

LATVIJAS VALSTS MEŽZINĀTNES
INSTITŪTS „SILAVA”

**LATVIJAS KOKAUDŽU BIOMASAS UN
OGLEKĻA UZKRĀJUMA
NOVĒRTĒŠANAS METODES**

JĀNIS LIEPIŅŠ

***FOREST STAND BIOMASS AND CARBON
STOCK ESTIMATES IN LATVIA***

LATVIJAS VEĢETĀCIJA

30

SALASPILS 2020

Latvijas Veģetācija, 30, 2020

Redaktore

Zane Lībiete, Latvijas Valsts mežzinātnes institūts „Silava”

Redkolēģija

Baiba Bambe, Latvijas Valsts mežzinātnes institūts „Silava”

Āris Jansons, Latvijas Valsts mežzinātnes institūts „Silava”

Māris Laiviņš, Latvijas Valsts mežzinātnes institūts „Silava”

Kaspars Liepiņš, Latvijas Valsts mežzinātnes institūts „Silava”

Agnese Priede, Dabas aizsardzības pārvalde

Solvita Rūsiņa, Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte

Inga Straupe, Latvijas Lauksaimniecības universitātes Meža fakultāte

Tehniskā redaktore, datorsalikums

Ilva Konstantinova, Latvijas Valsts mežzinātnes institūts „Silava”

Citēšanas piemērs:

Liepiņš, J., 2020. Latvijas kokaudžu biomasas un oglekļa uzkrājuma novērtēšanas metodes. *Latvijas Veģetācija* 30: 1–114.

Žurnāla raksti ir recenzēti. Iesniegtos rakstus pirms publicēšanas izvērtē redaktors un anonīmi recenzenti.

Before accepting and publishing papers in this journal the articles are reviewed by the editor and anonymous reviewers.

ISSN 1407-3641

© Latvijas Valsts mežzinātnes institūts „Silava”

Žurnāls elektroniskā formā lasāms interneta vietnē www.silava.lv

ANOTĀCIJA

Liepiņš J. (2020) Latvijas kokaudžu biomasas un oglekļa uzkrājuma novērtēšanas metodes

Publikācija ietver Jāņa Liepiņa promocijas darba “Kokaudžu biomasas noteikšanas metodikas izstrāde un oglekļa uzkrājuma aprēķini Latvijā” rezultātus. Promocijas darba zinātniskie vadītāji Dr.silv. Kaspars Liepiņš un Dr.silv. Andis Lazdiņš.

Neraugoties uz mežsaimniecības sektora nozīmīgumu, koku biomasas un oglekļa aprēķinu metodika Latvijā joprojām ir nepilnīga. Pašreizējā kokaudžu oglekļa uzkrājuma aprēķinu metodikā vislielāko aprēķinu nenoteiktību dod fakts, ka Latvijā nav pēc starptautiski atzītas metodikas veidotu biomasas aprēķinu vienādojumu izplatītākajām koku sugām. Līdzšinējie pētījumi Latvijā par saimnieciski nozīmīgāko koku sugu biomasas un oglekļa apjoma novērtēšanas metodēm veikti fragmentāri, tikai atsevišķu koku sugu un biomasas frakciju līmenī. Ir nepieciešamas precīzas metodes, lai aprēķinātu CO₂ piesaisti kokaugu virszemes un sakņu biomasā un raksturotu uzkrātā oglekļa izmaiņas Latvijas mežos. Pētnieciskais darbs izstrādāts, lai nodrošinātu Latvijas kokaudžu biomasas un oglekļa uzkrājuma aprēķinu atbilstību nacionālo ziņojumu sastādīšanas vadlīnijām.

Dati Latvijas saimnieciski nozīmīgāko koku sugu virszemes un celma/sakņu biomasas aprēķiniem, ievākti 124 meža nogabalos, katrā nozāgējot trīs dažādu dimensiju paraugkokus. Koku virszemes biomasas vienādojumu izstrādei analizētas 102 priedes, 81 egles, 105 bērzi un 84 apses, bet celma/sakņu biomasas vienādojumu izstrādei – 37 priedes, 29 egles, 42 bērzi un 33 apses. Aprēķinot stumbra biomasu, ir nepieciešami precīzi stumbra reducētā blīvuma mērījumi, jo dažādām sugām reducētais blīvums stumbra garenvirzienā un šķērsgriezumā izmainās atšķirīgi. Vidējā stumbra reducētā blīvuma noteikšanai un izmaiņu raksturošanai izmērīti 14 366 koksnes un 4652 mizas paraugi.

Pētījumā apstiprinājās, ka priedei, eglei, bērzam un apsei stumbra vidējais mizas blīvums statistiski būtiski ($p < 0.001$) atšķiras no vidējā koksnes blīvuma. Vidējā koksnes blīvuma lietošana stumbra biomasas aprēķinos veido vidēji 1.5–4.5% kļūdu, atkarībā no koku sugas. Koka sakņu, kuru caurmērs pārsniedz 2 mm, biomasas izpēte, tādā apjomā un detalizācijas pakāpē kā šajā pētījumā, nav veikta nevienā citā pētījumā. Pētījumā izstrādāti jauni Latvijas teritorijai piemēroti stumbra, zaru, kopējās virszemes un celma/sakņu biomasas aprēķina vienādojumi, kuri lietojami plašā koku dimensiju amplitūdā. Pētījumā noskaidrots, ka citu Fenoskandijā izstrādāto vienādojumu izmantošana oglekļa uzkrājumu raksturošanai Latvijas kokaudzēs, veido 4.7–61.7% kļūdu atkarībā no koku sugas un virszemes vai celma/sakņu biomasas frakcijas. Siltumnīcefekta gāzu (SEG) inventarizācijas vadlīniju noklusētie mērenās joslas mežu biomasas pārrēķina koeficienti Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājumus palielina par 36.9%, bet boreālo mežu biomasas pārrēķina koeficientu

lietošana samazina par 5.2%, salīdzinot ar pētījumā izstrādāto metodiku. Atbilstoši Latvijas nacionālajā SEG inventarizācijā izmantotajai meža definīcijai, oglekļa uzkrājums Latvijas kokaudžu biomasā 2016. gadā bija 238.1 ± 3.5 milj. t.

Atslēgas vārdi: koku biomasā, alometriskie vienādojumi, oglekļa uzkrājums, koksnes blīvums.

SUMMARY

Liepiņš J. (2020) Forest stand biomass and carbon stock estimates in Latvia.

The present publication is a revised version of the PhD thesis “Methodology development for forest stand biomass and carbon stock estimates in Latvia”. Supervisors Dr.silv. Kaspars Liepiņš and Dr.silv. Andis Lazdiņš.

Regardless the importance of the forestry sector in Latvia, the methodological basis for analysing the amount of biomass and sequestered carbon in Latvia is still incomplete. Currently, one of the biggest drawbacks is that there are no approved and suitable biomass equations for common tree species in Latvia. Previous studies in Latvia on biomass and carbon assessment for common tree species are fragmented and limited to separate biomass fractions and several tree species. To estimate CO₂ sequestration in aboveground and belowground woody biomass, accurate methods are required. This study is aimed to develop the methods for forest biomass and carbon stock assessment that are based on recommendations for national reporting.

The material for study of aboveground and belowground tree biomass is collected in 124 forest stands. Three sample trees per stand have been harvested – in total 102 Scots pines, 81 Norway spruces, 105 birches and 84 European aspens, while stumps and roots of 37 Scots pines, 29 Norway spruces, 42 birches and 33 European aspens are lifted for belowground biomass studies. Accurate measurements of the stem basic density are needed to calculate total stem biomass. 14 366 stem wood and 4652 stem bark samples have been analysed to study the variation of within-the-stem basic density and to calculate the mean density of the stems.

Our study approved that the basic density of stem bark significantly ($p < 0.001$) differs from stem wood density. The use of mean stem wood density values instead of whole stem density values leads to biased estimation of stem biomass (1.5–4.5% error depending on tree species). Examination of small root (diameter over 2 mm) biomass performed in our study to such an extent has not been done before. Within our study new equations for estimation of stem, branch, total aboveground and belowground biomass were developed for application in Latvian conditions for a wide range of tree dimensions. We found that the use of biomass equations applied for biomass estimation in Fennoscandia in our conditions are creating an 4.7–61.7% error depending on tree species and biomass component. Application of default values of biomass expansion factors and root to shoot ratios for temperate and boreal forests defined in IPCC guidelines creates an overestimation of 36.9% and an underestimation of 5.2%, respectively in comparison to methodology elaborated and recommended in this study. In accordance to the forest land definition used in national GHG reports, the total carbon stock in Latvia in year 2016 was 238.1 ±3.5 million tonnes.

Key words: tree biomass, allometric equations, carbon stock, basic density.

SATURS

	Lpp.
ANOTĀCIJA.....	3
SUMMARY.....	5
SATURS.....	7
DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI.....	8
IEVADS.....	9
1. KOKAUDŽU BIOMASAS UN OGLEKĻA UZKRĀJUMA NOTEIKŠANAS	
PROBLEMĀTIKAS ANALĪZE.....	12
1.1. Oglekļa globālās aprites dinamika un piesaiste.....	12
1.1.1. Oglekļa aprites cikls.....	12
1.1.2. Atmosfēras oglekļa piesaiste.....	14
1.1.3. Oglekļa uzskaites aktualitāte.....	18
1.2. Kokaudžu biomasas novērtēšanas metodes.....	22
1.2.1. Virszemes biomasas novērtēšana.....	23
1.2.2. Sakņu un celma biomasas novērtēšana.....	25
1.2.3. Alometrisko sakarību izmantošanas iespējas.....	27
1.2.4. Tālīzpētes metodes.....	29
1.3. Reducētā blīvuma nozīme biomasas un oglekļa uzkrājumu novērtēšanā.....	32
1.4. Oglekļa novērtēšanas metožu salīdzinājums Eiropas mežos.....	36
2. PĒTĪJUMA MATERIĀLS UN METODIKA.....	42
2.1. Empīriskā materiāla raksturojums.....	42
2.2. Koku virszemes biomasas empīriskā materiāla ievākšana un apstrāde.....	44
2.3. Koku celma/sakņu biomasas empīriskā materiāla ievākšana un apstrāde.....	48
2.4. Vienādojumu izstrāde.....	50
3. PĒTĪJUMA REZULTĀTI UN DISKUSIJA.....	54
3.1. Blīvuma izmaiņas koku stumbros.....	54
3.2. Koku biomasas alometriskās sakarības un vienādojumu izstrāde.....	65
3.2.1. Biomasas struktūra.....	65
3.2.2. Vienādojumu izstrāde.....	71
3.2.3. Biomasas vienādojumu validācija.....	84
3.3. Latvijas kokaudzēs akumulētais ogleklis.....	89
SECINĀJUMI.....	100
REKOMENDĀCIJAS.....	101
LITERATŪRA.....	102

DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI UN SIMBOLI

<i>AGB</i>	kopējā virszemes biomasa
<i>BB</i>	dzīvo un sauso zaru biomasa
<i>BEF</i>	biomasas pārrēķina koeficients
<i>BGB</i>	kopējā celma/sakņu biomasa
<i>C</i>	ogleklis
<i>CO₂</i>	oglekļa dioksīds
<i>D</i>	koka krūšaugstuma caurmērs
<i>ETS</i>	emisiju kvotu tirdzniecības sistēma
<i>FAO</i>	Pārtikas un lauksaimniecības organizācija
<i>Gt</i>	gigatonna
<i>ĢIS</i>	ģeogrāfiskās informācijas sistēma
<i>H</i>	koka augstums
<i>IPCC</i>	Klimata pārmaiņu starpvaldību padome
<i>LiDAR</i>	aerolāzerskenēšanas radars
<i>MAPE</i>	vidējā absolūtā kļūda
<i>MRM</i>	meža resursu monitorings
<i>PRSE</i>	regresijas koeficienta relatīvā standartkļūda
<i>R₂</i>	determinācijas koeficients
<i>RMSE</i>	vidējā kvadrātiskā kļūda
<i>SAR</i>	sintezētās apertūras radars
<i>SB</i>	stumbra biomasa
<i>SEG</i>	siltumnīcefekta gāzes
<i>u. c.</i>	un citi
<i>UNFCCC</i>	Apvienoto Nāciju Organizācijas Vispārējā konvencija par klimata pārmaiņām
<i>ZIZIMM</i>	zemes izmantošana, zemes izmantošanas maiņa un mežsaimniecība

IEVADS

Nepieciešamība stabilizēt oglekļa dioksīda (CO₂) un citu siltumnīcefekta gāzu (SEG) koncentrāciju atmosfērā, lai mazinātu antropogēno ietekmi uz klimata izmaiņām, ir aktualizēta vairākos starptautiskos nolīgumos, tajā skaitā Kioto protokolā un Parīzes nolīgumā, kuri realizēti Eiropas Savienības klimata politikā. Oglekļa daudzumu atmosfērā iespējams normalizēt, ne tikai samazinot CO₂ emisijas un sekmējot fosilā kurināmā aizstāšanu ar biomasu, bet arī veicinot atmosfērā esošā CO₂ piesaisti un saistīto oglekli uzglabājot dažādās krātuvēs. Liela CO₂ noplūžu riska un augsto uzglabāšanas izmaksu dēļ abiotiskās oglekļa piesaistes tehnoloģijas varētu būt plašāk izmantojamas pēc 2025. gada (Lal, 2008), tāpēc šobrīd pasaulē lielāks uzsvars tiek likts tieši uz dabiskām CO₂ piesaistes metodēm okeānos un sauszemes ekosistēmās. Ņemot vērā pašreizējo zināšanu līmeni, joprojām nav skaidrs, kā papildus oglekļa uzglabāšana okeānos var mainīt to ekoloģiju ilgtermiņā (Chisholm, 2001; Williamson *et al.*, 2012), kamēr atmosfērā esošā CO₂ piesaiste ar fotosintēzi jau no klimata pārmaiņu problēmas pirmsākumiem ir atzīta par piemērotu metodi gāzes samazināšanai atmosfērā, kas nerada negatīvu ietekmi uz vidi (Lal, 2008).

Meža ekosistēmā CO₂ piesaiste notiek galvenokārt kokaugu virszemes un sakņu biomasā, un tad humifikācijas procesā daļa no oglekļa tiek uzkrāta augsnē (Gren, Zeleke, 2016). Kokaugi un lakstaugi fotosintēzes procesā izmanto saules gaismu, lai CO₂, ūdeni un barības vielas sintezētu par cukuriem un ogļhidrātiem, kas uzkrājas dažādās koka daļās, piemēram, lapās, zaros, stumbrā, saknēs (Gorte, 2009). Beidzoties dzīves ciklam, lielākā daļa no augos uzkrātā oglekļa sadalīšanās procesā nonāk atpakaļ atmosfērā, bet atlikušais papildina augsnes oglekļa krājumus. Visas koku daļas satur oglekli, bet tā saturs dažādu koku sugu frakcijās (zari, stumbrs, saknes) nedaudz atšķiras. Koku biomasā uzkrātā oglekļa daudzumu aprēķina, reizinot dažādu koka frakciju biomasu ar oglekļa saturu un summējot iegūtos rezultātus.

Lai gan SEG koncentrācijas pieaugums atmosfērā galvenokārt ir antropogēnu darbību rezultāts, galvenais uzsvars oglekļa bilances uzlabošanā pasaulē, paralēli fosilo resursu izmantošanas ierobežošanai, kas ir arī lielākais antropogēno emisiju avots, tiek likts uz CO₂ bioloģiskās piesaistes veicināšanu. Zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektors rada vislielāko ietekmi uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti Latvijā. Mūsu valsts CO₂ piesaiste augošu koku biomasā būtiski pārsniedz visu pārējo tautsaimniecības sektoru kopējās SEG emisijas. Tā kā Latvija ir Eiropas Savienības un starptautisko nolīgumu dalībvalsts, ir svarīgi, lai mēs prastu ar maksimālu precizitāti novērtēt mežaudžu CO₂ piesaisti, tādējādi mazinot saistību pārvērtēšanas riskus. Neskatoties uz ZIZIMM sektora nozīmīgumu, metodiskā bāze CO₂ piesaistes analīzei šajā sektorā ir nepilnīga. Viens no lielākajiem trūkumiem ir nepilnīgas zināšanas par Latvijas mežaudzēs uzkrāto oglekļa apjomu un metodiski korektu biomasas aprēķina vienādojumu neesamība. Dažādu koku sugu biomasas sadalījums pa frakcijām būtiski atšķiras, tāpēc visām izplatītākajām koku sugām nepieciešami atsevišķi biomasas vienādojumi.

Precīzas metodes nepieciešamas ne tikai, lai aprēķinātu CO₂ piesaisti augošu kokaugu biomasā, bet arī, lai raksturotu koksnes produktos, biokurināmajā, nobirās, nedzīvajā koksnē un augsnē saistītā oglekļa daudzumu. Pētījuma aktualitāti nosaka starptautiskās saistības, ko Latvija apņēmusies pildīt, ratificējot Apvienoto Nāciju Organizācijas Vispārējo konvenciju par klimata pārmaiņām (UNFCCC) 1995. gadā, tās Kioto protokolu 2002. gadā un Parīzes vienošanos 2016. gadā. Saskaņā ar Kioto protokolu, Latvijai SEG emisijas laika posmā no 2008.–2012. gadam bija jāsamazina par 8%, salīdzinot ar 1990. gadu. Atbilstoši lēmumiem Kankunas konferencē, kura notika Meksikā 2010. gadā, līdz 2020. gadam SEG emisijas plānots samazināt vēl par 20–30%. CO₂ piesaiste kokaugu biomasā iekļauta Kioto protokolā kā viens no mehānismiem SEG emisiju radīto klimata izmaiņu mazināšanai globālā mērogā.

Zinātniskajā literatūrā ir plaši diskutēts par koku virszemes un celma/sakņu biomasas mainību pat vienas sugas ietvaros, secinot, ka sagaidāmo biomasu ietekmē, piemēram, veģētācijas zonas, platuma grādi, ūdens deficīts, gada vidējā temperatūra un citi faktori (Berninger et al., 1995; Stegen et al., 2011; Wirth et al., 2004; u. c.). Visa Latvijas teritorija atrodas Eiropas hemiboreālajā mežu joslā (Ahti et al., 1968; EEA, 2007), kura izvietota starp mēreno un boreālo mežu joslu. Šī pārejas zona kartēs ir attēlota kā šaura josla, pēc augšanas apstākļiem līdzīgāka boreālajiem mežiem, tomēr ar lielāku koku sugu daudzveidību, kā arī mitru un mēreni vēsu klimatu. Hemiboreālais reģions ir salīdzinoši neliels, un tajā līdz šim nav veikti plašāki pētījumi par oglekļa piesaisti izplatītāko koku sugu mežaudzēs.

Ziemeļeiropā (Ziemeļvalstīs un Baltijas valstīs) priedei, eglei un bērzam biomasas vienādojumi, kas balstīti uz plašu un reprezentatīvu empīrisko materiālu, ir izstrādāti Zviedrijā (Marklund, 1987, 1988; Petersson, Stahl, 2006) un Somijā (Repola, 2008, 2009). Piemēram, Norvēģijas kokaudžu oglekļa uzkrājuma aprēķinu metodika izmanto Zviedrijā izstrādātus biomasas vienādojumus (Neumann et al., 2016). Tomēr apstiprinājies, ka bērza biomasas vienādojumu ģeogrāfiska ekstrapolācija pat vienas veģētācijas zonas ietvaros būtiski palielina kļūdu biomasas, līdz ar to oglekļa uzkrājuma aprēķinos Norvēģijas apstākļos, pamatojot nepieciešamību pēc vietējiem biomasas vienādojumiem (Smith et al., 2014; Smith et al., 2016). Arī Somijā oglekļa apjoma aprēķina metodika rekomendē lietot lokāli izstrādātos vienādojumus, pamatojoties uz atšķirīgajiem rezultātiem, kuri iegūti, Somijas apstākļos lietojot Zviedrijā izstrādātos biomasas vienādojumus (Repola, 2008, 2009).

Latvijā līdzšinējie pētījumi par koku biomasas un oglekļa satura novērtēšanas metodēm saimnieciski nozīmīgākajām koku sugām veikti fragmentāri – atsevišķu koku sugu un biomasas frakciju līmenī. I. Liepa un T. Blija (2008) ir aprakstījuši Latvijas egļu mežu koku biomasas struktūru, balstoties uz 21 paraugkoka datiem no Zemgales. Ar dažādām vienādojumu izteiksmēm ir mēģināts aprakstīt 40-gadīgu egļu virszemes biomasu (Lībiete et al., 2017) un secināts, ka lokāli izstrādātie vienādojumi demonstrē ievērojami augstāku precizitāti nekā Somijā izstrādātie. Promocijas darbā A. Bārdulis (2013) ir raksturojis prieku jaunaudzju sakņu biomasas izmaiņas sausieņu meža tipos. Ir veikti daži pētījumi par oglekļa akumulāciju virszemes un sakņu biomasā priedes, egles un bērza stādījumos lauksaimniecības zemēs (Daugaviete et al., 2008; Bārdulis et al.,

2017). Ir pieejamas dažādu autoru (Daugaviete, 2010; Miezīte et al., 2011; Bārdulis et al., 2015) publikācijas par baltalkšņu audžu virszemes un sakņu biomasas aprēķiniem un noteikšanas metodēm. Iepriekš veikto pētījumu metodikas ne vienmēr ir saskaņotas, tāpēc oglekļa satura, kā arī koku biomasas dati nav salīdzināmi un nav izmantojami Latvijas SEG inventarizācijas ziņojumiem.

SEG aprēķina vadlīnijās rekomendētie noklusējuma koeficienti biomasas noteikšanai Latvijas mežaudzēs nav zinātniski pamatoti, un tāpēc to izmantošana nebūtu pieļaujama atbilstoši vadlīnijās ietvertajiem nosacījumiem par zinātniski verificētu metožu pielietošanu nozīmīgu CO₂ piesaistes avotu aprēķiniem. Turpretī nekorektu un nepārbaudītu citu valstu vienādojumu izmantošana SEG emisiju un CO₂ piesaistes aprēķinos var būtiski ietekmēt aprēķinu rezultātus gan oglekļa uzkrājumu palielinājuma, gan samazinājuma virzienā, kā arī radīt nepareizu priekšstatu par klimata izmaiņu mazināšanas darbību ietekmes kvantitatīvajiem rādītājiem. Tāpēc, lai nodrošinātu biomasas aprēķinu atbilstību nacionālo ziņojumu sagatavošanas vadlīnijām, tiek izstrādāts pētnieciskais darbs, kura **mērķis** ir izveidot alometriskos vienādojumus saimnieciski nozīmīgāko koku sugu biomasas raksturošanai un noteikt Latvijas kokaudzēs uzkrāto oglekli.

Lai sasniegtu pētnieciskā darba mērķi, izvirzīti sekojoši **pētnieciskie uzdevumi**.

1. Raksturot vidējo stumbra reducēto blīvumu, tā izmaiņas stumbra garenvirzienā un šķērsgriezumā.
2. Izstrādāt parastās priedes (*Pinus sylvestris* L.), parastās egles (*Picea abies* (L.) H. Karst.), bērzu (*Betula* sp.) un parastās apses (*Populus tremula* L.) atsevišķu koku virszemes, celma/sakņu, stumbra un zaru biomasas vienādojumus.
3. Novērtēt kokaudžu biomasā uzkrāto oglekli, izmantojot Latvijas meža resursu monitoringa (MRM) datus.

1. KOKAUDŽU BIOMASAS UN OGLEKĻA UZKRĀJUMA NOTEIKŠANAS PROBLEMĀTIKAS ANALĪZE

1.1. Oglekļa globālās aprites dinamika un piesaiste

1.1.1. Oglekļa aprites cikls

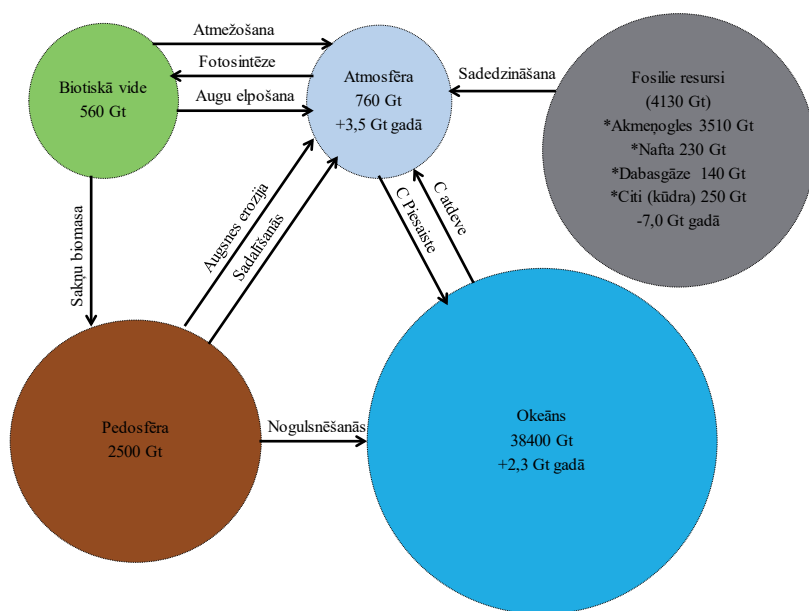
Par klimata pārmaiņām pēdējā laikā tiek diskutēts aizvien vairāk – par tām runā gan zinātnieki, gan politiķi. Klimata pārmaiņas var rasties dabiskā ceļā, un tās izraisa, piemēram, zemes plātņu tektonika, vulkāniskā aktivitāte, saules, zemes, okeānu un atmosfēras savstarpēja mijiedarbība, arī saules aktivitātes maiņa, tomēr parasti šādas klimata pārmaiņas notiek ļoti lēni – vairāku tūkstošu gadu laikā. Patlaban klimats mainās ļoti strauji. Zemeslodes virsmas vidējā temperatūra kopš industriālā perioda sākuma ir palielinājusies par 0.55–0.8°C, salīdzinot ar 1986.–2005. gadu, bet 2015. gadā vidējā temperatūra pirmo reizi paaugstinājās vairāk nekā par 1°C (Hawkins et al., 2017). Strauji paaugstinoties zemeslodes virsmas temperatūrai, notiek ievērojamas pārmaiņas ekosistēmās (Greene, Pershing, 2007), paaugstinās ūdens līmenis okeānos, palielinās savvaļas ugunsgrēku biežums un intensitāte (Westerling, 2006). Minēto un arī citu klimata pārmaiņu cēlonis pēc daudzu zinātnieku domām ir antropogēnās darbības (zemes lietojuma maiņa, atmežošana, biomasas dedzināšana, mitrāju nosusināšana, augsnes apstrāde, fosilo resursu lietošana u. c.), kuru rezultātā atmosfērā palielinās SEG emisijas. Līdz ar to, palielinoties cilvēku populācijai, pakāpeniski palielinājusies arī SEG koncentrācija atmosfērā, jo īpaši tā palielinājusies kopš industriālā perioda sākuma, kas tiek datēts ap 1780.–1800. gadu (Hawkins et al., 2017).

Galvenā cilvēku sabiedrības radītā SEG ir CO₂, un tā galvenokārt izdalās, sadegot fosilajiem kurināmajiem – akmeņoglēm, naftai un dabasgāzei. Oglekļa daudzumu un tā plūsmu var izteikt oglekļa vienībās vai arī CO₂ vienībās (1 kg oglekļa ir ekvivalents ar 3.67 kg CO₂) (IPCC, 2003). Pasaules sabiedrība ir izpratusi nepieciešamību stabilizēt CO₂ un citu SEG koncentrāciju atmosfērā, lai mazinātu globālās sasilšanas procesu. Pamatā ir definētas trīs stratēģijas CO₂ koncentrācijas atmosfērā samazināšanai (Schrag, 2007):

- samazināt globālo enerģijas patēriņu;
- attīstīt enerģijas veidus ar zemām CO₂ emisijām;
- piesaistīt CO₂ no atmosfēras ar dabiskiem un inženiertehniskiem paņēmieniem.

Oglekļa apmaiņa starp dažādiem tā avotiem un piesaistītājiem notiek nepārtraukti, un šo procesu sauc par oglekļa aprites ciklu. Aprites cikls aptver vairākas oglekļa krātuves, starp kurām notiek dinamiskas oglekļa plūsmas vienā vai dažādos virzienos. Tā kā lielākā daļa no oglekļa apmaiņas reakcijām attiecas uz CO₂, tad cikla elementi, ko mēs pazīstam kā oglekļa piesaistītājus, patiesībā ir CO₂ piesaistītāji (Beijere et al., 2006).

Globālā oglekļa aprites cikla izpratne ir svarīga, izstrādājot potenciālās stratēģijas klimata pārmaiņu mazināšanā. Uz zemeslodes ir piecas galvenās oglekļa krātuves (1.1. att.) – fosilie resursi, atmosfēra, okeāns, biotiskā vide (dzīvie organismi) un pedosfēra, jeb augsne virs pamatieža (Lal, 2008). No minētajām oglekļa krātuvēm lielākā ir okeāns, tajā akumulētas apmēram 38 400 Gt oglekļa, un tā apjomi krātuvē palielinās vidēji ar ātrumu 2.3 Gt oglekļa gadā. Ģeoloģiskā oglekļa krātuve, ietverot visus fosilos resursus, ir otra lielākā. Fosilo resursu oglekļa krājumi tiek lēsti apmēram 4130 Gt, no tiem lielākais oglekļa apjoms akumulēts akmeņoglēs (85%), naftā (5.5%) un dabasgāzē (3.3%). Akmeņogles un nafta veido apmēram 40% no pasaules CO₂ emisijām (Schrag, 2007), bet nākotnē akmeņogļu patēriņš varētu arī pieaugt. Sadedzinot fosilos resursus, oglekļa apjomi krātuvē samazinās vidēji par 7 Gt gadā tam nonākot atmosfērā, bet, pieaugot akmeņogļu patēriņam CO₂ plūsma uz atmosfēru turpinās palielināties. Trešā lielākā oglekļa krātuve ir augsne līdz 1 m dziļumam jeb pedosfēra. Pedosfēra ietver augsnes organisko oglekli apmēram 1462–1548 Gt un augsnes neorganisko oglekli 695–748 Gt (Batjes, 2014). Ceturtā lielākā oglekļa krātuve ir atmosfēra – 760 Gt, kurā tas sastopams CO₂ veidā, savukārt vismazākā ir biotiskā vide – 560 Gt.



1.1. attēls. Oglekļa plūsma starp galvenajām oglekļa krātuvēm.

(Lal, 2008)

Figure 1.1. Global carbon pools and fluxes between them.

(Lal, 2008)

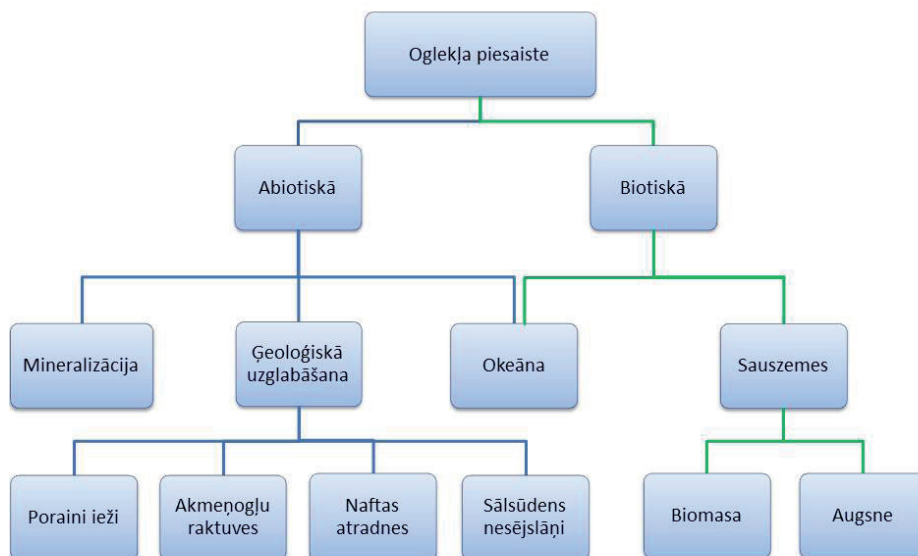
Starp atmosfēru un biotisko vidi ir lielas grūti aprēķināmas divvirzienu oglekļa plūsmas, bet no fosilajiem resursiem uz atmosfēru oglekļa plūsma ir vienvirziena un viegli aprēķināma (Berndes et al., 2011). Oglekļa daudzuma pieauguma temps atmosfērā lielā

mērā ir atkarīgs no antropogēnām darbībām, kā arī no biogeoķīmisko un klimatisko procesu mijiedarbības oglekļa krātuvēs. Daļa no atmosfērā nonākušā oglekļa absorbējas okeānos un dzīvajā biomasā, tomēr tā apjomi atmosfērā turpina palielināties, vidēji ar tempu 3.5 Gt oglekļa gadā. Prognozējams, ka fosilo resursu patēriņš kulmināciju sasniegs 2025. gadā, līdz ar to oglekļa plūsma uz atmosfēru turpinās palielināties, bet pēc tam būs vairāk vai mazāk konstanta, līdz samazināsies fosilo resursu ieguve (Lal, 2008). Sauszemes oglekļa krātuves (biotiskā vide un pedosfēra) kopā absorbē apmēram 2–4 Gt oglekļa gadā un līdz 2050. gadam to piesaistes potenciāls varētu palielināties līdz 5 Gt gadā (Scholes, Noble, 2001). Oglekļa piesaistes kapacitāte sauszemes ekosistēmās varētu palielināties caur tā saucamo CO₂ mēslošanas efektu (angļu val. *CO₂ fertilization effect*) (Matthews, 2007) un izmaiņām zemes lietojuma veidos un apsaimniekošanā. CO₂ mēslošanas efekta princips ir vienkāršs: lielāks CO₂ daudzums atmosfērā veicina augu augšanu, nodrošinot arvien lielāku CO₂ piesaisti to biomasā.

Sauszemes oglekļa plūsmas aprēķini uz citām krātuvēm ir mazāk precīzi nekā okeānos, atmosfērā un izlietojot fosilos resursus (Houghton et al., 2009). CO₂ emisijas zemes izmantošanas maiņas rezultātā ir neskaidras, jo joprojām nav precīzi zināms, piemēram, tropisko mežu atmežošanas apmērs, kā arī to biomasā (Xue et al., 2017). Arī Eiropas valstu mežu biomasas aprēķinos ir liela nenoteiktība, novērtējot uzkrātā oglekļa apjomus mežaudzēs pat vienas koku sugas ietvaros, kas norāda uz nepieciešamību uzlabot aprēķinu kvalitāti (Neumann et al., 2016). Šobrīd sauszemes oglekļa uzkrājumu raksturošanas metožu izvēle un tās pilnveidošana ir katras valsts atbildība, tomēr metodikas izstrādāšanas pamatprincipus un emisiju faktoros nosaka vadlīnijas, kuru uzdevums ir harmonizēt aprēķinu metodes un padarīt rezultātus salīdzināmus. Zinātniski pamatotu aprēķina metožu izstrādāšanai ir būtiska ietekme uz globālās oglekļa plūsmas aprēķinu ticamību un klimata pārmaiņu mazināšanas politikas mērķu sasniegšanu. Katras valsts lokālo apstākļu iekļaušana aprēķinos ļauj būtiski samazināt nenoteiktību un identificēt efektīvākos klimata izmaiņu mazināšanas pasākumus.

1.1.2. Atmosfēras oglekļa piesaiste

Atmosfērā esošā CO₂ uztveršanu un uzglabāšanu citās oglekļa krātuvēs, kas citādi tiktu emitēti atpakaļ atmosfērā, sauc par oglekļa piesaisti. Visus oglekļa piesaistes veidus var iedalīt divās lielās kategorijās: abiotiskie un biotiskie oglekļa piesaistes paņēmieni (1.2. att.). Abiotiskie piesaistes paņēmieni balstās uz fizikālām un ķīmiskām reakcijām, kā arī inženiertehniskām metodēm bez dzīvo organismu (piemēram, augu vai mikroorganismu) iejaukšanās (Lal, 2008). Savukārt biotisko paņēmieni pamatā ir oglekļa piesaiste no atmosfēras caur fotosintēzes procesu un turpmāku tā noglabāšanu augsnē un okeānos. Fotosintēzes blakusprodukts ir skābeklis, attiecīgi, mazinoties CO₂ piesaistei no atmosfēras, samazinās arī skābekļa saturs atmosfērā.



1.2. attēls. Potenciālās oglekļa piesaistes iespējas.

(atbilstoši literatūrā pieejamajai informācijai)

Figure 1.2. *Potential carbon sequestration options.*

(according to literature review)

Viena no reālākajām abiotiskajām piesaistes iespējām CO₂ koncentrācijas samazināšanai atmosfērā ir tā uztveršana un uzglabāšana zemes dziļēs vai okeānos. Tas ir process, kurā antropogēnas izcelsmes CO₂ tiek savākts, tādā veidā nodrošinot gāzes izolāciju no atmosfēras (Pires et al., 2011; Boot-Handford et al., 2014). Uztverto CO₂ var iesūknēt izstrādātās akmeņogļu raktuvēs, naftas urbumos, stabilos iežu slāņos vai sālsūdens nesējslāņos (Klara et al., 2003). CO₂ iesūknēšana okeānos lielā dziļumā ir alternatīva, kas plaši apspriesta jau apmēram 40 gadus (Lal, 2008). Lielā dziļumā (dziļāk par 1000 m) CO₂ ir blīvāks nekā ūdens, līdz ar to tas grimst un var tikt uzglabāts okeānu dziļēs. CO₂ piesaistes potenciāls okeānos lēsts līdz 10 000 Gt, pārsniedzot aprēķinātos fosilo kurināmo krājumus (IPCC, 2005). Kopš idejas rašanās septiņdesmito gadu beigās ir panākts ievērojams progress izmaksu samazināšanas ziņā CO₂ uzglabāšanai okeānos, bet joprojām metode vērtējama kā dārga. Rūpnieciskā CO₂ uzglabāšana prasa lielu enerģiju un dārgas iekārtas, uztvertā gāze ir jātransportē un jāuzglabā stabilos ģeoloģiskos veidojumos (Rubin, 2012). Uzglabāšanas izmaksas ir novērtētas apmēram 40–70 eiro par tonnu CO₂, atkarībā no pielietotās tehnoloģijas (Narbel et al., 2014), tāpēc joprojām turpinās darbs pie citu risinājumu meklēšanas. CO₂ iesūknēšana ekspluatējamās naftas vai gāzes atradnēs, vienlaikus izspiežot no iežiem fosilos resursus, varētu būt ekonomiski izdevīgāka stratēģija, kas vēl jāpilnveido (Lackner, 2003). Citas potenciālās oglekļa piesaistes iespējas, kuras prezentējuši zinātnieki, ir mākslīgās fotosintēzes izvērsšana (Meyer, 1989), CO₂ pārveidošana ģeoloģiski stabilos minerālkarbonātos (Huijgen, Comans, 2003), kā arī

oglekļa piesaiste okeānos ar aktīvo absorbētāju palīdzību. Tomēr arī iepriekšminētajām metodēm ir augstas izmaksas vai liels risks negatīvi ietekmēt apkārtējo vidi (Royal Society, 2009).

Kopumā abiotiskajai oglekļa piesaistei okeānos un zemes dziļēs prognozē lielu potenciālu, jo teorētiski šiem avotiem ir lielāka oglekļa ietilpība nekā biotiskajai piesaistei (Freund, Ormerod, 1997). Tomēr mākslīga oglekļa noglabāšana varētu būt plašāk izmantojama vien pēc 2025. gada, jo šobrīd pieejamās tehnoloģijas ir dārgas, energoietilpīgas un saistās ar augstu CO₂ noplūžu risku. (Lal, 2008). Šī iemesla dēļ šobrīd pasaulē lielāks uzsvars tiek likts tieši uz biotiskajām oglekļa piesaistes metodēm, kas vienlaicīgi ļauj samazināt arī energoresursu patēriņu un nodrošināt mazāku fosilā kurināmā izmantošanu.

Literatūrā minēta arī cita iespēja, kā dabiskā veidā piesaistīt okeānos oglekli ar fotosintēzes palīdzību. Fitoplanktona fotosintēze ir viens no bioloģiskajiem mehānismiem, kurš gadā piesaista apmēram 45 Gt oglekļa (Falkowski, 2000). Daļa no fitoplanktona organiskā materiāla nogulsnējas okeāna dzelmē, tādējādi akumulējot oglekli. Dzelzs (Fe) pieejamība ir viens no faktoriem, kas ietekmē fitoplanktona izplatību okeānu ekosistēmās. Tāpēc tiek veikti pētījumi par Fe mēslošanas nozīmi biotiskajā CO₂ piesaistē okeānos (Martin et al., 1994; Boyd et al., 2004). Ņemot vērā pašreizējo zināšanu līmeni, joprojām nav skaidrs, kā okeānu mēslošana var ietekmēt okeānu ekoloģiju ilgtermiņā, līdzīgi kā CO₂ iesūkņēšana (Chisholm, 2001; Williamson et al., 2012).

Mitrāji un to augsnes ir ievērojama krātuve, kas uzglabā apmēram 450 Gt oglekļa (Warner et al., 1993). Kūdras augsnes var saturēt vairāk nekā 200 reizes lielāku oglekļa daudzumu nekā uz tām esošā veģētācija (Garnett et al., 2001). Tomēr šādu augšņu nosusināšana un to turpmāka izmantošana vairumā gadījumos padara tās par CO₂ emisiju avotu. Lielas mitrāju platības daudzu gadu garumā visā pasaulē ir nosusinātas lauksaimniecības vai mežsaimniecības vajadzībām. Kūdra nosusinātās augsnēs sadalās, un kūdras biežums samazinās ar ātrumu 1–2 cm gadā, galvenokārt oksidācijas procesu rezultātā (Wosten et al., 1997; Leifeld et al., 2011). Mitrāju atjaunošana varētu novest pie atgriezeniska procesa un būt oglekļa piesaistes nevis emisiju avots. Tomēr pēc to atjaunošanas paietu pārāk ilgs laiks, līdz dabisko procesu rezultātā atjaunotās mitrzemes kļūtu līdzīgas dabiskajām. Zinātnieku pētījumi liecina par to, ka boreālajā un hemiboreālajā mežu joslā arī pēc nosusināšanas augsne var darboties kā oglekļa piesaistītājs nevis emisiju avots (Ojanen et al., 2010; Lohila et al., 2011; Lupikis et al., 2017). Tas nozīmē, ka meža audzēšana šādās platībās nodrošina lielāku oglekļa ienesi augsnē, pārsniedzot oglekļa emisijas kūdras sadalīšanās rezultātā.

