko Uri**

Tartu, 2020

## 1. Sissejuhatus

Erinevate rahvusvaheliste lepingute raames on Eestil kohustus raporteerida riigi kasvuhoonegaaside sidumisest ja süsinikuvarudest ning voogudest. Muuhulgas on Eesti kohustatud kord aastas esitama Euroopa Komisjonile ja ÜRO-le inimtekkeliste kasvuhoonegaaside inventuuriaruande, lisaks Kyoto protokolliga seotud aruande, samuti raportid kasvuhoonegaaside sidumisest ja muutustest metsanduse ning maakasutuse valdkondades (LULUCF). Kuigi esitatud andmed peaks põhinema relevantsetel teadusuuringutel ja regionaalsetel mudelitel, on Eestis seni kasutatud IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) biomassi laiendustegurite (BCEF – biomass conversion and expansion factor) vaikeväärtusi, kuna regionaalsed, riigispetsiifilised mudelid on seni puudunud. Samas sõltuvad IPCC laiendustegurid paljudest erinevatest muutujatest, mistõttu vaikeväärtuste kasutamine ei anna piisavalt täpset hinnangut Eesti metsaressursist. Et luua Eesti tingimustesse sobivad regionaalsed metsapuude biomassi mudelid peamiste puuliikide kohta, algatati 2017. aastal riigihange nr. 191205 „Eesti puistute biomassi mudelite väljatöötamine“, mille sai täitmiseks Eesti Maaülikool (EMÜ). Mudelite väljatöötamiseks vajalikud väli- ja labortööd, samuti mudelite koostamine viidi läbi EMÜ metsakasvatuse ja metsaökoloogia õppetoolis professor Veiko Uri juhtimisel.

Vastavalt riigihanke tehnilisele kirjeldusele oli lõppenud uuringu eesmärgiks välja töötada Eesti tingimustesse sobivad mudelid maapealse ja maa-aluse biomassi, samuti selle erinevate komponentide (tüvi, oksad okkad, lehed juured jne.) arvutamiseks hariliku männi (*Pinus sylvestris*), hariliku kuuse (*Picea abies*) ja kase (*Betula sp.*) kohta. Koostatud originaalmudelite põhjal on võimalik saada täpsem riigispetsiifiline hinnang riikliku kasvuhoonegaaside inventuuri jaoks, samuti võimaldavad regionaalsed biomassi mudelid hinnata kogu Eesti metsaressurssi paremini.

Riigihanke tehnilises kirjelduses esitatud lähteülesanne nägi ette, et mudelite koostamiseks vajalikud mudelpuud tuleb valida paljudest erinevatest puistutest, mis võimaldaks universaalsete mudelite rakendamist riigiülesele. Sealhulgas peavad valimis oleme esindatud erineva vanusega puistud, erinevad kasvukohatüübid ja boniteedid. Mudelite koostamisel tuleb argumenttunnustena kasutada metsa inventeerimisel mõõdetavaid või nendest lihtsalt tuletatavad karakteristikud. Mudelite koostamisel on oluliseks eelduseks, et biomassi fraktsioon ei ole sõltumatu tunnus, vaid need korreleeruvad sama puu piires. Mudelid peaksid olema lihtsalt rakendatavad ja lihtsalt mõõdetavatest takseertunnustest tuletatavad, samas piisavalt täpsed. Nagu on kirjutanud Eesti metsakorralduse üks suurkujusid, professor Artur Nilson, tuleb mudelite koostamisel leida tasakaal täpsuse ning universaalsuse vahel, metsanduslik mudel peab olema otstarbekas ja mugav (Nilson, 2014).

Vastavalt riigihanke tehnilises kirjelduses toodud suunistele võeti mudelite koostamiseks vajalike andmete kogumisel ja mudelite loomisel aluseks J. Repola poolt kasutatud meetodika (Repola 2008; 2009) ja mudelite üldkujud, seda vastavate kohandustega Eesti tingimustele.

Tuginedes uuringu käigus kogutud mahukale andmestikule (165 männi mudelpuud, 127 kuuse mudelpuud ja 117 kase mudelpuud) koostati maapealse biomassi üldmudelid, samuti

eraldi mudelid puude üksikfraktsioonide (tüve puidu, tüve koore, okste, kuivanud okste, okaste/lehtede, kännu ja juurte) kohta.

Allpool on toodud üksikasjalik ülevaade tööde käigust, saadud tulemustest ja koostatud mudelitest.

## **2. Metoodika ja tööde kirjeldus.**

Riigihanke tehnilises kirjelduses toodud probleempüstitus nägi ette, et mudelite koostamiseks vajalikud mudelpuud tuleb valida erinevatest puistutest, mis võimaldaks universaalsete mudelite koostamist ning nende rakendamist riigiülesele. Sealhulgas peavad puistutest olema esindatud erineva vanusega metsad, erinevad kasvukohatüübid, boniteetid ning võimalusel tuleks arvestada ka hooldusraiate mõjuga. Vastavalt nendele esitatud nõuetele valiti peamiselt RMK ja Järvselja puistute andmebaasidest välja eraldised sobivate mudelpuude leidmiseks. Sellele järgnes puistute ülevaatus looduses ja kui tingimused vastasid nõuetele, mõõdeti relaskoobiga puistu rinnaslõikepindala ning langetati valitud mudelpuu või mudelpuud. Üksikjuhtumitel valiti mudelpuid ka erametsadest. Ligikaudu 30% mudelpuude puhul nägi metoodika ette ka maa-aluse osa biomassi hindamist, selleks tuli mullast välja pesta kogu mudelpuu juurestik. Kuna see töö eeldas suurema koguse vee olemasolu läheduses (maksimaalselt 100 m raadiuses), tekitas see nõue lisapiiranguid mõningate puistute valikul.

Samuti nägi uuringu tehniline kirjeldus ette, et mudelite koostamisel tuleb argumenttunnustena kasutada metsa inventeerimisel kogutud või nendest lihtsalt tuletatavad karakteristikud nagu näiteks puu rinnasdiameeter, võraalgus, rinnaspindala ja kõrgus, männikute ja kaasikute puhul tuleks arvestada ka boniteeti, et oleks esindatud nii viljakatel kui ka vähem viljakatel kasvukohatüüpidel kasvavaid puistud.

### **2.1 Mudelpuude maapealse biomassi hindamine**

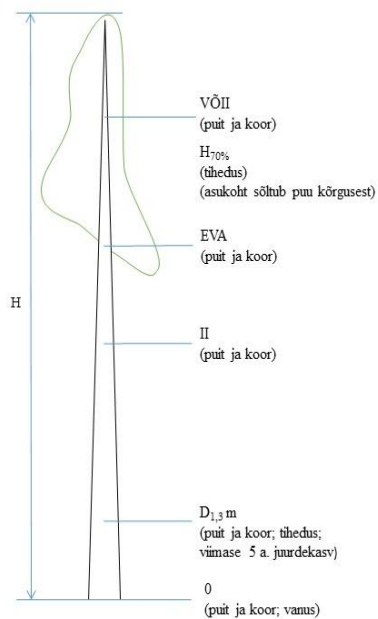
Projekti lähteülesanne nägi ette maapealse biomassi hindamist vähemalt 150 männi, 100 kuuse ja 110 kase mudelpuu põhjal.

Üldjoontes toimus mudelpuude maapealse osa töötlemine järgmiselt:

- Valitud puu langetati, mõõdeti lindiga puu kõrgus (pikkus), samuti elusvõra algus ja arutati võra pikkus.
- Puu elusvõra jagati neljaks võrdse pikkusega sektsiooniks, oksad laasiti ja kaaluti metsas sektsioonide kaupa. Igast sektsioonist valiti üks keskmine mudeloks (keskmine nii mõõtmetelt, kui ka lehtede/okaste massi järgi). Mudelpuude kõik kuivad oksad koguti kokku ja kaaluti metsas ühe fraktsioonina.
- Võrast allapoole jääv tüvi jagati kaheks sektsiooniks: 0-1,3 m; 1,3 m kuni elusvõra alguseni. Et elusvõra jagati neljaks, siis vastavalt ka tüvi selles osas jagunes neljaks sektsiooniks.

Mõõdeti kännu diameeter, tüve diameeter 1,3 m kõrguselt, samuti iga sektsiooni otsadiameeter. Diameetrid mõõdeti kõikidel juhtudel kahes suunas ( $d_1$  ja  $d_2$ ), hiljem arvutati nende keskmine. Kõik tüvesektsioonid kaaluti metsas, jämedamate mudelpuude puhul kaaluti raskemad tüveosad väiksemate osade kaupa (et neid oleks võimalik tõsta kaalule) (Joon. 2), hiljem nende massid liideti ja saadi tüvesektsiooni kogukaal.

- Tüvesektsioonide (0; 1,3; EVA; VÕII) alumisest otsast, samuti II tüvesektsiooni keskelt lõigati analüüsiketast tüvekoore osakaalu hindamiseks (joon. 1). Puidu tiheduse määramiseks võeti analüüsikettad kahest tüve osast: rinnakõrguselt ( $D_{1,3}$  ketas) ja 70% puu kõrguselt). Puu viimase 5 aasta radiaaljuurdekasvud mõõdeti  $D_{1,3}$  kettalt (Joon. 1).



**Joonis 1.** Mudelpuu erinevat analüüsiketaste asukohad



## Joonis 2. Mudelpuu töötlemine metsas.

Mudeloksad, samuti tüvekettad toimetati laborisse, kus toimus nende edasine töötlemine. Mudeloksad jagati laboris omakorda fraktsioonideks (okkad/lehed, oksad, käbid) ning neist eraldati alamproovid kuivainesisalduse määramiseks. Alamproovid kuivatati kuivatuskapis temperatuuril 105 °C kuni püsiva massi saavutamiseni ja kaaluti.

Mudelpuu kuivanud oksad kaaluti ühe fraktsioonina, sellest eraldati samuti alamproov, mis kuivatati ja kaaluti.

Erinevalt kõrguselt võetud tüveketastelt eraldati koor ja puit (koore ja puidu osakaalu hindamiseks kogu tüvemassist) (Joon. 1), need fraktsioonid kaaluti eraldi, seejärel kuivatati kuivatuskapis temperatuuril (105 °C) ja määrati nende kuivmassid.

Tüve  $D_0$  kettalt loendati aastarõngad puu vanuse määramiseks. Selleks kettaid kuivatati toatemperatuuril ligikaudu nädal, seejärel need lihviti, et aastarõngad oleksid paremini loetavad. Mõnel juhul, kui aastarõngad olid väga halvasti loetavad, kettad skaneeriti ja aastarõngad loendati programmiga WinDENDRO.

Tüvepuidu tihedust hinnati kahelt analüüsikettalt ( $D_{1,3}$  ja  $H_{70\%}$ ) võetud proovide alusel. Igalt selliselt kettalt võeti 3 proovi nii, et need iseloomustaksid keskmist tüvepuidu tihedust ketta erinevatest piirkondadest säsist kuni kooreni. Proovid kuivatati temperatuuril 105° C absoluutkuivaks (niiskus 0%), milleks kulub hinnanguliselt umbes nädal. Proovide kuivamist ja püsiva massi saavutamist kontrolliti korduvkaalumise teel. Tiheduse määramiseks kasutati spetsiaalset lisaseadmega kaalu Kern EMB-V 2000-2V, millega proov kaaluti, seejärel uputati vees ning kaaluti uuesti. Arvestades vee tihedust kindla temperatuuri juures (17° C=0,9982 g cm<sup>-3</sup>), puiduproovi kaalu õhukeskkonnas ja vees, arvutas kaal automaatselt mõõdetava puiduproovi tiheduse.

Viimase 5 aasta juurdekasv mõõdeti kõikidel mudelpuudel  $D_{1,3}$  kettalt. Eelnevalt kettad kuivatati ja lihviti. Töödeldud kettad skaneeriti ja aastarõngaste radiaaljuurdekasvud mõõdeti programmiga WinDENDRO.

## 2.2 Mudelpuude maa-aluse biomassi hindamine

Töö tehniline kirjeldus nägi ette maa-aluse biomassi hindamist iga uuritava puuliigi puhul vähemalt kolmekümnel mudelpuul (ca 30% mudelpuudest). Kuna koostatavad mudelid peavad olema aditiivsed, st. biomassi erinevate üksikkomponentide funktsioonid peavad baseeruma sama analüüsipuu mõõtmistulemustel. Seega peab iga mudelpuu maa-aluse biomassi hindamisele eelnema puu maapealse biomassi hindamine. Kõikidel juhtudel toimus esmalt mudelpuu maapealse osa töötlemine ja puu mõõtmine, sellele järgnes maa-aluse osa eraldamine ja töötlemine (puhastamine, fraktsioneerimine).

Maa-aluse osa biomassi hindamiseks kasutati juurestike väljapesemise meetodit, mis üldjoontes õigustas end hästi: meetod tagas töö efektiivsuse ja kvaliteedi. Kuna meetod oli uudne, kasutati seda Eestis esmakordselt, siis toimus projekti vältel ka meetodi pidev arendus ja täiendamine. Alustati ühe pumbaga, aga suure töömahu tõttu võeti projekti teisel poolel kasutusele juba kolme võimsat mootorpumba, nendega pumbati vesi suure surve all proovitükile ja juurestiku ümber olev muld uhuti eemale. Vesi koos tekkinud settega pumbati alalt eemale elektriliste tsentrifugaalpumpadega, nende käitamiseks kasutati autonoomset elektrigeneraatorit. Kuna selline meetod eeldab suuremas koguses vee olemasolu puistu ja mudelpuude lähedal, siis seadis see lisapiirangu sobivate mudelpuude valikule. Sobivate alade leidmiseks tehti esmalt vastav päring andmebaasidest (kasutati tiikide ja kraavide kaardikihti), see võimaldas leida sobivad katsealad kuivenduskraavide ja tiikide lähedusest.

Kuna suuremate mudelpuude juurestikud olid massiivsed ja korraga tervet juurestikku välja tõmmata ei ole võimalik, siis väljapesemise käigus lõigati kännu küljest järk-järgult lahti suuremaid juuri, need pesti mullast vabaks ja tõmmati vintside abil eraldi mullast välja. Järele jäänud känd (südamik) vintsiti samuti välja, suuremate kändude puhul kasutati lisaks plokkidega kombineeritud vintsisüsteeme (Joon. 3). Kõik mullast eemaldatud juured ja kännud pesti metsas surveveega suuremast mullast võimalikult puhtaks. Seejärel tükeldati juurestik väiksemateks osadeks, et neid oleks võimalik pakkida puude kaupa suurtesse kilekottidesse. Pakitud juurestikud transporditi edasiseks puhastamiseks ning fraktsioneerimiseks metsamaja laborisse. Känd ja jämedamad juured kaaluti metsas ning neilt lõigati alamproovid kuivaine määramiseks. Ka need alamproovid pakiti kilekottidesse ning toimetati laborisse.