Oglekļa piesaiste dabisku procesu rezultātā notiek ne tikai mitrāju augsnēs, bet arī citās minerālaugsnēs, papildinot augsnes organiskā un neorganiskā oglekļa krājumus. Pretstatā ģeoloģiskajai piesaistei, kur CO₂ mākslīgi iesūknē 1–2 km dziļumā, augsnes organiskā oglekļa piesaiste norisinās 0–40 cm dziļumā dabisku humifikācijas procesu rezultātā. Apstrādātas augsnes parasti satur mazākus oglekļa krājumus nekā līdzvērtīgas neapstrādātas augsnes, jo augsnes apstrādes rezultātā notiek augsnē esošā oglekļa emitēšana. Uzsākot iepriekš neapgūtas augsnes apstrādi, visstraujāk organiskais ogleklis tiek atbrīvots

pirmajos 20–50 gados mērenajos reģionos un pirmo 5–10 gadu laikā tropiskajos reģionos (Lal, 2001). Apstrādāta augsne satur apmēram 50–75% no sākotnējā organiskā oglekļa apjoma, un tā emisiju izraisa oksidēšanās, mineralizācijas, izskalošanās un erozijas procesi (Kumar et al., 2013). Noplicinātu augšņu atjaunošana ir viena no stratēģijām, lai samazinātu CO₂ daudzumu atmosfērā. Organiskā oglekļa piesaistes potenciāls augsnēs ir novērtēts aptuveni 0.4–1.2 Gt jeb 5–15% no pasaules fosilo kurināmo emisijām (Lal, 2004). Kūtsmēsļu, notekūdeņu dūņu un citu minerālmēslojumu izmantošana lauksaimniecībā ir veids, kā paātrināt un palielināt augsnes oglekļa piesaisti (Smith et al., 1997), jo augsnes oglekļa piesaistes apjoms ir cieši saistīts ar augu virszemes daļā un saknēs esošā oglekļa izmantošanu humifikācijas procesā. Atšķirībā no augsnes organiskā oglekļa, neorganiskā oglekļa piesaistes ātrums ir ievērojami lēnāks un tas notiek sarežģītu ķīmisku reakciju rezultātā.

Oglekļa uzkrāšana mežos dzīvajā un nedzīvajā biomasā, zemsegā un augsnē, kā arī koksnes produktos jau no klimata pārmaiņu problēmas pirmsākumiem ir atzīta par efektīvu metodi CO₂ samazināšanai atmosfērā, neradot negatīvu ietekmi uz vidi (Lal, 2008). Meža ekosistēmās ogleklis tiek uzkrāts ne tikai kokaugu biomasā, bet arī nobīrās, augos un augsnē. CO₂ mēslošanas efekta rezultātā prognozējams, ka potenciālā oglekļa piesaiste meža ekosistēmās varētu nākotnē palielināties pie nosacījuma, ja augsnes nodrošinājums ar barības vielām nesamazināsies.

Diskusijas par meža platību un koku ciršanas vecuma palielināšanu joprojām ir aktuālas globālā mērogā. Tiek meklēti jauni starptautiski instrumenti globālai SEG samazināšanai atmosfērā, mēģinot samazināt mežizstrādes apjomus un kombinējot dažādas zemju apmežošanas un neproduktīvu mežaudžu nomaiņas programmas. Saskaņā ar atsevišķu zinātnieku domām, zemes lietojuma veida maiņa, ieskaitot meža zemes transformāciju, ir viens no galvenajiem iemesliem, kas 21. gadsimtā veicina cilvēces radītas vides problēmas (Petrokofsky et al., 2012). Tikai atmežošana vien izraisa apmēram 12% no visām SEG emisijām, savukārt vēl 6% rada kūdras oksidēšanās nosusināšanas rezultātā un ugunsgrēki kūdras atradnēs (Werf et al., 2009). Daļēji zemes lietojuma maiņas rezultātā izraisīto meža platību samazināšanos tropiskajos reģionos kompensē meža platību palielināšanās mērenajā un boreālajā joslā (Ni et al., 2016). Apmežošanas pretinieki gan apgalvo, ka liela mēroga atklātu vietu apmežošanai var būt arī negatīva kopējā ietekme uz klimatu, jo tiks samazināts zemes albedo (Unger, 2014) vai arī būtiski tiks ietekmēta ūdens plūsma, kā arī palielināsies augsnes sasāļošanās un paskābināšanās (Jackson, 2005). Albedo ir saules radiācijas daļa, ko atstaro zemes virma atpakaļ atmosfērā. Tādēļ, apsverot plaša mēroga apmežošanas pasākumus, būtu jāņem vērā arī procesa negatīvā ietekme uz ūdens pieejamību un albedo izmaiņām. Risinājums varētu būt izaudzētās koksnes novākšana un ilglaicīga uzglabāšana zem zemes, tādējādi noglabājot koksni saistīto oglekli. Šāda stratēģija, pamatojoties uz minēto ideju, tika ieteikta vairākus gadus iepriekš (Zeng, 2008; Köhl, Frühwald, 2009).

Sausa koksne satur apmēram 50% oglekļa, un koksne varētu tikt noglabāta uz ilgu laiku, piemēram, izstrādātās ogļu raktuvēs vai speciālās uzglabāšanas vietās netālu no mežiem (Ni et al., 2016). Analizējot ieteiktās metodes, oglekļa noglabāšana ēkās un mēbelēs

tomēr ir lētāks un saprātīgāks paņēmieni. Īpaši pēdējos gados arvien aktuālāka kļūst CO₂ emisiju samazināšana ēku būvniecībā, arvien jaunu koksnes pielietojumu atrašana, kā arī tās apstrādes tehnoloģiju pilnveidošana (Gustavsson et al., 2006; Cabeza et al., 2013). Novērtēts, ka oglekļa uzglabāšanas teorētiskais potenciāls koksnes produktos vai koksnes krātuvēs globālā mērogā varētu būt 5–15 Gt oglekļa gadā (Zeng, 2008). Reālais potenciāls gan varētu būt ievērojami mazāks, jo pasaulē pastāv daudz un dažādi mežsaimnieciskās darbības ierobežojumi kuri limitē pieejamos koksnes resursus. Klimata pārmaiņu starpvaldību padome (IPCC) deviņdesmitajos gados novērtējusi neto oglekļa piesaisti sauszemes ekosistēmās apmēram 1–2.6 Gt oglekļa gadā. Jaunākos pētījumos, izmantojot meža inventarizāciju datus un jaunākos secinājumus par oglekļa apriti ekosistēmās, oglekļa piesaiste novērtēta vidēji 2.4 ± 0.4 Gt gadā, bet piesaistes lielums katru gadu ir mainīgs (Pan et al., 2011). Nenoteiktības un oglekļa piesaistes izmaiņu laika gaitā dēļ ārkārtīgi svarīgi ir veikt precīzus oglekļa piesaistes aprēķinus, lai pieņemtu nepieciešamos lēmumus par klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumiem.

1.1.3. Oglekļa uzskaites aktualitāte

SEG uzskaites nozīme pasaules attīstītajās valstīs ir aktualizējusies, kopš starptautiskā mērogā ir uzsākta cīņa pret straujām klimata pārmaiņām. 1997. gada 11. decembrī pieņemts Kioto protokols, kas pievienots UNFCCC un ir viens no svarīgākajiem starptautiskajiem juridiskajiem instrumentiem, kas šobrīd nosaka mērķus un metodes cīņai pret klimata izmaiņām. Lai protokols kļūtu izpildāms, tas bija jāratificē pietiekamam skaitam pasaules valstu, kuru radītās emisijas pārsniedz 55% no pasaules CO₂ emisijām (Breidenich et al., 1998). Amerikas Savienoto Valstu radīto emisiju īpatsvars ir 36.1% no kopējām pasaules emisijām, tomēr šī valsts atteicās parakstīt Kioto protokolu un vēlāk izstājās no līguma. Tikai tad, kad Krievijas Federācija, kuras emisiju īpatsvars bija 17.4%, parakstot protokolu, kļuva par dalībvalsti, tas 2005. gada 16. februārī varēja stāties spēkā (Bejjere et al., 2006).

Kioto protokola un UNFCCC uzdevumi ir ierobežot un samazināt sešu galveno SEG (oglekļa dioksīds CO₂, metāns CH₄, dislāpekļa oksīds N₂O, fluorogļūdeņraži HFC, perfluorogļūdeņraži PFC, sēra heksafluorīds SF₆) plūsmu uz atmosfēru, kā arī palielināt CO₂ piesaisti oglekļa krātuvēs. Gadu gaitā daudzu dalībvalstu politiskā griba Kioto protokola ietvaros ir būtiski vājinājusies. To veicināja arī grūtības globālā mērogā izstrādāt vienotu emisiju samazināšanas politiku, jo dalībvalstu viedokļi bija ļoti atšķirīgi (Gren, Zeleke, 2016). Likumprojekti, kas vienas dalībvalsts tautsaimniecību būtiski neietekmēja, citās dalībvalstīs radīja lielu ietekmi uz to ekonomiku. IPCC secināja, ka ar SEG emisiju samazināšanu attīstītajās valstīs būs par maz, lai sasniegtu sākotnēji izvirzītos mērķus, turklāt strauji augošā ekonomika Ķīnā un Indijā radīja arvien lielākas SEG emisijas. Pēc pirmā Kioto protokola saistību perioda beigām 2012. gadā izrādījās neiespējami izvirzīt un apspriest jaunus emisiju samazināšanas plānus ar tādām lielām valstīm kā Japānu, Jaunzēlandi un Krievijas Federāciju, kamēr Kanāda un Amerikas Savienotās valstis Kioto protokolu nemaz nebija ratificējušas (Savaresi, 2016).

Kopš cīņas uzsākšanas pret klimata pārmaiņām SEG emisijas pasaulē ir tikai augušas un sasniegušas līdz šim augstāko līmeni (Grassi et al., 2017). Iepriekšminētā situācija ir atstājusi Eiropas Savienību un citas valstis, kā, piemēram, Austrāliju, Norvēģiju un Šveici neizdevīgā pozīcijā kā vienīgās protokola līgumslēdzējas puses ar reāliem emisiju samazināšanās mērķiem (Savaresi, 2016). Eiropas Savienība ir apņēmusies līdz 2020. gadam samazināt kopējo SEG emisiju apjomu vismaz par 20%, salīdzinot ar 1990. gada līmeni, un uzņemties saistības par samazinājumu pat par 30%, ja citas rūpnieciskās valstis piekritīs rīkoties līdzīgi. Lai panāktu šāda līmeņa emisiju samazinājumu, tika nosprausti mērķi līdz 2020. gadam uzlabot energoefektivitāti par 20%, palielināt atjaunojamās enerģijas īpatsvaru par 20% un panākt, lai 10% transportlīdzekļos izmantotās degvielas būtu biodegviela. Kļuva skaidrs, ka, lai turpmāk novērstu klimata pārmaiņas, veicinātu pāreju uz oglekļa mazietilpīgu un pret klimata pārmaiņām noturīgu attīstību, ir nepieciešama jauna vienošanās, aizstājot Kioto protokolu.

Pēc ilgām diskusijām 2015. gada 12. decembrī 195 pasaules valstu vienbalsīgi apstiprinātais Parīzes nolīgums ir līdz šim nozīmīgākā starptautiskā vienošanās, kuras mērķis ir izvairīties no sekām, ko rada klimata izmaiņas (Grassi et al., 2017). Parīzes nolīgums 2020. gadā aizstās Kioto protokolu, un tā galvenais mērķis būs noturēt globālās temperatūras pieaugumu zem 2°C, salīdzinot ar pirms rūpniecības laikmeta vidējo temperatūru (Rogelj et al., 2016), un censties ierobežot temperatūras pieaugumu 1.5°C robežās (Hulme, 2016). Nolīgumā īpaši tiek uzsvērtā negatīvā atmežošanas un noplicinošas meža apsaimniekošanas ietekme kopējā CO₂ emisiju samazināšanā. Latvija Parīzes nolīguma ratifikāciju apstiprināja 2017. gada 9. februārī un tā nosacījumus – samazināt Eiropas Savienības SEG emisijas par vismaz 40% līdz 2030. gadam – īsteno kopīgi ar pārējām dalībvalstīm. Parīzes nolīguma izvirzītie mērķi ir ļoti ambiciozi; lai noturētu globālās temperatūras pieaugumu zem 2°C, ikgadējās CO₂ emisijas jāsamazina no pašreizējā līmeņa 10 Gt oglekļa gadā līdz 5–6 Gt oglekļa 2050. gadā (Ni et al., 2016). Kaut gan sauszemes un okeāna oglekļa krātuvēs tiek absorbēts apmēram 60% no kopējo CO₂ emisiju apjoma, tomēr piesaistes ātrums un kapacitāte nav pietiekama, lai asimilētu visus plānotos antropogēnos CO₂ izmešus 21. gadsimtā, ja turpmāk netiks krasi ierobežota fosilo resursu izmantošana (Lal, 2008).

Lai būtu iespējams izvērtēt mežsaimniecības sektora ieguldījumu, katrai valstij 2011. gadā aprēķināts SEG emisiju samazināšanas un piesaistes palielināšanas mērķis jeb tā sauktais meža apsaimniekošanas references līmenis (angļu val. *forest management reference level* vai *forest reference emission level*). UNFCCC noteiktais references līmenis ir oglekļa emisiju robežvērtība, pret kuru iespējams novērtēt valsts mežsaimniecības sektora ieguldījumu emisiju samazināšanā. Latvijai, kā arī vairākām citām dalībvalstīm, kurām nebija pieejama nacionālā aprēķinu metodika, meža apsaimniekošanas references līmeni aprēķināja komisijas pētniecības centrs. Mūsu valstij sākotnēji tika apstiprināts ļoti ambiciozs references līmenis (–16 302 milj. t CO₂ ekvivalenti gadā), un bija augsts risks, ka šo mērķi nebūs iespējams sasniegt, ņemot vērā ka mežam jāapmierina arī sabiedrības sociālās un ekonomiskās funkcijas. Dalībvalstīm bija tiesības nepaļauties uz komisijas aprēķiniem un izstrādāt arī savas nacionālās metodikas references līmeņa precizēšanai.

Metodikas pilnveidošanas rezultātā, izmantojot daudz korektākus nacionālā meža resursu monitoringa (MRM) datus, Latvijā izstrādātos biomasas vienādojumus (Liepiņš et al., 2017) un citus uzlabojumus, Latvijas meža apsaimniekošanas saistību apmērs no 2014.–2020. gadam samazināsies zem 4000 milj. t. CO₂ gadā. Četrkārtīgā atšķirība starp Eiropas Komisijas ekspertu izstrādāto meža apsaimniekošanas references līmeni un aprēķinu rezultātiem, kas balstīti uz Latvijā pārbaudītiem pieņēmumiem, norāda uz ārkārtīgi būtisku nacionālo metožu un aprēķinu lomu SEG emisiju uzskaitē un prognozēšanā.

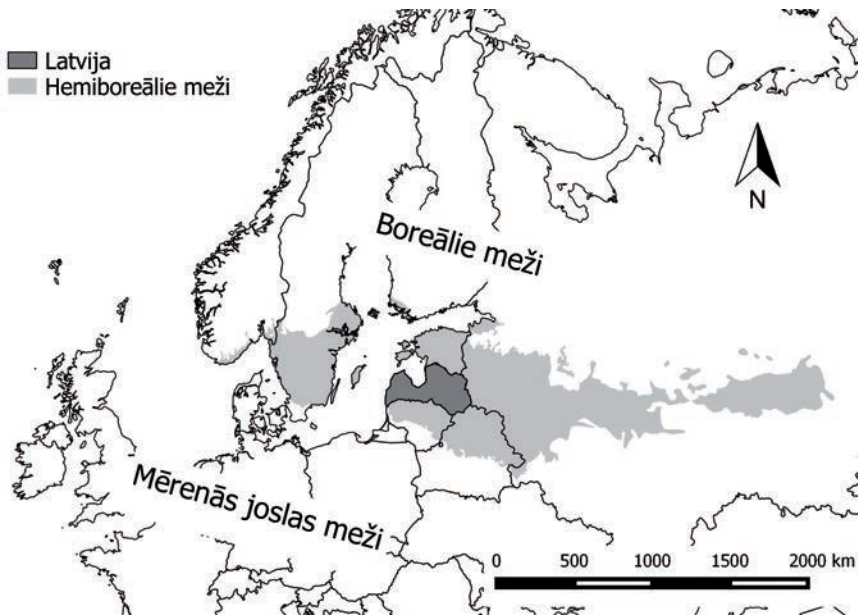
Parīzes nolīgums nosaka, ka dalībvalstīm arī pēc 2020. gada būs jānosaka meža apsaimniekošanas references līmenis, kurš noteiks mežsaimniecības radīto SEG emisiju un CO₂ piesaistes robežvērtības no 2021.–2025. un 2026.–2030. gadiem (Sasaki et al., 2016). Eiropas Komisijā turpinās darbs pie dalībvalstu nacionālā mežsaimniecības uzskaites plāna izstrādes (angļu val. *national forestry accounting plan*), kurā tām būs jāpamato noteiktais meža apsaimniekošanas references līmenis. Lai Latvija spētu aizstāvēt savas pozīcijas, ir nepieciešami ne vien zinātniski pētījumi par risinājumiem emisiju mazināšanai un to uzskaites metožu pilnveidošanai, bet arī diplomātiski jāspēj pamatot Latvijas intereses Eiropas līmenī.

Viens no mehānismiem CO₂ emisijas samazināšanai atmosfērā ir emisiju kvotu tirdzniecības sistēma (ETS). Viena emisijas kvota ir atļauja emitēt 1 tonnu CO₂ izmešu. Eiropas Savienības iekšējā ETS ir lielākais oglekļa tirgus pasaulē (Fan et al., 2017) un līdz šim organizēta trijos pārskata periodos (Cretí, Joēts, 2017). Pirmajā pārskata periodā, kas norisinājās no 2005.–2007. gadam, visas emisiju kvotas tika piešķirtas bez maksas, radot iespaidīgu emisijas kvotu pārpalikumu, ko vēlāk nācās anulēt. Arī nākamajā pārskata periodā no 2008.–2012. gadam kvotas piešķīra bez maksas, tomēr ar nelielu rezervi, ko Eiropas Komisija vēlāk pārdeva izsolē tām valstīm kuras saistības nevarēja izpildīt. No 2013. gada sācies nākamais ETS periods, kas noslēgsies 2020. gadā. Arī trešajā periodā tika nolemts, ka daļa kvotu dalībvalstīm jāpiešķir bez maksas, bet pārējām jānonāk izsolēs. Vairāk nekā 40% no tirgū pieejamajām emisiju kvotām tiek izsolītas elektroenerģijas nozarē un šī daļa katru gadu pieaug (European Commission, 2017). Kopumā Eiropas Savienības ETS sistēma nav devusi sākotnēji gaidīto rezultātu (Cretí, Joēts, 2017). Zemās emisijas kvotu cenas nav motivējušas samazināt kaitīgo CO₂ emisiju nonākšanu atmosfērā. Nepieciešamība mainīt esošo situāciju ETS novedusi pie reformām, kas stāsies spēkā nākamajos gados. Reformu rezultātā pieaugs CO₂ emisiju cena, kas ietekmēs visus iedzīvotājus un uzņēmumus Eiropas Savienībā. Paredzams, ka, pieaugot emisiju vienību cenai, neizbēgami palielināsies elektroenerģijas cenas, jo tieši šī nozare ir galvenais emisiju kvotu pircējs.

Atbilstoši UNFCCC prasībām, dalībvalstīm, t. sk. Latvijai, katru gadu ir jāsniedz pārskats par SEG emisijām un CO₂ piesaisti, kā arī noteiktajos termiņos jāsaģatavo nacionālie ziņojumi atbilstoši IPCC definētajām vadlīnijām (Gasparini, Di Cosmo, 2015; Grassi et al., 2017). Ziņojumos jāsniedz informācija ne tikai par SEG emisijām un CO₂ piesaisti, bet arī par UNFCCC saistību īstenošanai veiktajiem un iecerētajiem politiskajiem risinājumiem (IPCC, 2003; Eggleston et al., 2006). Pēc veiksmīgas Eiropas Savienības emisiju samazināšanas mērķu sasniegšanas otrajā pārskata periodā (2008.–2012. gads)

turpmākie Eiropas Savienības izvirzītie mērķi ir daudz ambiciozāki, tajā skaitā arī attiecībā uz meža apsaimniekošanu.

Atmežošana ir galvenais SEG emisiju avots tropu mežos, bet lielākais oglekļa apjoms tiek piesaistīts mērenajos un boreālajos mežos (Pan et al., 2011). Latvija un Igaunija, lielākā daļa Lietuvas, Baltkrievijas ziemeļu daļa un Zviedrijas dienvidu reģioni pēc teritoriālā novietojuma atrodas Eiropas hemiboreālajā mežu joslā (Ahti et al., 1968), kas izvietota starp mēreno un boreālo joslu (1.3. att.). Vadlīnijās (Eggleston et al., 2006) Latvijai tiek piedāvāti mērenās mežu joslas biomasas un līdz ar to oglekļa aprēķinu un pārrēķinu koeficienti, kurus ieteikts pielietot arī tādām Eiropas valstīm kā Horvātija, Bulgārija un Serbija. Šo pārrēķina koeficientu lietošana Latvijas mežos var radīt ievērojamu uzkrātā oglekļa pārvērtēšanas risku. Vairāki zinātnieki ir pētījuši koku virszemes biomasas variēšanu atkarībā no ģeogrāfiskā novietojuma, veģetācijas zonām, ūdens deficīta, vidējās temperatūras un citiem faktoriem (Berninger et al., 1995; Wirth et al., 2004; Stegen et al., 2011). Dažādu klimatisko faktoru kompleksās iedarbības rezultātā mežaudžu krājam, līdz ar to arī kokos uzkrātā oglekļa apjomam Eiropā ir tendence palielināties virzienā no ziemeļu platuma grādiem uz dienvidiem.



1.3. attēls. Latvijas atrašanās vieta hemiboreālo mežu joslā.
(pēc Ahti et al., 1968 un EEA, 2007)

*Figure 1.3. Location of Latvia in the hemiboreal forest zone.
(according to Ahti et al., 1968 and EEA, 2007)*

Pirmajos Kioto protokola saistību gados CO₂ piesaiste tika rēķināta vienkāršoti, izmantojot IPCC izstrādātos noklusētos pārrēķinu koeficientus. 2011. gadā Latvijas Valsts mežzinātnes institūts “Silava” uzsāka AS “Latvijas valsts meži” un SIA “Meža nozares kompetences centrs” finansētu pētījumu par mežsaimniecisko darbību ietekmi uz SEG emisijām un oglekļa piesaisti. Pētījums noslēdzās 2015. gadā, un tā ietvaros izstrādātie matemātiskie instrumenti ļāva būtiski uzlabot kokaudžu CO₂ piesaistes aprēķinu metodiku, piemērojot Latvijas teritorijai atbilstošākus pārrēķinu koeficientus nekā vadlīnijās minētie, izvairoties no būtiska oglekļa apjoma koksnes biomasā pārvērtēšanas riska.

Koksnes biomasas mežaudzēs Latvijā ir viens no CO₂ piesaistes pamatavotiem, tāpēc, atbilstoši starptautiskajām SEG inventarizācijas ziņojuma sastādīšanas vadlīnijām, Latvijā vairs nedrīkst izmantot vadlīnijās iekļautos biomasas pārrēķinu koeficientus, bet ir jāizstrādā zinātniski pamatota un aprobēta metodika oglekļa apjoma koksnes biomasā novērtēšanai, tajā skaitā vienādojumi koku biomasas noteikšanai. Latvijā mežs ir vienīgā ZIZIMM sektora kategorija, kur oglekļa piesaiste pārsniedz SEG emisijas. Saskaņā ar nacionālā SEG inventarizācijas ziņojuma datiem ik gadu koku biomasā tiek piesaistīts apmēram 32 milj. t CO₂, lai gan daļa no tā nonāk atpakaļ atmosfērā mežizstrādes un citu procesu rezultātā. Rēķinot uz platības vienību, ikgadējā Latvijas mežu oglekļa piesaiste ir ievērojama pat visas Eiropas mērogā, tāpēc ir svarīgi, lai mēs to spētu novērtēt maksimāli precīzi.

1.2. Kokaudžu biomasas novērtēšanas metodes

Atbilstoši *H. Eggleston et al.* (2006) klasifikācijai, meža ekosistēmā piecas galvenās oglekļa krātuves ir stumbra un zaru biomasas, sakņu biomasas, nobiras, kritālas un organiskās vielas augsnē. Fotosintēzes procesā augus uzņemtais ogleklis nepārtraukti pārvietojas starp šīm oglekļa krātuvēm. Vislielākais piesaistītā oglekļa apjoms ir akumulēts kokaugu virszemes biomasā, kas ir vissvarīgākā un redzamākā no minētajām sauszemes oglekļa krātuvēm (Ravindranath, Ostwald, 2008a). Sakņu biomasas, jeb visu dzīvo sakņu galvenā funkcija globālajā oglekļa aprites ciklā ir tā nogādāšana un uzglabāšana augsnē (Eggleston et al., 2006). Nobiru un kritālu kopējā masa sastāda vien nelielu īpatsvaru no kopējā mežaudzēs akumulētā oglekļa apjoma, tāpēc tai ir neliels īpatsvars kopējā oglekļa bilancē (Ravindranath, Ostwald, 2008a). Arī organiskā augsne ir nozīmīga oglekļa krātuve mežā, bet oglekļa piesaiste augsnē, tāpat kā nobirās un kritālās akumulētais ogleklis, ir tiešā mērā atkarīgs no augu virszemes un sakņu daļas biomasas (Lal, 2005; Kumar et al., 2006;). Tāpēc koku biomasas novērtēšana ir priekšnoteikums, lai varētu apzināt nobirās, kritālās un augsnē akumulēto oglekļa apjomus.

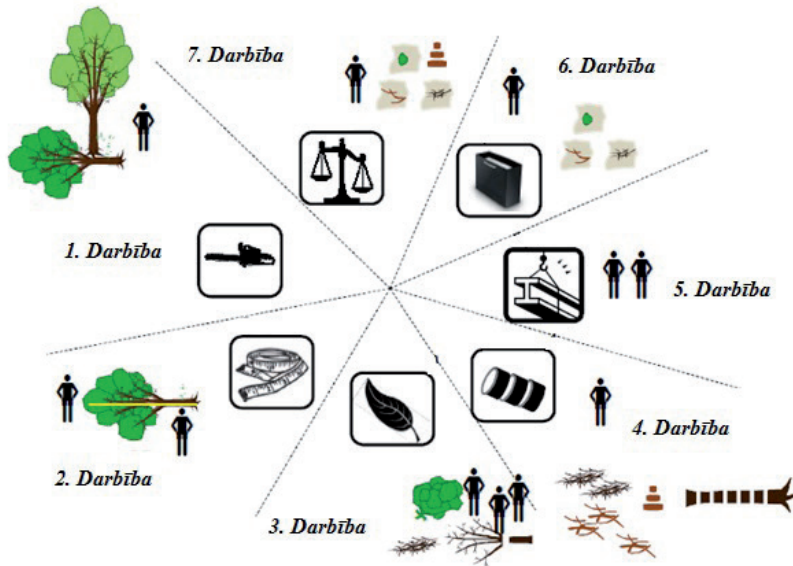
1.2.1. Virszemes biomasas novērtēšana

Koku virszemes biomasu ietver vairākas biomasas frakcijas, kuras nepieciešams noteikt atsevišķi: stumbra koksne, stumbra miza, sausie zari, dzīvie zari, lapas vai skuju (Eggleston et al., 2006; Ravindranath, Ostwald, 2008a). Novērtējot kokaudzēs saistītā oglekļa apjomus, vairumā gadījumu zinātnieki biomasas frakciju skaitu samazina, piemēram, stumbra koksnes masa tiek noteikta kopā ar mizu, iegūstot uzreiz visa stumbra biomasu. Arī skuju koku dzīvajiem zariem ļoti bieži pieskaita klāt skuju un čiekuru masu. Nedaudz citādi ir ar lapkokiem, jo, mērot zaru biomasu koku bezlapu periodā, lapu masa netiek iekļauta aprēķinos.

Ir pieejamas divas empīrisku datu ievākšanas metodes koku virszemes biomasas novērtēšanai. Pirmā metode, saukta arī par destruktīvo metodi (angļu val. *destructive method* vai *harvest method*), ir izvēlēto paraugkoku vai visu koku nozāģēšana noteiktā platībā. No visām koku biomasas aprēķina metodēm destruktīvā metode ir visprecīzākā, tomēr arī dārgākā un darbietilpīgākā (Gibbs et al., 2007). Metodes pamatā ir atsevišķu koku frakciju – stumbra un zaru – atdalīšana, svēršana vai tilpuma aprēķināšana un reprezentatīvu paraugu ievākšana absolūti sausas biomasas aprēķināšanai. Metodes ierobežojumi ir tādi, ka tā ir piemērojama tikai nelielām platībām vai atsevišķu koku biomasas noteikšanai. Minēto metodi galvenokārt pielieto, izstrādājot alometriskos vienādojumus, kurus savukārt piemēro biomasas novērtēšanai plašākā mērogā (Marklund, 1988; Jenkins et al., 2003; Zianis et al., 2005; Cienciala et al., 2006; Johansson, 2007; Repola, 2008, 2009; Blujdea et al., 2012; Mugasha et al., 2013; Chave et al., 2014; Smith et al., 2014; Bronisz et al., 2016).

Pretēji iepriekšējai, otra biomasas novērtēšanas metode paredz biomasas aprēķināšanu bez koku iznīcināšanas jeb nozāģēšanas (angļu val. *non-destructive method*). Metode piemērojama meža ekosistēmās, kurās aug retas vai aizsargājamas koku sugas un šādu koku nozāģēšana nav iespējama vai pieļaujama, vai arī biomasas novērtēšanai plašākā mērogā. Piemēram, *N. Montès et al.* (2000) izstrādāja metodi *Juniperus thurifera* L. biomasas novērtēšanai Marokas dienvidos. Pētījumā individuālu koku biomasu novērtēja, datorizēti rekonstruējot koka formu un vainagu (pēc divām uzņemtām fotogrāfijām noteiktos leņķos), tad, izmantojot katra koka frakciju (stumbrs, zari, lapas) tilpuma un blīvuma datus, aprēķināja koka biomasu. Cits veids kā nedestruktīvi novērtēt virszemes biomasu, ir kāpt kokos un mērīt zaru vai stumbra diametrus noteiktās vietās un augstumos (Aboal et al., 2005), vai arī vienkārši nomērīt krūšaugstuma caurmēru, koka augstumu, koka tilpumu, blīvumu un, pielietojot alometriskos vienādojumus, aprēķināt biomasu (Ravindranath, Ostwald, 2008a). Lai gan šīs metodes raksturojamas kā saudzīgākas, tomēr atsevišķu koku nozāģēšana un nosvēršana pēc destruktīvās metodes ir nepieciešama, lai pārbaudītu izstrādātās metodes precizitāti. No visām koku biomasas novērtēšanas metodēm alometrisko vienādojumu pielietošana ir visizplatītākā.

Atbilstoši *N. Picard et al.* (2012) ieteikumiem, koku virszemes biomasas novērtēšanai ar destruktīvo metodi vajadzētu būt organizētai, secīgi izpildot septiņas darbības (1.4. att.).



1.4. attēls. Veicamās darbības kokaugu virszemes biomasas novērtēšanai.

(pēc Picard et al., 2012)

Figure 1.4. *Organization of a biomass measurement site.*

(Picard et al., 2012)

1. darbība ir darba vietas sagatavošana un koka nozāģēšana. Pirms koka nozāģēšanas noteikti uz augoša koka ir jāatzīmē krūšaugstums, lai būtu atskaites punkts stumbra garuma mērījumiem. 2. darbība sevī ietver iepriekš plānoto koka parametru uzmērīšanu un stumbra šķērsriezuma vietu atzīmēšanu. 3. darbība ir stumbra atzarošana, sauso un dzīvo zaru sašķirošana un, ja paredzēta, tad arī zaru atlapošana. 4. darbībā koka stumbrs optimālākajā variantā tiek sazāģēts 1 m vai 2 m garos nogriežņos jeb sekcijās, kā arī tiek izzāģētas koka šķērsriezuma ripas. 5. darbībā tiek nosvērtas koka stumbra sekcijas (kopā ar attiecīgajām šķērsriezuma ripām), kā arī atsevišķi dzīvo un sauso zaru masa. Visvienkāršāk svēršanu veikt ar iekaramajiem svāriem un uz vietas konstruētu atbalsta statīvu svaru iekāršanai, vai arī uzliktot svarus uz traktora strēles, bet tad ir jānodrošina laba piebraukšana objektam. 6. darbība ir attiecināma uz paredzēto stumbra un zaru paraugu (piemēram mitruma, blīvuma) ievākšanu, sagatavošanu un marķēšanu. 7. darbībā, lai samazinātu kļūdu rašanos, rekomendē turpat lauka apstākļos visus mitruma paraugus nosvērt un tikai tad iepakot līdžņemšanai. Gadījumos, kad to nav uzreiz iespējams izdarīt, mitruma paraugi ir jānosver uzreiz pēc to nogādāšanas laboratorijā.

1.2.2. Sakņu un celma biomasas novērtēšana

Liels oglekļa īpatsvars, ko kokaugi asimilē fotosintēzes laikā, tiek novadīts uz koka daļu kas atrodas augsnē, jeb koka saknēm (Litton et al., 2007). Noteiktos augšanas apstākļos sakņu biomasā piesaistītā oglekļa apjoms var pat pārsniegt koka virszemes biomasā akumulētā oglekļa apjomu (Mosera et al., 2010). Visbiežāk tomēr sakņu biomasas īpatsvars kokiem sastāda apmēram 20–26% no kopējās biomasas (Ravindranath, Ostwald, 2008b). Boreālās un mērenās joslas mežos koka saknes visvairāk ir izvietotas augsnes virskārtā; pirmajos 30 cm no augsnes virskārtas ir izvietoti 80–90% no visām saknēm (Jackson et al., 1996). Neskatoties uz to, ka koku sakņu biomasai ir būtiska ietekme uz augsnes veidošanās procesiem un mežaudžu oglekļa bilanci, tā joprojām ir ļoti maz pētīta, salīdzinot ar koku virszemes daļu. Lielākā daļa publicēto biomasas vienādojumu izstrādāti, lai noteiktu virszemes biomasu, jo reprezentatīvu sakņu biomasas datu iegūšana ir daudz dārgāka un laikietilpīgāka (Varik et al., 2013; Weiskittel et al., 2015).

Līdzīgi kā koku virszemes biomasā, arī sakņu biomasā sastāv no vairākām biomasas frakcijām. Koku rupjās saknes (angļu val. *coarse roots*) un uzsūcošās saknes (angļu val. *fine roots*) veido galveno sakņu biomasas daļu, un tām ir svarīga nozīme kopējā oglekļa un barības vielu aprites ciklā (Clark et al., 2001; Malhi et al., 2009; Smyth et al., 2013). Uzsūcošās saknes (saknes ar diametru mazāku par 2 mm) bieži tiek izslēgtas no sakņu biomasas aprēķiniem, jo tās praktiski nevar empīriski atdalīt no organiskās augsnes (Ravindranath, Ostwald, 2008b). Koka celms, kurš sastāv no virszemes un augsnē esošās monolītās, atsevišķās saknēs nediferencētās daļas (Liepa, Blija, 2008) parasti tiek pieskaitīts pie sakņu biomasas, tomēr celma daļa dažādos pētījumos var tikt definēta atšķirīgi. Diskutabls ir jautājums par vietu, kur beidzas koka virszemes biomasā un sākas sakņu biomasā. Teorētiski uzskata, ka koka virszemes biomasā sākas līdz ar augsnes virsmu, bet praktiski šādā augstumā koka stumbru biomasas mērījumiem sagatavot ir ļoti grūti, īpaši, ja koks sasniedz lielas dimensijas. Tāpēc praksē kā vietu, kur sadalās virszemes un celma/sakņu biomasas, visbiežāk izmanto noteiktu celma augstumu, kuru vai nu nosaka zināmā attālumā no zemes virsmas (Johansson, 2002; Mugasha et al., 2013; Albert et al., 2014) vai proporcionāli koka augstumam (Marklund, 1988; Repola, 2008, 2009; Smith et al., 2014).

Celma/sakņu biomasas novērtēšanas paņēmienus var grupēt tiešās un netiešās metodēs. Pielietojot tiešās novērtēšanas metodes, tiek traucēta turpmāka koka augšana, turpretim netiešās metodes kokam ir nekaitīgas. Zinātniskajā literatūrā joprojām nav vienprātības par to, kā vislabāk novērtēt sakņu biomasu (Vogt et al., 1998; Levillain et al., 2011; Milchunas, 2012; Yuan, Chen, 2012). Piemēram, pētījumā, kurā salīdzinātas uzsūcošo sakņu novērtēšanas metodes, *Z.Y. Yuan & H.Y.H. Chen* (2012), pielietojot netiešās metodes, konstatēja ievērojami lielāku sakņu apjomu, salīdzinot ar tiešo metožu pielietošanu, kas ir pretrunā ar citiem pētījumiem, kuros apgalvots, ka rezultāti abu metožu gadījumā neatšķiras (Vogt et al., 1998; Finér et al., 2011). Vienprātības trūkums starp pētniekiem apliecina, ka nepieciešams kritiski izvērtēt katras metodes stiprās un vājās puses, un, vadoties no pieejamajiem resursiem (darbaspēka pieejamība, pieejamais finansējums, vietas īpatnības,

kā arī citi ierobežojumi), jāizvēlas sākotnēji izvirzītajiem pētījuma mērķiem vispiemērotākā metode.

S.D. Addo-Danso *et al.* (2016) ir apkopojuši un vērtējuši visbiežāk izmantotās celma/sakņu biomasas novērtēšanas metodes, balstoties uz iepriekš definētiem kritērijiem (1.1. tab.).

1.1. tabula / *Table 1.1.*

Celma/sakņu biomasas novērtēšanas metodes
(Addo-Danso *et al.*, 2016)
Methods for estimating tree belowground biomass
(Addo-Danso *et al.* 2016)

Metode <i>Method</i>		Darbības princips <i>Operational principle</i>	Precizitātes prasības <i>Requirements for accuracy</i>	Izmaksas <i>Cost effectiveness</i>	Precizitāte <i>Accuracy</i>
Rupjo sakņu biomasā					
Sakņu sistēmas izrakšana	Tiešā	Attiecina sakņu biomasu pret noteiktiem koka parametriem	Zaudēto un norauto sakņu korekcija	Lielas	Augsta
Augsnes tilpumparauga metode	Tiešā	Pieņem, ka koka saknes augsnes paraugā ir izvietotas vienmērīgi	Augsnes bedrei ir jābūt pietiekami dziļai	Lielas	Augsta
Augsnes profila metode	Tiešā	Pieņem, ka pastāv pozitīva korelācija starp uzmērītajām saknēm profilā un to kopējo apjomu	Sakņu biomasas korekcija	Zemas	Zema
Augsnes urbuma metode	Tiešā	Kopējo sakņu biomasu pielīdzina sakņu apjomam urbuma paraugā	Urbuma diametram jābūt lielākam par 10 cm	Lielas	Zema
Alometriskie vienādojumi	Netiešā	Sakņu apjoms ir saistīts ar koka izmēriem un vecumu	Vienādojuma precizitātes novērtējums atbilstoši konkrētajiem apstākļiem	Zemas	Zema
Virszemes un sakņu masas attiecība	Netiešā	Pieņem, ka pastāv būtiska sakarība starp koka virszemes un celma/sakņu biomasu	Attiecības korigēšana pēc vecuma vai augšanas apstākļiem	Zemas	Zema
Augsnes skenēšana ar radaru	Netiešā	Izmantojot attālās izpētes metodes	Drenētas smilts augsnes ar zemu organisko vienu un dzelzs saturu	Lielas	Zema
Uzsūcošo sakņu biomasā					
Augsnes urbuma metode	Tiešā	Sakņu biomasu aprēķina pēc sakņu apjoma urbuma paraugā	Urbuma diametram jābūt lielākam par 10 cm	Lielas	Augsta

Metode <i>Method</i>		Darbības princips <i>Operational principle</i>	Precizitātes prasības <i>Requirements for accuracy</i>	Izmaksas <i>Cost effectiveness</i>	Precizitāte <i>Accuracy</i>
Augsnes tilpumparauga metode	Tiešā	Pieņem, ka sakņu masa paraugā ir proporcionāla kopējai masai	Balanss starp paraugu izmēru un daudzumu	Lielas	Augsta
Alometriskie vienādojumi	Netiešā	Sakņu apjoms ir atkarīgs no koka izmēriem un vecuma	Vienādojumu precizitātes novērtējums	Zemas	Zema

S.D. Addo-Danso et al. (2016) secinājis, ka kritēriji, kurus izmanto, lai identificētu uzsūcošās un rupjās saknes, ne vienmēr zinātniskajā literatūrā ir vienoti, visbiežāk sakņu iedalījums izveidots, balstoties uz subjektīvi noteiktām diametra klasēm. Uzsūcošās saknes atšķirīgos literatūras avotos definētas kā saknes ar diametru mazāku par 0.5 mm, 1 mm, 2 mm vai 5 mm. Arī rupjo sakņu minimālais caurmērs var variēt no 2 –50 mm. Tomēr lielākajā daļa pētījumu uzsūcošās saknes definētas kā saknes ar diametru ≤ 2 mm, pārējās saknes klasificētas kā rupjās saknes. Analizējot biomasas novērtēšanas metodes (1.1. tab.), secināms, ka visa koka sakņu izrakšana ir precīzākā, tomēr arī darbietilpīgākā un dārgākā metode celma/sakņu apjoma novērtēšanai, bet tā ne vienmēr ir piemērojama, jo ne visās augsnēs to iespējams veiksmīgi izpildīt. Augsnes tilpumparauga metode savukārt varētu būt kompromiss starp izmaksām un precizitāti. Analizējot dažādu Eiropas valstu nacionālos SEG inventarizācijas ziņojumus, secināms, ka alometriskie vienādojumi un virszemes un sakņu masas attiecību raksturojoši koeficienti ir visbiežāk izmantotās metodes celmu/sakņu biomasas novērtēšanā. Jāatzīst, ka ne vienmēr minēto metožu precizitāte ir pārbaudīta apstākļos, kuros tās tiek pielietotas.

1.2.3. Alometrisko sakarību izmantošanas iespējas

Biomasas aprēķinos alometriskās sakarības starp koku raksturojošajiem parametriem visbiežāk tiek aprakstītas ar zemāk esošo pakāpes funkciju $Y = aX^b$ (1.1) vai tās linearizēto izteiksmi $\lg Y = \lg a + b \lg X$ (1.2) (Zianis & Mencuccini, 2004; Picard et al., 2015).

$$Y = aX^b \tag{1.1}$$

vai

$$\lg Y = \lg a + b \lg X \tag{1.2}$$

kur: Y – aprēķināmā vērtība;
 X – faktoriālā pazīme;
 a, b – regresijas koeficienti.