**Joonis 3** Näiteid mudelpuude juurestike väljapesemisest

Metsamajas pesti kõik juurefraktsioonid hoolikalt mullast täiesti puhtaks ja kaaluti. Puu maa-alune osa jagati järgmisteks fraktsioonideks: känd, juured  $d > 10$  cm,  $d = 5-10$  cm,  $d = 1-5$  cm ja  $d < 1$  cm. Kuigi ette antud metoodika nõudis vaid üle 1 cm juurefraktsioonide hindamist, siis suurema täpsuse huvides jagati juurestik detailsemalt. Lisatud andmefailides on esitatud ka alla 1 cm juurefraktsiooni massid.



**Joonis 4.** Juurestike fraktsioneerimine laboris.

Kõikidest fraktsioonidest eraldati alamproovid, mis kuivatati kuivatuskapis ( $105$  °C) püsiva kaaluni, seejärel määrati nende kuivmass. Saadud kuivaine suhte ning fraktsioonide masside põhjal arvutati igale mudelpuule erinevate juurefraktsioonide kuivmassid ning nende summeerimisel saadi kogu maa-aluse osa (järe juurefraktsioon) biomass.

### **3. Projekti käik ja tulemused.**

Vastavalt hankedokumentides toodud tehnilise kirjeldusele koostati projekti esimeses etapis detailne tööplaan, kus töötati välja mudelpuude valiku põhimõtted erinevate puuliikide kohta, see plaan oli aluseks erinevate tööde kavandamisel ja projekti täitmisel.

#### **Harilik mänd (*Pinus sylvestris*)**

Harilik mänd on uuringusse kaasatud kolmest puuliigist kõige suurema ökoloogilise amplituudiga, ühelt poolt kasvavad männikud nii viljakates kasvukohtades (palu- ja laanemetsad) ja teisalt ka ebasoodsates, sageli ekstreemsetes kasvukohtades (nõmme- ja soometsad). Sellest tulenevalt oli männi mudelpuude valiku seisukohalt optimaalne jaotus kasvukohtade, st. sisuliselt boniteetide lõikes mudelite üldistusvõime osas oluline küsimus. Kasvukohatingimustest tulenevalt on nii puude produktsioonivõime kui ka biomassi allokatsioon erinev. Võimalikult universaalsete mudelite loomiseks planeeriti männi puhul võtta mudelpuid võimalikult paljudest erinevatest kasvukohatüüpidest.



Vajalike mudelpuude valikul otsustati männikuid käsitleda kolme erineva boniteedirühmana: Ia – II; III – IV ja V - Va. Mudelpuude jaotamisel erinevate boniteediga puistute vahel lähtuti Eesti männikute boniteediklasside jaotusest. Kõrgeboniteedilised männikud (Ia-II) moodustavad 61% kõikidest Eesti männikutest (Aastaraamat Mets 2016), III - IV bon. puistud moodustavad 28% ning V-Va boniteedi puistud vaid 11%. Samas proportsioonis kavandati analüüsiks võtta mudelpuid erineva boniteediga puistutest. Planeeritud 150 männi mudelpuust langetati kõige rohkem puid Ia-II bon. puistutest (92 tk) ja kahest järgnevast boniteedigrupist vastavalt 42 ja 16 mudelpuud.

Teine oluline tegur mudelpuude valikul oli nende proportsionaalne jagunemine vanuseklasside lõikes. Ka siin lähtuti Eesti männipuistute vanuselisest jaotusest (Aastaraamat Mets 2016).

Seega diferentseeriti valitavad mudelpuud lähtudes kahest peamisest faktorist (boniteet ning vanus) ning mõlemal juhul järgiti vastavate puistute proportsioone Eesti metsades. Detailne mudelpuude jaotus vanuse- ja boniteediklasside lõikes esitati projekti esimese etapi vahearuanandes (Projekti I etapi vahearuanne, Tabel 1).

### **Harilik kuusk (*Picea abies*)**

Harilik kuusk levib Eestis valdavalt vaid viljakatel ja väga viljakatel muldadel: 76% kuusikutest kasvavad Ia-I boniteedi puistutena ning 93% kuusikutest kuulub boniteediklassi vahemikus Ia-II (Aastaraamat Mets 2016). Seega ei peetud kuuse biomassi mudeli koostamisel vajalikuks mudelpuude diferentseerimist boniteedi järgi küll aga jagati vajalikud mudelpuud vanuse põhjal (Projekti I etapi vahearuanne, Tabel 2). Kokku oli ette nähtud kasutada mudelite koostamiseks 100 kuuse mudelpuu andmed, neist 30 puhul tuli hinnata ka maa-alust biomassi. Mudelpuude valikul lähtuti peamiselt nende vanuselisest jaotusest, aluseks võeti Eesti kuusikute vanuseline struktuur (Aastaraamat Mets 2016), kõik kuuse mudelpuud võeti viljakate kasvukohatüüpide puistutest. Kuna puistute vanus ja nende keskmine diameeter on omavahel korrelatsioonis, siis erinevas vanuses puistute valik tagas ka erineva rinnasdiameetriga puude piisava esindatuse valimis.

### **Kased (*Betula sp.*)**

Kaasikute puhul Eestis tervikuna on puistute varieeruvus suur, sest tegemist on kahe ökoloogiliselt väga erineva puuliigiga. See kajastub ka nende puistute jagunemisel boniteediklassidesse: suurim osa kaasikutest (70%) kuulub I ja II boniteediklassi ja väga produktiivseid (Ia bon.) kaasikuid on 11%. Vaid 5% kaasikutest kuulub IV-V boniteeti, need on eeldatavasti peamiselt sookaasikud. Kuna metsade takseerimisel kaske liigipõhiselt ei eristata, siis otseselt on nende kahe liigi osakaalu Eesti metsades ka suhteliselt keeruline hinnata. Kuid kuna arukaasikud kasvavad vaid parasniisketil ja peamiselt viljakatel kasvukohtadel, seevastu turvasmullad ning liigniisked alad on sookaasikute päralt, siis kaasikute jagunemine erinevate kasvukohatüüpide lõikes iseloomustab kaudselt ka nende kahe puuliigi puistute jagunemist. Ligi pooled (ca 50%) kaasikutest kasvavad palu-, laane- ja

salumetsades ja need on eeldatavalt arukaasikud. Oluline osa (27%) kaasikutest kasvab soovikumetsades ja ligikaudu viiendik kõdusoometsades. Soometsades kasvab vaid 5% kaasikutest (Aastaraamat Mets 2016). Samas võib kõdusookaasikutest mingi osa olla ka arukaasikuid, näit. õhukese turbakihiga ja hästi väljakujunenud kõdusooaladel, mis on soodsa veerežiimiga. Vastavalt tehnilisele kirjeldusele tuli mudelite koostamiseks kasutada vähemalt 110 kase mudelpuu andmeid ning neist 30 puul hinnata ka maa-aluse osa biomassi. Ka kase mudelpuude jagunemine vanuse ja boniteediklasside lõikes on detailselt esitatud projekti I etapi vahearuandes (Tabel 3).

Tegelik projekti käigus langetatud ning fraksioneeritud mudelpuude arv kujunes kõikide puuliikide lõikes siiski suuremaks planeeritust.

Mänd - planeeriti 150 mudelpuud, langetati ja töödeldi 165 puud, so. 15 puud rohkem.

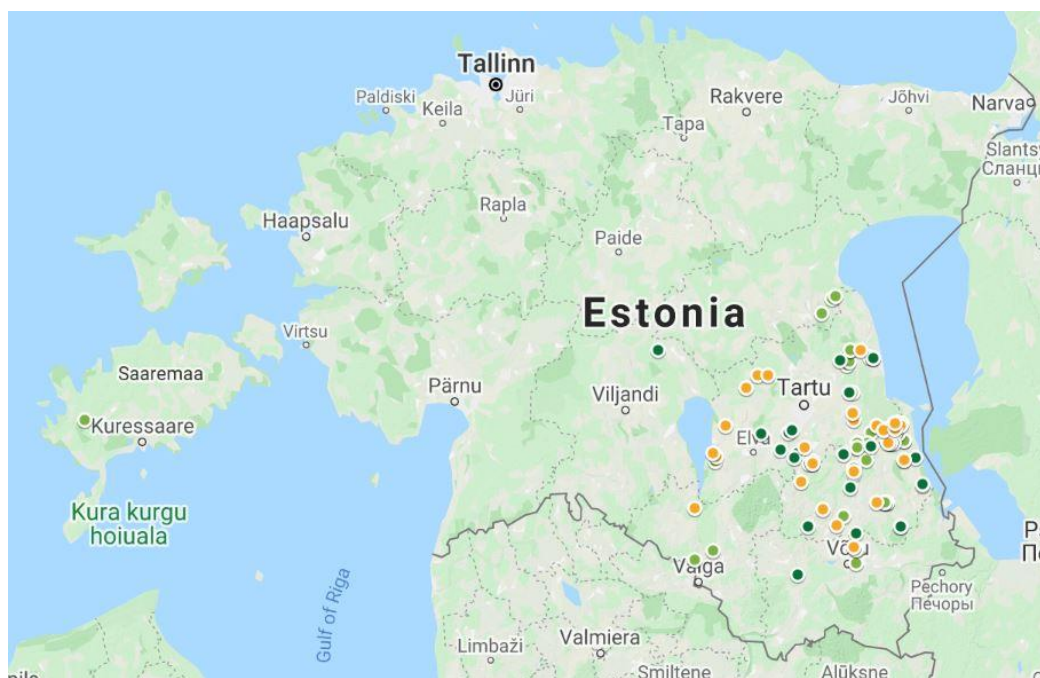
Kuusk - planeeriti 100 mudelpuud, langetati ja töödeldi 127 puud, so. 27 puud rohkem.

Kask - planeeriti 110 mudelpuud, langetati ja töödeldi 117 puud, so. 7 puud rohkem.

Ette nähtust suurem mudelpuude arv oli tingitud sellest, et paljud algselt maa-aluse biomassi hindamiseks planeeritud mudelpuud osutusid erinevatel põhjustel selleks mittesobivateks, enamasti oli põhjuseks piisavas koguses vee puudumine läheduses. Kuigi maapealse osa biomass nende puude puhul hinnati (st. puud langetati ja töödeldi), siis juurestik jäi hindamata. Nende asemele tuli leida uued, sobivamad mudelpuud. Aga kuna maa-aluse biomassi hindamisega peab kaasnema ka maapealse biomassi hindamine (mudelid peavad olema aditiivsed), siis see viiski uuringu käigus töödeldud summaarse mudelpuude arvu suurenemiseni.

### 3. Tulemused

Nagu eespool kirjeldatud, langetati ja töödeldi projekti käigus kokku 409 mudelpuud (ette oli nähtud 360 mudelpuud). Põhiline osa puistutest, kust mudelpuid langetati, kasvasid Lõuna-Kagu- ja Ida- Eesti piirkonnas (Joon. 5). Alad püüti valida nii, et kaetud oleks võimalikult lai kasvukohatüüpide varieeruvus, esindatud on nii mineraal- kui turvasmuldadel kasvavad puistud.



**Joonis 5.** Projekti täitmiseks valitud puistute paiknemine (heleroheline - mänd, tumeroheline - kuusk, oranž - kask). Paljudel juhtudel võeti ühest puistust mitu mudelpuud.

#### 3.1 Mänd

Kokku põhinevad nii projekti aruanne kui ka koostatud männi biomassi mudelid 165 männi mudelpuu andmetel, neist 30 puu puhul on olemas andmed ka puu maa-aluse osa biomassi kohta (Lisa 1, Männi mudelpuude koondfail). Andmestik on esindatud kõik boniteediklassid ja mitmed erinevad kasvukohatüübid.

Et mänd kasvab väga erinevates kasvukohatüüpides, siis püüti mudelpuude valikul katta seda laia kasvutingimuste erinevusest põhjustatud varieeruvust, st. püüti töötada selles suunas, et võimalikult paljud kasvukohatüübid oleks esindatud. Maapealse biomassi allokatsiooni mõjutab küll puistu boniteet, aga mitte otseselt kasvukohatüüp (st. tõenäoliselt on sama täiuse ja keskmise kõrgusega V boniteedi nõmme- ja loomänniku okste-, okaste- ja tüvemassi proportsioonid suhteliselt sarnased). Samas võivad kasvukoha erinevad mullaomadused mõjutada olulisel määral juurestiku kujunemist (näit. mänd liivmullal *versus* paepeasel mullal kasvavad männid). Et teatud määral selgitada võimalikke maa-aluse biomassi erisusi paemuldadel kasvavatel mändidel, otsustati mõned männi mudelpuud võtta ka kastikuloo

kasvukohatüübist. Sobiv ala (vee kättesaadavuse seisukohalt) leiti Saaremaalt, kust võeti kolm männi mudelpuud ja pesti välja nende juurestikud. Sellest ka ühe männi prooviala paiknemine Saaremaal (Joonis 5).

Valimis oleva 165 mudelpuu keskmine rinnasdiameeter oli  $19,4 \pm 0,6$  cm, väikseim männi mudelpuu oli diameetriga 0,9 cm ja kõige jämedam 44,5 cm läbimõõduga. Puude keskmine kõrgus valimis oli  $19,5 \pm 0,6$  m. Kõige lühema mudelpuu kõrgus oli 1,9 m ja kõrgeima männi mudelpuu kõrgus oli 32,4 m. Kõige noorem männi mudelpuu oli 13 aastat ja vanim 140 aastat vana, valitud puude keskmine vanus oli 64 a.

Keskmine maapealse osa biomass (kõik fraktsioonid) oli männi mudelpuude valimis ( $n=165$ ) 19,5 kg (kuivaines), väikseima puu maapealne mass oli 0,12 kg ja suurima maapealse biomassiga mänd kaalus 101,5 kg. Maa-alune biomass (känd+jämedate juurte fraktsioon) moodustas keskmiselt  $20 \pm 0,9\%$  puude kogu biomassist. Okaste osakaal puude maapealse osa biomassist oli valimis keskmiselt  $4,4 \pm 0,4\%$ . Okaste osakaal puu maapealsest biomassist vähenes nii puu diameetri kui vanuse suurenedes. Koore osakaal tüvemassist varieerus 4 – 47% ja see vähenes puu dimensioonide suurenemisega.