Alometriskie vienādojumi tiek pielietoti, lai, izmantojot viegli izmērāmas pazīmes, aprēķinātu grūtāk izmērāmas pazīmes, piemēram, koka biomasu. Mežsaimniecībā šim

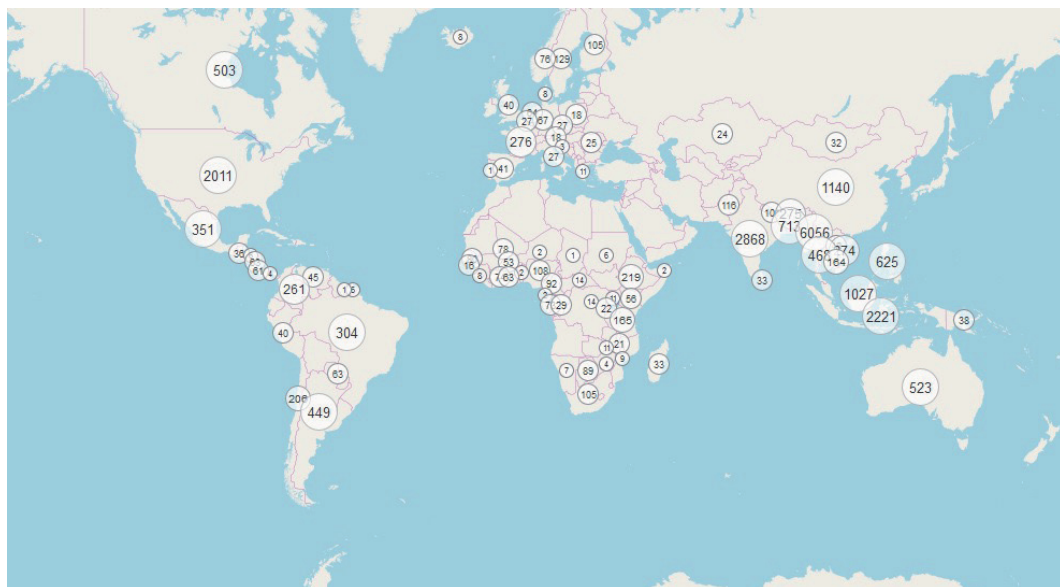
mērķim visbiežāk pielietotā pazīme ir koka krūšaugstuma caurmērs (D). Koka biomasa ir atkarīga ne vien no D , bet arī no koka augstuma (H), koksnes blīvuma un vairākiem citām faktoriem, tāpēc vienādojumos bieži ietver vairākas faktoriālās pazīmes, kas ļauj uzlabot prognozēšanas precizitāti (Chave et al., 2005; Zianis et al., 2005). Valsts mēroga biomasas aplēsēm pielietotajos vienādojumos visbiežāk kā faktoriālās pazīmes izmanto audžu parametrus, kuri iegūti meža resursu monitoringos.

Salīdzinājumā ar D , H izmērīšana ir laikietilpīgāka un mazāk precīza, tāpēc, raksturojot biomasu noteiktā platībā vai parauglaukumā, parasti visiem kokiem tiek mērīts D , bet H tikai atsevišķiem kokiem (Peng et al., 2001; Feldpausch et al., 2011). Iepriekšminētajā gadījumā vispirms tiek sastādīts augstuma-diametra vienādojums, ar kuru aprēķina izlīdzinātos augstumus visiem kokiem, kuriem mērīts D , un tikai tad pielieto alometriskos biomasas vienādojumus.

Kvalitatīvi izveidoti un lokāli izstrādāti biomasas alometriskie vienādojumi ir galvenais nosacījums, lai būtu iespējams veikt korektus oglekļa uzkrājuma aprēķinus valsts mērogā (Chave et al., 2014; Temesgen et al., 2015; Weiskittel et al., 2015). Alometrisko vienādojumu pielietošana tiek uzskatīta par precīzāku metodi nekā biomasas pārrēķina koeficientu (BEF) (Pettersson et al., 2012) vai plašu teritoriju raksturojošu biomasas vienādojumu izmantošana (Cifuentes-Jara et al., 2015). Ir konstatēts, ka šādu vienādojumu piemērošana konkrētas mežaudzes līmenī var radīt sistemātiskas kļūdas līdz pat 400% robežās (Alvarez et al., 2012; Ngomanda et al., 2014).

Biomasas vienādojumus var izstrādāt gan atsevišķu koku, gan visas kokaudzes līmenī (Somogyi et al., 2007). Atsevišķu koku biomasas vienādojumus sastāda, ietverot viegli uzmērāmas pazīmes (kā D un H). Savukārt kokaudzes līmeņa vienādojumos biomasu parasti aprēķina no kokaudzes krājas platības vienībā (Brown, Lugo, 1984; Di Cosmo et al., 2016). Kokaudzes līmeņa vienādojumi parasti ir ļoti vienkārši un praktiski pielietojami, jo koksnes krāja ir viens no visbiežāk novērtētajiem kokaudzes raksturojošajiem rādītājiem. *Y. Pan et al.* (2004) minēto metodi ir uzlabojis, kokaudzes krāju iedalot klasēs, ņemot vērā augšanas apstākļus un vecumgrupas.

Globāli aktualizējoties nepieciešamībai novērtēt oglekļa piesaisti meža ekosistēmās, strauji pieaug izstrādāto biomasas alometrisko vienādojumu skaits visā pasaulē. Orientēties plašajā vienādojumu klāstā nereti ir ļoti grūti, un tādēļ radās nepieciešamība apzināt un apkopot visus jau izstrādātos biomasas aprēķina vienādojumus. *GlobAllomeTree* tīmekļa vietne (<http://www.globallometree.org>) ir pirmā datubāze, kas izstrādāta 2013. gadā un radīta ar mērķi apkopot izstrādātos koku alometriskos vienādojumus visā pasaulē (Henry et al., 2013). 2018. gada sākumā datubāzē bija reģistrēti vairāk nekā 9200 dažādās valstīs publicēti dažādām koku sugām un frakcijām veidoti biomasas alometriskie vienādojumi (1.5. att.). Šajā datu bāzē nav reģistrēts neviens Baltijas valstīs (Latvijā, Lietuvā un Igaunijā) izveidots biomasas vienādojums.



1.5. attēls. *GlobAllomeTree* datubāzē ievietotie biomasas alometriskie vienādojumi.

(<http://www.globallometree.org>)

Figure 1.5. *Biomass allometric equations in the GlobAllomeTree database.*

(<http://www.globallometree.org>)

Nepieciešams atzīmēt, ka daudzi no vietnē *GlobAllomeTree* publicētajiem vienādojumiem neatbilst IPCC (2003) “labas prakses” vadlīnijām attiecībā uz vienādojumu validāciju, matemātisko apstrādi, rezultātu atkārtojamību, ko nodrošina nodrošina laba procesa dokumentācija (Cifuentes-Jara et al., 2015), līdz ar to šādu vienādojumu izmantošana nacionālajos SEG inventarizācijas ziņojumos nebūtu pieļaujama. Lai gan vairākos zinātniskos avotos ir minētas vispārīgas vadlīnijas alometrisku vienādojumu aprakstīšanai un novērtēšanai (Pretzsch et al., 2002; IPCC, 2003; Jenkins et al., 2004; Eggleston et al., 2006; Baldasso et al., 2012; Picard et al., 2012; Sileshi, 2014), tomēr nevienā dokumentā nav praktisku ieteikumu par obligāti nepieciešamo un vēlamu informāciju, kas būtu jāsniedz, publicējot alometriskos vienādojumus. Šī iemesla dēļ ekspertu komanda no visas pasaules (Cifuentes-Jara et al., 2015) ir izstrādājusi praktiskas rekomendācijas alometrisku vienādojumu izstrādāšanai visā pasaulē.

1.2.4. Tālizpētes metodes

Kokaudžu biomasas novērtēšanai ar tālizpētes tehnoloģijām pēdējo trīsdesmit gadu laikā ir velūta pastiprināta uzmanība, un ir izdarīts apjomīgs darbs, attīstot un pilnveidojot vairākas metodes (Sharma, Chaudhry, 2015). Sākotnēji tālizpēte bija kā alternatīva tradicionālām biomasas novērtēšanas metodēm, turpretī šobrīd tā ir kļuvusi par vadošo

metodi plaša mēroga mežaudžu biomasas un oglekļa krājumu novērtēšanā (Turner et al., 2014; Lei, Shirong, 2017). Tālīzpētes galvenā priekšrocība ir īsā laikā un ar salīdzinoši zemām izmaksām iegūstama kokaudžu biomasas informācija par plašām teritorijām, arī par grūti pieejamām platībām. Paralēli biomasas novērtēšanai, tālīzpētes tehnoloģijas izmantojamas arī, piemēram, meža tipu kartēšanai vai kokaudžu parametru noteikšanai (Toan et al., 1992; McRoberts et al., 2014).

Nepieciešamā informācija kokaudžu biomasas novērtēšanai ar tālīzpētes metodēm tiek iegūta, izmantojot pasīvos un aktīvos sensorus. Pasīvie sensori uztver virsmas atstaroto vai izstaroto elektromagnētisko starojumu. Pie pasīvajiem sensoriem pieder optiskie tālīzpētes sensori, no kuriem iegūst satelītattēlus, kā arī uz lidaparātiem stiprināmas kameras aerofoto attēlu uzņemšanai. Turpretī aktīvie tālīzpētes sensori, piemēram, sintezētās apertūras radari (SAR) vai lāzeru staru impulsu kā aerolāzerskenēšanas radari (LiDAR) izstaro elektromagnētisko starojumu kas parasti ir mikroviļņu veidā.

Biomasas novērtēšana, izmantojot pasīvos optiskos tāldarbības sensorus (IKONOS, *Quickbird*, *Landsat* TM un ETM+, SPOT, ASTER, NOAA AVHRR un MODIS), ir ar mainīgu precizitāti, kas atkarīga no sensora telpiskās un spektrālās izšķirtspējas un meža tipa (Sarker, 2010). Vairākos pētījumos, kuros izmantotas no IKONOS un *Quickbird* sensoriem iegūtas augstas izšķirtspējas satelītainas, ir iegūti daudzsološi rezultāti (Thenkabail et al., 2004; Hyde et al., 2006). Tomēr, izmantojot iepriekšminētos augstas izšķirtspējas attēlus, ir jārēķinās ar neprecizitātēm, kuras izraisa koku vainagu ēnas un topogrāfijas lielā spektrālā variācija. Īsviļņu infrasarkanās joslas diapazons, ko izmanto iepriekšminētie pasīvie sensori, nav tik plašs, lai atsevišķos apstākļos analizētu visas spektrālās izmaiņas attēlā, kas tieši ietekmē tālīzpētes metodes precizitāti (Lu, 2006). Līdzīga situācija ir ar zemākas izšķirtspējas satelītainām, kuras nedod pietiekami detalizētu informāciju par biomasas izmaiņām mazākā platības vienībā. Tādēļ metode šobrīd izmantojama tikai plaša mēroga un aptuvenām biomasas aplēsēm.

Biomasas novērtēšanai izmanto ne tikai satelītattēlus, bet arī pārlidojumos iegūtus augstas izšķirtspējas telpiskus aerofoto attēlus. Šādi iespējams iegūt gan koku augstumu, gan diametru un vainagu mērījumus (Sharma, Chaudhry, 2015). Lai novērtētu mežaudzes biomasu ar augstu precizitāti, ar aerofoto metodi iegūtos koku mērījumus salīdzina ar lauka mērījumu datiem un izveido modeļus biomasas aprēķināšanai. Ir apstiprināts, ka ar minēto metodi var arī samazināt meža inventarizācijas izmaksas, jo īpaši grūti pieejamās vietās un mežaudzēs ar lielu koku skaitu (Sharma, Chaudhry, 2015). Pretēji satelītattēlu analīzes iespējām, aerofoto attēlu iegūšana ir ievērojami dārgāka, tāpēc metode piemērojama samērā nelielām platībām.

Pasīvo tālīzpētes tehnoloģiju izmantošanas trūkums ir arī to nespēja iegūt datus zem koku vainagiem vai caur mākoņiem, jo metode spēj analizēt tikai redzamos spektrālos datus (Le Toan et al., 1992). Jāņem vērā, ka kopējā virszemes biomasā sastāv gan no vainaga (lapas un skuju), gan koksnes (stumbri un zari) biomasas frakcijām. Lapu un skuju biomasā parasti sastāda līdz 10% no visa koka biomasas (Dobson et al., 1992; Chave et al., 2014). Tāpēc optiskās un infrasarkanās starojuma atpazīšanas metodes ir efektīvākas un precīzākas lapu un skuju, nevis koksnes biomasas novērtēšanā. Spektrālie dati, kas

iegūti ar iepriekšminētajām metodēm, ir atkarīgi no lapotnes ķīmiskajām un strukturālajām izmaiņām un vairāk piemēroti veģetācijas indeksa mērīšanai (Dong et al., 2003). Veģetācijas indekss ir vienkāršots skaitlisks indikators, kuru pielieto zaļās veģetācijas novērtēšanai un salīdzināšanai. Zinot veģetācijas indeksa un biomasas attiecību, iespējams aprēķināt aptuvenu virszemes biomasu.

No aktīvajiem tālzipētes sensoriem, SAR izmantošana ir perspektīvs risinājums kokaudžu biomasas izpētē, jo radars līdz noteiktam dziļumam ir spējīgs nolasīt datus arī zem koku vainagiem un datu ievākšanu neietekmē meteoroloģiskie apstākļi (Le Toan et al., 2011). Salīdzinājumā ar pasīvajiem tāldarbības sensoriem, kuri uztver tikai redzamo informāciju, SAR priekšrocība ir, ka tā raidītais signāls atstarojas gan no koka vainagiem un zariem, gan no zemes virsmas, ļaujot šos datus izmantot kokaudžu biomasas aprēķiniem (Gibbs et al., 2007). Īsākos viļņu garumus parasti atstaro sīkie zari un koku vainags, bet garākos – koku stumbri un resnie zari. Izmantojot SAR datus, ir grūtības atšķirt koku sugas un veģetācijas tipus, jo radara dati atspoguļo virsmu reljefu, nenosakot vai tas, piemēram, ir augsnes vai zālaugu reljefs, tādējādi atsevišķos gadījumos radot grūtības precīzi novērtēt biomasu (Lu et al., 2016). SAR lietošana ir piemērota homogēnām un jaunām mežaudzēm līdzienās vietās, jo metodes precizitāte samazinās, palielinoties virsmas reljefam (Le Toan et al., 2011).

Cita aktīvo sensoru sistēma ir LiDAR, kas ar lāzera stara palīdzību iegūst trīsdimensiju punktu kūli (Patenaude et al., 2004). LiDAR izmantošana ir relatīvi jauna un pašreiz visdaudzsološākā tālzipētes biomasas novērtēšanas metode, kas nodrošina tādu pašu vai pat labāku precizitāti, salīdzinot ar citām iepriekš apskatītajām metodēm. LiDAR tehnoloģiju plaši izmanto arī arhitektūrā un būvniecībā (Sharma, Chaudhry, 2015; Lu et al., 2016). Ar lāzera gaismas impulsu iespējams novērtēt biomasu arī biežās mežaudzēs, kas ievērojami pārsniedz SAR iespējas (Sarker, 2010). Jaunākajos pētījumos demonstrēts, ka ar LiDAR ir iespējams iegūt mazāku biomasas aprēķinu nenoteiktību, salīdzinot ar alometriskajiem vienādojumiem (Stovall et al., 2018), tomēr šī metode raksturojama kā ļoti dārga, lai to varētu izmantot lielās platībās (Sharma, Chaudhry, 2015). Ar LiDAR tehnoloģijām tiek aprīkotas lidmašīnas, helikopteri vai pat droni, un iegūtos trīsdimensiju punktu mākoņus apstrādā un vizualizē īpaši šim mērķim paredzētās programmās. LiDAR iegūtie dati ļauj iegūto informāciju sadalīt slāņos, kas savukārt nodrošina to, ka iespējams atšķirt teritorijas reljefu no veģetācijas un veikt mežaudzes parametru analīzi (Lu et al., 2016). Biomasas modelēšanai ļoti noderīga ir no LiDAR datiem iegūstamā trīsdimensionālā audzes struktūra.

Katrai no tālzipētes metodēm ir trūkumi un priekšrocības, tāpēc to apvienošana varētu būt visoptimālākais risinājums attālinātai biomasas noteikšanai (Kellndorfer et al., 2010). Optisko sensoru dati galvenokārt atspoguļo virsmas īpašības, bet radaru dati nodrošina vertikālu datu struktūru, tāpēc abu datu sapludināšana kopā varētu sniegt jaunu informāciju par kokaudzi. Lai gan satelītattēlu un LiDAR datu apvienošana tiek vērtēta kā visdaudzsološākais risinājums liela mēroga biomasas novērtēšanai (Lu et al., 2016), tomēr atsevišķos pētījumos šī pieeja ir apšaubīta un atspoguļota ar mainīgām sekmēm. Vairākos pētījumos demonstrēts, ka optisko datu apvienošana ar LiDAR iegūto informāciju neuzlaboja vai vien neredz ietekmēja biomasas prognozēšanas precizitāti (Clark et al.,

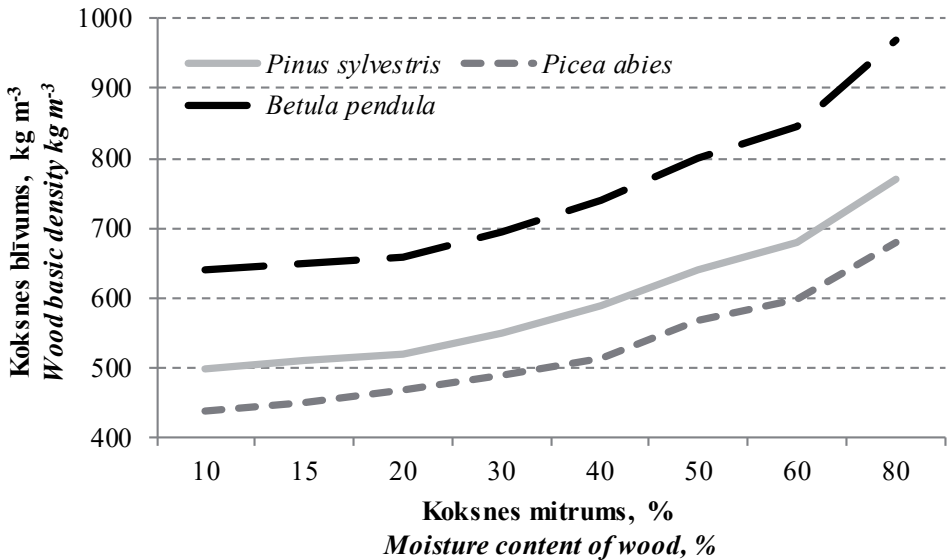
2011; Latifi et al., 2012). Savukārt *J.R. Anderson et al.* (2008) un *G. Vaglio Laurin et al.* (2014) konstatējuši, ka LiDAR un hiperspektrālo radaru iegūtās informācijas sapludināšana būtiski uzlaboja biomasas aplēses mērenās un tropiskās joslas mežos.

Lielākā daļa prognožu par biomasu un oglekļa uzkrājumiem mežaudzēs visā pasaulē ir ļoti aptuvenas, tāpēc tālīzpētes metožu attīstība ir vienīgais reālais risinājums kā šo biomasas aprēķinu nenoteiktību samazināt. Šajā kontekstā LiDAR izmantošana ir kļuvusi par dzīvotspējīgāko tālīzpētes metodi (Stovall et al., 2018), jo biomasas datu ievākšana pēc destruktīvās metodes, lai raksturotu liela mēroga biomasas izmaiņas, nav iespējama.

1.3. Reducētā blīvuma nozīme biomasas un oglekļa uzkrājumu novērtēšanā

Koksnes blīvums ir viens no galvenajiem koksnes kvalitātes rādītājiem, jo tas netieši raksturo arī citas fizikālās un mehāniskās koksnes īpašības, kā arī nosaka koksnes pielietojuma iespējas. Piemēram, konstrukciju zāģmateriāliem nepieciešams liels koksnes blīvums un izturība, bet zema blīvuma koksne ir vairāk piemērota celulozes un papīra rūpniecībai (Saranpää, 2003). Visā pasaulē arvien lielāka uzmanība tiek pievērsta oglekļa emisiju samazināšanai būvniecībā un produktu ražošanā. Lai samazinātu CO₂ daudzumu atmosfērā, attīstoties jaunām tehnoloģijām, arvien vairāk tiek projektētas un būvētas augstas izturības ēku konstrukcijas un ražoti produkti, kuros izmanto koksni (Gustavsson et al., 2006; Cabeza et al., 2013). Koksnes izmantošana būtībā ir CO₂ neitrāls process; koki augot piesaista CO₂, un tos sadedzinot vai tiem sadaloties, tieši tāds pats daudzums CO₂ izdalās atpakaļ atmosfērā. Ilgtermiņa efekts CO₂ līdzsvarošanā tiek panākts, kad koksne vispirms tiek izmantota būvniecībā vai interjerā, un pēc tam kā enerģijas avots. Koksnes blīvums norāda uz to, cik daudz oglekļa koksnē ir akumulēts (Chave, 2005). Oglekļa saturs koksnē ir apmēram 50% no tā sausas masas, un, koksni izmantojot produktu ražošanā, tas tiek noglabāts šajā produktā.

Viens no svarīgākajiem faktoriem, kas ietekmē koksnes blīvumu, ir ūdens īpatsvars koksnē (1.6. att.). Svaigi cirstā stāvoklī koksne ir smagāka, bet žāvējot tā pakāpeniski zaudē ūdeni un kļūst vieglāka. Tā kā blīvums ir masas attiecība pret tilpumu, atspoguļojot koksnes blīvuma datus, svarīgi ir norādīt, pie kāda koksnes mitruma tas ticis mērīts, jo koksnei mitruma ietekmē ir tendence palielināt gan tilpumu, gan masu (Saranpää, 2003). Blīvuma definīcijas var atšķirties atkarībā no mērīto koksnes paraugu relatīvā mitruma. Kokrūpnieki visbiežāk nosaka svaigi cirstas koksnes blīvumu (angļu val. *green wood density*) vai gaissausas koksnes blīvumu (angļu val. *air-dry wood density*), ko nosaka pie standartmitruma, tomēr jāņem vērā, ka daudzās valstīs koksnes standartmitrumu definē atšķirīgi; koksnē atlikušais ūdens saturs var būt robežās no 12% līdz 15% (Chave, 2005). Absolūti sausas koksnes blīvums (angļu val. *oven dry wood density*) tiek noteikts pie 0% relatīvā mitruma un ir plaši lietots zinātniskajā literatūrā, jo izslēdz jebkāda veida ūdens satura ietekmi uz blīvuma mērījumiem. Biomasas un oglekļa uzkrājumu aprēķināšanai izmanto reducēto jeb bāzes blīvumu (angļu val. *basic density*), kas raksturo sausas koksnes masu piebriedušas koksnes tilpuma vienībā.



1.6. attēls. Koksnes blīvums atkarībā no koksnes mitruma.

(Kops, 1997)

Figure 1.6. Relation of density to moisture content for wood.

(Kops, 1997)

Koksnes blīvumu salīdzināšana un nepareiza interpretēšana, ignorējot to atšķirīgās nozīmes, joprojām rada pārpratumus. Tādēļ, atspoguļojot koksnes blīvuma vērtības, vienmēr jānorāda mitruma saturs, pie kāda noteikts koksnes tilpums un masa, kā arī žāvēšanas temperatūra, jo arī tai ir ietekme uz absolūti sausas koksnes masas noteikšanu (Pettersson, Stahl, 2006). Absolūti sausas masas noteikšanai, koksni žāvējot zem 100°C temperatūras, paraugi netiek pilnībā izžāvēti, turpretī, ja žūšanas temperatūra pārsniedz 105°C, paraugi var apdegt (Ilic et al., 2000).

Koksnes mitrums vai blīvums ir galvenie mainīgie koksnes masas novērtēšanā (Henry et al., 2010). Aprēķinot stumbra biomasu no blīvuma datiem, ir nepieciešami precīzi stumbra tilpuma mērījumi (Bergstedt, Olesen, 2000; Repola, 2008, 2009; Henry et al., 2010; Skovsgaard et al., 2011). Stumbra biomasas aprēķinu ticamība lielā mērā ir atkarīga no tā, cik precīzi tiek aprēķināts stumbra tilpums un vidējais stumbra reducētais blīvums. Vidējā blīvuma aprēķināšanai zinātniskajā literatūrā tradicionāli tiek pielietotas dažādas metodes. Ir pierādīts, ka priedes, egles un bērza stumbra blīvums 25% augstumā aptuveni ir tāds pats kā vidējais blīvums visā stumbūrā (Hakkila, 1979). Metodes trūkums ir tas, ka šādi nav iespējams noteikt blīvumu lieliem kokiem, jo ir apgrūtināti augošam kokam blīvuma paraugu ievākt šādā augstumā. Tāpēc P. Hakkila (1979) ir izveidojis regresijas vienādojumus, aprēķinot priedes, egles un bērza vidējo stumbra blīvumu no koka

vecuma, caurmēra un krūšaugstuma blīvuma datiem. Metode raksturojama kā saudzīga pret kokiem, jo pieļauj koksnes paraugus iegūt ar pieauguma svārpstu. Pati vienkāršākā metode, pārreķinot stumbra tilpumu biomasā, ir lietot konstantas blīvuma vērtības katrai koku sugai (Bartelink, 1996).

Stumbra biomasas noteikšanai pēc destruktīvās metodes ir nepieciešami precīzi blīvuma dati par katru koku, tāpēc vidējo stumbra blīvumu ir jānosaka nevis vienā, bet vairākos paraugos. Iegūtie paraugi var būt stumbra šķērsriezuma ripas (Repola, 2008, 2009), koksnes tilpumparaugi, kas iegūti ar 12 mm platu pieauguma svārpstu (Chave, 2005; Liepins, Rieksts-Riekstins, 2013), kā arī izzāģēti dažādu dimensiju šķērsriezuma ripu sektori (Herajarvi, 2004; Herājārvi, Junkkonen, 2006; Millers, Magaznieks, 2012). Iegūstamo paraugu skaitam vajadzētu būt proporcionālam stumbra garumam, optimālajā variantā ik pa 1 vai 2 metriem (Picard et al., 2012).

Vidējo stumbra blīvumu ir grūti noteikt vairāku iemeslu dēļ. To ietekmē daudzi faktori, piemēram, koku augšanas ģeogrāfiskais reģions, koka augšanas apstākļi un tā sociālais statuss, koka vecums un augstums, augšanas temps, kā arī dažādi ģenētiskie faktori (Hakkila, 1979; Singh, 1984; Saranpää, 2003; Dibdiakova, Vadla, 2012). Piemēram, parastās egles stumbra vidējais blīvums vienas kokaudzes ietvaros mainās robežās no 5 līdz 10% (Skovsgaard et al., 2011). Tāpēc konstantu blīvuma vērtību izmantošana biomasas novērtēšanā var radīt ievērojamas sistemātiskas kļūdas.

Stumbra blīvums var mainīties ne tikai starp vienas sugas kokiem, bet arī viena indivīda ietvaros. Literatūrā ir analizētas blīvuma izmaiņas gan virzienā no serdes uz mizu, gan arī no saknēm uz galotni (Herājārvi, Junkkonen, 2006; Repola, 2006; Jyske et al., 2008). Izteikta blīvuma samazināšanās virzienā uz galotni ir novērojama priedei, bet mazāk izteikta bērzam (Hakkila, 1979; Repola, 2006). Savukārt eglei un apsei blīvums stumbra garenvirzienā ir vairāk vai mazāk konstants; līdz stumbra vidusdaļai tas nedaudz samazinās, bet tad virzienā uz galotni atkal palielinās (Karki, 2001; Herājārvi, Junkkonen, 2006; Repola, 2006). Pretēji iepriekšminētajām koku sugām, baltalkšņa koksnes blīvums galotnes virzienā pakāpeniski palielinās (Saranpää, 2003).

Koksnes blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā ir jāņem vērā, lai izvairītos no sistemātiskām kļūdām, nosakot vidējo stumbra blīvumu, kā arī, plānojot ievācamo paraugu skaitu. Īpaši svarīgi tas ir koku sugām ar izteiktu blīvuma mainību garenvirzienā, piemēram, priedei. Priedes, egles un bērza blīvuma vērtības 1.3 m augstumā ir lielākas nekā vidējās blīvuma vērtības visam stumbram (Hakkila, 1979). Ja blīvums netiek noteikts visai šķērsriezuma ripai vienlaicīgi, tad jāņem vērā arī blīvuma radiālās izmaiņas katrā šķērsriezuma ripā.

Radiālās blīvuma izmaiņas koka stumbrā matemātiski ir grūti aprakstīt, jo tās atšķiras katrai koku sugai atkarībā no augšanas apstākļiem un no vietas stumbrā. Vairumam koku sugu, izņemot tās, kuru koksne ir ar izkliedētiem vadaudiem, piemēram, bērzam un papelei, pastāv cieša sakarība starp koku gadskārtu platumu un koksnes blīvumu (Saranpää, 2003). Koksnes gadskārtu agrīnā daļa veidojas pavasarī un vasarā un ir ar mazāku blīvumu nekā vēlīnā koksnes daļa, kura veidojas vasaras otrajā pusē. Ir pieņemts uzskatīt, ka ātraudzīgāko koku koksne ar platakām koksnes gadskārtām (lielāku agrīnās koksnes īpatsvaru) ir mazāk

blīva nekā lēnāk augušiemi kokiem (Alteyrac et al., 2005; Gardiner et al., 2011). Vēlīnās koksnes īpatsvars koksnes gadskārtās kuras atrodas tuvu serdei parasti ir mazāks, bet virzienā uz mizu īpatsvars palielinās (Saranpää, 2003). Pieaugušām eglēm vēlīnās koksnes īpatsvars pieaug no 20% 20. gadskārtā līdz 35% 110. gadskārtā (Hakkila, Uusvaara, 1968), ietekmējot arī blīvuma izmaiņas. Egles stumbrā koksnes blīvums tāpat kā vēlīnās koksnes īpatsvars palielinās virzienā no serdes uz mizu (Hakkila, 1979). *L. Wilhelmsson et al.* (2002) atklāja, ka stumbra krūšaugstuma caurmērs, gadskārtu skaits un klimatiskie rādītāji ietekmē attiecīgi 50% un 59% no egles un priedes koksnes blīvuma izmaiņām.

Blīvuma izmaiņas stumbra šķērsriezuma ripās ir jāņem vērā gadījumos, kad nav iespējams izmērīt blīvumu visai ripai vienlaicīgi, kā tas parasti ir no lieliem kokiem iegūtiem paraugiem. Tā kā tradicionāli blīvuma parauga tilpums tiek mērīts ar iegremdēšanas metodi ūdenī (Ilic et al., 2000), ir laukietilpīgi un neracionāli izmantot liela izmēra paraugus. Praksē visbiežāk stumbra šķērsriezuma ripas, ievērojot noteiktas shēmas, sadala mazāka izmēra blīvuma paraugos, lai tie ietilptu mērtraukā (Karki, 2001; Herajarvi, 2004; Herājārvi, Junkkonen, 2006; Millers, Magaznieks, 2012). Shēmu ievērošana, sagatavojot paraugus, ir priekšnosacījums, lai pēc tam varētu aprēķināt vidējo svērtu blīvumu visai šķērsriezuma ripai un tālāk jau visam koka stumbram.

SEG nacionālo inventarizācijas ziņojumu sastādīšanas vadlīniju (Eggleston et al., 2006) aprakstītā biomasas aprēķina metodika piedāvā vidējās reducētā blīvuma vērtības (1.2. tab.), kuras pielietojamas, ja nav zinātniski pamatotu blīvuma datu par raksturīgākajām koku sugām. Diemžēl vadlīniju piedāvātās, tāpat kā citviet literatūrā lietotās blīvuma vērtības stumbra biomasas aprēķinos ir definētas kā koksnes nevis visa stumbra vidējās blīvuma vērtības.

1.2. tabula / Table 1.2.

Reducētā blīvuma vērtības Latvijā augošu koku sugām

(Eggleston et al., 2006)

Basic density values for tree species growing in Latvia

(Eggleston et al., 2006)

Koku suga <i>Tree species</i>	Blīvums, kg m ⁻³ <i>Basic density, kg m⁻³</i>
<i>Pinus sylvestris</i>	420
<i>Picea abies</i>	400
<i>Betula</i> spp.	510
<i>Populus</i> spp.	350
<i>Alnus</i> spp.	450
<i>Fraxinus</i> spp.	570
<i>Acer</i> spp.	520
<i>Tilia</i> spp.	430
<i>Quercus</i> spp.	580

Somijā veiktajos pētījumos ir pierādīts, ka mizas blīvums priedei ir relatīvi mazāks, bērzam tas ir nedaudz lielāks, bet eglei praktiski identisks vidējam koksnes blīvumam (Hakkila, 1979). Arī citām koku sugām, tajā skaitā apsei, ir novērotas lielas (līdz 136 kg m^{-3}) reducētā blīvuma atšķirības starp stumbra koksni un mizu (Erickson, 1972). Tā kā mizas masas īpatsvars koka stumbrā ir robežās no 9.5–16.3% skujkokiem un 10.6–24.1% lapkokiem (Uusvaara, Pekkala, 1979), tad vidējā koksnes blīvuma piemērošana stumbra biomasas aprēķinos rada sistemātiskas kļūdas. Analizējot zinātniskajā literatūrā pieejamo informāciju, secināms, ka vidējās stumbra reducētā blīvuma vērtības, kurās ņemts vērā arī mizas īpatsvars un blīvums, vairumam koku sugu nemaz nav pieejamas, tāpēc aprēķinos tiek izmantotas koksnes blīvuma vērtības.

Alternatīva metode stumbra biomasas noteikšanai, neizmantojot blīvumu, ir aprēķināt svaigi cirsta stumbra masas attiecību pret absolūti sausu tā masu, jeb, citiem vārdiem sakot, noteikt ūdens daudzumu koka stumbrā (Marklund, 1988; Ebuy et al., 2011; Afif-Khouri, 2013; Mugasha et al., 2013; Smith et al., 2014; Elfving et al., 2017). Metodi visbiežāk pielieto gadījumos, kad ir neliels paraugkoku skaits, kā arī zaru un sakņu biomasas aprēķināšanai, jo šīm koka frakcijām, atšķirībā no stumbra, ir ļoti darbietilpīgi noteikt tilpumu. Izstrādājot Zviedrijas nacionālos biomasas vienādojumus, *L.G. Marklund* (1987) aprakstījis ieteikumus, kuri jāņem vērā, lai neveidotos sistemātiskas kļūdas, pielietojot iepriekšminēto metodi. Pirmkārt, koksnes mitruma paraugi ir pēc iespējas ātrāk jānosver vai jāsapako uzglabāšanai, īpaši vējainās, siltās, nokrišņiem bagātās dienās, kad tie ļoti strauji iztvaiko vai uzņem ūdeni. Otrkārt, ja paraugus nav iespējams uzreiz nosvērt, tie obligāti jāuzglabā telpā ar zemu temperatūru, lai uzglabāšanas procesā koksne nezaudētu daļu oglekļa, ietekmējot absolūti sausas masas mērījumus. *L.G. Marklund* (1987) arī secinājis, ka pie liela paraugkoku skaita un pie lieliem paraugu transportēšanas attālumiem, precīzi ievērot abus iepriekšminētos nosacījumus ir praktiski neiespējami.

1.4. Oglekļa novērtēšanas metožu salīdzinājums Eiropas mežos

Klimata pārmaiņu kontekstā, mežaudžu spēja piesaistīt atmosfērā esošo oglekli un ražot atjaunojamus energoresursus (biomasu) ir kļuvusi par vienu no nozīmīgākajiem vadmotīviem, plānojot dabas resursu apsaimniekošanas stratēģijas visā Eiropā. Vidēji visās Eiropas Savienības dalībvalstīs 16.7% no patērētās enerģijas tiek iegūti no atjaunojamajiem resursiem, no kuriem lielāko īpatsvaru – 64.4% – veido biomasu (EUROSTAT, 2017). Pieaugošā interese par Eiropas mežu pareizu apsaimniekošanu klimata pārmaiņu mazināšanas kontekstā pamato nepieciešamību nepārtraukti aktualizēt informāciju par mežaudžu stāvokli un to augšanas gaitu. Informāciju par Eiropas meža platības izmaiņām, meža koksnes resursu struktūru un dinamiku, mežaudžu bojājumiem, atmirušo koksni un uzkrāto hronoloģisko informāciju par mežaudžu augšanas gaitu pamatā veido nacionālie MRM, kuru datu vākšanas metodikas var atšķirties atkarībā no valstu konceptuālās pieejas (Tomppo et al., 2010). Neskatoties uz atšķirībām datu ievākšanas metodikās, Eiropā tieši

MRM dati visbiežāk lietoti, sastādot nacionālos ziņojumus UNFCCC vajadzībām par ZIZIMM sektoru (Tomppo et al., 2010).

MRM pamatā uzkrāj koku mērījumu datus un tos izmanto, lai iegūtu precīzu informāciju par meža resursiem valsts un starptautisko statistikas pārskatu vajadzībām. Tā kā kokaudžu biomasu ir aprēķināma no krājas vai koku caurmēra, augstuma mērījumiem, un ogleklis veido apmēram pusi no šīs masas, tad tie paši MRM koku mērījumu dati ir izmantojami, lai novērtētu kokaudzēs piesaistītā oglekļa apjomus. Tā kā mežu platības Eiropā nav viendabīgas, aptverot dažādas koku sugas un to augšanas apstākļus, katra konvenciju parakstījusī dalībvalsts oglekļa uzkrājumus savos mežos novērtē pēc individuālas aprēķina metodikas (Neumann et al., 2016). Novērtējot oglekļa piesaistes potenciālu Eiropas mežos, aprēķina metožu atšķirību dēļ ir grūti apzināt kopējo aprēķinu nenoteiktību.

Analizējot UNFCCC un Kioto protokolu parakstījušo dalībvalstu nacionālos SEG inventarizācijas ziņojumus (UNFCCC, 2018), secināms, ka pielietotās dalībvalstu kokaudžu biomasas aprēķināšanas metodes ir diezgan atšķirīgas. Daudzas konvenciju parakstījušās dalībvalstis, no Baltijas valstīm tajā skaitā arī Igaunija, kokaudžu biomasu aprēķina, izmantojot SEG nacionālo inventarizācijas ziņojumu sastādīšanas vadlīniju (Eggleston et al., 2006) ieteiktos *BEF* vai koksnes blīvuma vērtības. Turpretī Lietuva kombinē vadlīniju ieteiktos pārrēķina koeficientus ar Krievijā izstrādātajiem un Eirāzijas ziemeļu daļai paredzētajiem. Gan Lietuva, gan Igaunija kokaudžu biomasu pārrēķina no MRM aprēķinātajiem kokaudžu krājas datiem.

Salīdzinot citu Eiropas valstu biomasas aprēķina metodes (1.3. tab.), secināms, ka individuālu koku krūšaugstuma caurmēra un koku augstumu datu izmantošana ir tikpat izplatīta prakse, aprēķinot biomasu, kā informācijas par kokaudžu krāju izmantošana.

1.3. tabula / Table 1.3.

Kokaudžu biomasas aprēķina metožu salīdzinājums dažādās Eiropas valstīs
Comparison of carbon estimation methods for European forests

Reģions <i>Region</i>	Valsts <i>Country</i>	Metode * <i>Method *</i>	Ievades parametri * <i>Variables *</i>
Ziemeļeiropa <i>Northern Europe</i>	Somija / <i>Finland</i>	<i>AV</i>	<i>D, H, (CR)</i>
	Norvēģija / <i>Norway</i>	<i>AV</i>	<i>D, (H)</i>
	Zviedrija / <i>Sweden</i>	<i>AV</i>	<i>D, (H)</i>
Centrālā-Rietumeiropa <i>Central-Western Europe</i>	Austrija / <i>Austria</i>	<i>AV+BEF</i>	<i>D, (H, CR, A)</i>
	Beļģija / <i>Belgium</i>	<i>AV+BEF</i>	<i>D, (H)</i>
	Francija / <i>France</i>	<i>BEF</i>	<i>D, (H)</i>
	Vācija / <i>Germany</i>	<i>AV</i>	<i>D, (H)</i>
	Nīderlande / <i>Netherlands</i>	<i>AV+BEF</i>	<i>D, (H)</i>
Centrālā-Austrumeiropa <i>Central-Eastern Europe</i>	Čehija / <i>Czech Republic</i>	<i>AV+BEF</i>	<i>D, (H, A)</i>
	Polija / <i>Poland</i>	<i>BEF</i>	<i>M</i>
	Rumānija / <i>Romania</i>	<i>BEF</i>	<i>M</i>

Reģions <i>Region</i>	Valsts <i>Country</i>	Metode * <i>Method *</i>	Ievades parametri * <i>Variables *</i>
Dienvideiropa <i>Southern Europe</i>	Itālija / <i>Italy</i>	<i>BEF</i>	<i>M</i>
	Spānija / <i>Spain</i>	<i>BEF</i>	<i>M</i>

* *AV* – alometriskie vienādojumi / *allometric functions*, *BEF* – biomasas pārrēķina koeficienti / *biomass expansion factors*, *D* – krūšaugstuma caurmērs / *diameter at breast height*, *H* – augstums / *tree height*, *CR* – vainaga parametri / *crown ratio*, *A* – vecums / *tree age*, *M* – krāja / *stand volume*. Vērtības iekavās norāda, ka parametri lietoti ne visām biomasas frakcijām / *Variables in brackets indicate that this variable is only used in some functions*.

Trīs no apskatītajām Eiropas valstīm (Somija, Austrija, Čehija) savos SEG inventarizācijas ziņojumos papildus koka *D* un *H* lieto arī citas kokus raksturojošas vērtības, piemēram, dažādus vainaga parametrus, stumbra tilpumu un koka vecumu. No apskatītajām biomasas aprēķina metodēm (1.3. tab.) četrās valstīs (Somija, Norvēģija, Zviedrija un Vācija) tiek lietoti alometriskie vienādojumi, piecas valstis (Francija, Polija, Rumānija, Itālija un Spānija) izmanto nacionālas *BEF* vērtības, bet atsevišķām koku sugām vai frakcijām trūkstošās *BEF* vērtības lielākoties tiek aizgūtas no vadlīnijām vai no kaimiņvalstīm. Četru valstu (Austrija, Beļģija, Nīderlande, Čehija) kokaudžu biomasas aprēķina metodes izmanto kombināciju no *BEF* un alometriskajiem vienādojumiem dažādu koka frakciju (stumbrs, zari, saknes) biomasas aprēķiniem.

Somijā nacionālajiem alometriskajiem biomasas vienādojumiem (Repola, 2008, 2009) kā mainīgās vērtības pamatā lieto *D* un *H*, bet skuju, lapu un zaru biomasas aprēķināšanai papildus tiek lietoti arī dažādi vainaga parametri. Norvēģijas mežu oglekļa uzkrājumu aprēķina metodika izmanto Zviedrijā izstrādātos alometriskos biomasas vienādojumus (Marklund, 1988; Petersson, Stahl, 2006). Līdz ar to abu valstu metodikās, aprēķinot virszemes (stumbrs, zari, skuju, lapas) biomasu, lieto *H* un *D*. Turpretī sakņu biomasu tiek aprēķināta tikai no koku *D* mērījumiem.