### 3.2 Kuusk

Kokku põhinevad projekti aruanne ning koostatud männi biomassi mudelid 127 kuuse mudelpuu andmetel, neist 30 puu puhul on andmed ka maa-aluse osa biomassi kohta (Lisa 2, Kuuse mudelpuude koondfail). Enamik mudelpuudest kasvasid I ja II boniteedi puistutes. Uuringus kasutatud 127 kuuse mudelpuu keskmine rinnasdiameeter oli  $22,1 \pm 0,8$  cm, väikseim mudelpuu oli diameetriga 1,1 cm ja kõige jämedam 42,5 cm läbimõõduga. Valimis oli puu keskmine kõrgus  $21,5 \pm 0,7$  m. Kõige madalama mudelpuu kõrgus oli 1,9 m ja kõrgeima kuuse mudelpuu kõrgus 32,8 m. Kõige noorem mudelpuu oli 9 aastat ja vanim 121 aastat vana, valitud mudelpuude keskmine vanus oli 52 a.

Keskmine maapealse osa biomass oli kuuse mudelpuude valimis ( $n=127$ ) 28 kg (kuivaines), väikseima maapealse massiga kuusk kaalus 0,75 kg ja suurima maapealse biomassiga kuusk kaalus 99,8 kg. Maa-alune biomass (känd+jämedate juurte fraktsioon) moodustas keskmiselt  $21 \pm 0,8\%$  puu kogu biomassist. Okaste osakaal maapealse osa biomassist oli valimis keskmiselt  $9,5 \pm 0,7\%$ . Koore osakaal tüvemassist varieerus 4 – 15% ja oli valimi keskmisena 6,8%.

### 3.3 Kask

Kokku põhinevad projekti aruanne ning koostatud kase biomassi mudelid 117 mudelpuu andmetel, neist 30 puu puhul on esitatud andmed ka maa-aluse osa biomassi kohta (Lisa 3, Kase mudelpuude koondfail). Esindatud on kõik boniteediklassid ja mitmed erinevad kasvukohatüübid. Neist 57 mudelpuud (so 49%) kasvasid I-II boniteedi puistutes, 44 mudelpuud (38%) III boniteedi puistutes, 15 mudelpuud III-IV boniteedi (13%) ja 1 mudelpuu V boniteedi puistus.

Analüüsitud 117 mudelpuu keskmine rinnasdiameeter oli 16,4±0,8 cm, väikseim mudelpuu oli diameetriga 3,1 cm ja kõige jämedam 40,8 cm läbimõõduga. Keskmine puude kõrgus oli valimis 19,4±0,7 m. Kõige madalama mudelpuu kõrgus oli 4,5 m ja kõrgeima kase mudelpuu kõrgus 33 m. Kõige noorem mudelpuu oli 11 aastat ja vanim 93 aastat vana, valitud puude keskmine vanus oli 46 aastat.

Keskmine kase mudelpuude (n=117) maapealse osa biomass oli 19,2 kg (kuivaines), väikseima massiga kask kaalus 2,3 kg ja suurima maapealse biomassiga kask kaalus 120 kg. Maa-alune biomass (känd+jämedate juurte fraktsioon) moodustasid keskmiselt 24±1,1% puu kogu biomassist. Lehtede osakaal maapealse osa biomassist oli valimis keskmiselt 3±0,3%. Koore osakaal tüvemassist varieerus 5 – 50% ja oli valimi keskmisena 16,6%. Suur on koore osakaal kogu tüvemassist väga noortel puudel.

### 3.4. Biomassi mudelid

Kogu uuringu ülesehitusel võeti aluseks Repola (2008; 2009) meetodika, ka mudelite koostamisel lähtuti Repola eeskujust. Üldjoontes kasutas Repola oma töödes kolme tüüpi erinevate sisenditega mudelit: (1. - tüüp - mudelite sisenditena kasutati vaid diameetrit ja kõrgust; 2-tüüp - lisaks võeti sisenditena kasutusele vanus ja võra pikkus; 3- tüüp – lisaks eespool toodud tunnustele veel lisaks koore paksus ja diameetri viimase viie aasta juurdekasv). Neist mudelitest omavad olulisemat rakenduslikku väärtust kaks esimest mudelit, kus sisenditeks on vastavalt töö tehnilisele kirjeldusele metsa inventeerimisel saadavad või nendest lihtsalt tuletatavad karakteristikud. Repola kasutas diameetri teisendust  $d_k = 2 + 1.25d$ , mis on sisult  $D_0$  arvutamise valem rinnasdiameetrist, mis omakorda pärineb Laasasenaho (1982) doktoritööst. Eesti mudelite koostamisel rakendati sama teisendust.

#### 3.4.1 Mänd

##### *Repola I tüüpi valemid*

Repola (2009) I tüüpi valemite sisenditeks on puu diameeter ( $d_{1,3}$ , cm) ja kõrgus ( $h$ , m). Kasutusel on puu diameetri teisendus, mis põhineb Laasasenaho (1982) doktoritööl ning on kännudiameetri ( $d_k$ ) hinnang rinnasdiameetri põhjal:

$$d_k = 2 + 1.25 \cdot d_{1,3} \quad (1)$$

Repola (2009) I tüüpi valemite parameetrid on toodud tabelis 1, kuivmassi ( $m$ ) ühikuks on kg ja valemikujud on järgmised:

$$\ln(m_{tüvi}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+14)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+12)} + \varepsilon \quad (2)$$

$$\ln(m_{koor}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \ln(h) + \varepsilon \quad (3)$$

$$\ln(m_{oksad\_elus}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+12)} + \varepsilon \quad (4)$$

$$\ln(m_{okkad}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+6)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+1)} + \varepsilon \quad (5)$$

$$\ln(m_{oksad\_kuiv}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+16)} + \varepsilon \quad (6)$$

$$\ln(m_{maapealne}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+20)} + \varepsilon \quad (7)$$

**Tabel 1.** Männi maapealse biomassi valemite konstantide väärtused (Repola (2009) I tüüpi valemid) ning valemi parameetrid

Para-meeter	Tüvi	Tüve koor	Elusad oksad	Okkad	Kuivad oksad	Üldmudel maapealne
	valem 2	valem 3	valem 4	valem 5	valem 6	valem 7
N	165	165	165	165	165	165
$b_0$	-4.056	-4.937	-5.430	1.669	-8.236	-3.508
$b_1$	9.171	8.531	18.161	15.535	12.077	10.944
$b_2$	4.594	0.480	-8.012	-13.573	-	2.048
SE	0.165	0.203	0.652	0.536	4.172	0.154
R <sup>2</sup>	0.988	0.967	0.730	0.698	0.087	0.987
p	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0001	<0.0001

Maa-aluse biomassi (kg) modelleerimiseks kasutati samuti Repola (2009) avaldatud valemikujusid:

$$\ln(m_{känd}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + \varepsilon \quad (8)$$

$$\ln(m_{juured>1cm}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+15)} + \varepsilon \quad (9)$$

Alla 1 cm juurte mudelit Repola artiklis ei ole käsitletud, seega kasutades Repola (2009) analoogiat leiti alljärgnev mudel:

$$\ln(m_{juured<1cm}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+21)} + \varepsilon \quad (10)$$

Maa-aluse biomassi arvutamisevalemite parameetrid on esitatud tabelis 2.