Piecas no apskatītajām valstīm (1.3. tab.) – Austrija, Beļģija, Francija, Vācija un Nīderlande – pēc Pārtikas un lauksaimniecības organizācijas (FAO) klasifikācijas (FAO, 2011) pieder Centrālajai-Rietumeiropai. Austrijas biomasas aprēķinu metodika izmanto gan *BEF*, gan alometriskos biomasas vienādojumus, atkarībā no tā, kurai koka frakcijai aprēķini tiek veikti. Zaru, skuju un sakņu biomasas aprēķināšanai tiek izmantoti alometriskie biomasas vienādojumi (Ledermann, Neumann, 2006), kuriem mainīgās vērtības ir *D* un vainaga parametri, bet sakņu biomasas vienādojumiem arī koka vecums (Offenthaler, Hochbichler, 2006). Stumbra biomasu tiek aprēķināta pēc īpaši Austrijai izstrādātiem pārrēķina koeficientiem, kuros tiek ņemts vērā stumbra tilpums, koksnes blīvums un stumbra forma. Kokaudžu biomasas aprēķinu metodika Beļģijā vispirms izmanto alometriskos vienādojumus, lai aprēķinātu stumbru tilpumus. Tilpums tiek reizināts ar vidējām reducētā blīvuma vērtībām katrai koku sugai, iegūstot stumbra biomasu. Lai aprēķinātu kopējo koka biomasu no stumbra datiem, tiek lietoti FAO rekomendētie *BEF*. Līdzīgi kā Beļģijā pielietotajā metodikā, arī Francijas metodika vispirms paredz aprēķināt koka tilpumu, bet, atšķirībā no Beļģijas, tilpums tiek aprēķināts ne tikai stumbram, bet visai koku virszemes daļai pēc speciālām formulām (Vallet et al., 2006). Pēc tam koka tilpums

tiek pārrēķināts biomasā, izmantojot Francijai izstrādātas *BEF* un blīvuma vērtības. Vācijā kokaudžu biomasu novērtē tikai ar alometriskajiem biomasas vienādojumiem. Dažādi virszemes biomasas vienādojumi tiek piemēroti atkarībā no koku vidējā *D* (koki, kuru *D* lielāks par 10 cm; koki ar *D* mazāku par 10 cm; koki, kuri nav sasnēguši 1.3 m augstumu) katrai koku sugai, kā mainīgās vērtības izmantojot *D*, *H* vai abus šos parametrus. Sakņu biomasas vienādojumos kā mainīgo vērtību izmanto tikai *D* un atsevišķām koku sugām vienādojumi ir aizgūti no Francijas un Zviedrijas. Nīderlandē visām koku sugām biomasu aprēķina, piemērojot *BEF*. Savukārt valsti raksturojošās *BEF* vērtības ir aprēķinātas pēc biomasas alometriskajiem vienādojumiem (Nabuurs et al., 2005), kuri izplatītākajām koku sugām izstrādāti Krievijā, bet atsevišķām koku sugām arī Zviedrijā, Francijā, Austrijā un arī pašā Nīderlandē.

Trīs no apskatītajām valstīm (1.3. tab.), Čehija, Polija un Rumānija, pēc FAO klasifikācijas (FAO, 2011) pieder Centrālās-Austrumeiropas valstu grupai. Čehijas biomasas aprēķinu metodika ir līdzīga Nīderlandes metodikai. Vispirms pēc nacionālajiem vai Eiropas vispārīgajiem biomasas vienādojumiem dažādām koku frakcijām tiek aprēķinātas no valdošās koku sugas un vecumgrupas atkarīgas *BEF* vērtības (Lehtonen et al., 2004), kuras pielieto biomasas aprēķināšanai no krājas, kas aprēķināta pēc stumbra tilpuma vienādojumiem. Polija, tāpat kā Rumānija, virszemes un sakņu biomasas aprēķinos lieto IPCC vadlīniju ieteikto metodi un *BEF* vērtības. Aprēķiniem nepieciešamās koku sugu vidējās blīvuma vērtības tomēr ir balstītas uz Polijā un attiecīgi Rumānijā ievāktiem datiem. Atšķirībā no Rumānijas, kur izmanto nacionālās blīvuma vērtības, Polijā reducētā blīvuma aprēķinu pamatā ir gaissausas koksnes blīvuma (pie 15% relatīvā mitruma) un koksnes rukuma reizinājums.

Itālija un Spānija 2017. gada SEG inventarizācijas ziņojumā oglekļa apjoma novērtēšanai mežaudzēs izmantojusi *BEF* vērtības. Itālija lieto nacionālās *BEF* vērtības un koksnes blīvumu datus gan koku virszemes, gan sakņu biomasas aprēķināšanai (Federici et al., 2008). Spānija izmanto nacionālās *BEF* vērtības tikai kokaudžu virszemes biomasas aprēķināšanai, bet informāciju par sakņu *BEF* un blīvuma vērtībām iegūst no IPCC vadlīnijām (Eggleston et al., 2006). Turpmākajos ziņojumos Spānija plāno izmantot Spānijā izstrādātus alometriskos biomasas vienādojumus izplatītākajām koku sugām un aprēķināt biomasu bez pārrēķinu koeficientiem (Neumann et al., 2016).

Zviedrijā veiktā pētījumā ir pierādīts, ka konstantu *BEF* vērtību pielietošana biomasas aprēķinos var radīt ievērojamu kļūdu (Pettersson et al., 2012), jo *BEF* vērtības mainās atkarībā no audzes vecuma, sastāva, struktūras, augšanas apstākļiem un krājas (Lehtonen et al., 2004; Wirth et al., 2004; Magalhães, Seifert, 2015). Zviedru pētījums apstiprināja, ka vislielāko precizitāti biomasas novērtēšanā iespējams sasniegt, izmantojot katrai koku sugai izstrādātus biomasas alometriskos vienādojumus, kuri tiek piemēroti individuālu koku līmenī. Tām valstīm, kurām nav izstrādāti reprezentatīvi biomasas alometriskie vienādojumi, piemērotākais risinājums varētu būt no vecuma atkarīgas *BEF* vērtības (Lehtonen et al., 2004; Pettersson et al., 2012).

Mūsdienās *BEF* vērtības joprojām tiek bieži izmantotas dažādu valstu nacionālajos SEG inventarizācijas ziņojumos, jo nacionālie MRM sniedz informāciju par stumbra

tilpumiem nevis par biomasu koka saknēs, zaros, skuļās, lapās un stumbrā, balstoties uz atsevišķu koku alometriskajiem biomasas vienādojumiem. Tomēr vien daži pētījumi ir novērtējuši iespējamās kļūdas lielumu, kas varētu rasties, lietojot nepiemērotas *BEF* vērtības (Lehtonen et al., 2007; Albaugh et al., 2009). Biomasas tieša aprēķināšana no koku uzmērījumu datiem nacionālajos SEG inventarizācijas ziņojumos ir salīdzinoši jauna tendence un joprojām nav plaši lietota reprezentatīvu biomasas vienādojumu trūkuma dēļ (Di Cosmo et al., 2016). Kā pagaidu risinājums minētajai situācijai varētu būt vispārīgie biomasas vienādojumi, kuri ir pieejami daudzām koku sugām un ģeogrāfiskajiem reģioniem (Wirth et al., 2004; Muukkonen, 2007; Chojnacky et al., 2014; Forrester et al., 2017).

Tāpat kā biomasas aprēķinu metodes, arī oglekļa saturs koksnes sausnā katrai valstij nacionālajos SEG inventarizācijas ziņojumos (UNFCCC, 2018) ir definēts atšķirīgi. Vadlīniju (Eggleston et al., 2006) piedāvātās vidējās oglekļa satura īpatsvara noklusētās vērtības boreālās un mērenās joslas mežiem (48% lapkokiem, 51% skujkociem vai 47% visiem kokiem) tiek lietotas vairākās valstīs, tostarp Lietuvā un Igaunijā. Igaunijā lieto visu koku sugu vidējo oglekļa satura vērtību, bet Lietuva skujkociem un lapkokiem lieto atsevišķas vērtības. Salīdzinot citu Eiropas valstu lietotās oglekļa īpatsvara vērtības, secināms, ka tās visos gadījumos ir robežās no 47 līdz 51% (1.4. tab.).

1.4. tabula / Table 1.4.

Dažādās Eiropas valstīs lietotais oglekļa saturs biomasā

(UNFCCC, 2018)

Carbon content of biomass used in different European countries

(UNFCCC, 2018)

Valsts <i>Country</i>	Skujkoki <i>Conifers</i>	Lapkoki <i>Deciduous</i>
Somija / <i>Finland</i>	50%	50%
Norvēģija / <i>Norway</i>	50%	50%
Zviedrija / <i>Sweden</i>	49%	49%
Austrija / <i>Austria</i>	Stumbrs / <i>Stem</i> (50%), zari, skuļas, saknes / <i>branches, needles, roots</i> (48%)	48%
Beļģija / <i>Belgium</i>	50%	50%
Francija / <i>France</i>	47.5%	47.5%
Vācija / <i>Germany</i>	50%	50%
Nīderlande / <i>Netherlands</i>	51%	48%
Čehija / <i>Czech Republic</i>	49%	48%
Polija / <i>Poland</i>	47%	47%
Rumānija / <i>Romania</i>	47%	47%
Itālija / <i>Italy</i>	47%	47%
Spānija / <i>Spain</i>	50.7%	48.5%
Igaunija / <i>Estonia</i>	47%	47%
Lietuva / <i>Lithuania</i>	51%	48%

Novērtējot kokaudžu oglekļa krājumus, zinātniskajā literatūrā daudzos gadījumos vienkāršoti tiek pieņemts, ka oglekļa saturs koka biomasā ir 50%. Tomēr nesenākie pētījumi apliecina, ka šis pieņēmums nav gluži precīzs, un oglekļa saturs būtiski atšķiras starp koku sugām, kā arī starp dažādām koku frakcijām (Thomas, Martin 2012). Piemēram, koku celma/sakņu biomasas vidējais oglekļa saturs ir 48.1%, tātad zemāks nekā virszemes biomasas frakciju vidējais oglekļa saturs, kas ir 50% (Ritson, Sochacki, 2003). Dažos pētījumos ir pierādīts, ka vispārīgi pieņemtā oglekļa satura vērtību izmantošana var radīt vidēji 5% kļūdu kokaudžu oglekļa uzkrājuma aprēķinos. Piemēram, tropu mežos kopējais oglekļa apjoms tiek pārvērtēts par apmēram 3.3–5.3% (Martin, Thomas, 2011), bet mērenās joslas mežos akumulētā oglekļa apjoma kļūda varētu būt robežās no 4 līdz 6 %, atkarībā no dominējošās koku sugas (Thomas, Malczewski, 2007; Jones, O'Hara, 2012).

Arī Latvijā ir veikti pētījumi par dažādu biomasas frakciju oglekļa saturu, bet tie veikti tikai atsevišķu koku sugu jaunaudzēs. Piemēram, baltalkšņa jaunaudzēs oglekļa saturs absolūti sausas koksnes dažādās virszemes frakcijās (stumbrs, zari, lapas, miza) svārstās no 47.2% stumbra koksne līdz 52.6% koku lapās, bet absolūti sausas koksnes sakņu biomasā konstatētais vidējais oglekļa saturs ir mazāks nekā koka virszemes frakcijās, attiecīgi 47.0%. (Bārdulis et al., 2011). Citā pētījumā, kurš veikts līdz 40 gadus vecās citu koku sugu audzēs, vidējais oglekļa saturs parastās priedes sakņu biomasā meža zemē novērtēts vidēji 48.9%, bet apmežotā lauksaimniecības zemē – 49.5%; turpretī bērza sakņu biomasas oglekļa saturs apmežotā lauksaimniecības zemē ir 47.3% (Bārdulis et al., 2017). Ā. Jansons *et al.* (2017) konstatēja priedes oglekļa satura būtisku ($p < 0.001$) palielināšanos no 48.2% līdz 51.7% sakņu biomasā, pieaugot koka vecumam. Priedes, egles un bērza 10–12 gadus vecos stādījumos lauksaimniecības zemēs apkopotī dati par oglekļa saturu virszemes un sakņu biomasas frakcijās (stumbra koksne, stumbra miza, zari, saknes, lapas un skujas), kur tas priedei svārstās robežās no 50.99 līdz 51.9%, eglei 49.81–50.51%, bet bērzam 49.7–52.21% (Daugaviete et al., 2008). IPCC vadlīniju SEG uzskaites metodika (Eggleston et al., 2006) rekomendē pielietot koksnes oglekļa īpatsvara vērtības, piemērojot tās atkarībā no klimatiskajiem reģioniem. Arī skujkokiem un lapkokiem mērenās un boreālās joslas mežos vadlīnijas iesaka lietot atšķirīgas oglekļa noklusētās vērtības. Tomēr kopš pēdējo vadlīniju izstrādes ir pagājis ilgs laiks, un šobrīd ir pieejamas precizētas, dažādām koku sugu grupām piemērojamas oglekļa īpatsvara vērtības, kuru aprēķinos izmantoti dati no daudz plašākiem koku augšanas apstākļiem un reģioniem. Apkopojot dažādu pētījumu rezultātus, secināts, ka oglekļa saturs dažādu koku sugu dzīvajā biomasā mērenās joslas mežos un boreālajos mežos var būt robežās no 43.4 līdz 55.6% (Thomas, Martin, 2012). Ņemot vērā jaunākās atziņas par koksnes oglekļa saturu, secināts, ka IPCC vadlīniju ieteiktās oglekļa satura vērtības tropiskajos mežos pārvērtē oglekļa uzkrājumus par apmēram 3.3% jeb vidēji 4.1 t oglekļa ha⁻¹ (Martin, Thomas, 2011). Salīdzinot ar citiem kļūdu rašanās avotiem, oglekļa satura precizēšanas ietekme uz kopējiem oglekļa uzkrājumiem ir viegli izmērāma, tomēr, veicot zinātniskās literatūras analīzi, nav atrodamā informācija, ka Eiropas mežos tas būtu darīts. Nacionālajos SEG inventarizācijas ziņojumos (UNFCCC, 2018) astoņas no apskatītajām 15 valstīm pilnībā vai daļēji lieto IPCC vadlīniju ieteiktās vērtības

mērenās un boreālās joslas mežiem (1.4. tab.). Somija, Norvēģija, Beļģija un Vācija lieto vispārpieņemto oglekļa īpatsvara vērtību 50%, bet Zviedrija, Francija un Spānija lieto savas oglekļa satura vērtības.

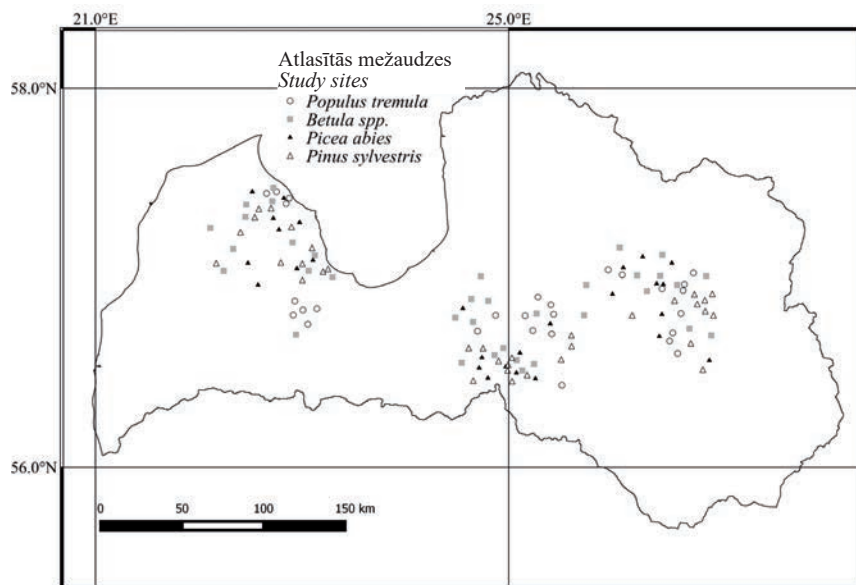
Nacionālajos SEG inventarizācijas ziņojumos (UNFCCC, 2018) 10 no apskatītajām 15 valstīm lieto vienādas oglekļa īpatsvara vērtības skujkokiem un lapkokiem (1.4. tab.). Apjomīgā literatūras analīzē, izvērtējot 31 pētījuma rezultātus no visas pasaules par oglekļa satura izmaiņām starp dažādiem reģioniem, skujkoku un lapkoku grupām, secināts, ka neatkarīgi no klimatiskā reģiona oglekļa saturs skujkoku ($50.8 \pm 0.7\%$) koksne ir būtiski lielāks nekā lapkokiem ($47.7 \pm 0.3\%$) (Thomas, Martin, 2012). Tāpēc vienāda oglekļa satura vērtību lietošana skujkokiem un lapkokiem nav zinātniski pamatota.

Tā kā joprojām nav pārliecinošu datu par koksnes oglekļa saturu, kāds būtu jālieto hemiboreālajā mežu joslā, pētījumā izmantotas skujkoku un lapkoku vidējās oglekļa satura vērtības, attiecīgi $50.8 \pm 0.6\%$ un $48.8 \pm 0.6\%$ kuras *S.C. Thomas & A.R. Martin* (2012) iesaka lietot mērenās un boreālās joslas mežos.

2. PĒTĪJUMA MATERIĀLS UN METODIKA

2.1. Empīriskā materiāla raksturojums

Empīriskais materiāls Latvijas saimnieciski nozīmīgāko koku sugu – parastās priedes (*Pinus sylvestris* L.), parastās egles (*Picea abies* (L.) H. Karst.), bērzu (*Betula pendula* Roth un *Betula pubescens* Ehrh.) un parastās apses (*Populus tremula* L.) – virszemes un sakņu biomasas vienādojumu izstrādei un oglekļa uzkrājumu koka biomasā aprēķiniem ievākts 124 meža nogabalos laikposmā no 2010.–2014. gadam. Mežaudžu atrašanās vietas izvēlētas dažādās Latvijas vietās, pārstāvot daudzveidīgus augšanas apstākļus un atšķirīgas koku populācijas (2.1. att.). Visas izvēlētas mežaudzes izvietotas akciju sabiedrības “Latvijas valsts meži” Ziemeļlatgales, Vidusdaugavas, Zemgales un Ziemeļkurzemes plānošanas reģionos. Atlasītie nogabali (35 kārpainā un purva bērza, 34 parastās priedes, 28 parastās apses, 27 parastās egles) galvenokārt izvietoti sausās un nosusinātās minerālaugsnēs, tādējādi reprezentējot lielāko daļu Latvijas meža augšanas apstākļu. Tikai 6% gadījumos meža nogabali atlasīti slapjās minerālaugsnēs un nosusinātās kūdras augsnēs. Mežaudzes slapjās kūdras augsnēs (kūdras slānis lielāks par 30 cm) no pētījuma tika izslēgtas, jo šādās vietās augsta ūdens līmeņa rezultātā bija apgrūtināta kvalitatīva empīriskā materiāla ievākšana.



2.1. attēls. Pētījumu objektu izvietojums Latvijas teritorijā.

Figure 2.1. Locations of study sites.

Katrai pētījumā iekļautajai koku sugai meža nogabali atlasīti, pārstāvot vienādā skaitā jaunaudzes, vidēja vecuma audzes, briestaudzes un pieaugušas audzes, kā arī koku sugai tipiskākos meža tipus. Visos atlasītajos nogabalos valdošās koku sugas īpatsvars bija lielāks par 70%. Lai raksturotu atlasītās mežaudzes, katrā nogabalā izvietots apļveida parauglaukums ar platību 500 m²; parauglaukumi subjektīvi izvietoti audzes vietās, kas visprecīzāk raksturo visu nogabalu, un to centrs atradās tālāk par 50 m no nogabala ārējās robežas (2.1. tab.).

2.1. tabula / Table 2.1.

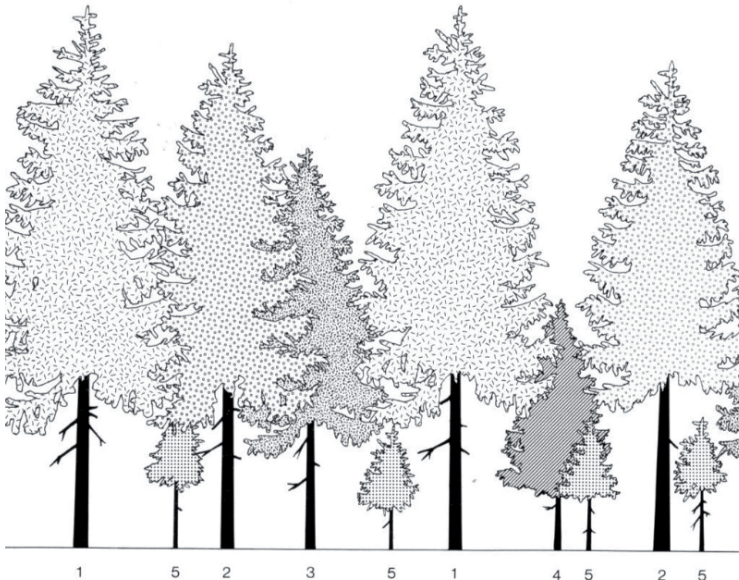
Atlasīto meža nogabalu vidējo rādītāju raksturojums atkarībā no valdošās koku sugas

Main characteristics of the studied stands according to the dominant tree species

Valdošā suga <i>Species</i>	Nogabalu skaits, gab. <i>Number of stands</i>	Sugas īpatsvars, % <i>Proportion of species, %</i>	Caurmērs, cm <i>DBH, cm</i>	Augstums, m <i>Tree height, m</i>	Šķērs-laukums, m ² ha ⁻¹ <i>Stand basal area, m² ha⁻¹</i>	Vecums, gadi <i>Age, years</i>
<i>Pinus sylvestris</i>	34	70–100	1.3–40.3	1.4–30.7	0.4–49.7	6–141
<i>Picea abies</i>	27	70–100	1.6–34.1	1.8–27.7	0.6–44.9	8–97
<i>Betula spp.</i>	35	70–100	2.8–32.3	5.2–29.6	0.9–44.4	8–92
<i>Populus tremula</i>	28	80–100	2.1–30.6	3.4–30.4	0.5–45.2	5–76

Ierīkotajos parauglaukumos katram kokam uzmērīts krūšaugstuma caurmērs un 15 dažādu dimensiju kokiem no katras sugas – arī augstums. Ja koku skaits parauglaukumā bija mazāks, tad augstums mērīts visiem kociem. No augstuma mērījumiem katrai sugai atsevišķi konstruēta augstumlīkne, pēc kuras aprēķināts augstums visiem pārējiem parauglaukumā uzmērītajiem šīs sugas kociem.

Pēc uzmērīšanas katrā parauglaukumā nozāģēšanai atzīmēti trīs dažādu dimensiju I, II un III Krafta klases paraugkoki (2.2. att.). Bojātie un trupējušie koki, kā arī koki ar dubultgalotnēm netika izvēlēti kā paraugkoki.



2.2. attēls. Koku klasifikācija pēc ārējā izskata un vainaga īpašībām.

(FAO, 2014)

1 – virsvaldu koki, 2 – valdošie koki, 3 – līdzvaldu koki, 4 – nomāktie koki,
5 – atmirušie un atmirstošie koki.

Figure 2.2. Social position of single trees in a stand.

(FAO, 2014)

1 – dominant, 2 – codominant, 3 – subdominant, 4 – suppressed, 5 – dying.

2.2. Koku virszemes biomasas empīriskā materiāla ievākšana un apstrāde

Virszemes biomasas aprēķiniem empīriskais materiāls ievākts no vēla rudens līdz agram pavasarim, periodā, kad lapu koki ir bezlapu stāvoklī, koku jaunie dzinumi ir nobrieduši un vairs nenotiek aktīva koka augšana. Kopā virszemes biomasas vienādojumu izstrādei ievākts empīriskais materiāls no 372 kociem (2.2. tab.).

2.2. tabula / Table 2.2.

Paraugkoku raksturojums virszemes biomasas aprēķiniem
Sample tree characteristics for aboveground biomass investigation

Koku suga <i>Tree species</i>	Koku skaits <i>Number of trees</i>	<i>D, cm / DBH, cm</i>				<i>H, m / Tree height, m</i>			
		Vidēji <i>Mean</i>	Std <i>Std.</i>	Min. <i>Min.</i>	Maks. <i>Max.</i>	Vidēji <i>Mean</i>	Std <i>Std.</i>	Min. <i>Min.</i>	Maks. <i>Max.</i>
<i>Pinus sylvestris</i>	102	19	9.4	1.5	45.2	17.3	9.2	1.9	34.5
<i>Picea abies</i>	81	17.5	9	2.3	36.3	16.6	8.9	2.8	30.8
<i>Betula spp.</i>	105	14.7	7.5	2.7	37.1	18.1	8.1	4.8	32.3
<i>Populus tremula</i>	84	13.8	8.3	2.7	34	16.6	8.5	3.7	29.9

Pirms paraugkoka nozāgēšanas katram kokam uzmērīts krūšaugstuma caurmērs un celma augstums, tos atzīmējot ar krāsu uz stumbra virsmas. Celma augstums visiem kokiem mērīts no zemes virsmas. Tas definēts kā 1% no koka augstuma, kas nomērīts pirms koka nozāgēšanas. Celma augstums ir arī vieta, kur koks sadalās virszemes un celma/sakņu biomasas frakcijās.

Pēc koka nozāgēšanas tā zaļais vainags stumbra garenvirzienā sadalīts trijās vienādās daļās. No katras daļas vidus marķēts viens vidēja izmēra zars, visi zari kopā izmantoti tālākām analīzēm, lai noteiktu vidējo ūdens īpatsvaru koka vainagā. No sauso zaru daļas vidus izvēlēts tikai viens paraugzars, kurš marķēts identiski. Pēc tam stumbrs rūpīgi atzarots, un visi dzīvie un sausie zari atsevišķi nosvērti ar pārvietojamā trijkājī iekarinašiem svariem (2.3. att.). Lielākajiem kokiem zari svērti ar *Kern HCB 99K50*, 99 kg ±0.05 svariem, bet mazākajiem – *Kern HDB 10K10N*, 10 kg ±0.01. Pēc svēršanas zaru paraugi iepakoti plastmasas maisos un nogādāti laboratorijā sausas masas noteikšanai.



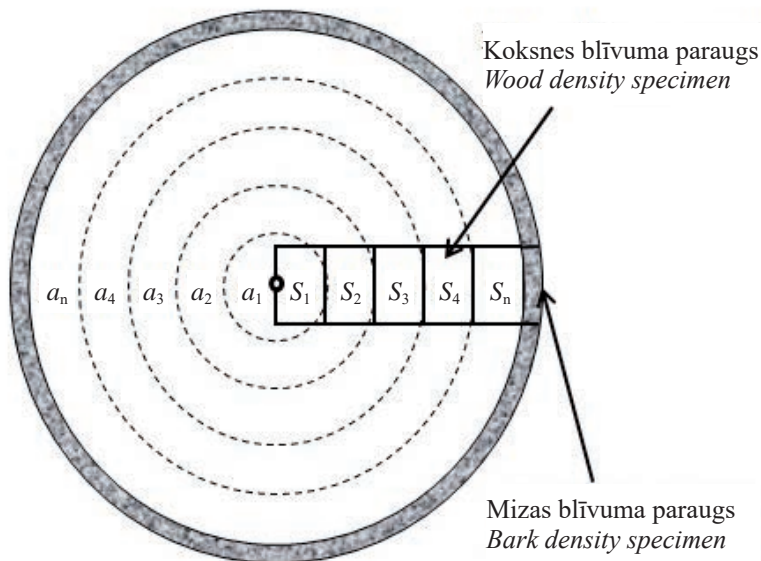
2.3. attēls. Zaru svēršanas process bērza nogabalā.
 Figure 2.3. Branch weighing in birch forest stand.

Laboratorijā zaru paraugi nosvērti un likti žāvēties 103°C grādu temperatūrā līdz nemainīgai to masai. Ja kādu iemeslu dēļ paraugus uzreiz pēc nogādāšanas laboratorijā nebija iespējams nosvērt, tie uzglabāti aukstumkamerā. Paraugu relatīvais mitrums noteikts pēc formulas (2.1). Visa koka dzīvo un sauso zaru biomasa aprēķināta pēc raksturojošo zaru paraugu dabiski mitras masas un absolūti sausas masas attiecības.

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2.1)$$

kur: W – parauga relatīvais mitrums, %;
 m_1 – parauga masa mitrā stāvoklī, g;
 m_2 – parauga masa absolūti sausā stāvoklī, g.

Uz nogāztā koka virsmas ar krāsu izveidotas atzīmes ik pa 1 m (kokiem, kuru stumbru garums ir līdz 20 m) vai ik pa 2 m, (ja stumbra garums ir 20 m un vairāk), un precīzi nomērīts stumbra kopējais garums. Koka stumbrs iezīmētajās vietās sadalīts nogriežņos jeb sekcijās. Katrā stumbra griezuma vietā, papildus arī pirmās sekcijas vidū un 1.3 m augstumā, izzāģētas apmēram 2–2.5 cm biezas koksnes ripas. Šķērsriezuma laukuma aprēķiniem katrai koksnes ripai izmērīts caurmērs ar un bez mizas divos savstarpēji perpendikulāros virzienos. Lai aprēķinātu stumbra vidējo reducēto blīvumu, no katra stumbra šķērsriezuma ripas sagatavoti paraugi jeb ripas segmenti blīvuma mērīšanai. Blīvuma segmentu sagatavošana veikta pēc attēlotās shēmas (2.4. att.).



2.4. attēls. **Blīvuma paraugu novietojums stumbra šķērsriezuma ripās.**

S – blīvuma paraugs, a – paraugam atbilstošā ripas platība.

Figure 2.4. Position of the density specimens within the sample discs.

S – density specimen, a – corresponding area of wood or bark specimen.

Blīvuma segmenta platums virzienā no ripas centra uz mizu bija stingri noteikts 20 mm. To skaits un pēdējā segmenta platums bija atkarīgs no šķērsriezuma ripas rādiusa. Segmenta biezums bija vienāds ar ripas biezumu, bet tā garums nepārsniedza 30 mm. Pēdējais segments (vistuvāk mizai) tika nomizots un, gadījumos ja tā platums bija mazāks par 5 mm, netika atdalīts no iepriekšējā segmenta. Stumbra šķērsriezuma ripas, kuru caurmērs mazāks par 20 mm, tika nomizotas, bet netika dalītas sīkākos segmentos. Šķērsriezuma ripām ar diametru, kas mazāks par 5 mm, blīvums tika mērīts, tās nemizojot, jo mizu nebija iespējams precīzi atdalīt no koksnes.

Pirms koksnes un mizas segmentu blīvuma mērīšanas tie uz 24 stundām tika iemērkti ūdenī, lai to neuzsūktu mērīšanas procesā (Ilic et al., 2000). Paraugu blīvums mērīts ar *Precisa XB 220A* laboratorijas svāriem, kas aprīkoti ar *Precisa* blīvuma mērīšanas komplektu (partijas numurs: 350–8556) divos atkārtojumos (2.5. att.). Pirms katra atkārtojuma paraugs nosusināts ar mīkstu papīru. Ja starp mērījumu atkārtojumiem konstatēta liela starpība, tad veikts vēl trešais mērījums, tādējādi samazinot sistemātisko un gadījuma kļūdu rašanos. Koksnes un mizas segmentu reducētā blīvuma aprēķiniem visi paraugi žāvēti 103°C temperatūrā, līdz tika sasniegta nemainīga to masa. Paraugu sausa masa noteikta uzreiz pēc to izņemšanas no žāvēšanas kameras, kamēr tie nav piesaistījuši gaisā esošo mitrumu. Reducētais blīvums aprēķināts pēc formulas (2.2).

$$\rho_r = \frac{\rho \times m_2}{m_1} \quad (2.2)$$

- kur: ρ_r – parauga reducētais blīvums, g cm⁻³;
 ρ – parauga blīvums mitrā stāvoklī, g cm⁻³;
 m_1 – parauga masa mitrā stāvoklī, g;
 m_2 – parauga masa absolūti sausā stāvoklī, g.



2.5. attēls. Blīvuma mērīšana koksnes paraugam.
 Figure 2.5. Density measurement of a wood sample.

Stumbra sekciju tilpuma aprēķiniem izmantoti katras šķērsriezuma vietas diametra mērījumu rezultāti divos savstarpēji perpendikulāros virzienos. Katras stumbra sekcijas tilpums aprēķināts pēc formulas (2.3), līdzīgi kā to darīja *A. Smith et al.* (2014), aprēķinot bērza stumbra biomasu.

$$V_S = \frac{l_S(g_1 + g_2)}{2} \quad (2.3)$$

kur: V_S – stumbra sekcijas tilpums, m³;
 l_S – stumbra sekcijas garums, m;
 g_1 – apakšējās virsmas šķērsriezuma laukums sekcijai, m²;
 g_2 – augšējās virsmas šķērsriezuma laukums sekcijai, m²;
 g – elipses laukums = $\pi / 4(\text{diametr}_1 \times \text{diametr}_2)$, m².

Katras stumbra sekcijas biomasu aprēķināta, reizinot tās tilpumu ar vidējo reducēto blīvumu, kurš aprēķināts kā vidējais aritmētiskais no abos galos esošo šķērsriezuma ripu vidējiem reducētajiem blīvumiem. Galotnes sekcijai blīvums aprēķināts tikai pēc vienas, apakšējās šķērsriezuma ripas vidējā reducētā blīvuma. Vidējā svērtā aprēķina formula (2.4) lietota, aprēķinot katras šķērsriezuma ripas vidējo blīvumu no koksnes un mizas segmentiem un tiem atbilstošajām platībām uz stumbra šķērsriezuma ripas (2.4. att.). Visa stumbra kopējā biomasu aprēķināta summējot individuālu sekciju biomasu.

$$\rho_{\text{ripa}} = \frac{S_1 \times a_1 + S_2 \times a_2 + S_n \times a_n + S_m \times a_m}{a_1 + a_2 + a_n + a_m} \quad (2.4)$$

kur: ρ_{ripa} – stumbra šķērsriezuma ripas vidējais reducētais blīvums, g cm⁻³;
 S_1, S_2, S_n – koksnes paraugu reducētais blīvums, g cm⁻³;
 S_m – mizas parauga reducētais blīvums, g cm⁻³;
 a_1, a_2, a_n – koksnes parauga aizņemtais laukums stumbra šķērsriezumā, cm²;
 a_m – mizas parauga aizņemtais laukums stumbra šķērsriezumā, cm².

2.3. Koku celma/sakņu biomasas empīriskā materiāla ievākšana un apstrāde

Koku celms un saknes atrakti nākamajā vasarā pēc koka nozāģēšanas. Datu paraugkopu kopā veido 141 atlasīts paraugkoks (37 parastās priedes, 29 parastās egles, 42 bērzi un 33 parastās apses), pārstāvot dažādas krūšaugstuma caurmēra pakāpes, koku augstumu un vecumu grupas katrai pētījumā ietvertajai koku sugai (2.3. tab.). Koku sakņu biomasu atrakta tiem pašiem kokiem, kuriem iepriekš novērtēta virszemes biomasu. Lai samazinātu smalko sakņu zudumu, visa sakņu sistēma katram kokam rakta tikai manuāli ar rokas darbarīkiem. Saknes, kuru caurmērs ir mazāks par 2 mm, tiek dēvētas par koka uzsūcošajām saknēm un ar parastajām metodēm ir ļoti grūti atdalāmas no augsnes (Eggleston et al., 2006). Tāpēc darba procesā mēģināts izrakt tik daudz uzsūcošo sakņu, cik iespējams, bet pilnībā izraktas tikai tās saknes, kuru caurmērs pārsniedza 2 mm.

2.3. tabula / Table 2.3.

Paraugkoku raksturojums celma/sakņu biomasas aprēķiniem
Sample tree characteristics for belowground biomass investigation

Koku suga <i>Tree species</i>	Koku skaits <i>Number of trees</i>	Parametrs <i>Variable</i>	Vidēji <i>Mean</i>	Std <i>Std.</i>	Min. <i>Min.</i>	Maks. <i>Max.</i>
<i>Pinus sylvestris</i>	37	<i>D, cm / DBH, cm</i>	15.1	9.7	1.5	45.3
		<i>H, m / Tree height, m</i>	13.0	9.4	1.9	34.5
		<i>Vecums, gadi / Age, years</i>	35.3	30.6	6.0	119.0
<i>Picea abies</i>	29	<i>D, cm / DBH, cm</i>	13.7	8.1	4.0	30.5
		<i>H, m / Tree height, m</i>	13.1	8.3	4.0	27.7
		<i>Vecums, gadi / Age, years</i>	30.3	22.2	11.0	72.0
<i>Betula spp.</i>	42	<i>D, cm / DBH, cm</i>	12.0	7.0	2.7	31.7
		<i>H, m / Tree height, m</i>	15.9	8.8	4.9	30.9
		<i>Vecums, gadi / Age, years</i>	26.7	21.2	8.0	72.0
<i>Populus tremula</i>	33	<i>D, cm / DBH, cm</i>	10.9	8.1	2.8	34.1
		<i>H, m / Tree height, m</i>	13.1	7.6	3.7	29.7
		<i>Vecums, gadi / Age, years</i>	16.2	13.2	6.0	46.0

Pēc izrakšanas un transportēšanas uz tālāko apstrādes vietu koka sakņu sistēma rūpīgi mazgāta, izmantojot augstspiediena ūdens sūkni, lai atbrīvotos no palikušās augsnes daļiņām (2.6. att.). Absolūti sausas celma/sakņu biomasas aprēķināšanai sakņu sistēma sadalīta trijās frakcijās:

- celma daļa – virszemē un augsnē esošā monolītā, atsevišķās saknēs nediferencētā daļa (Liepa, Blija, 2008);
- balstsaknes – visas koka saknes, kuru caurmērs pārsniedz 20 mm;
- sīkās saknes – visas atraktās koka saknes, kuru caurmērs ir mazāks par 20 mm.

Kopējā celma un sakņu masa noteikta, nosverot katru frakciju atsevišķi ar tiem pašiem iekarināmajiem lauka svariem, kuri izmantoti koku zaru svēršanai. Absolūti sausas masas aprēķiniem no celma un saknēm ievākti paraugi relatīvā mitruma noteikšanai. No celma daļas vidus izzāģēts viens paraugs, no balstsaknēm izzāģēti trīs atšķirīga diametra sakņu paraugi, bet trīs par 20 mm mazākas pilna garuma saknes izvēlētas kā sīkās saknes reprezentējošs paraugs. Visi ievāktie paraugi uzreiz nosvērti un tad žāvēti 103°C temperatūrā līdz nemainīgai to masai. Paraugu relatīvais mitrums aprēķināts pēc (2.1) izteiksmes. Koka celma/sakņu biomasa aprēķināta, summējot celma, balstsakņu un sīko sakņu kopējo biomasu, kas katrai frakcijai noteikta pēc raksturojošo paraugu dabiski mitras – absolūti sausas masas attiecības.



2.6. attēls. Atrakta un nomazgāta parastās priedes sakņu sistēma.
 Figure 2.6. Excavated and washed belowground biomass of Scots pine.

2.4. Vienādojumu izstrāde

Latvijas MRM uzkrāj datus par individuālu koku D un H , tāpēc šīs viegli izmērāmās koka pazīmes pētījumā izvēlētas kā mainīgās vērtības, lai radītu ērti pielietojamus un praktiskus vienādojumus. Dažkārt kā mainīgās vērtības vienādojumos papildus D un H tiek lietots arī koka vecums vai dažādi vainaga parametri, bet Latvijas MRM pagaidām šādu informāciju neievāc individuālu koku līmenī. Pēc apjomīgas literatūras analīzes galarezultātā izvēlētas trīs matemātiskās izteiksmes (2.5, 2.6 un 2.7), aprēķinot koka stumbra biomasu (SB), dzīvo un sauso zaru biomasu (BB), kopējo virszemes biomasu (AGB) un kopējo celma daļas un sakņu biomasu (BGB). AGB aprēķināta, saskaitot SB un BB (skujas un čiekuri ir iekļauti skujkokiem, bet lapas nav iekļautas lapkokiem), kamēr kopējā BGB ir aprēķināta, saskaitot celma, balstsakņu un sīko sakņu biomasu.

$$\ln \hat{Y}_{ki} = \ln(a) + b \times \ln(D) + u_k + \varepsilon_{ki} \quad (2.5)$$

$$\ln \hat{Y}_{ki} = \ln(a) + b \times \ln(D) + c \times \ln(H) + u_k + \varepsilon_{ki} \quad (2.6)$$

$$\ln \hat{Y}_{ki} = \ln(a) + b \times \left(\frac{D}{D+m} \right) + c \times H + d \times \ln(H) + u_k + \varepsilon_{ki} \quad (2.7)$$

kur: \hat{Y}_{ki} – koka i biomasu nogabalā k , kg;
 D – koka krūšaugstuma caurmērs, cm;
 H – koka augstums, m;

a , b , c un d – regresijas koeficienti;
 m – konstante;
 u – randomizētais faktors (angļu val. *random effect*) nogabalam k ;
 ε – randomizētais faktors kokam i nogabalā k .

Vienādojums (2.5) ir linearizēta pakāpes funkcija, kurā kā vienīgais arguments norādīts D , bet vienādojums (2.6) ir linearizēta pakāpes funkcija ar diviem argumentiem D un H . Abi iepriekšminētie vienādojumi ir visplašāk lietotie zinātniskajā literatūrā, lai modelētu koku biomasu Eiropas mežos (Zianis et al., 2005). Nedaudz citāds paņēmieni biomasas prognozēšanā ir aprakstīts Zviedrijā veiktajos pētījumos (Marklund, 1987, 1988), kur, mainot argumentu skaitu vienādojumā (2.7), meklēta piemērotākā mainīgo vērtību kombinācija, kas dotu mazāko iespējamo prognozēšanas kļūdu. Minētā metode tika pārbaudīta, izmantojot plašu un reprezentatīvu empīrisko materiālu no Zviedrijas nacionālā MRM, un izstrādātie virszemes biomasas vienādojumi tiek plaši lietoti visās Skandināvijas valstīs (Repola, 2008, 2009).

Datu sākotnējā analīze parādīja, ka, palielinoties argumentu D un H vērtībām, palielinās arī atkarīgās pazīmes standartnovirze. Tāpēc, lai nodrošinātu atkarīgo pazīmju dispersiju homogenitāti vienādojumos (2.5, 2.6 un 2.7), tika veikta logaritmiskā transformācija, kas šādos gadījumos ir ieteicama (Claesson et al., 2001; Zianis, Mencuccini, 2004; Repola, 2009; Weiskittel et al., 2015). Pielietojot transformāciju, tiek panākts, ka atkarīgā pazīme, kas šajā pētījumā ir biomasas, pie mazām un lielām argumentu vērtībām tiek aprēķināta precīzāk.

Tā kā biomasas tika izmērīta un aprēķināta trijiem paraugkokiem katrā no 124 meža nogabaliem jeb parauglaukumiem, tad savāktajam empīriskajam materiālam ir hierarhiska struktūra (Claesson et al., 2001; Repola, 2008, 2009; Temesgen et al., 2015). Tas nozīmē, ka biomasas dažādās koka frakcijās, parasti variē ne vien starp dažādām kokaudzēm, bet arī katras kokaudzes līmenī, piemēram, atkarībā no Krafsta klases. Lai gan eksistē arī citas koeficientu novērtēšanas metodes, regresijas koeficientu novērtēšanā visbiežāk izmanto tā saukto vismazāko kvadrātu metodi. Biomasas vienādojumu izstrādē, pielietojot vismazāko kvadrātu metodi, parasti tiek ignorēta datu hierarhiskā struktūra, un vienādojumu koeficientu standartkļūda tiek atspoguļota mazāka, nekā tā ir patiesībā (Repola, 2008, 2009). Pētīto argumentu ietekmi hierarhiski strukturētiem datiem precīzāk var novērtēt ar lineāriem jaukta tipa modeļiem (angļu val. *linear mixed models*), kuri dod iespēju analizēt koku biomasas datus ne vien atkarībā no pētītajiem argumentiem, bet arī starp dažādiem parauglaukumiem kā arī katras kokaudzes ietvaros (Claesson et al., 2001).