**Tabel 2.** Mäni maa-aluse biomassi valemite konstantide väärtused (Repola 2009 I tüüpi valemid) ning valemi parameetrid

Parameeter	Känd	Juured > 1 cm	Juured < 1 cm
	valem 8	valem 9	valem 10
N	30	30	30
$b_0$	-6.056	-5.221	-4.672
$b_1$	12.609	12.846	9.249
SE	0.369	0.384	0.555
R <sup>2</sup>	0.917	0.919	0.739
p	<0.0001	<0.0001	<0.0001

*Repola II tüüpi valemid*

Repola (2009) II tüüpi valemite sisenditeks on lisaks diameetrile ja kõrgusele veel vanus ( $A$ ) ja võra pikkus ( $h_{võra}$ , m). Neid valemite kasutati Repola poolt vaid maapealse biomassi fraktsioonide (kg) arvutamiseks, valemite parameetrid on tabelis 3 ning valemikujud on järgmised:

$$\ln(m_{tüvi}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+14)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+10)} + b_3 \cdot \ln(A) + \varepsilon \quad (11)$$

$$\ln(m_{koor}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \ln(h) + \varepsilon \quad (12)$$

$$\ln(m_{oksad\_elus}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+8)} + b_3 \cdot \ln(h_{võra}) + \varepsilon \quad (13)$$

$$\ln(m_{okkad}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+4)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+1)} + b_3 \cdot \ln(h_{võra}) + \varepsilon \quad (14)$$

$$\ln(m_{oksad\_kuiv}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+16)} + \varepsilon \quad (15)$$

$$\ln(m_{maapeatne}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+24)} + b_3 \cdot h_{võra} + \varepsilon \quad (16)$$

**Tabel 3.** Mäni maapealse biomassi valemite konstantide väärtused (Repola (2009) II tüüpi valemid) ning valemi parameetrid

Para-meeter	Tüvi	Tüve koor	Elusad oksad	Okkad	Kuivad oksad	Üldmudel maapealne
	valem 11	valem 12	valem 13	valem 14	valem 15	valem 16
N	165	165	165	165	165	165
$b_0$	-4.612	-4.937	-4.052	0.509	-8.236	-3.377
$b_1$	9.122	8.531	14.409	16.824	12.077	10.496
$b_2$	4.232	0.480	-7.258	-15.616	-	2.185
$b_3$	0.156	-	0.738	0.626	-	0.111
SE	0.148	0.203	0.638	0.498	4.172	0.152
R <sup>2</sup>	0.990	0.967	0.743	0.750	0.087	0.987
P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0001	<0.0001

#### Repola III tüüpi valemid

Repola (2009) III tüüpi valemite sisenditeks on lisaks diameetrile, kõrgusele, vanusele ja võra pikkusele veel viimase 5 aasta diameetri ( $i_5$ , cm) ja rinnaspindala ( $i_{g5}$ , cm<sup>2</sup>) juurdekasv ning kahekordne koorepaksus ( $bt$ , cm). Valemid 3 kasutati Repola poolt vaid maapealse biomassi arvutamiseks, tulemused on tabelis 4 ning valemikujud on järgmised:

$$\ln(m_{tüvi}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+9)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+16)} + b_3 \cdot \ln(A) + b_4 \cdot i_{g5} + \varepsilon \quad (17)$$

$$\ln(m_{koor}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+18)} + b_2 \cdot \frac{d_{1,3}}{A} + b_3 \cdot bt + \varepsilon \quad (18)$$

$$\ln(m_{oksad\_elus}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+10)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+4)} + b_3 \cdot \ln(i_{g5}) + b_4 \cdot \ln(h_{võra}) + \varepsilon \quad (19)$$

$$\ln(m_{okkad}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+6)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+1)} + b_3 \cdot \ln(i_{g5}) + b_4 \cdot \ln(h_{võra}) + \varepsilon \quad (20)$$

$$\ln(m_{oksad\_kuiv}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+16)} + b_2 \cdot \ln(h_{võra}) + b_3 \cdot \ln(i_{g5}) + b_4 \cdot A + \varepsilon \quad (21)$$

$$\ln(m_{maapealne}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+18)} + b_3 \cdot i_5 + b_4 \cdot A + b_5 \cdot bt + \varepsilon \quad (22)$$

Valemities kasutatud koore kahekordne paksus ( $bt$ ) ei ole mõõdetud tunnus vaid arvutati koore ja tüve kuivmasside kaudu valemiga:

$$bt = d_{1,3} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{m_{koor}}{(m_{koor} + m_{tüvi})}} \right) \quad (23)$$

Kuna viimase 5 aasta kahekordne radiaalne juurdekasv ( $i_5$ ) oli mõõdetud ning eelmise valemiga on arvutatud kahekordne koorepaksus ( $bt$ ), siis arvutati viimase 5 aasta ristlõikepindala kasv järgmiselt:



$$i_{g5} = \frac{\pi}{4} \cdot [(d_{1,3} - bt)^2 - (d_{1,3} - bt - i_5)^2] \quad (24)$$

**Tabel 4.** Mäni maapealse biomassi valemite konstantide väärtused (Repola (2009) III tüüpi valemid) ning valemi parameetrid

Parameeter	Tüvi	Tüve koor	Elusad oksad	Okkad	Surnud oksad	Üldmudel (maapealne)
	valem 17	valem 18	valem 19	valem 20	valem 21	valem 22
N	150	150	150	150	150	150
$b_0$	-5.524	-6.604	-3.284	-0.102	-6.645	-3.662
$b_1$	10.853	11.107	10.656	9.689	15.919	11.154
$b_2$	3.743	-0.822	-4.930	-8.172	-3.051	1.908
$b_3$	0.003	0.920	0.377	0.198	0.727	0.007
$b_4$	-0.0005	-	0.252	0.389	-0.011	0.001
$b_5$	-	-	-	-	.	-0.094
SE	0.139	0.164	0.634	0.502	4.058	0.144
R <sup>2</sup>	0.991	0.978	0.752	0.742	0.083	0.989
P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0136	<0.0001

### 3.4.2 Kuusk

Nagu mäni nii ka kuuse puhul on kasutatud Repola (2009) kolme tüüpi valemite – esimeste puhul on sisenditeks valemiga 1 teisendatud diameeter ( $d_k$ , cm) ja kõrgus ( $h$ , m), teist tüüpi mudelite puhul kasutati lisaks diameetrile ja kõrgusele vanust ( $A$ ) ja elusvõra pikkust ( $H_{võra}$ , m) ning kolmandate puhul on lisatud sisendite hulka veel viimase 5 aasta diameetri ( $i_5$ , cm) ja rinnaspindala ( $i_{g5}$ , cm<sup>2</sup>) juurdekasv ning kahekordne koorepaksus ( $bt$ , cm) (Repola 2009). Viimaste arvutamiseks kasutati valemite 23 ja 24. Maa-aluse biomassi arvutamiseks on ainult esimest tüüpi valemiteid.