Pētījumā vienādojumu (2.5, 2.6 un 2.7) koeficienti aprēķināti, izmantojot lineāros jaukta tipa modeļus datorprogrammā R ar pakotni “lme4” (Bates et al., 2015). Atlasītajiem vienādojumiem kā fiksētie faktori (angļu val. *fixed factor*) norādīti D un H , bet kā randomizētais faktors (angļu val. *random factor*) izvēlēts parauglaukums jeb meža nogabals. Lai pēc iespējas korektāk aprēķinātu biomasu ļoti maziem un lieliem ($D > 60$ cm) kokiem, L.G. Marklund (1987, 1988) secināja, ka ar D logaritmisko transformāciju vien nepietiek, tā vietā vienādojumā (2.7) ieliekot izteiksmi $D / (D + m)$, kur m ir konstante. Konstante katrai

koku sugai un koka frakcijai tiek aprēķināta atsevišķi, un tā atspoguļo labāko korelāciju starp $\ln \hat{Y}$ un diametra izteiksmi $D / (D + m)$ pie dažādām m vērtībām (Marklund, 1987). Šāda pati D izteiksme ir izmantota, izstrādājot Zviedrijas nacionālos celma/sakņu biomasas vienādojumus (Pettersson, Stahl, 2006), jaunu un pārbiezinātu parastās priedes kokaudžu virszemes biomasas vienādojumus (Repola, Ulvcrona, 2014), kā arī biomasas vienādojumus Somijas izplatītākajām koku sugām (Repola, 2008, 2009). Papildus tam *J. Repola* (2008, 2009) savos pētījumos secinājis, ka arī augstuma transformācijas lietošana $H / (H + m)$ atsevišķos gadījumos uzlabo vienādojuma precizitāti, aprēķinot biomasu noteiktām koka frakcijām.

Veicot vienādojumu logaritmisko transformāciju, jārēķinās ar papildu novirzi jeb kļūdu, kura rodas, transformējot iegūtos rezultātus atpakaļ aritmētiskajās vienībās (Snowdon, 1991; Jenkins et al., 2003; Zianis et al., 2005; Hunziker et al., 2014). Kļūda, kura radusies inversās transformācijas rezultātā, visbiežāk tiek koriģēta ar dažādiem korekcijas koeficientiem, kurus pievieno linearizētajam vienādojumam pirms transformēšanas atpakaļ. Literatūrā ir minēti dažādi pieņēmumi, aprēķinot šos korekcijas koeficientus. Ja atkarīgās pazīmes vidējās vērtības dispersija vai standartnovirze ir liela, tad tiek ieteikta izteiksme (2.8) (Marklund, 1987; Snowdon, 1991; Repola, 2008, 2009).

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n e^{\ln \hat{Y}_i}} \quad (2.8)$$

kur: k – korekcijas koeficients;
 n – novērojumu skaits;
 Y_i – novērotās vērtības;
 \hat{Y}_i – aprēķinātās vērtības.

Tā kā logaritmiski transformētie vienādojumi prasa atkārtotu to pārveidošanu, reālo biomasas vērtību iegūšanai izmanto izteiksmi (2.9).

$$\hat{Y}_i = k \times \exp(\ln \hat{Y}_i) \quad (2.9)$$

kur: k – korekcijas koeficients;
 \hat{Y}_i – aprēķinātā biomasas koka i .

Izstrādāto regresijas vienādojumu novērtēšana veikta ar determinācijas koeficientu (R^2), vidējās vērtības vidējo kvadrātisko kļūdu ($RMSE$) un vidējo absolūto kļūdu ($MAPE$) palīdzību, kuras aprēķinātas pēc izteiksmēm (2.10), (2.11) un (2.12).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2.10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (2.11)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{Y_i} \quad (2.12)$$

kur: R^2 – determinācijas koeficients;
 $RMSE$ – vidējā kvadrātiskā kļūda, kg;
 $MAPE$ – vidējā absolūtā kļūda, %;
 Y_i – novērotā biomasas kokam i , kg;
 \hat{Y}_i – aprēķinātā biomasas kokam i , kg;
 \bar{Y} – paraugkopas vidējā novērotā biomasas, kg;
 n – novērojumu skaits.

$MAPE$ vienādojumos raksturo kļūdas procentuālo novirzi no vidējās vērtības. R^2 norāda, kāda atkarīgās pazīmes variācijas daļa tieši atkarīga no faktoriālo pazīmju (argumentu) variācijas, bet $RMSE$ atspoguļo regresijas vienādojuma atlikumu vidējo izkliedi ap vidējo vērtību. Palielinoties R^2 , $RMSE$ samazinās. Abu iepriekšminēto statistisko rādītāju izmantošana, salīdzinot regresijas vienādojumu prognozēšanas precizitāti, nav nepieciešama, jo abi rādītāji būtībā atspoguļo vienu un to pašu, tikai pretējos virzienos (Sileshi, 2014). Tāpēc šajā pētījumā vienādojumi savā starpā salīdzināti tikai pēc R^2 , bet $RMSE$ lietots, novērtējot vienādojumus.

Lai aprēķinātu varbūtību, ar kādu izvēlētais regresijas vienādojums ir pareizs, un izvērtētu, kurš no vienādojumiem ir labāks, izmantots koriģētais Akaike informācijas kritērijs ($AICc$), kas aprēķināts pēc izteiksmes (2.13). Informācijas kritēriji ir noderīgi līdzekļi modeļu salīdzināšanai un klasificēšanai no vislabākā uz sliktāko (Burnham, Anderson, 2002) un tiek plaši izmantoti bioloģijā un citās zinātnēs (Akaike, 1974). Sastādot vienādojumu, ir svarīgi atrast līdzsvaru starp aproksimācijas līknes precizitāti un prognozēšanas izteiksmes sarežģītību. Šo problēmu risina ar informācijas kritēriju palīdzību, kur statistika iekļauj “sodu” par nepietiekamu pielāgošanu un pārmērīgi lielu regresijas koeficientu skaitu. $AICc$ ir tas pats AIC , bet ar augstāku jutīgumu pret papildu parametriem. $AICc$ kritērijs tiek izmantots gadījumos, kad novērojumu skaits ir mazs, kā tas šajā pētījumā ir atsevišķu koku celma/sakņu biomasas datiem. *H. Motulsky & A. Christopoulos* (2003) rekomendē vienmēr lietot $AICc$, jo tas konverģē uz AIC , kad novērojumu skaits kļūst pietiekoši liels. *G.W. Sileshi* (2014) apgalvo, ka $AICc$ vērtības ir labāk interpretēt, ja tās ir attiecinātas viena pret otru, norādot uz varbūtību (angļu val. *Akaike's weights*), ar kādu konkrētais vienādojums ir labāks.

$$AICc = AIC + \frac{2p(p+1)}{n-p-1} \quad (2.13)$$

kur: $AICc$ – koriģētais Akaike informācijas kritērijs;
 AIC – nosacītais Akaike informācijas kritērijs (“cAIC4” pakotne datorprogrammā R);
 p – parametru skaits statistiskajā modelī;
 n – novērojumu skaits.

Katra regresijas vienādojuma koeficientu ticamība novērtēta ar relatīvo standartklūdu (*PRSE*), kas aprēķināta pēc (2.14) izteiksmes (Sileshi, 2014; Picard et al., 2015). Balstoties uz pieejamo informāciju literatūrā, pieņemts, ka izstrādātais vienādojums tiks noraidīts, ja viena vai vairāku regresijas koeficientu *PRSE* vērtības būs lielākas par 30%. Ja argumentu (*H*, $\ln H$) izslēgšana no (2.7) izteiksmes pozitīvi ietekmēja *AICc* (vērtība samazinājās), vai kādam no regresijas koeficientiem *PRSE* bija lielāka par 30%, minētie vienādojuma mainīgie no izteiksmes tika izslēgti un palikušo koeficientu vērtības tika pārrēķinātas.

$$PRSE = 100 \frac{\text{regresijas koeficienta standartklūda}}{\text{regresijas koeficients}} \quad (2.14)$$

Lai izvairītos no sistemātiskām kļūdām, katrs izstrādātais vienādojums analizēts arī ar atlikumu izkliedes diagrammu palīdzību. Relatīvā starpība starp izmērīto un aprēķināto biomasu tika attiecināta pret logaritmiski transformētām prognozētajām biomasas vērtībām. Lai atklātu sistemātiskas kļūdas atlikumu izkliedes diagrammā, izmantota *W.S. Cleveland* (1979) aprakstītā slīdošā vidējā procedūra (angļu val. *locally weighted scatterplot smoothing* jeb *LOWESS*), kas iebūvēta datorprogrammā *CurveExpert Professional 2.2*. Lai izstrādātais vienādojums būtu izmantojams prognozēšanā, tā atlikumu izkliedes diagrammās izvilktajai līnijai nedrīkst parādīties būtiskas novirzes no vidējās vērtības, kā arī punktiem ir jābūt nejauši izkārtotiem. Prognozētās biomasas vērtības atlikumu izkliedes diagrammās tiek transformētas, lai vienlīdz labi varētu atklāt sistemātisku novirzi gan lieliem, gan arī maziem kokiem.

3. PĒTĪJUMA REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Blīvuma izmaiņas koku stumbros

Reducētais blīvums ir svarīgs, lai aprēķinātu biomasas daudzumu koka stumbrā un atspoguļotu tā izmaiņas. Stumbra blīvuma izmaiņas garenvirzienā (no celma uz galotni) un šķērsgriezumā (no serdes uz mizu) sniedz priekšstatu par to, kā dažādas blīvuma paraugu ievākšanas metodes var ietekmēt stumbra biomasas un līdz ar to – kopējos oglekļa uzkrājuma aprēķinus. Pētījumā lietotā stumbra koksnes reducētā blīvuma noteikšanas metodika ļauj salīdzināt šī pētījuma datus ar līdzīgos pētījumos iegūtajiem. Salīdzinot un analizējot koksnes blīvuma izmaiņas un vidējos rādītājus, kas iegūti dažādos pētījumos, iespējams gūt apstiprinājumu korekti ievāktiem datiem. Analizējot literatūrā pieejamo informāciju, secināts, ka visa stumbra vidējās blīvuma vērtības vairumam koku sugu nemaz nav pieejamas. Turpretī informācija par stumbra koksnes reducētā blīvuma izmaiņām un vidējām vērtībām ir pieejama visām šajā pētījumā iekļautajām koku sugām. Aprēķinot visa stumbra vidējo blīvumu, atšķirībā no stumbra koksnes blīvuma, būtu jāņem vērā arī mizas īpatsvars un tās blīvums. Daudzos pētījumos stumbra biomasas aprēķinos tiek izmantoti vidējie koksnes blīvuma rādītāji, kas ir konceptuāli nepareizi. Iepriekšminētā situācija varētu būt izveidojusies tāpēc, ka zinātniskajā literatūrā detalizēta informācija par vidējo mizas reducēto blīvumu un blīvuma izmaiņām stumbra garenvirzienā praktiski nav atspoguļota.

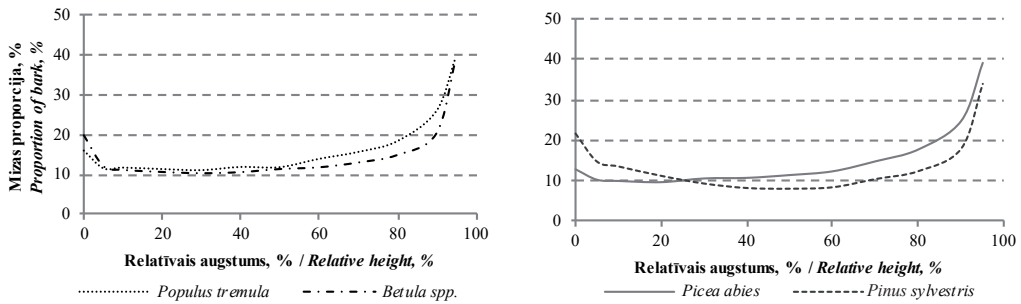
Pētījumā stumbra mizas īpatsvars uzrādīja ievērojamas atšķirības ne tikai starp pētītajām koku sugām bet arī katras sugas ietvaros. Mizas īpatsvars no kopējā stumbra tilpuma priedei ir robežās no 5.5% līdz 34.5%, eglei 6.6–28.3%, bērzam 7.9–21.5% un apsei 7.0–23.6%. Visām pētītajām koku sugām mazu dimensiju kokiem mizas īpatsvars stumbrā ir ievērojami lielāks nekā pieaugušiem kokiem (3.1. tab.). Pie vidējā krūšaugstuma caurmēra 5 cm mizas īpatsvars starp sugām variē robežās no 16.7% līdz 26.9%, bet, vidējam caurmēram pieaugot līdz 30 cm, mizas īpatsvars samazinās vairāk nekā divas reizes un ir robežās no 8.2% līdz 10.4%. Tas liecina par to, ka būtisku koksnes un mizas blīvuma atšķirību gadījumā lielāka sistemātiska kļūda veidosies jaunaudžu stumbra biomasas aprēķinos. Latvijā mizas biežumu un tās īpatsvaru dažādu koku sugu apaļos kokmateriālos atspoguļojuši L. Līpiņš un I. Liepa (2007). Autoru aprēķinātie vidējie mizas īpatsvara rādītāji priedei (6–15%), bērzam (12–15%), eglei (10%) un apsei (10%) ir līdzvērtīgi šajā pētījumā iegūtajiem rādītājiem un izmantojami koku ar krūšaugstuma diametru virs 10 cm aprakstīšanai, kas arī atbilst autoru ievāktajam empīriskajam materiālam.

3.1. tabula / Table 3.1.

Vidējās mizas īpatsvara vērtības no kopējā stumbra tilpuma ± standartkļūda atkarībā no koka krūšaugstuma caurmēra
Average values of proportion of bark volume ± standard error, %

<i>D, cm DBH, cm</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Betula spp.</i>	<i>Populus tremula</i>
5	26.9 ±1.3	20.9 ±0.9	16.7 ±0.4	17.9 ±0.6
10	18.9 ±0.7	14.9 ±0.9	12.1 ±0.6	12.3 ±0.4
15	10.9 ±0.7	11.2 ±0.5	11.1 ±0.4	11.0 ±0.3
20	9.8 ±0.5	9.6 ±0.3	10.9 ±0.3	10.0 ±0.5
25	8.9 ±0.5	8.5 ±0.3	10.5 ±0.6	10.1 ±0.6
30	7.7 ±0.4	8.2 ±0.3	10.4 ±0.4	9.1 ±0.5

Mizas īpatsvars koka stumbrā lielāks ir celma, bet jo īpaši galotnes daļā (3.1. att.). Mizas īpatsvara izmaiņas stumbra garenvirzienā ir atkarīgas no mizas biežuma un stumbra diametra kombinētas ietekmes. Tuvojoties koka galotnei, stumbra šķērsriezuma caurmērs samazinās straujāk. Turpretī miza galotnes daļā kļūst tikai nedaudz plānāka, salīdzinot ar stumbra vidusdaļu, tāpēc arī mizas īpatsvars strauji palielinās. Piemēram, no egles stumbra tievgaļa sagatavotiem apaļajiem kokmateriāliem mizas procentuālais daudzums ir par apmēram 7% lielāks nekā apaļkokiem no stumbra vidusdaļas (Sarmulis et al., 2005). Mazākais mizas īpatsvars katrai koku sugai tiek sasniegts atšķirīgos stumbra relatīvajos augstumos. Priedei mazākais mizas īpatsvars ir stumbra vidusdaļā (50% relatīvais augstums), kamēr eglei, bērzam un apsei zemākais mizas īpatsvars ir stumbra lejasdaļā (apmēram 20–30% relatīvais augstums). Līdzīgi rezultāti ir konstatēti arī Somijā, kur eglei vismazākais mizas īpatsvars norādīts pie 20% relatīvā augstuma (Laasasenaho et al., 2005). Analizējot priedes un egles mizas biežuma izmaiņas vienāda diametra kokiem, novērots, ka virs 20% relatīvā augstuma priedes miza kļūst plānāka nekā egles miza (Drēska et al., 2003). Turpretī stumbra lejasdaļā priedei miza ir biežāka nekā eglei.



3.1. attēls. Mizas īpatsvars stumbrā šķēsgriezumā atkarībā no relatīvā augstuma.
 Figure 3.1. Average bark proportion values of stem basal area as a function of relative height.

Lielu daļu no mizas apjoma izmaiņām izskaidro koka krūšaugstuma caurmēra, augstuma vai stumbrā tilpuma variācija (Liepiņš, Liepiņš, 2015). Tā kā koka krūšaugstuma caurmērs ir visvieglāk un visprecīzāk izmērāmā koka pazīme, pētījumā noskaidrots, ka priedes, egles, bērza un apses caurmērs izskaidro attiecīgi 85%, 86%, 51% un 79% no mizas īpatsvara izmaiņām un ir vispiemērotākā pazīme tā prognozēšanai. Vislielākā nenoteiktība, prognozējot vidējo mizas daudzumu koka stumbrā, ir bērzam, uz ko norāda arī zemāks determinācijas koeficients. Daudz izteiktāku datu izkliedi, kas ievērojami pārsniedz priedes un egles datu izkliedi, ir konstatējis I. Liepa (2011), aprēķinot bērza mizas tilpumus koka stumbrā. Autors to skaidro kā divu bērza sugu datu sapludināšanu, ignorējot šo sugu specifiku. Daļēji bērza mizas īpatsvara aprēķinu nenoteiktība varētu būt skaidrojama ar kreves mizas veidošanos stumbrā lejasdaļā, kuras biezums vienādu diametru kokiem var būt ļoti atšķirīgs dažādām koku populācijām un pat vienas kokaudzes ietvaros. Lai gan kreves miza bērzam parasti nesniedzas augstāk par 3 m un iekļaujas pirmajā resgaļa sortimentā (Līpiņš, Liepa, 2007), tomēr tā atstāj lielu ietekmi uz aprēķinu nenoteiktību.

Klimatisko zonu un meža tipa ietekme uz egļu mizas īpatsvaru koka stumbrā ir pētīta Somijā (Laasasenaho et al., 2005). Minētais pētījums apstiprināja, ka veģetācijas perioda garums ir būtisks faktors, kas ietekmē mizas biezumu un līdz ar to arī mizas īpatsvaru koka stumbrā. Somijas ziemeļu daļā augošajām eglēm miza ir biežāka, bet meža tipa ietekme uz mizas biezumu pētījumā netika apstiprināta. Šajā pētījumā netika konstatētas būtiskas mizas īpatsvara atšķirības starp meža nogabaliem valsts ziemeļu–dienvidu, kā arī austrumu–rietumu virzienā, kas skaidrojams ar relatīvi nelielo Latvijas teritoriju un meža nogabalu ģeogrāfisko izkliedi. Visi atlasītie meža nogabali atradās starp 56.–58. paralēli un 21.–27. meridiānu (2.1. att.). Koku augšanas reģiona ietekme uz mizas biezumu priedei, eglei, bērzam un apsei nav konstatēta arī iepriekš veiktajos pētījumos Latvijā (Līpiņš, Liepa, 2007). Tas apliecina, ka pētījumā aprēķinātie vidējie mizas īpatsvara rādītāji ir attiecināmi uz visu Latvijas teritoriju.

Pētījumā apstiprinājās, ka priedes, egles, bērza un apses stumbrā vidējais mizas blīvums statistiski būtiski ($p < 0.001$) atšķiras no vidējā koksnes blīvuma (3.2. tab.). Minētais fakts apstiprina to, ka koksnes reducēto blīvuma vērtību izmantošana visa koku

stumbra biomasas aprēķināšanai rada sistemātisku kļūdu, vidēji palielinot stumbra biomasu priedei par 4.5% un eglei par 2.5%, bet bērzam un apsei samazinot kopējo stumbra biomasu attiecīgi par 2.4% un 1.5%. Zīmīgi, ka pētītajām skujkoku sugām vidējais koksnes blīvums ir lielāks nekā mizas blīvums, pretēji lapkoku sugām, kurām miza ir blīvāka par koksni. Priedei koksnes un mizas reducētā blīvuma starpība (137 kg m^{-3}) ir ievērojami lielāka nekā pārējām koku sugām (apsei – 52 kg m^{-3} , bērzam – 80 kg m^{-3} un eglei – 82 kg m^{-3}). Tas ir skaidrojams ar krasākām koksnes blīvuma izmaiņām priedes stumbru garenvirzienā, salīdzinājumā ar pārējām koku sugām. Līdzīgi secinājumi par mizas un koksnes blīvuma atšķirību ietekmi uz biomasas aprēķiniem iegūti arī Somijā (Hakkila, 1979), kur, raksturojot vidējo priedes stumbra biomasu ar mizu, tiek rekomendēts koriģēt jeb samazināt iegūtās biomasas vērtības par 2%, bet bērzam palielināt stumbra biomasu par 0.5%, tādā veidā netieši norādot uz identiskām mizas un koksnes blīvuma atšķirībām. Līdzīgi kā priedei, arī egles mizas blīvums tiek ziņots mazāks nekā koksnei (Hakkila, 1989), kā arī konstatēts, ka mizas blīvums nepārtraukti samazinās virzienā uz galotni. J.R. Erickson (1972) pētījis dažādu Ziemeļamerikas koku sugu mizas un koksnes reducētā blīvuma atšķirības šķeldas paraugos, secinot, ka apsei miza ir daudz blīvāka par koksni, bet visām pētītajām skujkoku sugām mizas blīvums izrādījās mazāks nekā koksnei.

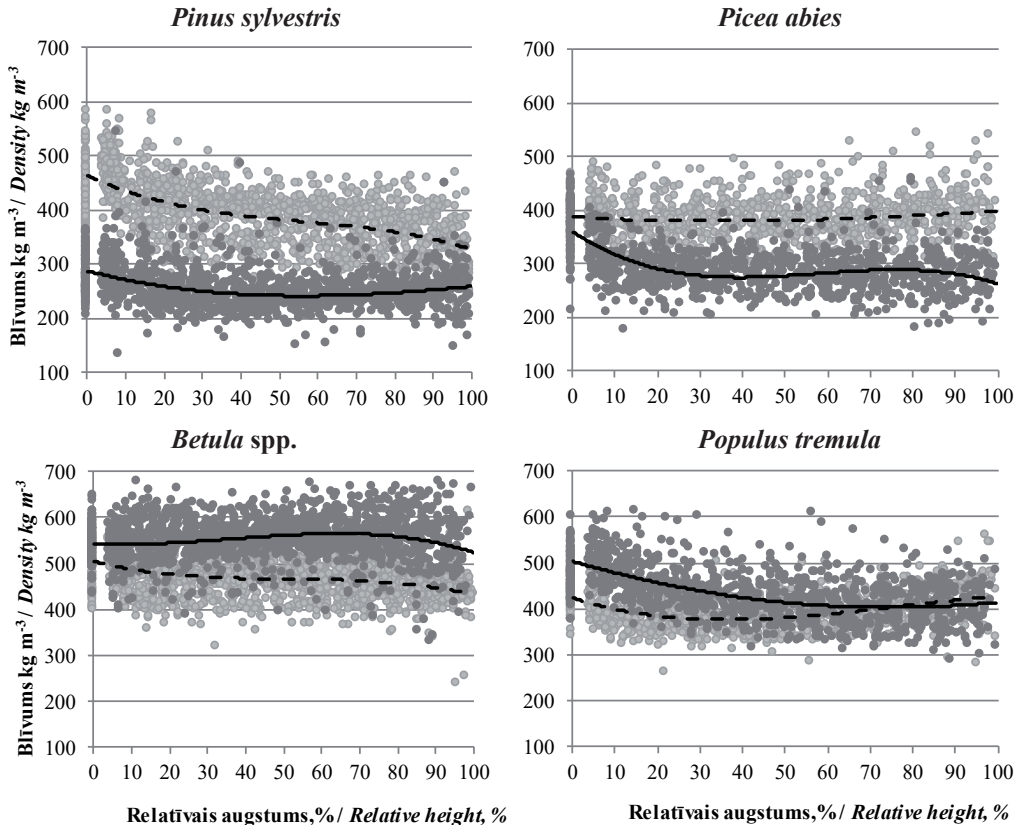
3.2. tabula / Table 3.2.

Koku sugu svērtās vidējās reducētā blīvuma vērtības ± standartnovirze
Weighted average basic density of tree species ± standard deviation

Koku suga <i>Tree species</i>	Visa stumbra blīvums, kg m^{-3} <i>Mean stem density, kg m^{-3}</i>	Stumbra koksnes blīvums, kg m^{-3} <i>Stemwood density, kg m^{-3}</i>	Stumbra mizas blīvums, kg m^{-3} <i>Stem bark density, kg m^{-3}</i>
<i>Pinus sylvestris</i>	380 ±48	397 ±49	260 ±24
<i>Picea abies</i>	368 ±35	378 ±36	295 ±27
<i>Betula spp.</i>	481 ±38	470 ±46	551 ±36
<i>Populus tremula</i>	399 ±30	393 ±29	446 ±39

Analizējot mizas un koksnes vidējo blīvuma vērtību starpību stumbra garenvirzienā, noskaidrots, ka, izņemot apsi, pārējām pētītajām koku sugām blīvuma atšķirības saglabājas būtiskas ($p < 0.05$) visa stumbra garumā (3.2. att.). Tikai apses stumbru galotnes daļā (70–100% relatīvais koku augstums) netika konstatētas būtiskas mizas un koksnes blīvuma atšķirības. Tas izskaidrojams ar to, ka mizas un koksnes blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā neseko vienām un tām pašām tendencēm, kā arī blīvuma izmaiņu amplitūda apses mizai ir nedaudz lielāka nekā pārējām pētījumā iekļautajām koku sugām. Apses mizas blīvums stumbra galotnes virzienā samazinās; stumbra lejasgalā strauji, bet galotnes daļā tikai nedaudz. Turpretī koksnes blīvums samazinās tikai līdz 30–40% relatīvajam koka augstumam, bet pēc tam virzienā uz galotni pakāpeniski pieaug. Arī citām lapkoku un skujkoku sugām mizas blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā nesakrīt ar koksnes blīvuma izmaiņām. Atsevišķām koku sugām mizas blīvuma starpība starp celmu un galotni var sasniegt 100 kg m^{-3} (Hakkila, 1989). Piemēram, priedei mizas blīvums virzienā

uz galotni samazinās, bet pēc tam galotnes daļā nedaudz pieaug. Turpretī bērzam mizas blīvums virzienā uz galotni pieaug, bet galotnes daļā nedaudz samazinās. Eglei mizas blīvums stumbra garenvirzienā samazinās; līdz 10% relatīvajam augstumam samazināšanās notiek ļoti strauji, bet pārējā stumbra daļā samazinājums ir neliels.



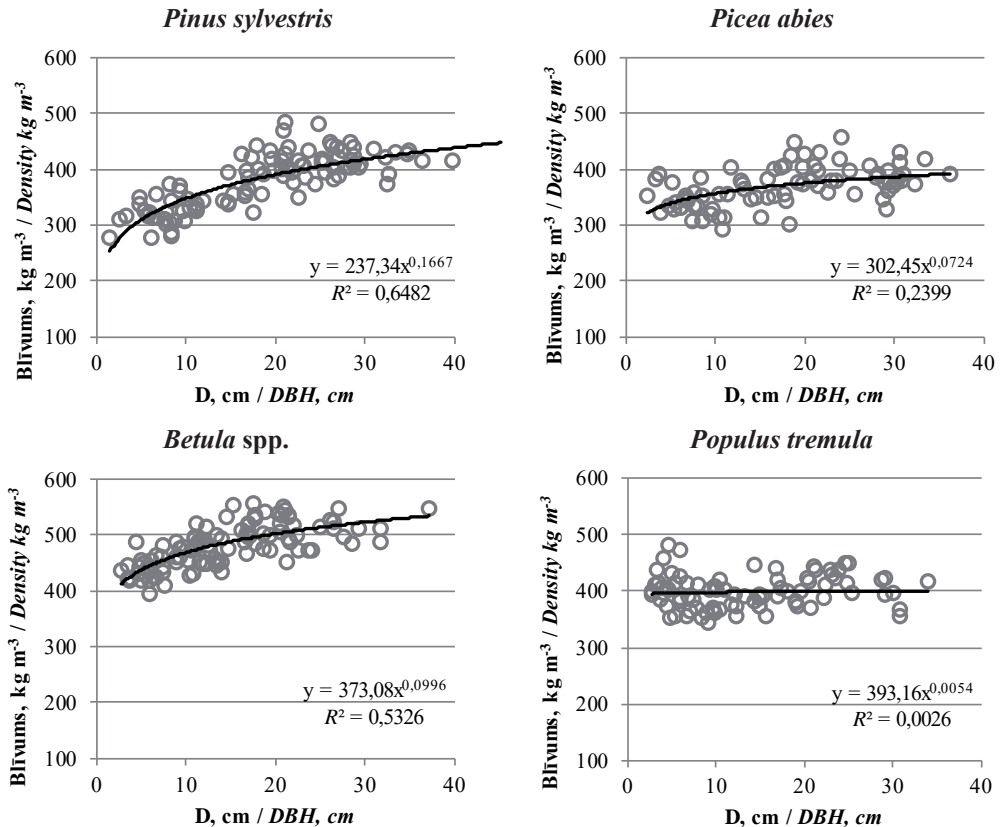
3.2. attēls. Vidējā stumbra koksnes (punktētā līnija) un stumbra mizas (nepārtrauktā līnija) reducētā blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā.

Figure 3.2. Mean stem wood (dashed line) and stem bark (solid line) density and their axial variation in tree stems.

J. Dibdiakova & K. Vadla (2012) konstatējuši būtiskas atšķirības ($p < 0.05$) Sitkas egles mizas blīvuma izmaiņās stumbra garenvirzienā un novērojuši, ka tikai celma daļā mizas blīvums pārsniedz koksnes blīvumu. M. Millers un J. Magaznieks (2012), analizējot priedes koksnes un mizas blīvuma izmaiņas atkarībā no koka vecuma, konstatējuši būtiskas atšķirības tikai koksnes blīvumā. Iepriekšminētajā pētījumā salīdzinot 37–70 gadus un 70–146 gadus vecas priedes, to vidējais mizas blīvums bija praktiski nemainīgs. Analizējot pētījuma datus ar lineārās regresijas analīzi, konstatēts, ka koka vecums būtiski neietekmē mizas vidējo blīvumu lapkoku sugām, turpretī priedei un eglei vecuma ietekme izrādījās būtiska ($p < 0.001$). Šī iepriekšminētā pētījuma atšķirīgie rezultāti izskaidrojami ar to, ka

M. Millers un J. Magaznieks (2012) nebija iekļāvuši salīdzināšanai priedes, kas jaunākas par 37 gadiem. Pētījumā konstatēts, ka pirmo divu vecumklašu skujkokiem vidējais mizas reducētais blīvums ir par 30–50 kg m⁻³ mazāks nekā ciršanas vecumu sasniegušiem kokiem.

Vidējais svērtais priedes, egles, bērza un apses stumbra koksnes reducētais blīvums pētījumā bija attiecīgi 397, 378, 470 un 393 kg m⁻³ (3.2. tab.). Kā redzams 3.3. attēlā, vidējais stumbra koksnes blīvums priedei, eglei un bērzam mainās atkarībā no koka dimensijām. Tāpēc, salīdzinot blīvuma datus ar citos pētījumos iegūtajiem, ir jāņem vērā arī izmantoto paraugkoku dimensijas. Pētījuma rezultāti apliecina, ka IPCC vadlīniju (Eggleston et al., 2006) dotās blīvuma vērtības (1.2. tab.) priedes, egles un bērza biomasas aprēķināšanai noved pie C apjoma pārvērtēšanas jaunaudzēs, jo blīvuma vērtības atbilst tikai kokiem ar krūšaugstuma caurmēru lielāku par 20–30 cm, jeb pieaugušiem kokiem. Turpretī apses biomasas aprēķiniem IPCC vadlīniju rekomendētais blīvums 350 kg m⁻³ ir ievērojami zemāks nekā šajā pētījumā konstatētais, norādot uz ievērojamu biomasas potenciāla un C apjoma nenovērtēšanu Latvijas apšu mežaudzēs.



3.3. attēls. Stumbra koksnes reducētā blīvuma izmaiņas atkarībā no koka krūšaugstuma caurmēra.

Figure 3.3. Stem basic density variations depending on breast height diameter.

Literatūrā minētās vidējās koksnes reducētā blīvuma vērtības parastajai apsei ir robežās no 376 kg m⁻³ līdz 403 kg m⁻³ (Smilga, 1988; Karki, 2001; Herājārvi, Junkkonen, 2006; Rytter et al., 2016). Šajā pētījumā konstatētais vidējais apses koksnes blīvums 393 kg m⁻³ atbilst iepriekš norādītajām blīvuma vērtībām.

Līdzīgi kā citām koku sugām, arī apses koksne ir lielas reducētā blīvuma atšķirības, bet, atšķirībā no pārējām apskatītajām koku sugām, blīvuma atšķirības apsei izskaidrot ir sarežģītāk. Iespējams, ka tās nosaka kompleksa vairāku pazīmju ietekme. Pētījumā netika konstatēta statistiski būtiska ($p > 0.05$) apses vidējā stumbra koksnes blīvuma un koka krūša augstuma caurmēra, koka augstuma, kokaudzes šķērslaukuma, kā arī kokaudzes vecuma korelācija. Tāpat pārbaudot ar dispersijas analīzi koku Krafta klases ietekmi uz vidējo stumbra blīvumu, netika konstatētas statistiski būtiskas ($p > 0.05$) atšķirības. No visām pētījuma ietvaros reģistrētajām koka un kokaudzes pazīmēm statistiski būtiska ($p = 0.01$) izrādījās koku skaita uz hektāru un apses koksnes vidējā blīvuma korelācija. Lai gan korelācijas koeficients ir neliels (-0.28), tomēr tas norāda uz to, ka mazāks blīvums ir kokiem, kuri auguši biežākā audzē. Vispārzināms ir fakts, ka jaunaudzēs koku skaits ir lielāks un, jauniem kokiem strauji augot, to koksnes blīvums vienmēr ir mazāks (Saranpää, 2003). Sasniedzot 15 gadu vecumu, parastajai apsei gadskārtu platums un augšanas temps ievērojami samazinās (Herājārvi, Junkkonen, 2006). Kopumā ir izpētīts, ka koku augšanas ātrumam ir neliela ietekme uz *Populus* spp. koksnes blīvumu (Zhang, 1995; Zobel, Jett, 1995), kas izskaidro, kādēļ konstatētā korelācija starp koku skaitu un apses koksnes vidējo blīvumu ir relatīvi vāja.

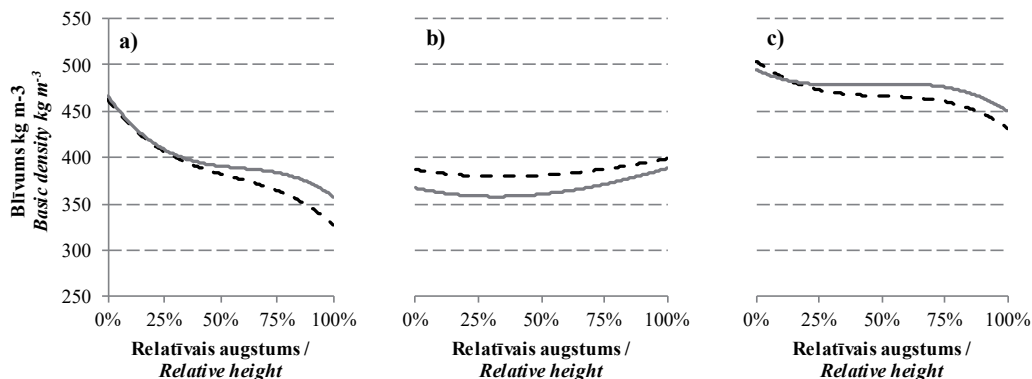
L. Rytter et al. (2013) apkopojusi koksnes reducētā blīvuma vērtības, kas publicētas Ziemeļeiropas un Baltijas valstīs. Autori secina, ka parastās egles koksne ir salīdzinoši viegla, dažādos pētījumos blīvumam esot robežās no 310 līdz 400 kg m⁻³. Savukārt priedes koksne ir smagāka; atsevišķos pētījumos priedes reducētais blīvums konstatēts pat 475 kg m⁻³. Apses blīvums, analizējot dažādus pētījumus, novērots robežās no 350 līdz 400 kg m⁻³, bet bērza koksne ir smagāka nekā vairumam Eiropā sastopamo skujkoku sugām, reducētajam blīvumam esot robežās no 430 līdz 520 kg m⁻³ (Rytter et al., 2013). Latvijā konstatēts, ka bērzu plantācijās lauksaimniecības augsnēs stumbra koksnes vidējais blīvums ir 455 kg m⁻³ (Liepiņš, Rieksts-Riekstins, 2013). Ņemot vērā ātrāku koku augšanu un īsāku koku rotācijas periodu, tas ir nedaudz mazāks nekā mežaudzēs augušanai koksnei. Somijā konstatēts, ka āra bērza un purva bērza koksnes blīvums neatšķiras, ja vien to augšanas temps ir vienāds (Repola, 2006). Praksē gan parasti purva bērza augšanas temps ir mazāks, tāpēc jārēķinās, ka bērza vidējais koksnes blīvums kūdras augsnēs varētu būt lielāks, jo šādās augsnēs vairāk dominē tieši purva bērzs. Aprēķinātais purva bērza vidējais koksnes blīvums Igaunijā ir 532 kg m⁻³, un tas būtiski lielāks ir vecās mežaudzēs (Uri et al., 2017).

Austrijā, Čehijā, Beļģijā, Vācijā, Francijā un Rumānijā, pārrēķinot stumbra tilpumu biomasas vienībās, priedei lietotās blīvuma vērtības ir robežās no 360 līdz 480 kg m⁻³, eglei no 360 līdz 438 kg m⁻³, bet bērzam no 490 līdz 551 kg m⁻³ (Neumann et al., 2016). Eiropā atspoguļoto vidējo blīvuma vērtību amplitūda ir ļoti plaša, un ne vienmēr ir iespējams pārliecināties par ievāktu blīvuma paraugu mērķi, izmantotajām metodēm un kvalitāti, kas

ir svarīgi, salīdzinot iegūtos rezultātus. Daudz detalizētāka koksnes blīvumu ietekmējošo faktoru analīze un vidējo vērtību atspoguļojums ir veikts Somijā (Hakkila, 1979), kur aprēķinātās stumbra koksnes reducētā blīvuma vidējās vērtības parastajai priedei ir 403 kg m^{-3} , parastajai eglei – 380 kg m^{-3} un bērzam – 483 kg m^{-3} . Minētās vērtības ir tikai nedaudz lielākas par šajā pētījumā noteiktajām. Pētījumā konstatēts, ka iepriekšminēto koku sugu pieaugušiem kokiem blīvums ir par 11% lielāks nekā jauniem kokiem, kā arī kūdras augsnēs augošām eglēm un priedēm blīvums ir lielāks, kas izskaidrojams ar zemāku koku augšanas tempu.

Jaunākā Somijā veiktā pētījumā (Repola, 2006) ir iegūti līdzīgi vidējā blīvuma rezultāti. Pētījumā analizēti 585 priedes, 585 egles un 195 bērzu paraugkoki, un katrai koku sugai izstrādāti vienādojumi blīvuma prognozēšanai jebkurā koka augstumā, kā arī aprēķinātas vidējās koksnes blīvuma vērtības priedei – 412 kg m^{-3} , eglei – 385 kg m^{-3} un bērzam – 475 kg m^{-3} . Arī šajā pētījumā iegūtās vidējās blīvuma vērtības ir tikai nedaudz lielākas (par 4–15 kg m^{-3} , atkarībā no koku sugas), nekā konstatēts šajā pētījumā. Vidējā blīvuma atšķirība varētu būt izskaidrojama ar to, ka *J. Repola* (2006) savā pētījumā pārsvarā analizējis kokus, kuri vecāki par 20 gadiem, ar krūšaugstuma caurmēru, kas lielāks par 8 cm. Turpretī šeit analizēti jaunāki un arī mazāka caurmēra koki.

Verificējot *J. Repola* (2006) izstrādātos blīvuma prognožu vienādojumus ar pētījumā ievāktajiem paraugkoku mērījumu datiem, secināts, ka priedei, eglei un bērzam blīvums tiek aprēķināts diezgan līdzīgi visā stumbra garenvirzienā (3.4. att.). Vidējais pēc vienādojumiem aprēķinātais koksnes blīvums priedei un bērzam bija attiecīgi par 3.4% un 2.2% augstāks nekā šajā pētījumā iegūtais vidējais blīvums. Turpretī eglei neizskaidrojamu iemeslu dēļ aprēķinātais vidējais koksnes blīvums bija par 4.3% zemāks nekā šajā pētījumā konstatētais un rezultējās sistemātiskā blīvuma novirzē visa stumbra garenvirzienā (Liepiņš, Liepiņš, 2017).

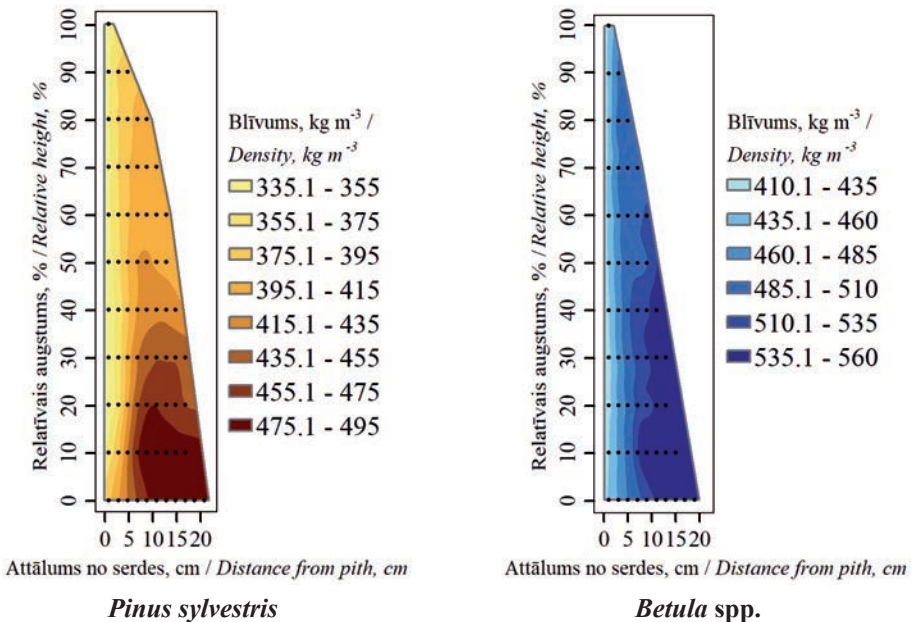


3.4. attēls. Koksnes reducētais blīvums (a) priedes, (b) egles un (c) bērza stumbru garenvirzienā pēc *J. Repola* (2006) vienādojumiem (pelēkā līnija) un pētījuma mērījumiem (melnā, pārtrauktā līnija).

Figure 3.4. Predictions of stem wood density in the vertical direction along Pinus sylvestris (a), Picea abies (b) and Betula spp. (c) stems according to Repola's (2006) models (grey line) and our measurements (black, dashed line).

Blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā, kā arī virzienā no serdes uz mizu ir jāņem vērā, nosakot vidējo stumbra blīvumu. Novērots, ka stumbra vidējo blīvumu visprecīzāk raksturo blīvuma paraugs, kurš iegūts 25% relatīvajā augstumā (Hakkila, 1979). Praksē šādā augstumā iegūt blīvuma paraugus ir dārgi un darbietilpīgi, tāpēc bieži vien augošiem kokiem tos iegūst koku krūšaugstumā. Vairākos pētījumos iegūtā informācija apliecina, ka krūšaugstumā ievāktam blīvuma paraugam vienmēr būs augstāks blīvums nekā vidēji visam stumbram, jo vispārīgi koksnes blīvumam ir tendence samazināties stumbra garenvirzienā, kā arī palielināties radiālajā virzienā no serdes uz mizu (Saranpää, 2003; Repola, 2006).

Priedei un bērzam novērota izteikta stumbra koksnes blīvuma samazināšanās virzienā uz galotni (3.2. att.), bet radiālajā virzienā blīvumam ir tendence palielināties mizas virzienā (3.5. att.). Palielinoties koka relatīvajam augstumam, blīvuma izmaiņu amplitūda stumbra šķērsgriezumā ievērojami samazinās. Piemēram, priedei 10% un 20% relatīvajā augstumā ir vislielākā blīvuma variēšana, kas stumbra šķērsgriezumā var sasniegt pat 126 kg m^{-3} , turpretī pie 70% un 80% relatīvā augstuma blīvuma variēšana ir gandrīz trīs reizes mazāka, nepārsniedzot 47 kg m^{-3} . Bērzam no 0 līdz 40% relatīvajā augstumā blīvums virzienā no serdes uz mizu samazinās vidēji par 105 kg m^{-3} , bet pie 80% relatīvā augstuma blīvums samazinās vairs tikai par 63 kg m^{-3} . Zīmīgi, ka bērzam, neatkarīgi no stumbra relatīvā augstuma, blīvumam ir tendence samazināties virzienā no serdes uz mizu, bet priedei blīvums radiālajā virzienā palielinās līdz noteiktam caurmēram, bet pēc tam, tuvojoties mizai, nedaudz samazinās. Līdzīgus novērojumus Somijas dienvidos ir konstatējis arī P. Hakkila (1979), secinot, ka pēc apmēram 80 gadu sasniegšanas priedes stumbra blīvums apļievas ārējā daļā nedaudz samazinās.



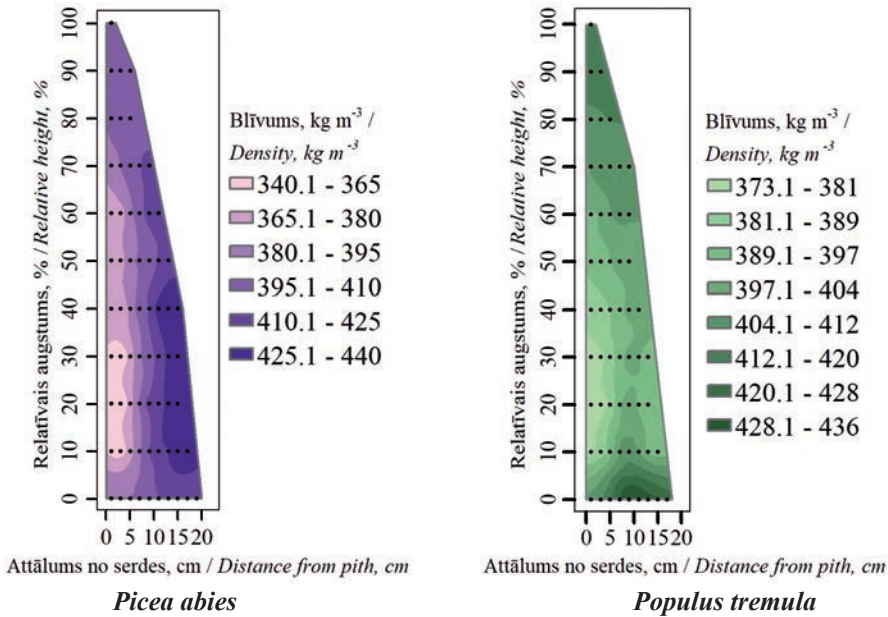
3.5. attēls. Koksnes reducētā blīvuma izmaiņas priedes un bērza stumbros.
 Figure 3.5. Basic density variation in stems of pine and birch derived from density measurements in wood specimens.

Eglei un apsei blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā nav tik izteiktas kā priedei un bērzam. Pieaugot koka relatīvajam augstumam, vidējais blīvums apmēram līdz stumbra vidusdaļai nedaudz samazinās vai saglabājas konstants, bet pēc tam virzienā uz galotni tas pieaug (3.2. att.). Viszemākās stumbra šķērsriezuma vidējās blīvuma vērtības eglei (377 kg m^{-3}) un apsei (381 kg m^{-3}) ir 3–6 m augstumā vai pie 20–40% relatīvā koku augstuma, kas novērots arī citos pētījumos (Karki, 2001; Saranpää, 2003; Heräjärvi, Junkkonen, 2006; Repola, 2006).

No citiem pētījumiem atšķirīgas blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā ir atspoguļotas parastās egles dažādas biezības izmēģinājumos (Johansson, 1993). Minētajā pētījumā krasās blīvuma svārstības stumbra garenvirzienā, īpaši stumbra augšējā daļā, varētu būt izskaidrojamas ar pētījumu metodoloģiskām atšķirībām, ievācot blīvuma paraugus. Piemēram, šajā pētījumā blīvuma paraugi ievākti ik pa 1 m vai 2 m, atkarībā no koku garuma, bet minētajā pētījumā blīvuma paraugi ievākti tikai 0 m, 4 m, 7 m, 10 m, 13 m augstumā, nenorādot stumbra kopējo garumu, kā arī analizēti tikai viena vecuma koki. Arī citos pētījumos blīvuma paraugripas izzāģētas vai nu no dažāda garuma koksnes sortimentu sākuma un beigu daļām (Repola, 2006) vai vēl lielākos attālumos (Wilhelmsson et al., 2002; Jyske et al., 2008). Tādējādi iegūtās blīvuma vērtības starp pētījumiem var nedaudz atšķirties, jo īpaši priedei un bērzam, kur blīvums stumbra garenvirzienā samazinās ļoti strauji. Katrā ziņā, jo biežākos intervālos ņemti blīvuma paraugi, jo tie precīzāk atspoguļo blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā.

Analizējot egles un apses blīvuma izmaiņas virzienā no serdes uz mizu, secināms, ka apsei, tāpat kā pārējām pētītajām koku sugām, vismazākais blīvums ir stumbra vidusdaļā pie serdes (juvenīlajai koksnei). Tāpat stumbra galotnes daļā blīvuma izmaiņu amplitūda, salīdzinot ar stumbra lejasdaļu, ievērojami samazinās (3.6. att.). Interesanti, ka juvenīlajai koksnei nav noteiktas pārejas, kur tā sākas un beidzas, bet tās fizikālās un mehāniskās īpašības, tajā skaitā blīvums, ievērojami atšķiras no pārējās koksnes (Saranpää, 2003).

Egles un apses stumbros apmēram pie 80% relatīvā augstuma blīvums ir praktiski konstants, izmaiņām radiālajā virzienā nepārsniedzot 8 kg m^{-3} . Apsei, līdzīgi kā priedei, stumbra lejasdaļā līdz noteiktam caurmēram blīvums palielinās. Savu maksimumu blīvums sasniedz apmēram 8–10 cm no serdes, pēc tam nedaudz samazinoties. Tā ir nozīmīga atziņa, kas dod iespēju koksnes pārstrādātājiem izvēlēties iespējami stiprāko koksni speciāliem nišas produktiem. No pētītajām koku sugām egles stumbra blīvuma svārstības ir vismazākās, un visblīvākā koksne atrodas aplievas ārējā daļā, pie 10–40% relatīvā stumbra augstuma. Salīdzinot ar pārējām pētītajām koku sugām, apses koksne attiecībā uz reducēto blīvumu ir viendabīgākā, jo, pretēji priedei un eglei, agrīnās un vēlīnās koksnes īpatsvara jeb gadskārtu platuma ietekme uz koksnes blīvumu ir salīdzinoši neliela. Latvijas PSR atkarībā no mizas krāsas izdalīja trīs apses formas: zaļā, gaišpelēkā un tumšpelēkā, secinot, ka zaļās un gaišpelēkās apses koksnes blīvums ir mazāks nekā tumšpelēkām apsēm (Smilga, 1967). Šajā pētījumā šāds apses dalījums netika praktizēts, līdz ar to nav iespējams pārliecināties par dažādu apšu genotipu ietekmi uz koksnes blīvumu.



3.6. attēls. Koksnes reducētā blīvuma izmaiņas egles un apses stumbros.

Figure 3.6. Basic density variation in stems of spruce and aspen derived from density measurements in wood specimens.

Vairumam koku sugu, bet jo īpaši skujkokiem, vidējo koksnes blīvumu un tā izmaiņas radiālajā virzienā būtiski ietekmē gadskārtu platums. Piemēram, duglāzijai (*Pseudotsuga menziesii*) agrīnās koksnes blīvums vidēji ir piecas reizes mazāks nekā vēlinājai koksnei, savukārt dažādu sugu eglēm vēlinās koksnes blīvums parasti ir apmēram divas reizes lielāks (Saranpää, 2003). Vēlinās koksnes īpatsvars parasti mazāks ir pirmajās gadskārtās virzienā no serdes un palielinās virzienā uz mizu. Tas izskaidro, kāpēc pētītajām koku sugām juvenīlajai koksnei parasti ir vismazākais blīvums.

Daudzām koku sugām, īpaši priedēm, ir izteikta tendence koksnes blīvumam strauji palielināties virzienā no serdes uz mizu, turpretī eglei koksnes blīvuma izmaiņas nav tik izteiktas, lai gan blīvums mainās plašā amplitūdā (Saranpää, 1994). Citā pētījumā autors analizējis 240 parastās egles, kas augušas 48 dabiskas izcelsmes un stādītās mežaudzēs, konstatējot pārsteidzoši lielas reducētā blīvuma vērtību svārstības radiālajā virzienā dažādos egles stumbros, lai arī koksnes paraugi bija bez acīm redzamiem defektiem (Saranpää, 2003). Minētajā pētījumā novērotās egles koksnes blīvuma izmaiņu tendences un svārstību amplitūda dažādos koka augstumos ir identiskas šajā pētījumā novērotajam (3.6. att.).

Meklējot nozīmīgākos koksnes blīvuma izmaiņu cēloņus, *L. Wilhelmsson et al.* (2002) analizējuši 252 egles un 120 priedes paraugkokus no dažādām mežaudzēm, aptverot plašu ģeogrāfisko reģionu un dažādus augšanas apstākļus, koku vecumus un dimensijas.

Pētījumā secināts, ka krūšaugstuma caurmērs, gadskārtu skaits un temperatūras summa kopā raksturo 50% no egles blīvuma izmaiņām un 59% no priedes blīvuma izmaiņām. Kopumā tikai neliela daļa no blīvuma izmaiņām bija izskaidrojamas ar dažādu kokaudžu atšķirībām un augšanas apstākļiem.

Meža mēslošanas ietekme uz egles koksnes blīvumu ir pētīta Zviedrijā (Mäkinen et al., 2002). Pētījumā noskaidrots, ka parauglaukumos, kuros tika ienestas papildus barības vielas, koku radiālais pieaugums palielinājās vairāk nekā trīs reizes, bet vidējais koksnes blīvums samazinājās par vairāk nekā 20%. Proporcionāli vairāk blīvums samazinājās vēlinajā koksne. Identiska blīvuma samazināšanās skujkoku koksnes stumbra šķēsgriezumā novērota arī pēc intensīvas kokaudzes retināšanas, bet kopumā retināšanai un mēslošanai ir liela ietekme uz blīvuma izmaiņām tikai jaunaudzēs, kamēr koku vainagi vēl nav saslēgušies (Saranpää, 2003).

3.2. Koku biomasas alometriskās sakarības un vienādojumu izstrāde

3.2.1. Biomasas struktūra

Vajadzība noskaidrot visas kokaudzes vai atsevišķu koka frakciju (piemēram, stumbra, zaru vai sakņu) biomasu ir aktualizējusies pēdējos 20 gados, kopš UNFCCC un Kioto protokola viens no uzdevumiem ir ierobežot un samazināt galveno SEG plūsmu uz atmosfēru, kā arī palielināt piesaistītā oglekļa apjomus. Informācija par koku biomasas struktūru ir nepieciešama, gan izstrādājot biomasas vienādojumus, gan plānojot racionālu meža apsaimniekošanu un koksnes izmantošanu, kā arī meža uzraudzībā (Schepaschenko et al., 2018).

Kokaudžu biomasas ievērojamo daļu, kura atsevišķiem kokiem var sasniegt pat 70%, veido nestumbru frakciju – zaru un sakņu biomasu (3.3. tab.). Pirms Kioto protokola pieņemšanas datu iegūšana par nestumbru biomasu nebija īpaši aktuāla, jo koka zaru un sakņu izmantošanas apjomi bija ļoti nelieli. Tādēļ daudzu valstu, tostarp Latvijas rīcībā esošo informāciju par zaru un sakņu biomasu var uzskatīt par fragmentāru, un šīs biomasas daļas noteikšanas metodes ir izstrādātas nepilnīgi (Liepa, Blija, 2008).

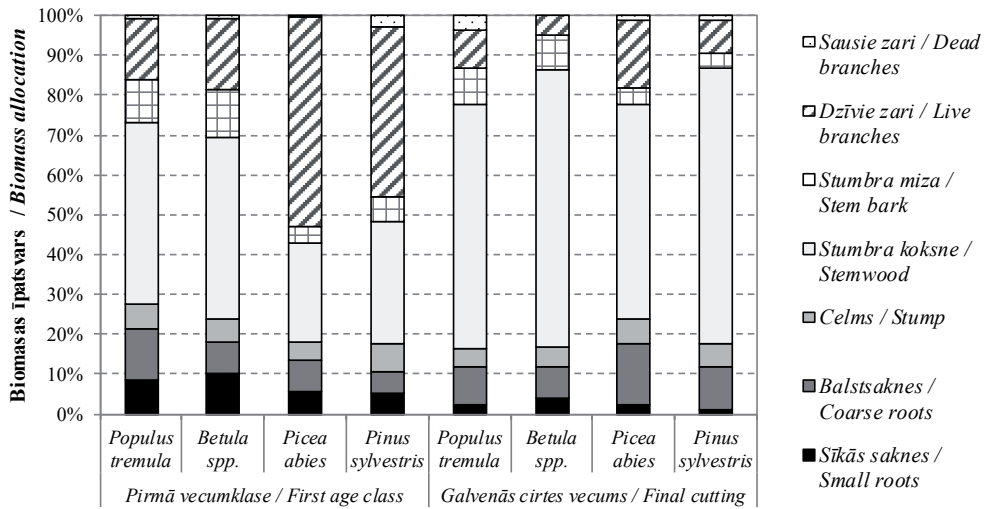
3.3. tabula / Table 3.3.

Paraugkoku biomasas frakciju raksturojums, kg
Descriptive data for the biomass components of sampled trees, kg

Koku suga <i>Tree species</i>	Frakcija <i>Component</i>	Vidēji <i>Mean</i>	Standartnovirze <i>Standard deviation</i>	Min. <i>Min.</i>	Maks. <i>Max.</i>
<i>Pinus sylvestris</i>	1. Celms / <i>Stump</i>	10.2	18.5	0.1	103.3
	2. Balstsaknes / <i>Coarse roots</i>	17.4	27.8	0.1	123.9
	3. Sīkas saknes / <i>Small roots</i>	3.3	4.2	0.1	17.3
	4. Stumbrs / <i>Stem</i>	165.7	181.7	0.1	998.9
	5. Miza / <i>Bark</i>	9.8	10.1	0.1	59.0
	6. Dzīvie zari / <i>Living branches</i>	24.9	21.9	0.4	107.7
	7. Sausie zari / <i>Dead branches</i>	4.4	4.8	0.0	23.1
	1. + 2. + 3.	30.1	49.0	0.1	244.4
	4. + 5. + 6. + 7.	204.8	211.8	0.6	1143.6
<i>Picea abies</i>	1. Celms / <i>Stump</i>	8.7	12.8	0.2	50.9
	2. Balstsaknes / <i>Coarse roots</i>	19.4	27.5	0.3	100.0
	3. Sīkas saknes / <i>Small roots</i>	4.1	4.0	0.4	16.6
	4. Stumbrs / <i>Stem</i>	133.1	147.1	0.4	536.9
	5. Miza / <i>Bark</i>	10.2	10.8	0.1	36.7
	6. Dzīvie zari / <i>Living branches</i>	44.6	40.9	1.3	165.7
	7. Sausie zari / <i>Dead branches</i>	4.1	4.8	0.0	17.2
	1. + 2. + 3.	32.2	43.4	0.9	167.4
	4. + 5. + 6. + 7.	192	198.6	1.8	737.1
<i>Betula spp.</i>	1. Celms / <i>Stump</i>	6.6	9.3	0.1	47.1
	2. Balstsaknes / <i>Coarse roots</i>	11.3	17.6	0.1	96.9
	3. Sīkas saknes / <i>Small roots</i>	4.6	4.4	0.2	16.5
	4. Stumbrs / <i>Stem</i>	109.4	126.6	0.7	522.3
	5. Miza / <i>Bark</i>	15.2	18.2	0.2	99.2
	6. Dzīvie zari / <i>Living branches</i>	15.9	23.9	0.3	150.3
	7. Sausie zari / <i>Dead branches</i>	0.6	1.0	0.0	5.9
	1. + 2. + 3.	22.5	30.1	0.4	146.1
	4. + 5. + 6. + 7.	141	165.8	1.2	709.3

Koku suga <i>Tree species</i>	Frakcija <i>Component</i>	Vidēji <i>Mean</i>	Standartnovirze <i>Standard deviation</i>	Min. <i>Min.</i>	Maks. <i>Max.</i>
<i>Populus tremula</i>	1. Celms / <i>Stump</i>	4.5	8.2	0.1	34.0
	2. Balstsaknes / <i>Coarse roots</i>	9.8	20.1	0.1	89.0
	3. Stkas saknes / <i>Small roots</i>	2.6	3.5	0.1	13.3
	4. Stumbrs / <i>Stem</i>	86.7	110.5	0.5	453.1
	5. Miza / <i>Bark</i>	11.2	14.0	0.2	63.1
	6. Dzīvie zari / <i>Living branches</i>	12.6	16.8	0.2	69.3
	7. Sausie zari / <i>Dead branches</i>	3.4	5.5	0.0	27.4
	1. + 2. + 3.	16.9	31.4	0.3	136.3
	4. + 5. + 6. + 7.	113.9	143.9	0.9	612.6

Analizējot pētīto koku sugu dažādu biomasas frakciju īpatsvaru kopējā biomasā, secināts, ka to alometriskās sakarības mainās atkarībā no koku sugas un kokaudzes attīstības pakāpes (3.7. att.). Vairumā gadījumos pie 3.7. attēlā norādītajiem koku vecumiem stumbrs (koksne un miza) ir lielākā biomasas frakcija, izņemot pirmās vecumklases priedes un egles. Vislielākais stumbra frakcijas īpatsvars galvenās cirtes vecumā novērots bērzam – 78.2%, bet vismazākais eglei – 58%. Konstatēts, ka tikai jaunaudžu vecuma priedēm un eglēm zaru biomasā ir lielāka par stumbra biomasu. Vislielākais zaru īpatsvars (skaitot kopā sauso un dzīvo zaru masu) kopējā biomasā novērots līdz 20 gadus vecām eglēm; visiem paraugkokiem zaru īpatsvars bija robežās no 45.8 līdz 58.3%, bet vidēji 52.8%. Identisku vecumu sasniegušām priedēm kopējais zaru biomasas īpatsvars ir nedaudz mazāks nekā eglēm – vidēji 45.5%, kas daļēji saistīts ar lielāku sauso zaru īpatsvaru. Tā kā priede ir gaismas prasīga koku suga, tās vainaga lejasdaļā gaismas trūkuma rezultātā agri sākas apakšējo zaru atmiršanas process, un sauso zaru īpatsvars līdz 20 gadu vecumam var sasniegt pat 4.4% no visa koka masas. Analizētajiem egles paraugkokiem līdz 20 gadu vecumam sauso zaru īpatsvars nepārsniedza 0.8% no visa koka masas. Kopumā visām koku sugām novērota tendence, ka zaru biomasas īpatsvars samazinās, pieaugot koka vecumam. Piemēram, ciršanas vecumu sasniegušām eglēm un priedēm vidējais zaru biomasas īpatsvars, attiecīgi 18.3% un 9.5%, ir ievērojami mazāks, salīdzinot ar jauniem kokiem. Iepriekšminētā tendence ir mazāk izteikta lapkoku sugām; bērzam zaru īpatsvars kopējā biomasā samazinās vidēji no 18.4% uz 4.8%, bet ciršanas vecumu sasniegušām apsēm, palielinoties koku vecumam, zaru īpatsvars samazinās no 15.9% uz 13.1%.



3.7. attēls. Koka sugu biomasas sadalījums frakcijās.

Figure 3.7. Biomass allocation of tree species.

Pirmā vecumklase apsei un bērzam ir 0–10 gadi, priedei un eglei 0–20 gadi, bet galvenās cirtes vecums apsei pieņemts 41, bērzam 71, eglei 81, priedei 101 gads.

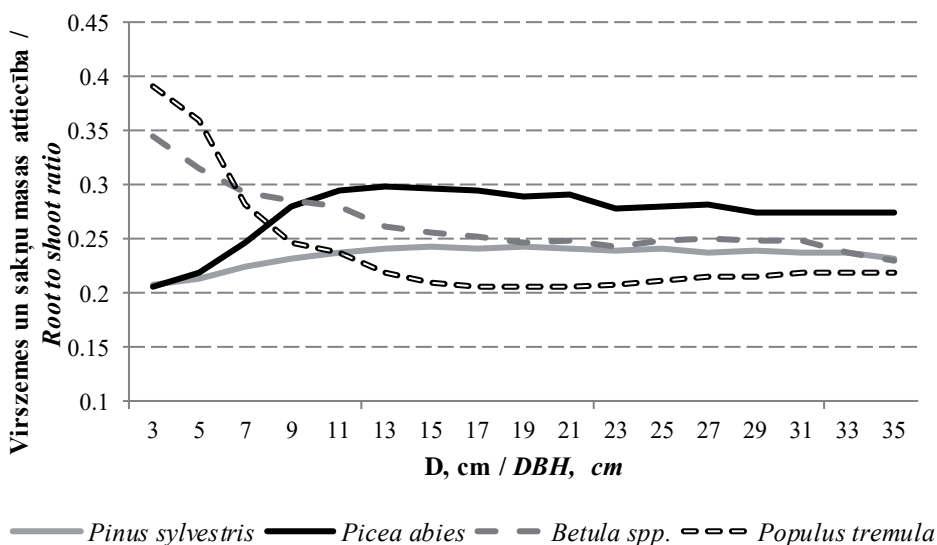
Pētījumā atsevišķi netika nodalīts āra un purva bērzs, bet Zviedrijā, ierīkojot dažādas biežības stādījumus ar abām iepriekšminētajām sugām, konstatēta ne tikai kopējā biomasas atšķirība viena vecuma kokiem, bet arī biomasas īpatsvara atšķirības starp virszemes un celma/sakņu biomasas frakcijām (Johansson, 2007). Autors secinājis, ka 12 gadu vecumā vienādos apstākļos augušu āra bērzu kopējā biomasā un virszemes biomasas īpatsvars ir lielāks nekā purva bērzam, norādot uz proporcionāli lielāku sakņu masu purva bērzam. Lielāka sakņu masa palīdz purva bērzam papildus nodrošināties pret izgāšanos vēja ietekmē, jo tas pārsvarā aug kūdras augsnēs kur augsnes noturība nav tik liela kā minerālaugsnēs.

Pētījumā koku celma, balstsakņu un sīko sakņu īpatsvars kopējā biomasā visām koku sugām kopā vidēji ir apmēram 20%, un identiski secinājumi iegūti arī Somijā, nosakot kopējo priedes, egles un bērza celma/sakņu biomasu (Repola, 2013). Lapkokiem bērzam un apsei lielāks celma/sakņu biomasas īpatsvars ir jauniem kokiem, bet mazāks pieaugušiem kokiem. Savukārt skuju koku sugām priedei un eglei ir pretēji (3.7. att.). Apsei celma/sakņu biomasas īpatsvars, pieaugot koka vecumam, samazinās visstraujāk, no 27.6% vidēji pirmajos 10 gados līdz 16.3%, sasniedzot galvenās cirtes vecumu. Bērzam celma/sakņu biomasas īpatsvars pirmajos 10 gados vidēji ir 24.0%, bet galvenās cirtes vecumā vairs tikai 16.9%. Priedei vidējais celma/sakņu biomasas īpatsvars, palielinoties koka vecumam, pieaug tikai nedaudz; pirmajos 20 gados tas ir 17.6%, bet 101 gada vecumā vidēji 17.7% un var teikt, ka tas ir gandrīz konstants. Galvenās cirtes vecumā egles celma/sakņu biomasas īpatsvars, salīdzinot ar pārējām koku sugām, ir vislielākais, vidēji 23.7%, kamēr līdz 20 gadu vecumam tas vidēji ir 18%. Pieaugot koka vecumam, atšķiras ne tikai kopējais celma/sakņu biomasas īpatsvars, bet arī sakņu biomasas sadalījums pa frakcijām.

Vislielākās izmaiņas skar tieši sīko sakņu (mazāku par 2 cm) īpatsvaru, kurš pirmās vecumklases kokiem bija robežās no 5.4 līdz 10.2%, bet galvenās cirtes vecumā vairs tikai no 1.0 līdz 3.9%.

Visā pasaulē sakarības starp dažādu koku sugu virszemes biomasas frakcijām ir salīdzinoši labi izprastas un aprakstītas, bet zināšanas par sakņu biomasu un tās īpatsvaru ietekmējošajiem faktoriem, joprojām ir diezgan ierobežotas. Dažkārt izpratnes palielināšanai par oglekļa apriti un tā uzkrāšanos dažādās sauszemes ekosistēmās informācija par kopējo koka biomasu ir ļoti nozīmīga. Celma/sakņu biomasas precīza uzmērīšana ir saistīta ar lielu darbietilpību un izmaksām, tāpēc daudzos pētījumos tā tiek novērtēta netieši – no aprēķinātiem vai precīzi uzmērītiem koku virszemes biomasas datiem (Cairns et al., 1997). Plaši izplatīta metode, aprēķinot celma/sakņu kopējo biomasu, ir pielietot virszemes un sakņu masas attiecību (angļu val. *root to shoot ratio*) (Mokany et al., 2006). Virszemes un sakņu masas attiecību var piemērot arī atsevišķu koku celma/sakņu biomasas aprēķināšanai, bet biežāk tā tiek piemērota biomasas aprēķināšanai kokaudzes līmenī, vai daudz plašākā mērogā – atsevišķiem meža tipiēm, biomiem, ekoloģiskajām zonām vai ģeogrāfiskajiem reģioniem.

Valstīm, kurām nav savas koku celma/sakņu biomasas aprēķina metodikas, IPCC labas prakses vadlīnijas (Eggleston et al., 2006) iesaka izmantot vidējās virszemes un sakņu masas attiecības, jeb pārreķina koeficientu noklusējuma vērtības atkarībā no ekoloģiskajām zonām. Mērenās joslas mežiem vadlīniju piedāvātās vērtības ir robežās no 0.20 pieaugušiem līdz 0.40 jauniem skujkoku mežiem un attiecīgi 0.24–0.46 lapkoku mežiem, bet visiem boreālās joslas mežiem no 0.24 līdz 0.39. Šajā pētījumā iegūtās virszemes un sakņu masas attiecības vērtības ir robežās no 0.20 līdz 0.25 priedei, 0.21–0.30 eglei, 0.23–0.34 bērzam un 0.21–0.39 apsei (3.8. att.).



3.8. attēls. Virszemes uz sakņu biomasas attiecības izmaiņas atkarībā no koka caurmēra.
Figure 3.8. Changes in the root-to-shoot ratio depending on tree diameter.

Pētījumā analizētās skujkoku (priede, egļe) un lapkoku (bērzs, apse) sugas atkarībā no koku krūšaugstuma caurmēra uzrādīja atšķirīgas virszemes un sakņu masas attiecības izmaiņas, palielinoties koka dimensijām. Līdzīgi kā analizējot dažādu koku sugu biomasas frakciju īpatsvaru atkarībā no koku vecuma (3.7. att.), arī, analizējot caurmēra ietekmi uz virszemes un sakņu masas attiecību, konstatēts, ka mazu dimensiju lapkokiem raksturīgs lielāks celma/sakņu biomasas īpatsvars nekā lielu dimensiju kokiem, bet skujkoku sugām ir pretēji. Pēc 3.8. attēlā redzamajām līkņu izmaiņu tendencēm secināms, ka celma/sakņu biomasas īpatsvars kokiem ar krūšaugstuma caurmēru virs 10–15 cm ir gandrīz konstants.

Pētījuma rezultāti liecina par to, ka vidējās IPCC vadlīniju virszemes un sakņu masas attiecības vērtības, kuras rekomendētas biomasas aprēķināšanai gan mērenās, gan arī boreālās joslas mežos, Latvijas apstākļos pārvērtē jaunaudzju celma/sakņu biomasu. Vislielākā biomasas pārvērtēšana notiek skujkoku jaunaudzēs, kurās virszemes biomasas nepārsniedz 50–75 t ha⁻¹. Tas ir tāpēc, ka IPCC vadlīniju rekomendētās celma/sakņu biomasas aprēķina koeficientu vērtības priežu un eglu jaunaudzēm ir divas reizes lielākas, nekā aprēķināts šajā pētījumā. Daļēji tas skaidrojams ar to, ka joprojām zinātniekiem nav vienotas izpratnes par vietu, kur dalās koka virszemes un celma/sakņu biomasas. Lielākoties pētījumos šīs biomasas frakciju sadalījums balstās uz subjektīvi noteiktu robežu, līdz ar to celma virszemes daļas masa var tikt pieskaitīta gan stumbram, gan sakņu biomasai. Nosakot virszemes un sakņu masas attiecību, būtu jāņem vērā tas, kādam mērķim to paredzēts lietot. No fizioloģiskā skatupunkta virszemes un sakņu masas attiecība tiek interpretēta tā, lai tā atspoguļotu fotosintēzes diferenciālo ieguldījumu starp koka virszemes un celma/sakņu biomasas frakcijām (Titlyanova et al., 1999). Šādā gadījumā zemes virma ir atbilstoša vieta virszemes un celma/sakņu biomasas frakciju nodalīšanai. Turpretī, aprēķinot mežā palikušās koksnes masu pēc mežistrādes vai raksturojot oglekļa plūsmu starp dažādām krātuvēm, svarīgi ir ņemt vērā to, ka pēc koka nociršanas augsnē paliek ne tikai koka saknes, bet arī celma virszemes daļa, kuras garums varētu būt apmēram 1% no koka garuma.

Vidējā virszemes un sakņu masas attiecība priedei, egļei, bērzam un apsei šajā pētījumā analizētajiem dažādu dimensiju paraugkokiem ir attiecīgi 0.23, 0.26, 0.26 un 0.24. Pētītajām koku sugām vidējās vērtības lielākoties sakrīt ar literatūrā publicētajām vērtībām, taču bija novērojamas arī dažas atšķirības. Lielbritānijā, nosakot tur sastopamo skujkoku sugu virszemes un sakņu masas attiecības, konstatēts, ka parastajai priedei attiecība vidēji ir 0.30 un egļei 0.25 (Levy et al., 2004), kas ir diezgan līdzīgas vērtībām, kuras iegūtas šajā pētījumā, īpaši egļei. Bērzam virszemes un sakņu attiecība visiem paraugkokiem ir robežās no 0.17–0.42 kas ir nedaudz mazāk, nekā novērots bērza paraugkokiem Norvēģijā 0.21–0.88 (Smith et al., 2016). Likumsakarība, ka, palielinoties koku caurmēram vai vecumam, samazinās sakņu biomasas īpatsvars, novērota gan šajā, gan iepriekšminētajā pētījumā. Vidējā virszemes un sakņu masas attiecība Norvēģijā augušajiem bērziem aprēķināta 0.42, kas ir ievērojami vairāk, nekā aprēķināts šajā pētījumā (0.26), kā arī citā pētījumā Igaunijā – 0.21 (Varik et al., 2013). A. Smith et al. (2016) pētījumu atšķirīgos rezultātus skaidro ar mazāku koku biežību parauglaukumos, kuros analizēti Norvēģijā augušie bērza paraugkoki. Pie mazākas biežības un koku savstarpējās konkurences tie

veido lielāku sakņu sistēmu, salīdzinot ar kokiem, kuri auguši lielā biežībā kā Igaunijas pētījumā, kur koku skaits bērza parauglaukumos bijis robežās no 3200–10 000 gab. ha⁻¹.

Pētījumā iegūtā visu koku sugu vidējā virszemes un sakņu masas attiecība ir 0.25, un tā ir ļoti tuva iepriekš publicētajām vērtībām mērenās joslas mežiem – 0.26, un boreālās joslas mežiem – 0.27 (Cairns et al., 1997). Tomēr šie rezultāti apliecina, ka vidējo virszemes un sakņu masas attiecību piemērošana atsevišķu kokaudžu līmenī var novest pie kļūdainiem biomasas aprēķiniem, jo attiecību ietekmē gan kokaudzes vecums, gan vidējais koku caurmērs. Tāpēc atsevišķu kokaudžu vai koku sakņu biomasas raksturošanai korektāk un precīzāk ir lietot alometriskos vienādojumus, nevis konstantus pārrēķina koeficientus.

3.2.2. Vienādojumu izstrāde

Empīrisko datu ievākšana ar destruktīvo metodi individuālu koku biomasas vienādojumu izveidei ir plaši izmantots paņēmiens, kas praktizēts daudzos pētījumos un pielietots arī šajā pētījumā. Šādu vienādojumu piemērošanai valsts mērogā nepieciešams nodrošināt, lai ievāktais empīriskais materiāls būtu reprezentatīvs visai mērķa populācijai (Temesgen et al., 2015). Lai nodrošinātu alometrisko vienādojumu ticamību un precizitāti, izstrādātajiem vienādojumiem jābūt balstītiem uz pietiekami lielu paraugkoku skaitu, vienlaikus meklējot līdzsvaru starp datu ievākšanas precizitāti un pieejamo finansējumu, jo šādu datu ievākšana ir dārga un laikietilpīga. Dažādu simulāciju rezultāti parāda, ka virszemes biomasas raksturošanai ir ieteicama vismaz 40 paraugkoku ar regulāru stumbrā formu izpēti katrai koku sugai ar priekšnoteikumu, ka paraugkopas koku dimensijas atbilst visai ģenerālkopai (Roxburgh et al., 2015). Pētījumā katrai koku sugai paraugkoku atlase bija plānota tā, lai aptvertu plašu Latvijā sastopamo mežaudžu un koku raksturlielumu amplitūdu. Kopā dati tika iegūti no 372 kokiem, 81–105 paraugkoki katrai koku sugai (2.2. tab.). Pēc nacionālā MRM datiem virsvaldu koki, valdošie koki, un līdzvaldu koki (2.2. att.) veido 97% no kopējās mežaudžu krājas Latvijas mežos, pamatojot pētījumā izmantoto paraugkoku atlases metodi. Pārējo (nomākto un atmirstošo) koku īpatsvars kopējā mežaudžu krājā ir relatīvi neliels, tāpēc šādi koki netika izvēlēti, un tika pieņemts, ka tas būtiski neietekmēs vienādojumu piemērojamību nacionālā mērogā.

Pētījumā veiktā visu koku sakņu virs 2 mm diametrā izrakšana ir dārga un darbietilpīga metode un tādā apjomā vēl nav veikta nekur citur. Praksē visbiežāk sīko sakņu masa visiem paraugkokiem tiek aprēķināta, izmantojot regresijas vienādojumus, kuru izveidei izrakts ierobežots skaits paraugkoku (Repola, 2008, 2009) vai izraktas tikai atsevišķas koka saknes (Pettersson, Stahl, 2006; Smith et al., 2016).

Pētījumā izstrādāto biomasas vienādojumu statistiskie rādītāji, regresijas koeficientu vērtības un to standartkļūdas visiem pētījuma ietvaros pārbaudītajiem vienādojumiem ir aplūkojamas 3.4. tabulā.

3.4. tabula / Table 3.4.

Regressijas vienādojumu koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji
Parameter estimates and goodness of fit statistics

	Vienādojums Equ.	Regressijas koeficientu vērtības ± standartklāda Parameter values ± standard errors				m	k	R ²	RMSE	MAPE	AICc	u _k	ε _{kl}
		ln(a)	b	c	d								
<i>Pinus sylvestris</i>	AGB	2.5	-2.4216 ± 0.131	2.4746 ± 0.045			1.096	0.979	30.7	20.7	702.4	0.036	0.018
		2.6	-2.4418 ± 0.081	1.7374 ± 0.089	0.7841 ± 0.082		1.036	0.986	25.3	11.3	664.8	0.007	0.015
	2.7	-1.4480 ± 0.037	8.7399 ± 0.295		0.5624 ± 0.059	16	1.009	0.989	22.4	8.0	640.3	0.000	0.010
	2.5	-2.4664 ± 0.177	2.3556 ± 0.055			1.450	0.965	35.5	74.3	732.0	0.265	0.012	
	2.6	-3.7288 ± 0.069	1.4423 ± 0.071	1.4402 ± 0.067		1.038	0.990	19.2	9.5	608.3	0.006	0.009	
	2.7	-2.8125 ± 0.055	7.1368 ± 0.217	0.0118 ± 0.003	1.1270 ± 0.062	15	1.005	0.993	15.5	5.5	566.9	0.000	0.005
	2.5	-1.8239 ± 0.208	1.7083 ± 0.073			1.036	0.739	12.7	33.9	522.3	0.043	0.110	
	2.6	-2.1367 ± 0.18	3.0078 ± 0.196	-1.2502 ± 0.181		1.040	0.815	10.7	26.7	489.0	0.033	0.073	
	2.7	-1.6032 ± 0.141	14.7696 ± 0.887		-1.5888 ± 0.182	11	1.042	0.858	9.4	19.8	462.6	0.015	0.073
	2.5	-3.9617 ± 0.226	2.4668 ± 0.084			1.180	0.970	8.6	35.5	176.8	0.076	0.028	
2.6	-3.9583 ± 0.167	1.6686 ± 0.208	0.8635 ± 0.207		1.068	0.981	6.9	20.4	160.5	0.027	0.028		
2.7	-3.2937 ± 0.116	9.0334 ± 0.921		0.5353 ± 0.157	14	1.035	0.986	5.9	14.5	145.8	0.012	0.025	
<i>Picea abies</i>	AGB	2.5	-1.7417 ± 0.115	2.2966 ± 0.041			1.090	0.972	32.7	19.2	569.2	0.031	0.011
		2.6	-1.9126 ± 0.121	2.0391 ± 0.094	0.3294 ± 0.098		1.051	0.979	28.9	15.3	551.1	0.026	0.010
	2.7	-0.5244 ± 0.099	8.8563 ± 0.424		0.3879 ± 0.097	19	1.013	0.982	26.5	10.1	537.0	0.008	0.013
	2.5	-2.3798 ± 0.165	2.3181 ± 0.052			1.437	0.950	35.2	67.3	580.7	0.204	0.010	
	2.6	-3.7839 ± 0.087	1.5994 ± 0.068	1.2735 ± 0.078		1.058	0.987	17.8	12.0	472.8	0.014	0.005	
	2.7	-2.5842 ± 0.087	7.0769 ± 0.259	0.0232 ± 0.005	0.9631 ± 0.08	15	1.002	0.988	17.1	6.2	467.8	0.001	0.006
	2.5	-1.6493 ± 0.19	1.8724 ± 0.068			0.977	0.871	16.0	25.5	452.8	0.060	0.042	
	2.6	-1.2871 ± 0.14	2.7957 ± 0.152	-1.0850 ± 0.157		1.036	0.910	13.3	18.5	425.3	0.023	0.031	
	2.7	0.3300 ± 0.091	12.0986 ± 0.698		-1.0682 ± 0.161	16	1.012	0.912	13.2	16.1	423.8	0.018	0.037
	2.5	-3.6785 ± 0.279	2.5007 ± 0.107			1.084	0.938	10.6	27.7	142.4	0.056	0.032	
2.6	-3.7973 ± 0.238	1.6300 ± 0.323	0.9420 ± 0.325		1.007	0.940	10.6	19.7	144.0	0.035	0.028		
2.7	-2.4967 ± 0.212	10.8184 ± 0.425			14	1.039	0.939	10.5	23.5	142.1	0.049	0.026	

	Vienādojums <i>Equ.</i>	Regressijas koeficientu vērtības ± standartkļūda <i>Parameter values ± standard errors</i>				<i>m</i>	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>MAPE</i>	<i>AICc</i>	<i>u_k</i>	<i>ε_{ki}</i>
		<i>ln(a)</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>								
<i>Betula</i> spp.	<i>AGB</i>	2.5	-2.6399±0.081	2.6360±0.031			1.050	0.940	40.2	13.7	779.8	0.012	0.011
		2.6	-3.2840±0.064	2.1135±0.057	0.7095±0.065		1.020	0.981	22.8	7.6	662.7	0.002	0.007
		2.7	-2.1284±0.121	9.3375±0.231	0.0221±0.005	11	1.004	0.987	19.0	6.4	626.4	0.000	0.007
	<i>SB</i>	2.5	-2.2382±0.111	2.4121±0.039			1.235	0.935	36.6	36.8	760.0	0.088	0.008
		2.6	-3.9257±0.057	1.8712±0.051	1.1025±0.058		1.016	0.983	18.4	6.7	618.1	0.002	0.006
		2.7	-2.9281±0.108	8.2943±0.205	0.0184±0.004	11	1.002	0.989	15.2	5.7	579.2	0.000	0.000
	<i>BB</i>	2.5	-3.5849±0.177	2.2048±0.068			1.176	0.791	11.1	41.0	508.7	0.008	0.146
		2.6	-2.4848±0.188	3.8346±0.18	-1.8855±0.203		1.075	0.880	8.4	26.6	452.5	0.011	0.075
		2.7	-1.0091±0.22	16.9249±0.788		12	1.075	0.883	8.3	20.8	449.9	0.008	0.076
	<i>BGB</i>	2.5	-3.6432±0.122	2.5127±0.05			1.006	0.976	4.8	13.6	136.9	0.010	0.020
	2.6	-3.6727±0.174	2.4684±0.185	0.0505±0.204		1.005	0.976	4.9	13.5	139.7	0.010	0.021	
	2.7	-2.5328±0.116	11.0050±0.247		14	0.970	0.975	4.9	13.7	138.3	0.015	0.022	
<i>Populus tremula</i>	<i>AGB</i>	2.5	-2.7253±0.084	2.5969±0.033			1.067	0.973	23.5	12.9	534.6	0.017	0.009
		2.6	-3.2117±0.103	2.1989±0.065	0.5461±0.083		1.036	0.984	18.0	11.2	492.0	0.013	0.005
		2.7	-1.9430±0.071	9.7510±0.302	0.0337±0.006	11	0.990	0.984	17.4	9.7	486.3	0.008	0.007
	<i>SB</i>	2.5	-3.0325±0.098	2.6431±0.039			1.079	0.967	22.4	15.0	526.6	0.021	0.014
		2.6	-3.7726±0.067	1.9786±0.063	0.8846±0.078		1.041	0.988	13.3	9.9	441.2	0.008	0.005
		2.7	-2.8955±0.142	8.3896±0.27	0.0226±0.006	11	1.006	0.991	11.6	7.6	420.1	0.004	0.005
	<i>BB</i>	2.5	-4.4654±0.205	2.5617±0.08			0.953	0.874	7.4	32.6	340.8	0.113	0.046
		2.6	-3.3511±0.258	3.3977±0.161	-1.1821±0.205		1.023	0.870	7.6	27.4	346.0	0.079	0.033
		2.7	-2.3703±0.286	14.3352±0.736		12	1.004	0.879	7.3	21.6	339.5	0.076	0.039
	<i>BGB</i>	2.5	-3.3691±0.132	2.3015±0.058			1.076	0.978	4.8	20.7	107.3	0.000	0.052
	2.6	-3.0269±0.191	2.7294±0.191	-0.5243±0.224		1.053	0.983	4.2	18.2	100.4	0.000	0.045	
	2.7	-2.3114±0.124	10.3644±0.303		15	0.992	0.984	4.0	19.5	96.6	0.005	0.058	

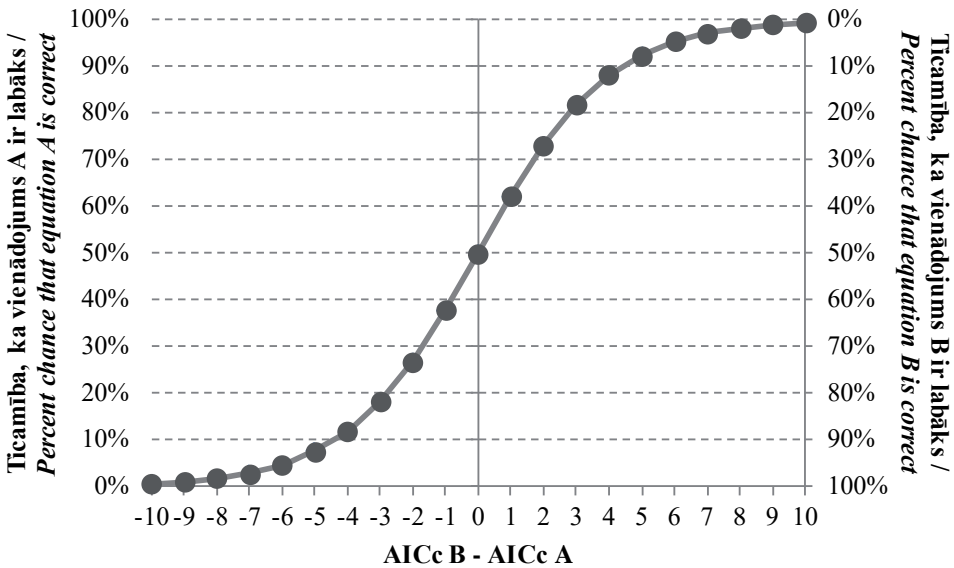
Piezīmes / Notes: Rekomendētais vienādojums katrai koka frakcijai iekrāsots treknrakstā / The proposed functions for each tree component are presented in bold. *AGB* – kopējā virszemes biomasas / total aboveground biomass, *SB* – stumbra biomasas / stem biomass, *BB* – zaru biomasas / branch biomass, *BGB* – kopējā celma/sakņu biomasas / total belowground biomass.