#### Repola I tüüpi valemid

Repola (2009) esimest tüüpi valemite parameetrid on esitatud tabelites 5 (maapealne biomass, kg) ja 6 (maa-alune biomass, kg) ning valemikujud on alljärgnevad:

$$\ln(m_{tüvi}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+14)} + b_2 \cdot \ln(h) + b_3 \cdot h + \varepsilon \quad (25)$$

$$\ln(m_{koor}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+18)} + b_2 \cdot \ln(h) + \varepsilon \quad (26)$$

$$\ln(m_{oksad\_elus}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+13)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+5)} + \varepsilon \quad (27)$$

$$\ln(m_{okkad}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+10)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+1)} + \varepsilon \quad (28)$$

$$\ln(m_{oksad\_kuiv}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+18)} + b_2 \cdot \ln(h) + \varepsilon \quad (29)$$

$$\ln(m_{maapealne}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+20)} + b_2 \cdot \ln(h) + \varepsilon \quad (30)$$

$$\ln(m_{känd}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+26)} + \varepsilon \quad (31)$$

$$\ln(m_{juured>1cm}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+24)} + \varepsilon \quad (32)$$

Alla 1 cm juurte mudelit Repola artiklis ei ole käsitletud, seega kasutades Repola (2009) analoogiat leiti alljärgnev mudel:

$$\ln(m_{juured<1cm}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+8)} + \varepsilon \quad (33)$$

**Tabel 5.** Kuuse maapealse biomassi valemite konstantide väärtused (Repola 2009 I tüüpi valemid) ning valemi parameetrid

Parameeter	Tüvi	Tüve koor	Elusad oksad	Okkad	Surnud oksad	Üldmudel (maapealne)
	valem 25	valem 26	valem 27	valem 28	valem 29	valem 30
N	127	127	127	127	127	127
$b_0$	-3.977	-5.142	-2.246	2.823	-18.381	-1.970
$b_1$	8.586	8.573	17.375	11.712	1.812	9.467
$b_2$	0.839	0.812	-8.258	-9.360	5.920	0.549
$b_3$	0.025	-	-	-	-	-
SE	0.185	0.249	0.509	0.515	2.489	0.197
R <sup>2</sup>	0.988	0.972	0.846	0.759	0.669	0.982
p	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

**Tabel 6.** Kuuse maa-aluse biomassi valemite konstantide väärtused (valemid Repola 2009) ning valemi parameetrid

Parameeter	Känd	Juured > 1 cm	Juured < 1 cm
	valem 31	valem 32	valem 33
N	30	30	30
$b_0$	-3.894	-3.785	-6.180
$b_1$	12.492	13.218	9.467
SE	0.308	0.255	0.394
R <sup>2</sup>	0.965	0.978	0.875
p	<0.0001	<0.0001	<0.0001

*Repola II tüüpi valemid*

Repola (2009) valemite 2 parameetrid on esitatud tabelis 7 ning valemikujud on alljärgnevad:

$$\ln(m_{tüvi}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+14)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+10)} + b_3 \cdot \ln(A) + \varepsilon \quad (34)$$

$$\ln(m_{koor}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \ln(h) + \varepsilon \quad (35)$$

$$\ln(m_{okсад_elus}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+8)} + b_3 \cdot \ln(h_{võra}) + \varepsilon \quad (36)$$

$$\ln(m_{okkad}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+4)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+1)} + b_3 \cdot \ln(h_{võra}) + \varepsilon \quad (37)$$

$$\ln(m_{okсад_kuiv}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+16)} + \varepsilon \quad (38)$$

$$\ln(m_{maapealne}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+24)} + b_3 \cdot h_{võra} + \varepsilon \quad (39)$$

**Tabel 7.** Kuuse maapealse biomassi valemite konstantide väärtused (Repola 2009 II tüüpi valemid) ning valemi parameetrid

Parameeter	Tüvi	Tüve koor	Elusad oksad	Okkad	Surnud oksad	Üldmudel (maapealne)
	valem 33	valem 34	valem 35	valem 36	valem 37	valem 39
N	127	127	127	127	127	127
$b_0$	-4.236	-5.142	-2.570	2.743	-18.381	-1.967
$b_1$	9.655	8.573	13.424	18.608	1.812	9.127
$b_2$	0.602	0.812	-7.446	-19.628	5.920	0.579
$b_3$	0.029	-	1.145	0.993	-	0.011
SE	0.185	0.249	0.451	0.441	2.489	0.197
R <sup>2</sup>	0.988	0.972	0.880	0.825	0.669	0.982
p	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

*Repola II tüüpi valemid*

Repola (2009) valemite 3 parameetrid on esitatud tabelis 8 ning valemikujud on alljärgnevad:

$$\ln(m_{tüvi}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \ln(h) + b_3 \cdot h + b_4 \cdot \ln(A) + b_5 \cdot i_5 + \varepsilon \quad (40)$$

$$\ln(m_{koor}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+16)} + b_2 \cdot \ln(h) + b_3 \cdot bt + \varepsilon \quad (41)$$

$$\ln(m_{okсад_elus}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+18)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+2)} + b_3 \cdot h_{võra} + b_4 \cdot \frac{d_{1,3}}{A} + b_5 \cdot i_5 + \varepsilon \quad (42)$$

$$\ln(m_{okkad}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot h_{võra} + b_3 \cdot \ln(i_5) + \varepsilon \quad (43)$$

$$\ln(m_{oksad\_kuiiv}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+14)} + b_2 \cdot \ln(h_{võra}) + b_3 \cdot h_{võra} + b_4 \cdot \ln(i_5) + \varepsilon \quad (44)$$

$$\ln(m_{maapealne}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+24)} + b_3 \cdot h_{võra} + \varepsilon \quad (45)$$

**Tabel 8.** Kuuse maapealse biomassi valemite konstantide väärtused (Repola 2009 III tüüpi valemid) ning valemi parameetrid

Parameeter	Tüvi	Tüve koor	Elusad oksad	Okkad	Surnud oksad	Üldmudel (maapealne)
	valem 40	valem 41	valem 42	valem 43	valem 44	valem 45
N	96	96	96	96	96	150
$b_0$	-4.006	-4.706	-1.549	-2.876	-22.563	-1.967
$b_1$	8.487	3.694	9.899	6.468	15.362	9.127
$b_2$	0.748	1.332	-3.051	0.072	11.769	0.579
$b_3$	0.028	0.837	0.111	0.337	-1.273	0.011
$b_4$	0.001	-	-0.287	-	-1.309	-
$b_5$	-0.016	-	0.157	-	.-	-
SE	0.197	0.201	0.512	0.493	2.194	0.197
R <sup>2</sup>	0.985	0.980	0.834	0.761	0.650	0.982
P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

### 3.4.3 Kask

Analoogiliselt männi ja kuusega on ka kase puhul kasutusel kolme tüüpi valemeid – esimeste puhul on sisendisteks valemiga 1 teisendatud diameeter ( $d_k$ , cm) ja kõrgus ( $h$ , m), teist tüüpi valemite puhul lisaks diameetrile ja kõrgusele vanus ( $A$ ) ja elusvõra pikkus ( $H_{võra}$ , m) ning kolmandat tüüpi valemite puhul on lisatud sisendite hulka veel viimase 5 aasta diameetri ( $i_5$ , cm) ja rinnaspindala ( $i_{g5}$ , cm<sup>2</sup>) juurdekasv ning kahekordne koorepaksus ( $bt$ , cm) (Repola 2009). Viimaste arvutamiseks kasutati valemeid 23 ja 24. Maa-aluse biomassi arvutamiseks ainult I tüüpi valemeid.