Vienādojums (2.5) / Equation (2.5): $\ln \hat{Y}_{ki} = \ln(a) + b \times \ln(D)$; Vienādojums (2.6) / Equation (2.6): $\ln \hat{Y}_{ki} = \ln(a) + b \times \ln(D) + c \times \ln(H)$

Vienādojums (2.7) / Equation (2.7): $\ln \hat{Y}_{ki} = \ln(a) + b \times \left(\frac{D}{D+m} \right) + c \times H + d \times \ln(H)$;

reālo biomasas vērtību iegūšanai izmanto izteiksmi / Equations can be retransformed as: Biomasas, kg / Biomass, kg = $k \times \exp(\ln \hat{Y})$; *a*, *b*, *c*, *d* – koeficienti / parameters; $\ln \hat{Y}$ – rezultatīvā pazīme / response variable; *D* / *DHB* – krūšaugstuma caurmērs / diameter at breast height; *H* – koka augstums / tree height; *m* – konstante / constant; *k* – korekcijas koeficients / correction factor; *u_k* – randomizētais faktors kokaudzei / residual variances between sites; ϵ_{ki} – randomizētais faktors kokam *i* kokaudzē *k* / residual variances within sites.

Katras koku sugas biomasas frakcijai teorētiski labākais vienādojums raksturots ar zemāko $AICc$ vērtību. Ja starpība starp divām $AICc$ vērtībām ir nulle, tad katram no pārbaudītajiem vienādojumiem ir vienāda (50%) ticamība būt precīzām, un nevar apgalvot, ka kāds no vienādojumiem ir labāks par otru (Motulsky, Arthur, 2003). Ja starpība starp divām $AICc$ vērtībām ir 2 un, piemēram, vienādojumam A ir zemāka $AICc$ vērtība nekā vienādojumam B, tad ar 73% ticamību var apgalvot, ka vienādojums A ir precīzāks par vienādojumu B (3.9. att.). Vēl viens veids, kā interpretēt $AICc$ vērtību starpību, ir apgalvot, ka vienādojums A ir 2,7 ($73 / 27 = 2,7$) reizes labāks nekā vienādojums B. Ja starpība starp divu vienādojumu $AICc$ vērtībām ir 6, tad jau ar 95% ticamību un diezgan droši var apgalvot, ka vienādojums A ir labāks ($95 / 5 = 20$ reizes) par vienādojumu B. Bieži vien empīriski ievāktie dati neatbalsta tikai vienu vienādojumu, kurš ir piemērots prognozēšanai, tādi var būt arī vairāki. Praksē pieņemts uzskatīt, ka, ja divu vienādojumu $AICc$ vērtību starpība ir mazāka par 2 (ticamība <73%), tad nevar īsti droši apgalvot, ka kāds no analizētajiem vienādojumiem ir pārliecinoši labāks par otru (Burnham, Anderson, 2002), un ir jāveic citas pārbaudes, lai noskaidrotu, vai kāds no vienādojumiem, piemēram, neveido sistemātisku novirzi pie noteiktām rezultatīvās pazīmes vērtībām, un kā tas ir interpretējams attiecīgajā kontekstā.



3.9. attēls. Vienādojumu ticamības novērtējums pēc divu $AICc$ vērtību starpības.

Figure 3.9. The relationship between the difference in $AICc$ scores and the probability that each model is true.

Izņemot bērza *BGB*, visām pārējām koku sugām un to frakcijām vienādojums 2.7 uzrāda zemākās $AICc$ vērtības, tādējādi minētajā kontekstā pārspējot pārējos pārbaudītos

vienādojumus 2.5 un 2.6. Interpretējot iegūtās $AICc$ vērtības, aprēķināta relatīvā varbūtība, raksturojot, par cik konkrētais vienādojums ir pārkāps nekā pārējie (Wagenmakers, Farrell, 2004). Aprēķinot bērza BGB , 2.5 vienādojumam ir 67% ticamība būt labākajam, salīdzinot ar 2.7 vienādojumu, bet 80% ticamība būt labākam nekā 2.6 vienādojums. Savukārt 2.7 vienādojumam ir vismaz 53%, 66%, 68% ticamība būt labākajam, salīdzinot ar 2.5 un 2.6 vienādojumiem, aprēķinot attiecīgi egles BGB , apses BB , egles BB , bet vairāk nekā 73% ticamība (starpība starp 2.7 un pārējo vienādojumu $AICc$ vērtībām bija lielāka par 6) būt labākajam, aprēķinot biomasu pārējām biomasas frakcijām.

Pēc $AICc$ vērtību analīzes 2.5 vienādojums teorētiski labāks par 2.6 vienādojumu ir ne tikai prognozējot bērza BGB , bet arī egles BGB un apses BB apjoma prognozēšanā ar ticamību būt pārkāpam attiecīgi 80% un 93%. Pārējām biomasas frakcijām diezgan droši var apgalvot, ka par 2.5 vienādojumu labāks ir 2.6 vienādojums, jo visos gadījumos ticamība bija lielāka par 88%.

Izvēloties piemērotāko egles BGB , bērza BGB , egles BB un apses BB vienādojumu, jāvērtē pārējie vienādojumu statistiskie rādītāji un jāpielieto citas vienādojumu novērtēšanas metodes. Iepriekšminēto koku sugu biomasas frakciju labākajam vienādojumam ir tikai attiecīgi 1.1, 2.0, 2.1 un 1.9 reizes lielāka varbūtība būt pareizam attiecībā pret nākamo vienādojumu ar otru zemāko $AICc$ vērtību, kas ir maznozīmīgi, lai noraidītu pārējos vienādojumus.

Regresijas koeficientu nenoteiktību parasti raksturo tā standartklūda. Pārāk liela koeficienta standartklūda ir pietiekošs iemesls vienādojuma noraidīšanai, ja vien no tā netiek izslēgta kāda faktoriālā pazīme, tādējādi samazinot paliekošo koeficientu standartklūdu un līdz ar to palielinot koeficientu ticamību. Šajā pētījumā katra vienādojuma regresijas koeficientu ticamība pārbaudīta ar $PRSE$, un visiem analizētajiem 2.5 vienādojuma koeficientiem (3.4. tab.) $PRSE$ nepārsniedza 30%, kura mūsu pētījumā pieņemta kā kritiskā robeža, lai noraidītu vienādojumu. Turpretī egles, bērza un apses BGB 2.6 vienādojumam atsevišķu koeficientu $PRSE$ vērtības ir attiecīgi 35%, 403% un 93%, norādot uz vienādojumu nepiemērotību BGB aprēķiniem. 2.7 vienādojuma statistiskā analīze parādīja, ka tikai priedes, egles, bērza, apses SB un bērza AGB vienādojums visprecīzāk aprēķina biomasu pēc tās sākotnējās izteiksmes. Pārējām biomasas frakcijām H , $\ln(H)$ vai abu minēto faktoriālo pazīmju izslēgšana no 2.7 izteiksmes samazināja $AICc$ vērtību vai bija saistīta ar nepieņemami lielu regresijas koeficientu $PRSE$.

G.W. Sileshi (2014) norāda, ka vienādojumus, kuriem $PRSE$ vienam vai vairākiem regresijas koeficientiem ir lielāka par 25%, vispār nedrīkstētu publicēt, jo tie nav ticami. Autors arī norāda, ka vides zinātnu pētījumos $PRSE$ kritiskajām robežvērtībām vajadzētu būt vēl zemākām, attiecīgi 20%. Tomēr citā pētījumā, kurā veikta biomasas vienādojumu statistiskā analīze, demonstrēts, ka $PRSE$ robežvērtība 25% ir nepamatoti zema, novērtējot koeficientu uzticamību, un tā atbilst 10^{-5} – 10^{-4} būtiskuma līmenim (Picard et al., 2015). Autors norāda, ka minētais būtiskuma līmenis ir vairāk nekā 5%, kas tiek tradicionāli lietots ekoloģijā, tāpēc $PRSE$ robežvērtības varētu būt arī augstākas par 25%.

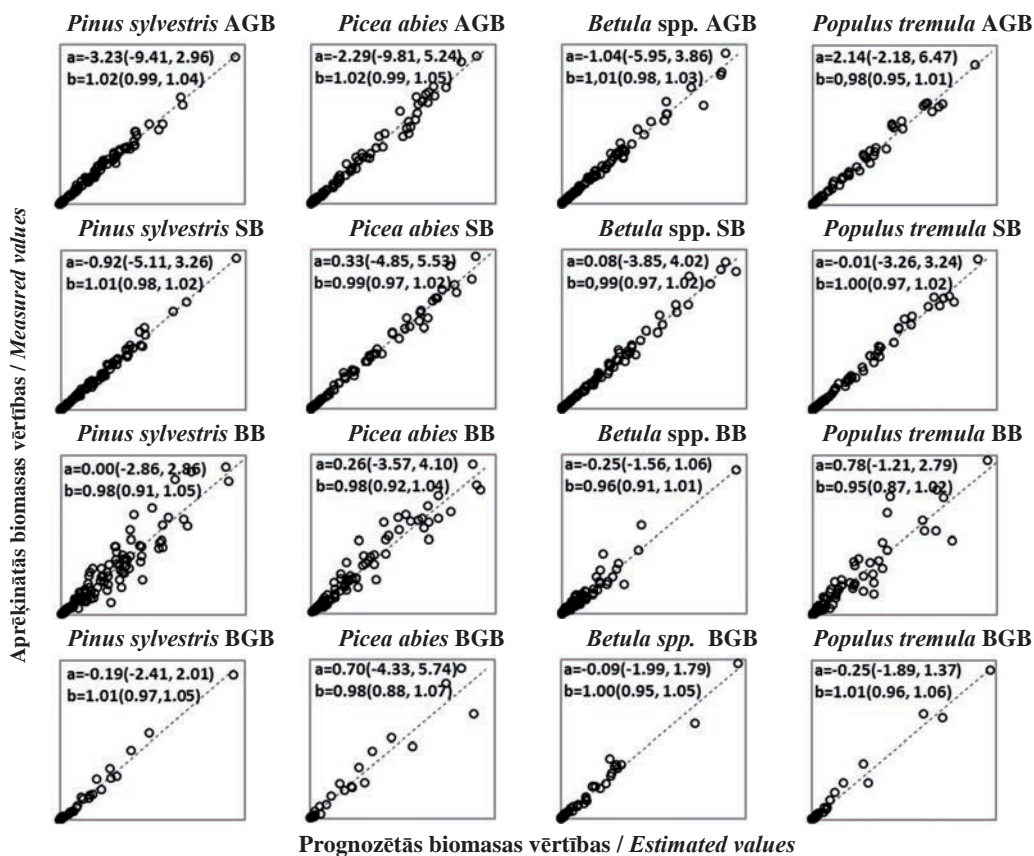
Visiem vērtētajiem vienādojumiem (3.4. tab.) R^2 uzrādīja ciešu sakarību starp mērītajām un aprēķinātajām biomasas vērtībām, iekļautajiem argumentiem izskaidrojot 73.3–99.3% no rezultatīvās pazīmes variācijas. 2.7 vienādojums kopumā uzrādīja

visaugstākās R^2 vērtības, izskaidrojot 85.8–99.3% no biomasas vērtību variēšanas. Attiecīgi nedaudz mazāka izskaidrotā variācija ir 2.6 vienādojumam 81.5–99.0%, bet vismazākā tā ir 2.5 vienādojumam 73.9–97.9%. Kopumā visām koku sugām, aprēķinot BB , jāreķinās ar lielāku prognozēšanas kļūdu, salīdzinot ar pārējām biomasas frakcijām, to atspoguļo arī sliktākas R^2 un $MAPE$ vērtības. Aprēķinot BB ar rekomendētajiem vienādojumiem (3.4. tab.), konstatētas vidēji par 10.1% (7.1–12.7%) mazākas R^2 vērtības, salīdzinot ar pārējo biomasas frakciju vidējo R^2 vērtību.

Regresijas vienādojumu novērtēšanai zinātniskajā literatūrā plaši izplatīta un samērā vienkārši pielietojama metode ir aprēķināto un prognozēto vērtību attiecināšana. Pēc vērtību attiecināšanas veic lineāro regresiju, ar kuru novērtē iegūtās taisnes novirzi no 1:1 iedomātās līnijas (ideālajā gadījumā regresijas koeficienti $a = 0$ un $b = 1$). Ja lineārās regresijas koeficienti $a \neq 0$ un $b \neq 1$, tad tas norāda uz nepietiekamu vienādojuma precizitāti un pētījuma kontekstā uz sistemātisku biomasas pārvērtēšanu vai pretēji – biomasas tiek novērtēta mazāk. Darba ietvaros katrai koka biomasas frakcijai rekomendēto vienādojumu (3.4. tab.) aprēķināto un prognozēto biomasas vērtību grafisks attēlojums un regresijas koeficientu vērtību analīze neuzrādīja statistiski būtisku regresijas taisnes novirzi no 1:1 iedomātās līnijas (3.10. att.).

Attēlojot un analizējot aprēķināto un prognozēto vērtību izkliedes diagrammas, svarīgi aprēķinātās vērtības likt uz Y ass, bet prognozētās uz X ass, jo pretējā gadījumā iegūtie rezultāti būs kļūdaini (Piñeiro et al., 2008). Lineārās regresijas a un b koeficientu atbilstība izvīzītajiem kritērijiem veikta, analizējot koeficientu 95% ticamības intervālus. Ja koeficientam a 95% ticamības intervāls ietver 0 vērtību, tad nevar noraidīt hipotēzi, ka $a = 0$. Tāpat, ja koeficienta b 95% ticamības intervāls ietver vērtību 1, tad nevar noraidīt hipotēzi, ka $b = 1$. Iepriekš aprakstītā aprēķināto un prognozēto biomasas vērtību savstarpējā analīze apstiprināja, ka biomasas frakciju rekomendētie vienādojumi (3.4. tab.) neveido sistemātisku novirzi no empīriski ievāktajiem datiem, līdz ar to vienādojumi ir lietojami biomasas prognozēšanā. Pētījuma kontekstā parasti šāda nevēlama novirze veidojas, lielu dimensiju kokiem pastiprināti ietekmējot regresijas koeficientu vērtības lielākas to ietekmes dēļ, salīdzinot ar mazākiem kokiem.

Vadoties pēc *G. Piñeiro et al.* (2008) novērojumiem, aprēķināto un prognozēto biomasas vērtību izkliedes diagrammas analīze ir visbiežāk lietotā vienādojumu novērtēšanas metode zinātniskajā literatūrā. Neskatoties uz metodes popularitāti, joprojām daudzos gadījumos tā tiek lietota nepareizi vai nepilnīgi (Sileshi, 2014). Visizplatītākā kļūda ir aprēķinātās vērtības likt uz X ass, bet prognozētās uz Y ass. Minētā kļūda neietekmē R^2 vērtības, jo abos gadījumos tās būs identiskas, bet nepareiza vērtību atlikšana uz X un Y asīm dod kļūdainu regresijas koeficientu 95% ticamības intervāla novērtējumu. Jo mazākas R^2 vērtības, jo lielāka būs kļūda, samainot abas asis vietām (Piñeiro et al., 2008). Atbilstoši autora secinājumiem, dažkārt aprēķināto un prognozēto vērtību analīze aprobežojas tikai ar R^2 atspoguļošanu vai izkliedes diagrammas attēlošanu, kas būtībā sniedz nepilnīgu priekšstatu par vienādojumu precizitāti.



3.10. attēls. Aprēķināto un prognozēto biomasas vērtību izkliedes diagramma un regresijas taisne.

Prognozētās vērtības aprēķinātas, izmantojot rekomendētos vienādojumus (3.4. tab.) katras koku sugas biomasas frakcijai. Vērtības uz X un Y asīm katrai diagrammai ir vienādas. *a* un *b* – lineārās regresijas koeficienti un iekavās to 95% ticamības intervāls. AGB – virszemes biomasas, SB – stumbra biomasas, BB – zaru biomasas, BGB – celma/sakņu biomasas.

Figure 3.10. The relationship between measured and predicted biomass.

The predicted values were estimated from the proposed functions (Table 3.4.). The values on the X and Y axes are the same in each diagram. *a* and *b* – parameter values of linear regression and their 95% confidence interval. AGB, SB, BB and BGB denote total aboveground, stem, total and belowground biomass, respectively.

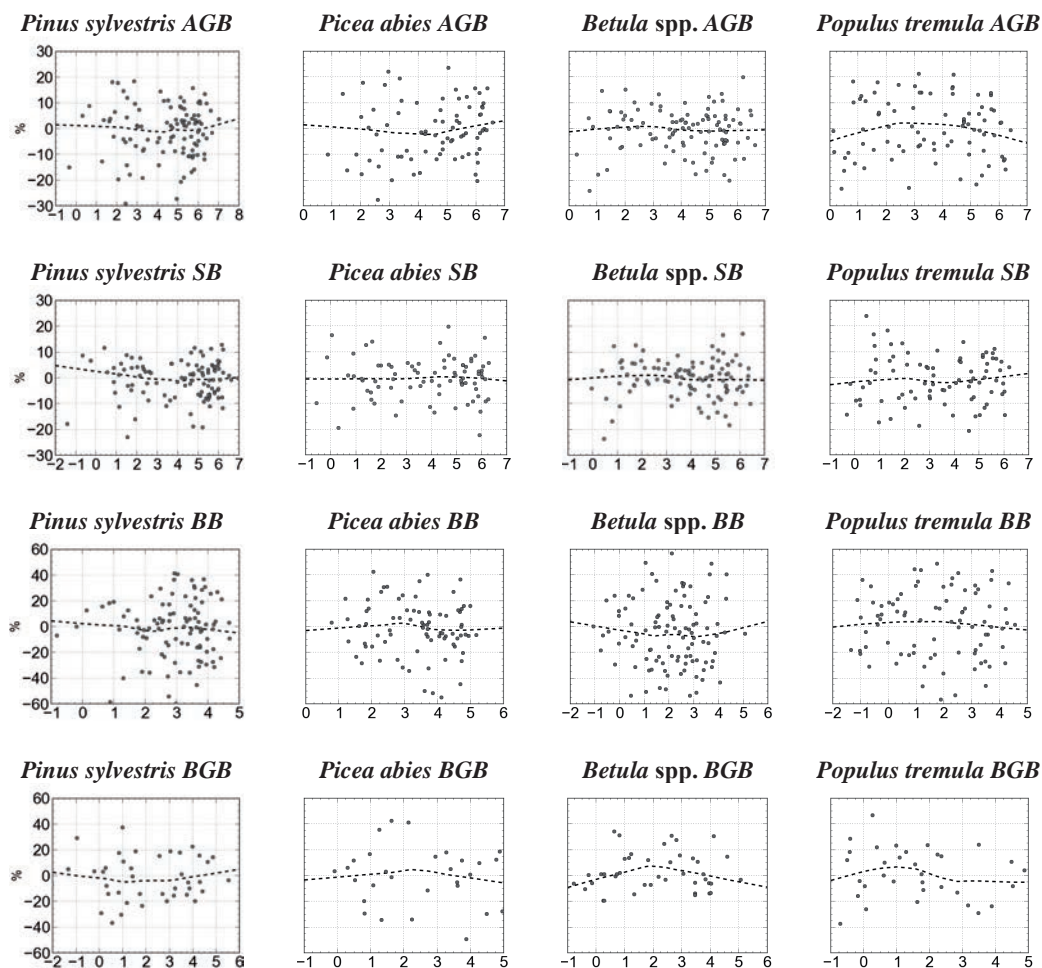
Novērtējot izstrādāto vienādojumu ticamību dažādu mainīgo lielumu diapazonā, pētījumā pārbaudīta vienādojumu atlikumu sadalījuma normalitāte (angļu val. *residual analysis*). Relatīvā starpība starp aprēķinātajām un prognozētajām biomasas vērtībām katram apskatītajam izstrādātajam vienādojumam attiecināta pret logaritmiski

transformētām prognozētajām biomasas vērtībām (3.11., 3.12. un 3.13. att.). Prognozētās biomasas vērtības atlikumu izkliedes diagrammās ir transformētas, lai vienlīdz labi varētu atklāt sistemātisku novirzi pie lielām un mazām biomasas vērtībām. Lai izstrādātais vienādojums būtu izmantojams prognozēšanā, tā atlikumu izkliedes diagrammās izvilktajai līnijai nedrīkst parādīties būtiskas novirzes no vidējās vērtības, kā arī punktiem ir jābūt nejauši izkārtotiem.

2.7 vienādojuma piemērošanas gadījumā nevienai koku sugas biomasas frakcijai nebija nevēlamu tendenču, kas norādītu uz sistemātiskām vienādojuma atlikumu novirzēm no vidējās vērtības (3.11. att.). Aprēķinot *AGB* un *SB*, lokālas prognozēšanas kļūdas nebija lielākas par, attiecīgi, $\pm 5.1\%$ un $\pm 4.8\%$. Savukārt, aprēķinot *BB* vai *BGB* pēc 2.7 vienādojuma, lokālas prognozēšanas kļūdas bija nedaudz lielākas, attiecīgi $\pm 6.9\%$ un $\pm 6.8\%$.

Aprēķinot biomasu pēc 2.6 un 2.5 vienādojumiem (3.12. un 3.13. att.), gandrīz visām biomasas frakcijām vienādojumu atlikumos novērojamas sistemātiskas kļūdas, kuras pārsniedza 10% robežu no vidējās vērtības. Tas vairumā gadījumu nozīmē nepietiekami precīzu biomasas novērtēšanu jauniem kokiem, īpaši skujkokiem. Ja atlikumu vidējā vērtība ir negatīva, tad pētījuma kontekstā tas norāda, ka konkrētais vienādojums prognozē lielāku biomasu, nekā ir aprēķināts pēc empīriski ievāktajiem datiem un pretēji, ja atlikumu vidējā vērtība ir pozitīva. Prognozējot *BGB* pēc 2.5 vienādojuma, atlikumu novirze no vidējās vērtības bija ievērojami mazāka nekā pārējām biomasas komponentēm. Tas norāda, ka, raksturojot *BGB*, koka *H* ir mazāka ietekme, salīdzinot ar pārējām biomasas komponentēm. Arī prognozējot egles, bērza un apses *BGB* pēc 2.7 vienādojuma, *H* izslēgšana no izteiksmes samazināja lokālas atlikumu novirzes no vidējās vērtības.

Pētījuma rezultāti apliecina, ka visu koku sugu biomasas vienādojumi, kuros kā mainīgie parametri iekļauti *D* un *H*, uzrāda zemākas *MAPE* vērtības, norādot uz zemāku vidējo procentuālo prognozēšanas kļūdu. Tomēr citi statistiskie rādītāji (*RMSE*, *AICc* un R^2) norādīja uz to, ka koku *H* iekļaušana vienādojumos ne vienmēr uzlabo to prognozēšanas precizitāti, jo īpaši, aprēķinot koku kopējo *BGB* un sīkāko sakņu biomasu (Liepiņš et al., 2017). Piemēram, aprēķinot apses *BB*, 2.5 vienādojums uzrādīja labākas statistisko rādītāju (*RMSE*, *AICc* un R^2) vērtības, salīdzinot ar 2.6 vienādojumu. Tomēr pārējiem virszemes biomasas frakciju (*AGB*, *SB*, *BB*) aprēķinu vienādojumiem neatkarīgi no koku sugas *H* iekļaušana ievērojami uzlaboja to precizitāti.



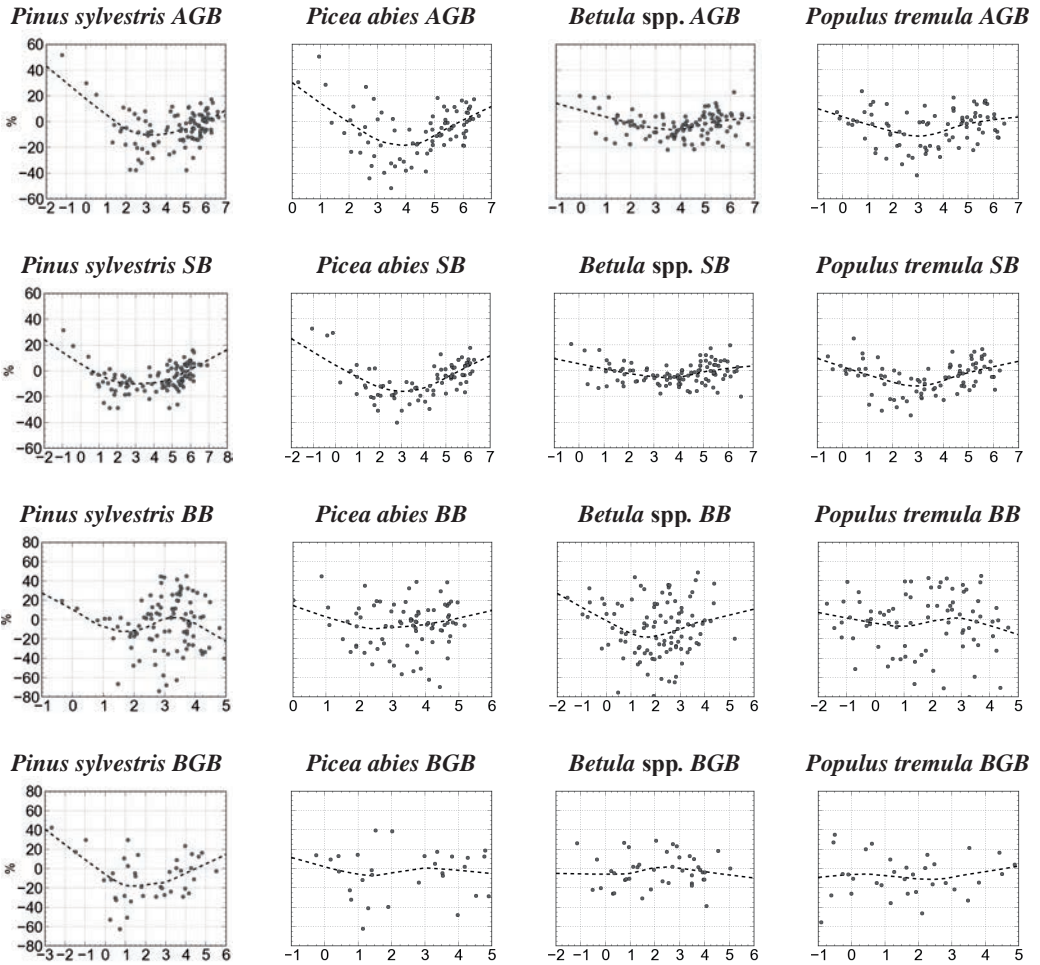
Transformētas biomasas vērtības / *Logarithm of biomass*

3.11. attēls. Vienādojuma 2.7 atlikumu sadalījuma struktūra.

Pārtrauktā līnija attēlota, izmantojot LOWESS regresiju. AGB – virszemes biomasas, SB – stumbra biomasas, BB – zaru biomasas, BGB – celma/sakņu biomasas.

Figure 3.11. *Structure of the relative residuals plotted against the logarithm of predicted biomass based on equation (2.7).*

The dashed line was smoothed using a LOWESS method. AGB, SB, BB, and BGB, denote total aboveground, stem, branch and total belowground biomass, respectively.



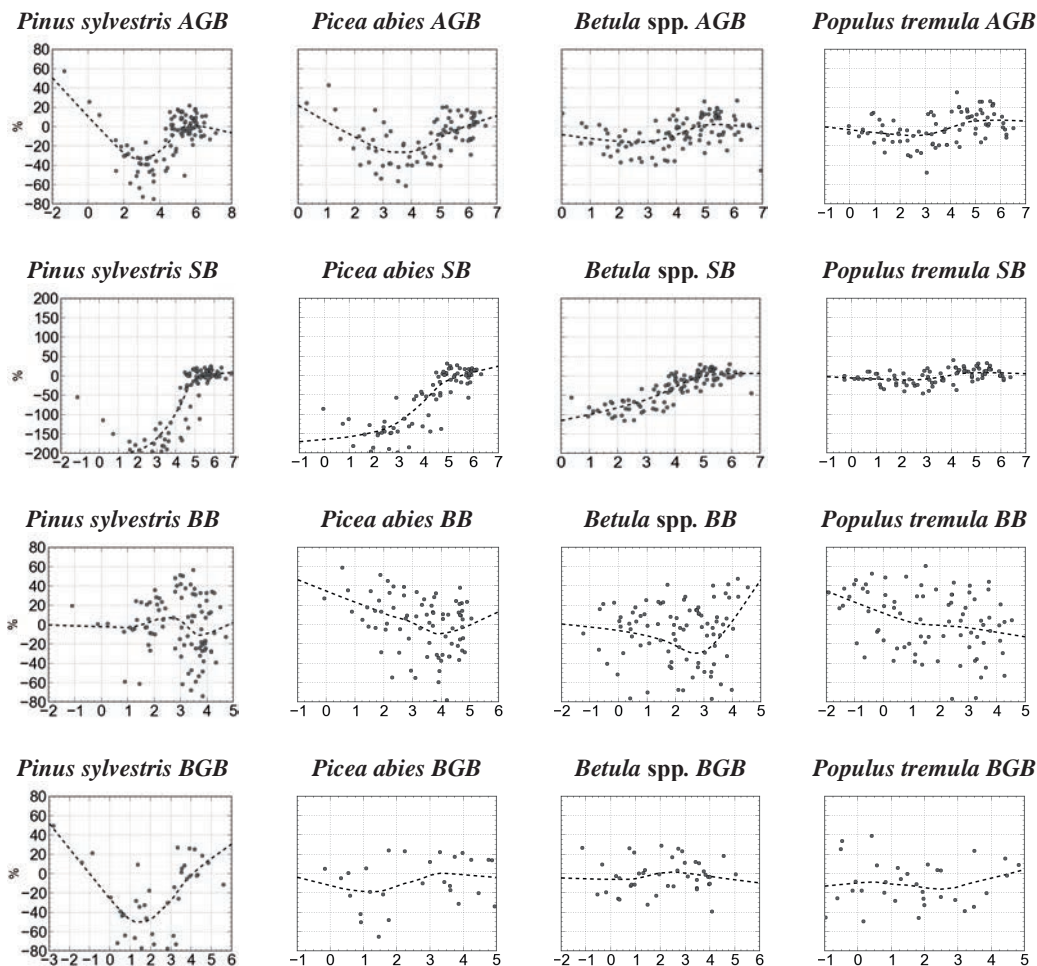
Transformētas biomasas vērtības / *Logarithm of biomass*

3.12. attēls. Vienādojuma 2.6 atlikumu sadalījuma struktūra.

Pārtrauktā līnija attēlota, izmantojot LOWESS regresiju. AGB – virszemes biomasas, SB – stumbra biomasas, BB – zaru biomasas, BGB – celma/sakņu biomasas.

Figure 3.12. Structure of the relative residuals plotted against the logarithm of predicted biomass based on equation (2.6).

The dashed line was smoothed using a LOWESS method. AGB, SB, BB, and BGB, denote total aboveground, stem, branch and total belowground biomass, respectively.



Transformētas biomasas vērtības / *Logarithm of biomass*

3.13. attēls. Vienādojuma 2.5 atlikumu sadalījuma struktūra.

Pārtrauktā līnija attēlota, izmantojot LOWESS regresiju. AGB – virszemes biomasas, SB – stumbra biomasas, BB – zaru biomasas, BGB – celma sakņu biomasas.

Figure 3.13. *Structure of the relative residuals plotted against the logarithm of predicted biomass based on equation (2.5).*

The dashed line was smoothed using a LOWESS method. AGB, SB, BB, and BGB, denote total aboveground, stem, branch and total belowground biomass, respectively.

Kā jau iepriekš ir norādījis *J.C. Jenkins et al.* (2003), zinātnieku vidū bieži vien ir pretrunīgi viedokļi par koka D kā vienīgā argumenta izmantošanu koka biomasas modelēšanā. Pētījumā tropiskajos mežos ir aprēķināts, ka kokaudzes biomasas aprēķinu standartklūda ir par 7% lielāka, ja nav pieejami koku augstuma mērījumi, tādā veidā uzsverot koku H nozīmi virszemes biomasas aprēķinos (Chave et al., 2005). Tāpat arī *A.J.N. Lima et al.* (2012) salīdzināja sešus alometriskos biomasas vienādojumus un secināja, ka vienādojumi, kuros kā arguments bija ietverts koku H , uzrādīja labākus statistiskos rādītājus, salīdzinot ar tiem, kuros kā vienīgais arguments bija D . Zviedrijā veiktā pētījumā pierādīts, ka īpaši jaunās priedes, egles un bērza kokaudzēs D un H kombinācija ievērojami samazina biomasas aprēķinu nenoteiktību, bet ar to vienalga bija nepietiekami, lai izskaidrotu būtiskas biomasas atšķirības starp dažādām mežaudzēm (Claesson et al., 2001). Autori norāda, ka biomasas nenoteiktība starp dažādām mežaudzēm visticamāk veidojas, ignorējot koku zaļā vainaga garumu, kurš mainās atkarībā no koku skaita platības vienībā. Iekļaujot vienādojumos zaļā vainaga garumu kā papildus argumentu, biomasas nenoteiktība starp mežaudzēm bija normas robežās.

Saprotams, ka koka H un zaļā vainaga garums ir ļoti svarīgi parametri koku virszemes biomasas prognozēšanā, tomēr šīs ir visgrūtāk precīzi izmērāmās koka pazīmes. Jau precīza koku H datu iegūšana vien dažkārt ir diezgan sarežģīts uzdevums, īpaši kokaudzēs ar augstiem kokiem un blīviem vainagiem, kā arī pie lielas koku biežības. Piemēram, tropiskajos mežos kokiem H mērījumu precizitāte parasti svārstās no 3–20%, kā rezultātā biomasas aprēķinu nenoteiktība uz ha^{-1} ir apmēram 6% (Hunter et al., 2013). Ņemot vērā koku H mērījumu augsto nenoteiktību tropiskajos mežos, ir aprēķināts, ka dažkārt biomasas vienādojumi bez koku H ir pat līdz trijām reizēm precīzāki (Phalla et al., 2017).

Somijas dienvidos veiktajā pētījumā raksturota 319 individuālu koku D un H mērīšanas precizitāte priedei, eglei un bērzam, to neatkarīgi veicot četriem profesionāliem uzņēmējiem (Luoma et al., 2017). Minētajā pētījumā noskaidrots, ka koku D un H mērījumu standartnovirze vidēji bija 0.3 cm (1.5%) un attiecīgi 0.5 m (2.9%), kas ir ievērojami zemāka nekā tropiskajos mežos, turklāt netika konstatētas arī statistiski būtiskas atšķirības starp dažādu cilvēku uzņēmējumiem. Tā kā koku augšanas apstākļi Latvijā ir diezgan līdzīgi apstākļiem Somijas dienvidos, pētījums netieši norāda, ka augošu koku uzņēmējumus arī mūsu platuma grādos ir iespējams veikt ar pietiekamu precizitāti, lai koku H iekļautu kā argumentu izstrādātajos vienādojumos. Vairāki autori (Andersen et al., 2006; Ene et al., 2012) ir pierādījuši, ka ar LiDAR ir iespējams iegūt ļoti precīzus koku H un D datus, un šai metodei ir ievērojams potenciāls koku mērījumu precizitātes palielināšanā nacionālajā mērogā.

Darba ietvaros atspoguļotie vienādojumu statistiskie rādītāji un veiktās pārbaudes norāda uz to, ka vairumā gadījumu (izņemot bērza *BGB*) 2.7 vienādojums, salīdzinot ar 2.5 un 2.6 vienādojumu, ir vispiemērotākais pētīto koku sugu biomasas frakciju aprēķiniem. Novērots, ka 2.7 vienādojuma izteiksme ir piemērota arī jaunu koku biomasas aprēķiniem, jo tā ir pietiekami elastīga, atšķirībā no 2.5 un 2.6 vienādojumu izteiksmēm. Skujkokiem, prognozējot biomasu pēc 2.5 vienādojuma, atlikumu novirze no vidējās vērtības vislielākā bija tieši jauniem kokiem ar D mazāku par 10 cm (3.13. att.). Neskatoties uz to, ka H iekļaušana pakāpes vienādojumā (2.6) samazināja atlikumu novirzi no vidējās vērtības,

joprojām vairumam koku frakciju vislielākā novirze tika konstatēta jauniem kokiem (3.12. att.).

Arī citi autori ir konstatējuši, ka pakāpes vienādojumi ne vienmēr korekti raksturo koku biomasas izmaiņas atkarībā no dažādiem mainīgajiem (Picard et al., 2015). Līdzīgus novērojumus par pakāpes vienādojumiem ir aprakstījis *P. Muukkonen* (2007), aprēķinot biomasu dažādām Eiropā izplatītām koku sugām, savos pētījumos secinot, ka pakāpes vienādojumi nav pietiekami elastīgi biomasas aprēķiniem, īpaši mazāku diametru kokiem. Tāpat arī logaritmiski pārveidota pakāpes funkcija ne vienmēr ir piemērojama visām situācijām, lai arī tā parasti dod ticamus rezultātus vispārīgai biomasas prognozēšanai (Claesson et al., 2001).

Pētījumā biomasas aprēķinu nenoteiktība starp dažādām kokaudzēm un vienas kokaudzes ietvaros analizēta, pielietojot lineāros jaukta tipa modeļus. Prognozējot koku frakciju biomasu pēc 2.5 vienādojuma, vairumā gadījumu (izņemot priedes *BB*, bērza *BB*, bērza *BGB*, apses *BGB*) mazāka aprēķinu nenoteiktība ir individuālu koku biomasas aprēķiniem konkrētā kokaudzē. Tas liecina par to, ka vienādojumi būs mazāk precīzi, piemērojot tos biomasas aprēķiniem ārpus kokaudzes, kur nozāģēti paraugkoki. *H* iekļaušana pakāpes vienādojumos samazināja kopējo biomasas aprēķinu nenoteiktību vidēji par 37%, ievērojami uzlabojot biomasas aprēķinu precizitāti. *D* un *H* kombinācija pakāpes vienādojumos vairāk samazināja aprēķinu nenoteiktību, saistītu ar biomasas izmaiņām starp dažādām kokaudzēm (visām koku sugām un frakcijām vidēji 49%), bet mazāk konkrētas kokaudzes individuālu koku biomasas aprēķiniem (visām koku sugām un frakcijām vidēji 26%). *H* iekļaušana pakāpes vienādojumos visvairāk samazināja *SB* aprēķinu kopējo nenoteiktību – vidēji par 64%, bet vismazāk *BGB* aprēķinu nenoteiktību – vidēji par 16%. Viskorektāk biomasas variēšanu pētījumā raksturoja 2.7 vienādojums, kura izmantošana, salīdzinot ar 2.5 vienādojumu, biomasas aprēķinos vidēji par 61% samazināja aprēķinu nenoteiktību.

Ir pieņemts uzskatīt, ka biomasas dažādu koku sugu frakcijās (zari, stumbrs, saknes) vienādu dimensiju kokiem variē starp dažādām kokaudzēm un arī konkrētas kokaudzes līmenī. Analizējot pētījuma datus, apstiprinājās jau iepriekš literatūrā paustās atziņas (Claesson et al., 2001; Repola, 2008, 2009), ka biomasas aprēķinu nenoteiktība starp dažādām kokaudzēm ir ievērojami mazāka nekā konkrētas kokaudzes ietvaros. Tāpēc, prognozējot biomasu pēc rekomendētajiem vienādojumiem (3.4. tab.), mazāka aprēķinu nenoteiktība būs visas kokaudzes, nevis atsevišķu koku biomasas aprēķiniem. Papildus mainīgo iekļaušana vienādojumu izteiksmēs vairāk samazina aprēķinu nenoteiktību starp dažādām kokaudzēm, nekā nenoteiktību vienas kokaudzes ietvaros (Repola, 2013). Tas izskaidro, kāpēc šajā pētījumā uz *D* balstītie biomasas vienādojumi vairumam koku frakciju uzrādīja sliktākus prognozēšanas rezultātus salīdzinājumā ar vienādojumiem, kuru izteiksmē iekļauts arī *H*. Koku *D* un *H* kombinācija vienādojumos nodrošina to, ka tie korektāk izskaidro biomasas atšķirības, kas veidojas koku savstarpējās konkurences rezultātā (Claesson et al., 2001).