#### Repola I tüüpi valemid

Repola (2009) valemite 1 parameetrid on esitatud tabelites 9 (maapealne biomass, kg) ja 10 (maa-alune biomass, kg) ning valemikujud on alljärgnevad:

$$\ln(m_{tüvi}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \ln(h) + b_3 \cdot h + \varepsilon \quad (46)$$

$$\ln(m_{koor}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+20)} + \varepsilon \quad (47)$$

$$\ln(m_{oksad\_elus}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+16)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+10)} + \varepsilon \quad (48)$$

$$\ln(m_{lehed}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+2)} + \varepsilon \quad (49)$$

$$\ln(m_{oksad\_kuiv}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+16)} + \varepsilon \quad (50)$$

$$\ln(m_{maapeatne}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+22)} + \varepsilon \quad (51)$$

$$\ln(m_{känd}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+26)} + \varepsilon \quad (52)$$

$$\ln(m_{juured>1cm}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+22)} + b_2 \cdot \ln(h) + \varepsilon \quad (53)$$

Alla 1 cm juurte mudelit Repola artiklis ei ole käsitletud, seega kasutades Repola (2009) analoogiat leiti alljärgnev mudel:

$$\ln(m_{juured<1cm}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+4)} + \varepsilon \quad (54)$$

**Tabel 9.** Kase maapealse biomassi valemite konstantide väärtused (Repola 2009 I tüüpi valemid) ning valemi parameetrid

Parameeter	Tüvi	Tüve koor	Elusad oksad	Lehed	Kuivanud oksad	Üldmudel (maapealne)
	valem 46	valem 47	valem 48	valem 49	valem 50	valem 51
N	117	117	117	117	117	117
$b_0$	-4.969	-5.146	-3.595	-18.929	-11.970	-3.321
$b_1$	9.047	9.990	17.196	21.635	2.246	10.037
$b_2$	1.211	2.637	-6.312	-	-	3.376
SE	0.126	0.260	0.625	0.847	2.917	0.144
R <sup>2</sup>	0.993	0.967	0.853	0.579	0.008	0.991
P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.3286	<0.0001

**Tabel 10.** Kase maa-aluse biomassi valemite konstantide väärtused (valemid Repola 2009) ning valemi parameetrid

Parameeter	Känd	Juured > 1 cm	Juured < 1 cm
	valem 52	valem 53	valem 54
N	30	30	30
$b_0$	-3.213	-3.075	-7.831
$b_1$	11.721	11.590	11.035
SE	0.522	0.417	0.342
R <sup>2</sup>	0.891	0.929	0.889
P	<0.0001	<0.0001	<0.0001

#### Repola II tüüpi valemid

Repola (2009) valemite 2 parameetrid on esitatud tabelis 11 ning valemikujud on alljärgnevad:

$$\ln(m_{t\ddot{u}vi}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \ln(h) + b_3 \cdot \ln\left(\frac{d_{1,3}}{A}\right) + \varepsilon \quad (55)$$

$$\ln(m_{k\ddot{o}or}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+20)} + \varepsilon \quad (56)$$

$$\ln(m_{\text{okсад\_elus}}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+12)} + b_3 \cdot \ln(h_{\text{võra}}) + \varepsilon \quad (57)$$

$$\ln(m_{\text{lehed}}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+2)} + b_2 \cdot \ln(h_{\text{võra}}) + \varepsilon \quad (58)$$

$$\ln(m_{\text{okсад\_kuiv}}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+16)} + \varepsilon \quad (59)$$

$$\ln(m_{\text{maapealne}}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+22)} + b_3 \cdot A + \varepsilon \quad (60)$$

**Tabel 11.** Kase maapealse biomassi valemite konstantide väärtused (Repola 2009 II tüüpi valemid) ning valemi parameetrid

Parameeter	Tüvi	Tüve koor	Elusad oksad	Lehed	Kuivad oksad	Üldmudel (maapealne)
	valem 55	valem 56	valem 57	valem 58	valem 59	valem 60
N	117	117	117	117	117	117
$b_0$	-4.930	-5.146	-5.274	-18.159	-11.970	-3.140
$b_1$	9.168	9.990	18.008	20.583	2.246	9.256
$b_2$	1.209	2.637	-7.134	0.021	-	3.608
$b_3$	-0.289	-	0.032	-	-	0.004
SE	0.120	0.260	0.634	0.850	2.917	0.131
R <sup>2</sup>	0.994	0.967	0.851	0.580	0.008	0.992
P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.3286	<0.0001

### Repola III tüüpi valemid

Repola (2009) valemite 3 parameetrid on esitatud tabelis 12 ning valemikujud on alljärgnevad:

$$\ln(m_{\text{tüvi}}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \ln(h) + b_3 \cdot \ln\left(\frac{d_{1,3}}{A}\right) + \varepsilon \quad (61)$$

$$\ln(m_{\text{koor}}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+8)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+22)} + b_3 \cdot \ln(bt) + \varepsilon \quad (62)$$

$$\ln(m_{\text{okсад\_elus}}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+10)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+10)} + b_3 \cdot \ln(i_5) + b_4 \cdot h_{\text{võra}} + b_5 \cdot A + \varepsilon \quad (63)$$

$$\ln(m_{\text{lehed}}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+2)} + b_2 \cdot \ln(h_{\text{võra}}) + \varepsilon \quad (64)$$

$$\ln(m_{\text{okсад\_kuiv}}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+6)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+10)} + b_3 \cdot A + b_4 \cdot i_5 + \varepsilon \quad (65)$$

$$\ln(m_{\text{maapealne}}) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_k}{(d_k+12)} + b_2 \cdot \frac{h}{(h+22)} + b_3 \cdot i_5 + b_4 \cdot \frac{d_{1,3}}{A} + \varepsilon \quad (66)$$

**Tabel 12.** Kase maapealse biomassi valemite konstantide väärtused (Repola 2009 III tüüpi valemid) ning valemi parameetrid

Parameeter	Tüvi	Tüve koor	Elusad oksad	Lehed	Kuivad oksad	Üldmudel (maapealne)
	valem 61	valem 62	valem 63	valem 64	valem 65	valem 66
N	117	117	117	117	117	117
$b_0$	-4.930	-2.686	-4.433	-18.159	-18.020	-3.144
$b_1$	9.168	3.527	15.732	20.583	26.506	9.789
$b_2$	1.209	5.472	-8.054	0.021	-17.434	3.465
$b_3$	-0.289	1.096	0.170	-	-0.021	0.015
$b_4$	-	-	0.094	-	-0.340	-0.224
$b_5$	-	-	0.009	-	-	-
SE	0.120	0.116	0.272	0.850	3.250	0.121
R <sup>2</sup>	0.994	0.993	0.964	0.580	0.050	0.993
P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.3434	<0.0001

Surnud okste biomassi kirjeldav valem ei osutunud oluliseks ( $p=0.3286-0.3434$ ). Seda tõenäoliselt seetõttu, et kase surnud oksad ei püsi puul kaua ja seega on kuivanud okste esinemine juhuslik ja väga varieeruv.

### Kasutatud kirjandusallikad

Aastaraamat Mets 2016, Keskkonnaagentuur, 2017

Laasasenaho, J., 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce, and birch. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108, 74 pp.

Repola, J. 2008. Biomass equations for birch in Finland. *Silva Fennica* 42(4): 605–624.

Repola, J. 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica* 43(4): 625–647.