Izstrādājot biomasas vienādojumus, ir svarīgi, lai atsevišķu koka frakciju (stumbrs, zari) prognožu summa ir vienāda ar kopējo prognozēto biomasu (Kozak, 1970; Repola, 2008, 2009; Bronisz et al., 2016). Šajā pētījumā prognozētā *SB* un *BB* summa diezgan

labi atbilst kopējām *AGB* prognozēm, tāpēc papildus procedūras biomasas vienādojumu aditivitātes nodrošināšanai netika veiktas. Izmantojot rekomendētos biomasas aprēķina vienādojumus, *SB* un *BB* summa vidēji apsei ir par 0.2%, bērzam par 0.5%, eglei par 0.5% un priedei par 0.8% lielāka nekā koku sugām atbilstošās *AGB* prognozes. Iegūtā novirze šajā pētījumā ir līdzīga citam pētījumam Somijā, kur novirze pēc aditivitātes koriģēšanas eglei bija 2.3%, 3.7%, 4.5%, bet priedei – 0.2%, 1.1%, 1,2% atkarībā no pielietotās vienādojuma izteiksmes (Repola, 2009).

3.2.3. Biomasas vienādojumu validācija

Darba ietvaros izstrādātie priedes, egles un bērza *AGB* un *BGB* vienādojumi salīdzināti ar Ziemeļeiropas valstīs izstrādātajiem biomasas aprēķina vienādojumiem, kuru izmantošana ir akceptēta, sastādot nacionālos inventarizācijas ziņojumus par ZIZIMM sektoru valstī. Atsevišķu koku augstuma un caurmēra mērījumi no 2571 priedēm, 2671 eglēm, 2379 bērziem un 2316 apsēm, kuri iegūti ierīkotajos pagaidu parauglaukumos visos atlasītajos meža nogabalos (2.1. tab.), izmantoti kā materiāls biomasas vienādojumu validēšanai.

Priedes, egles un bērza *AGB* un *BGB* salīdzināšanai izvēlēti vienādojumi no Zviedrijas (Marklund, 1988; Petersson, Stahl, 2006), Somijas (Repola, 2008, 2009), kā arī bērza vienādojumi no Norvēģijas (Smith et al., 2014, 2016). Priedei un eglei Norvēģijā lieto Zviedrijā izstrādātos vienādojumus. Parastajai apsei *AGB* salīdzināta tikai ar Zviedrijā izstrādātajiem biomasas vienādojumiem atsevišķi mazākiem un lielākiem kokiem, jo šajā valstī nav kopīga vienādojuma visu dimensiju kokiem. Apsēm ar *D* mazāku par 11 cm biomasu rēķināta pēc *T. Johansson* (2000) ieteiktajiem vienādojumiem, bet kokiem ar *D* virs 11 cm biomasu aprēķināta pēc *T. Johansson* (2002) vienādojumiem, sekojot autora rekomendācijām. Citu Ziemeļeiropas valstu apses vienādojumi (Simola, 1977; Korsmo, 1995) netika iekļauti, jo tie paredzēti biomasas novērtēšanai tikai jaunaudzēs ar koku krūša augstuma diametru mazāku par 16 cm. Literatūrā netika atrasts neviens apses *BGB* vienādojums ar ko salīdzināt pētījumā iegūtos datus. Tā kā šajā pētījumā lapu biomasu netika iekļauta, visos gadījumos no salīdzināšanai izmantotajiem *AGB* vienādojumiem bērzam un apsei tā tika izslēgta, turpretī skujkokiem tā ir iekļauta kopējā *AGB*.

Balstoties uz vizuālu biomasas aprēķinu līkņu salīdzinājumu (3.14. att.), vairums salīdzināto *AGB* un *BGB* vienādojumu (izņemot apses *AGB* un bērza *BGB* vienādojumus) uzrādīja līdzīgas biomasas izmaiņas. Apses *AGB*, aprēķināta pēc *T. Johansson* (2000, 2002) vienādojumiem, uzrādīja ievērojamu biomasas pārvērtēšanu kokiem ar *D* lielāku par 35 cm. Savukārt bērza *BGB* aprēķini pēc *J. Repola* (2008) vienādojuma lielākajiem kokiem aprēķināja par 46% mazāku biomasu, nekā aprēķināts pēc pētījumā izstrādātā vienādojuma (3.5. tab.). Kopumā Zviedrijā izstrādātie priedes, egles un bērza biomasas vienādojumi (Marklund, 1988; Petersson, Stahl, 2006) uzrādīja mazākas *MAPE* vērtības, salīdzinot ar vienādojumiem no Somijas (Repola, 2009), norādot uz precīzāku biomasas aprēķināšanu Latvijas apstākļos (3.5. tab.). Norvēģijā izstrādātie biomasas aprēķina vienādojumi bērzam

(Smith et al., 2014, 2016) uzrādīja vislabākos prognozēšanas rezultātus, piemērojot tos Latvijas apstākļiem, uz ko norāda zemākas MAPE vērtības.

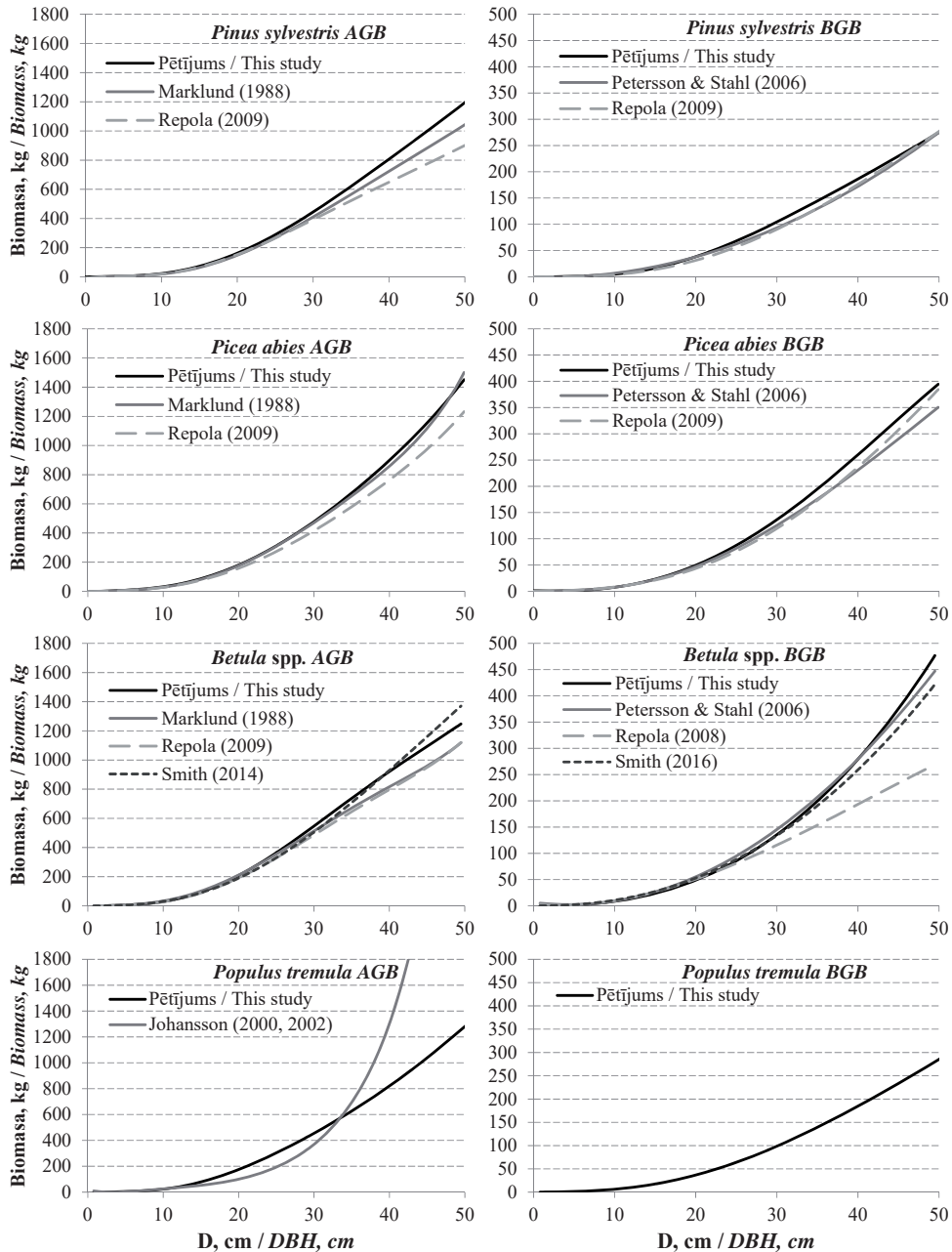
3.5. tabula / Table 3.5.

Šajā un citos pētījumos izstrādāto vienādojumu biomasas aprēķinu relatīvā starpība atkarībā no vidējā krūšaugstuma caurmēra
The percent difference between our and given biomass functions depending on tree diameter

D, cm DBH, cm	<i>Pinus sylvestris</i>				<i>Picea abies</i>			
	AGB ¹	AGB ²	BGB ⁴	BGB ²	AGB ¹	AGB ²	BGB ⁴	BGB ²
5	17.9	19.0	-4.0	6.1	18.4	19.7	-6.9	-55.7
10	12.1	14.8	-16.0	-19.6	10.6	14.4	-1.9	-9.3
15	7.5	7.6	-1.0	6.6	5.9	12.5	1.8	6.4
20	5.2	6.5	1.6	11.8	3.0	12.2	4.5	11.7
25	4.4	7.8	2.7	11.6	1.3	12.4	6.6	13.1
30	5.6	10.6	1.3	8.4	1.4	13.1	8.2	12.5
35	8.0	14.2	-1.8	2.5	3.3	14.0	9.6	10.8
40	8.0	15.6	-4.6	-1.9	5.5	14.8	10.6	8.6
45	11.5	19.6	-8.1	-9.8	-1.3	15.0	11.6	6.1
50	14.4	23.0	-6.1	-11.0	0.5	15.7	12.2	4.1
MAPE	9.5	13.9	4.7	8.9	5.1	14.4	7.4	13.8

D, cm DBH, cm	<i>Betula spp.</i>						<i>Populus tremula</i>
	AGB ¹	AGB ²	AGB ⁵	BGB ⁴	BGB ²	BGB ⁵	AGB ³
5	-13.0	8.6	6.3	-119.2	-71.4	-54.1	17.3
10	-13.5	6.2	-3.4	-29.2	-26.5	-32.3	4.4
15	-8.1	6.1	3.6	-15.1	-12.3	-20.4	27.2
20	-2.3	7.7	8.1	-12.7	-6.1	-12.4	41.3
25	2.5	9.6	9.2	-12.3	1.4	-6.9	35.9
30	5.8	11.3	8.4	-11.8	7.2	-3.3	21.6
35	8.1	11.7	4.6	-10.5	18.3	0.2	-9.4
40	10.5	12.9	-0.3	-8.1	25.8	3.4	-59.2
45	10.0	11.2	-7.3	-6.2	37.2	5.2	-122.6
50	10.8	10.8	-9.1	-1.4	45.6	8.4	-278.9
MAPE	8.5	9.6	6.0	22.7	25.2	14.7	61.8

¹ L.G. Marklund (1988), ² J. Repola (2008, 2009), ³ T. Johansson (2000, 2002), ⁴ H. Peterson & G. Stahl (2006), ⁵ A. Smith et al. (2014, 2016). Negatīva zīme norāda uz biomasas pārvērtēšanu salīdzinot ar pētījumā izstrādāto vienādojumu / When the sign is negative, it indicates overestimation compared to our function. MAPE – vidējā absolūtā kļūda / mean absolute percent error, D / DBH – krūšaugstuma caurmērs / diameter at breast height, AGB – kopējā virszemes biomasas / total aboveground biomass, BGB – kopējā celma/sakņu biomasas / total belowground biomass.



3.14. attēls. Sagaidāmā virszemes (AGB) un celma/sakņu (BGB) biomasa atkarībā no pielietotā vienādojuma.

Pētījumā rekomendētie vienādojumi salīdzināti ar vienādojumiem no Baltijas jūras reģiona.
Figure 3.14. Total expected aboveground (AGB) and belowground (BGB) biomass.
 The proposed functions presented in the current study were compared with other functions from the Baltic Sea region.

Darba ietvaros analizēto citu valstu *AGB* un *BGB* vienādojumu prognozēšanas precizitāte Latvijas apstākļos ir atkarīga ne tikai no pielietotā vienādojuma, bet arī no vidējā koka caurmēra (3.5. tab.). Vienādojumi noteiktās caurmēra grupās biomasu var prognozēt precīzāk vai mazāk precīzi. Viskorektāk citu valstu vienādojumi atspoguļo biomasas izmaiņas diametru grupās no 15 līdz 35 cm. Mazu un lielu dimensiju kokiem biomasas aprēķini vidēji atšķiras vairāk nekā par 10%, salīdzinot ar šajā pētījumā izstrādātajiem vienādojumiem, kas daļēji izskaidrojams ar mazāku konkrēto dimensiju paraugkoku skaitu citu valstu pētījumos.

Pētījumā izstrādātie priedes, egles un bērza *AGB* un *BGB* vienādojumi salīdzināti ar konkrētajiem citu valstu vienādojumiem (3.14. att.), kuriem ir šim pētījumam identiska celma augstuma definīcija. Izņēmums ir apses biomasas vienādojumi, kur celma augstums definēts 10 cm no zemes virskārtas (Johansson, 2002). Atšķirīga celma augstuma definīcija varētu būt viens no iemesliem, kāpēc apses *AGB* biomasu pēc *T. Johansson* (2000, 2002) vienādojumiem lielākajiem kokiem tiek stipri pārvērtēta, salīdzinot ar pētījumā izstrādāto vienādojumu. Piemēram, 30 m garai apsei šajā pētījumā celma augstums no zemes virskārtas būs 30 cm, kura masa ieskaitīta *BGB* ar pieņēmumu, ka pēc koka nozāģēšanas aptuveni šāda stumbra daļa kopā ar saknēm paliek mežā satrūdēšanai. Savukārt *T. Johansson* metodika pie identiska apses garuma tikai stumbra apakšējos 10 cm no zemes virskārtas ieskaita *BGB*, bet pārējo celma daļu – *AGB* frakcijā. Turklāt *T. Johansson* apses vienādojumi kā vienīgo vienādojumu argumentu izmanto, kas padara vienādojumus mazāk jutīgus pret koku *H* izmaiņām dažādu augšanas apstākļu ietekmes rezultātā. Uz koku *D* balstīti vienādojumi ir piemēroti biomasas aprēķināšanai kokiem ar identisku *D/H* attiecību kā ievāktajam empīriskajam materiālam.

Analizējot bērza *BGB* vienādojumu prognozēšanas precizitāti atkarībā no pielietotā vienādojuma, vienīgi *J. Repola* (2008) vienādojumam raksturīga ievērojama novirze, palielinoties koka vidējam *D*. Tas daļēji varētu būt skaidrojams ar pētījumu metodoloģiskajām atšķirībām, jo *J. Repola* pētījumā saknes izraktas līdz 10 mm diametram, bet pārējos pētījumos koku saknes atraktas rūpīgāk – līdz 2 mm diametram. Interesanti, ka eglei un priedei dažādu vienādojumu *BGB* aprēķini ir diezgan līdzīgi, neskatoties uz iepriekšminētajām atšķirībām empīriskā materiāla ievākšanas metodēs. Pētījuma rezultāti sakrīt ar *A. Smith et al.* (2016) secinājumiem, ka biomasas vienādojumu ģeogrāfiska ekstrapolācija rada kļūdainus biomasas aprēķinus. Daudzi zinātnieki ir pētījuši *AGB* un *BGB* izmaiņas atkarībā no dažādiem faktoriem, secinot, ka koku biomasu ir atkarīga no ģeogrāfiskā platuma un garuma, veģetācijas zonas, ūdens deficīta, gada vidējās temperatūras un citiem faktoriem (Berninger et al., 1995; Wirth et al., 2004; Stegen et al., 2011). Koku augšanas apstākļi Zviedrijas dienvidos ir diezgan līdzīgi augšanas apstākļiem Latvijā un pēc teritoriālā novietojuma ietilpst Eiropas hemiboreālā mežu joslā (Ahti et al., 1968; EEA, 2007). Šajā sakarā viegli ir izskaidrojams, kāpēc Zviedrijā izstrādātie (Marklund, 1988; Petersson, Stahl, 2006) priedes, egles un bērza biomasas vienādojumi Latvijas apstākļos ir precīzāki nekā vienādojumi no Somijas (Repola, 2008, 2009).

Sakarā ar vispārzināmām grūtībām korekti prognozēt sauso zaru biomasu lielu šīs biomasas frakcijas variāciju dēļ (Zianis et al., 2005), darba ietvaros mēs apvienojām dzīvo un sauso zaru frakcijas kopējā *BB*. Sauso zaru īpatsvars no *BB* frakcijas vidēji šajā pētījumā priedei, eglei, bērzam un apsei bija attiecīgi 13.2%, 6.7%, 4.3% un 17.1%. Pētījumā netika novērota būtiska bērza sauso zaru īpatsvara korelācija ar koka parametriem *D* vai *H* (3.6. tab.), līdz ar to var secināt, ka, mainoties koka dimensijām, sauso zaru biomasas frakcijas īpatsvars bērzam gandrīz nemainās. Savukārt pārējām koku sugām, lai gan korelācija ir vāja līdz vidēji stipra, tā ir statistiski būtiska ($p < 0.05$). Visciešāk ar koka parametriem *D* un *H* pozitīvi korelē egles sauso zaru biomasas īpatsvars. Pētījumā atsevišķām eglēm sauso zaru īpatsvars kopējā *BB* sasniedza pat 20%. Izņemot bērzu, pārējām apskatītajām koku sugām vismazākais sauso zaru īpatsvars ir kokiem ar *D* mazāku par 10 cm. Tā kā bērzs ir izteikti gaismas prasīga koku suga, apakšējo zaru atmirsšana bērzam sākas agrāk nekā pārējām koku sugām. Turklāt, atšķirībā no pārējām koku sugām, bērzam korelācija bija negatīva, iezīmējot tendenci samazināties sauso zaru īpatsvaram līdz ar koku *D* un *H* pieaugumu.

3.6. tabula / Table 3.6.

Sauso zaru īpatsvara kopējā zaru biomasā (*BB*) korelācija ar koku krūšaugstuma diametru (*D*) un augstumu (*H*)
Diameter at breast height (DBH) and tree height (H) correlation with proportion of dry branches in total branch biomass (BB)

	<i>Pinus sylvestris</i>		<i>Picea abies</i>		<i>Betula</i> spp.		<i>Populus tremula</i>	
	<i>D / DBH</i>	<i>H</i>	<i>D / DBH</i>	<i>H</i>	<i>D / DBH</i>	<i>H</i>	<i>D / DBH</i>	<i>H</i>
<i>R</i> *	0.30	0.29	0.62	0.66	-0.12	-0.18	0.46	0.53
<i>p</i> **	0.002	0.003	0.000	0.000	0.234	0.063	0.000	0.000

* Spīrmena rangu korelācijas koeficients / *Spearman's rank correlation coefficient*.

** *p* vērtība / *p value*.

Pētījumā aprēķinātās sauso zaru īpatsvara vērtības ir ļoti līdzīgas tām, kuras aprēķinātas pēc *L.G. Marklund* (1988) vienādojumiem, attiecīgi priedei – 13.6%, eglei – 7.6% un bērzam – 4.6%. Turpretī *J. Repola* (2008, 2009) biomasas vienādojumi priedei, eglei un bērzam prognozē nedaudz lielākas sauso zaru īpatsvara vidējās vērtības, attiecīgi 15.1%, 11.5% un 7.1%. Iepriekšminētais liecina, ka nepieciešamības gadījumā sauso zaru biomasu priedei un eglei ir iespējams aprēķināt pēc Zviedrijā izstrādātajiem vienādojumiem, jo Latvijas apstākļos vienādojumu prognozes būs precīzākas nekā vidējās īpatsvara vērtības, kas iegūtas no kopējās zaru biomasas.

Vienādojumu atlikumu sadalījuma struktūra (3.11., 3.12. un 3.13. att.) apstiprināja, ka pētījumā rekomendētie vienādojumi ir pielietojami koku biomasas aprēķiniem plašā *D* amplitūdā un, balstoties un ievāktā empīriskā materiāla daudzveidību, – arī dažādos koku augšanas apstākļos. Tomēr ir apstākļi, kur darba ietvaros izstrādāto vienādojumu

precizitāte ir neskaidra un nepārbaudīta. Izstrādāto vienādojumu piemērotība joprojām nav pārbaudīta nomākto un atmirstošo koku biomasas aprēķiniem, jo tie pētījumā netika iekļauti kā paraugkoki. Nomāktiem un atmirstošiem kokiem savstarpējās konkurences rezultātā ir izveidojies mazāks zaļais vainags nekā pārējai kokaudzei, un prognozējams, ka rekomendētie biomasas vienādojumi pārvērtēs to kopējo biomasu, jo īpaši zaru biomasu. Tāpat paraugkoki netika izvēlēti vietās ar augstu ūdens līmeni slapjās kūdras augsnēs, jo šādās vietās bija apgrūtināta kvalitatīva datu ievākšana. Minētie ierobežojumi jāpatur prātā, aprēķinot *BGB* biomasu kūdras augsnēs, jo šādās augsnēs augušu koku sakņu biomasas parasti ir lielāka nekā minerālaugsnēs (Hakkila, 1972). Apsaimniekotu mežaudžu biomasas prognožu vienādojumi parasti dod kļūdainas prognozes neapsaimniekotās un pārbiezinātās jaunaudzēs (Repola, Ulvcrona, 2014). Tāpēc būtu nepieciešami turpmāki pētījumi, lai novērtētu darba ietvaros izstrādāto vienādojumu piemērotību arī šādos apstākļos.

Neraugoties uz empīriskā materiāla lietošanas ierobežojumiem, pētījumā izstrādāto biomasas vienādojumu salīdzināšana ar līdzīgiem vienādojumiem no Baltijas jūras reģiona (3.14. att.) apstiprināja, ka rekomendētie vienādojumi ticami prognozē biomasu arī lielāku dimensiju kokiem nekā uzmērītajiem paraugkokiem. Darba ietvaros lielākais nozāģētā paraugkoka *D* priedei, eglei un bērzam bija robežās no 36.3–45.2 cm (2.2. tab.), bet *AGB* un *BGB* vienādojumu validēšanā izmantoto koku maksimālais *D* bija 57.3 cm.

3.3. Latvijas kokaudzēs akumulētais ogleklis

Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājuma raksturošanai izmantoti MRM 2012.–2016. gada rezultāti, ietverot II cikla pēdējo divu gadu uzmērījumus un III cikla pirmo trīs gadu uzmērījumus. Izvēlētais aprēķinu periods raksturo Latvijas kokaudžu oglekļa apjomu uz 2016. gadu, un identisks aprēķinu periods ir atspoguļots arī 2018. gada Latvijas veidotajā pārskatā par SEG emisijām un oglekļa uzkrājumiem valstī. Aprēķinos izmantoti pētījumā rekomendētie individuālu koku biomasas vienādojumi, piemērojot tos katram MRM parauglaukumos uzmērītajam kokam atbilstoši sugai. 2018. gada Latvijas veidotajā pārskatā par oglekļa uzkrājumiem valstī kokaudzēs uzkrātais ogleklis rēķināts no MRM parauglaukumu krājas, koksnes reducētā blīvuma un dažādiem biomasas pārrēķinu koeficientiem (UNFCCC, 2018). Kokaudžu oglekļa uzkrājumu aprēķinos izmantoti tikai MRM parauglaukumu dati par zemes kategorijām (pēc MRM klasifikācijas kods 10–14, 62, 64) atbilstoši UNFCCC un Kioto protokola definētajai meža zemes definīcijai. MRM ierīkotajos pastāvīgajos parauglaukumos uzmērīti visi koki sākot no 2.1 cm diametra. Tā kā biomasas vienādojumi pētījumā izstrādāti tikai četrām Latvijā izplatītākajām koku sugām, pārējām sugām vienādojumi piemēroti atbilstoši 3.7. tabulai.

3.7. tabula / Table 3.7.

Mežu resursu monitoringa (MRM) datubāzē esošo koku sugām piemērotie biomasas vienādojumi Latvijas kokaudžu oglekļa aprēķiniem
Biomass equations applied to tree species in the national forest inventories (NFI) database for carbon stock estimates in Latvia

Koku suga <i>Tree species</i>	Sugu grupa <i>Species group</i>	Sugas kods <i>Species code</i>	Pielietotais vienādojums <i>Applied equation</i>
<i>Pinus sylvestris</i>	Skujkoks / <i>Coniferous</i>	1	<i>Pinus sylvestris</i>
<i>Picea abies</i>	Skujkoks / <i>Coniferous</i>	3	<i>Picea abies</i>
<i>Betula</i> spp.	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	4	<i>Betula</i> spp.
<i>Alnus glutinosa</i>	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	6	<i>Populus tremula</i>
<i>Populus tremula</i>	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	8	<i>Populus tremula</i>
<i>Alnus incana</i>	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	9	<i>Populus tremula</i>
<i>Quercus robur</i>	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	10	<i>Betula</i> spp.
<i>Fraxinus excelsior</i>	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	11	<i>Betula</i> spp.
<i>Tilia cordata</i>	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	12	<i>Betula</i> spp.
<i>Larix decidua</i>	Skujkoks / <i>Coniferous</i>	13	<i>Picea abies</i>
<i>Pinus</i> spp.	Skujkoks / <i>Coniferous</i>	14	<i>Pinus sylvestris</i>
<i>Picea</i> spp.	Skujkoks / <i>Coniferous</i>	15	<i>Picea abies</i>
<i>Ulmus</i> spp.	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	16	<i>Betula</i> spp.
<i>Fagus sylvatica</i>	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	17	<i>Betula</i> spp.
<i>Carpinus betulus</i>	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	18	<i>Betula</i> spp.
<i>Populus</i> spp.	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	19	<i>Populus tremula</i>
<i>Salix</i> spp.	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	20	<i>Populus tremula</i>
<i>Salix caprea</i>	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	21	<i>Populus tremula</i>
<i>Pinus sibirica</i>	Skujkoks / <i>Coniferous</i>	22	<i>Pinus sylvestris</i>
<i>Abies alba</i>	Skujkoks / <i>Coniferous</i>	23	<i>Picea abies</i>
<i>Acer platanoides</i>	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	24	<i>Betula</i> spp.
<i>Malus sylvestris</i>	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	51	<i>Betula</i> spp.
<i>Cerasus</i> spp.	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	56	<i>Betula</i> spp.
Citas koku un krūmu sugas <i>Other species</i>	Lapkoks / <i>Deciduous</i>	–	<i>Populus tremula</i>

Pētījumā izstrādātie biomasas vienādojumi attiecināmi uz 85.5% Latvijas kokaudžu krājas, kurā priedes īpatsvars – 33.0%, egles – 19.5%, bērza – 23.7%, bet apses – 9.3%. No pārējo koku sugu krājas īpatsvara, kas Latvijas mežos ir 14.5%, lielāko daļu jeb 12.2% aizņem alkšņu ģints koku sugas baltalksnis (6.2%) un melnalksnis (6.0%). Tā kā abām

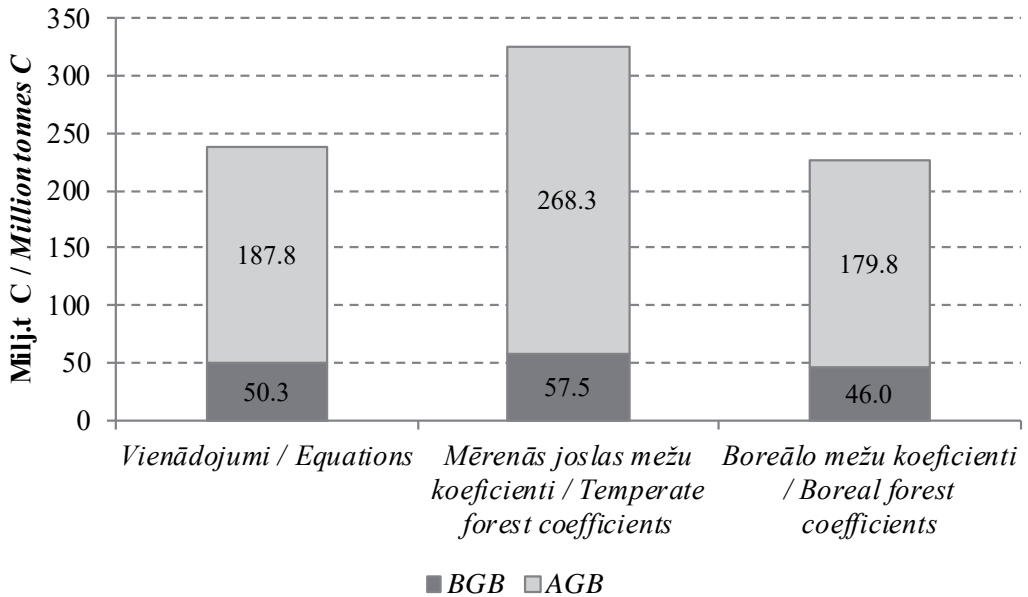
alkšņu ģints sugām netika atrasti oglekļa uzkrājumu aprēķiniem piemēroti biomasas vienādojumi, tiem piemēroti pētījumā izstrādātie apses vienādojumi. Apses vienādojumi abām koku sugām piemēroti, balstoties uz koksnes reducēto blīvumu, kurš alkšņiem pēc literatūrā atrodamās informācijas un pētījuma datiem vairāk atbilst apsei nekā bērzam (3.2. tab.). Zviedrijā, analizējot 24 baltalkšņa un 31 melnalkšņa dabiskas izcelsmes kokaudzes, aprēķinātais vidējais reducētais koksnes blīvums baltalkšnim bija 359 kg m^{-3} , bet melnalkšnim – 427 kg m^{-3} (Johansson, 2005). No iepriekšminētā pētījuma iegūtais abu alkšņu vidējais svērtais blīvums (409 kg m^{-3}) pēc to aizņemtās krājas īpatsvara Latvijā ir ļoti tuvs blīvumam (399.4 kg m^{-3}), kāds ir konstatēts apsei šajā pētījumā. Citā pētījumā atspoguļotas Ziemeļeiropu un Baltijas valstis raksturojošas reducētā blīvuma vērtības, kuras baltalkšnim (360 kg m^{-3}) un melnalkšnim (370 kg m^{-3}) arī norādītas kā tuvākas apsei (380 kg m^{-3}) nevis bērza (480 kg m^{-3}) blīvuma vērtībām (Rytter et al., 2016). Arī pērējām pētījumā neapskatītajām koku sugām (3.7. tab.), tāpat kā alkšņiem, izstrādātie biomasas vienādojumi piemēroti pēc tuvākajām reducētā blīvuma vērtībām, kuras pārējām sugām atrodamas *Dryad* datubāzē (Zanne et al., 2009).

Pētījumā aprēķināts, ka visas Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājuma raksturošanai vidējais svērtais oglekļa saturs koku biomasā ir $49.9 \pm 0.006\%$, kurš aprēķināts pēc rekomendētajām skujkoku un lapkoku oglekļa satura vērtībām mērenās un boreālās joslas mežiem (Thomas, Martin, 2012) un skujkoku un lapkoku biomasas īpatsvara Latvijas mežos. Pētījumā lietotais oglekļa saturs dzīvajā biomasā skujkokiem ir 50.8%, bet lapkokiem 48.8%. Oglekļa saturs dažādām koka frakcijām (stumbrs, zari, saknes) ir nedaudz atšķirīgs, tomēr, ņemot vērā detalizētu pētījumu trūkumu, visām koka frakcijām piemērota identiska oglekļa satura vērtība atbilstoši sugu grupai pēc 3.7. tabulas.

Pētījumā aprēķinātais Latvijas kokaudžu biomasā uzkrātais ogleklis kopā 2016. gadā ir 238.1 ± 3.5 milj. t (3.15. att.). Lielākais īpatsvars (79% jeb 187.8 milj. t) no tā ir akumulēts kokaugu virszemes daļā, kamēr celmos un saknēs akumulēts apmēram 50.3 milj. t oglekļa. Latvijas sastādītajā ziņojumā par oglekļa piesaisti valstī atbilstoši UNFCCC vadlīnijām kokaudzēs uzkrātais ogleklis identiskā aprēķina periodā ir 237.0 milj. t., kurš, neskatoties uz pētījuma un pašreiz spēkā esošās metodikas atšķirībām, ir ļoti līdzīgs. Lielākās abu aprēķinu metožu atšķirības ir skaidrojamas ar atšķirīgajiem pieņēmumiem par oglekļa saturu dzīvajā biomasā. Šajā pētījumā pielietotais vidējais svērtais oglekļa saturs dzīvajā biomasā ir 49.9%, kamēr pašreiz spēkā esošajā metodikā tas ir 52.1%, tādā veidā palielinot kopējos oglekļa uzkrājumus valstī. Aprēķinos piemērojot dzīvās biomasas oglekļa saturu, ko izmanto līdzšinējā aprēķinu metodika, Latvijas kokaudžu akumulētais oglekļa apjoms būtu lielāks par 10.5 milj. t jeb 4.2% un sasniegtu 248.1 milj. t. Tas norāda uz to, ka līdzšinējā aprēķinu metodika nepietiekamā apmērā novērtē kokaudžu biomasu Latvijā.

Salīdzinot Latvijā veikto pētījumu rezultātus par oglekļa saturu priedes, egles, bērza un baltalkšņa biomasas frakcijās (stumbrs, zari un saknes), secināts, ka tas ir bijis robežās no 47.2 līdz 51.7%. Vidējā svērtā oglekļa satura 52.1% lietošana nedaudz pārsniedz iepriekš konstatētās vērtības Latvijā, tomēr jāatzīmē, ka pētījumi Latvija veikti galvenokārt šo koku sugu jaunaudzēs un kokaugu stādījumos lauksaimniecībā neizmantotajās zemēs. Tā kā šobrīd trūkst informācijas par oglekļa satura variēšanu dalījumā pa koku sugām un

biomasas frakcijām visā hemiboreālajā mežu reģionā, Latvijas nacionālajā SEG ziņojumā lietotās oglekļa satura vērtības (50.7–53% atkarībā no koku sugas) pirms izmantošanas būtu jāverificē un jāapraksta anonīmi recenzētos zinātniskos izdevumos, kas līdz šim nav darīti. Tāpēc, pamatojoties uz citu Eiropas valstu oglekļa satura pieņēmumiem to aprēķinu metodikās (1.4. tab.) un jaunākajām atziņām par oglekļa saturu mērenās joslas un boreālajos mežos (Thomas, Martin, 2012), esošajā Latvijas aprēķinu metodikā lietoto oglekļa saturu dzīvajā biomasā būtu ieteicams samazināt uz 48.8% lapkokiem un 50.8% skujukokiem.



3.15. attēls. Uzkrātais ogleklis kokaudžu virszemes biomasā (AGB) un celma/sakņu biomasā (BGB), pielietojot dažādas aprēķinu metodes.

Figure 3.15. Carbon stock in aboveground (AGB) and belowground (BGB) forest biomass using different calculation methods.

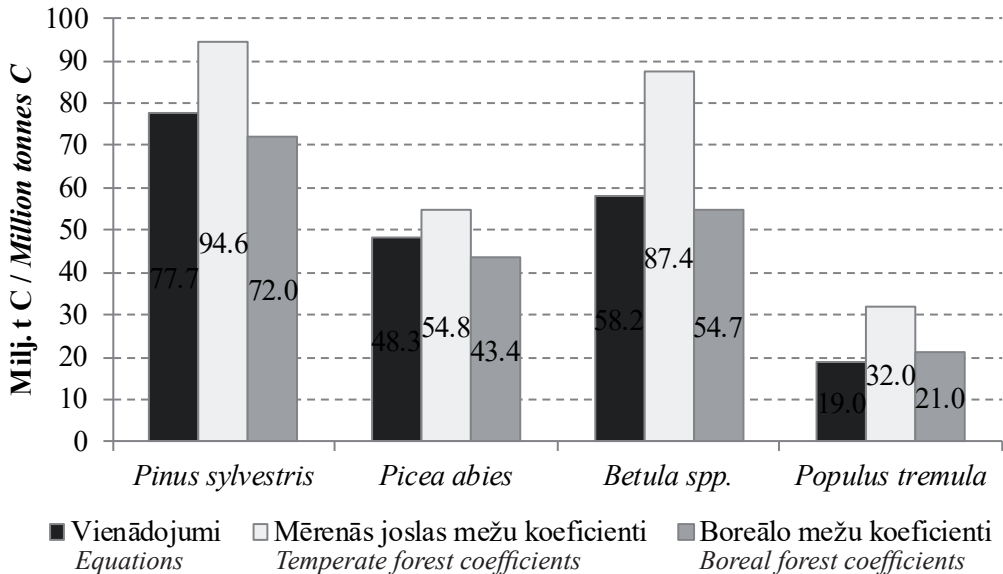
Daudz neprecīzāki Latvijas kokaudžu oglekļa aprēķini bija, lietojot IPCC vadlīniju (Eggleston et al., 2006) piedāvātos biomasas pārrēķina koeficientus mērenās joslas un boreālajiem mežiem (3.15. att.). Lai novērtētu IPCC vadlīniju piedāvāto koeficientu ietekmi uz kokaudžu oglekļa aprēķiniem, visās metodēs piemērots identisks pieņēmums par oglekļa saturu biomasā. Izmantojot mērenās joslas mežu pārrēķinu koeficientus, Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājumi tiek pārvērtēti par 36.9% jeb par 87.8 milj. t. Salīdzinot ar pētījumā izstrādātajiem biomasas vienādojumiem, šie Dienvideiropai piemērotie koeficienti krietni vairāk pārvērtē kokaudžu virszemes daļā akumulēto oglekli (par 42.9%), bet mazāk – kokaudžu celmu un sakņu oglekļa apjomus (par 14.4%). Pretēji ir ar vadlīniju piedāvātajiem boreālo mežu biomasas pārrēķina koeficientiem, kuru izmantošana par 5.2% jeb 12.3 milj. t samazina kokaudzēs uzkrāto oglekli, salīdzinot ar šajā pētījumā lietoto aprēķinu metodiku. Piemērojot šos Ziemeļeiropai paredzētos pārrēķina koeficientus, lielāka

kļūda rodas kokaudžu celma/sakņu daļas oglekļa novērtēšanā (−8.5%), kamēr uzkrātais ogleklis kokaudžu virszemes biomasā tiek novērtēts nedaudz precīzāk ar kļūdu – 4.3%.

IPCC vadlīnijās (Eggleston et al., 2006) pēc teritoriālā novietojuma Latvijai tiek piedāvāti mērenās joslas mežu biomasas aprēķinu un pārrēķinu koeficienti, bet pēc pētījuma aprēķiniem redzams, ka šo pārrēķinu koeficientu izmantošana Latvijas apstākļos nav pieļaujama. Pētījuma izstrādes gaitā, balstoties uz daļēji ievākto empīrisko materiālu, jau 2013. gadā IPCC vadlīniju piedāvātie pārrēķinu koeficienti Latvijai tika koriģēti, jo koku biomasas mērījumi liecināja par būtiskām vadlīniju piedāvāto pārrēķinu koeficientu neatbilstībām. Nākot klāt jaunam empīriskajam materiālam un 2015. gadā noslēdzoties pētījumam “Mežsaimniecisko darbību ietekme uz siltumnīcefekta gāzu emisijām un CO₂ piesaisti”, biomasas aprēķina metodika tika koriģēta vēlreiz. Dažādos aprēķinu etapos izmantoto *BEF* koriģēšana līdz šim ir ļāvusi pakāpeniski uzlabot Latvijas kokaudžu oglekļa aprēķinu metodiku, izvairoties no būtiska akumulētā oglekļa pārvērtēšanas riska. Minētā iemesla dēļ nelielās atšķirības Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājuma aprēķinos starp pētījumā izstrādāto un pašreiz spēkā esošo metodiku ir viegli izskaidrot, jo gan izstrādātie biomasas vienādojumi, gan IPCC vadlīniju koriģētās *BEF* vērtības balstās uz vienu un to pašu empīrisko materiālu. Ir pierādīts, ka, izmantojot individuālu koku biomasas vienādojumus kopā ar MRM datubāzi, iespējams iegūt precīzākas biomasas prognozes, nekā biomasu aprēķinot no kopējās krājas ar *BEF* (Neumann et al., 2016). Līdzīgi kā pētījumā veiktajos aprēķinos, arī Zviedrijas pieredze rāda, ka ar atsevišķu koku biomasas vienādojumiem aprēķinātā kokaudžu *AGB* ir vidēji par 5% lielāka, nekā no kokaudžu krājas datiem aprēķinātā (Jalkanen et al., 2005).

Salīdzinot kokaudžu oglekļa resursus pēc valdošās koku sugas aizņemtās platības, secināts, ka izteikti vairāk tas akumulēts priežu kokaudzēs (3.16. att.). Tas izskaidrojams ar to, ka priede Latvijā aizņem vislielākās meža platības, kā arī skujkoku biomasā oglekļa saturs ir lielāks nekā lapkokos. Darba ietvaros aprēķinātais bērzu, egļu un apšu kokaudzēs uzkrātais ogleklis ir attiecīgi par 19.5 milj. t, 29.4 milj. t un 58.7 milj. t mazāks nekā priedei.

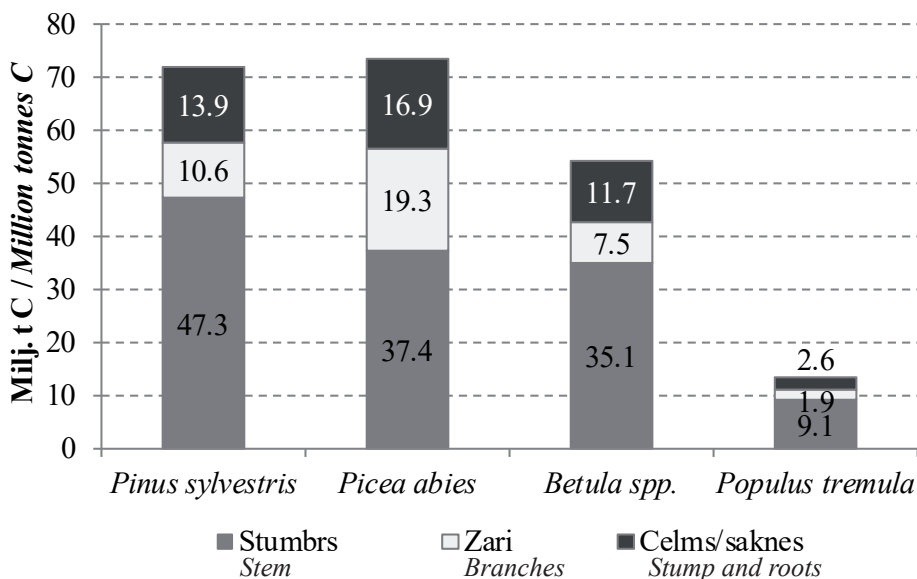
Analizējot IPCC vadlīniju rekomendēto mērenās joslas un boreālo mežu *BEF* ietekmi uz oglekļa aprēķiniem dalījumā pa koku sugām, secināts, ka Dienvideiropai paredzētie jeb mērenās joslas mežu koeficienti pārvērtē oglekli visu sugu audzēs. Visvairāk ogleklis tiek pārvērtēts platībās, kur dominē lapkoki, bērzu audzēs par 50.2% un apšu audzēs par 68.6%, bet mazāk priedes (21.7%) un egles (13.6%) audzēs. Savukārt Ziemeļeiropai paredzētie jeb boreālo mežu pārrēķina koeficienti Latvijas apstākļos nepietiekamā apmērā novērtē biomasu priedes, egles un bērzu audzēs, attiecīgi uzkrātais ogleklis ir par 7.3%, 10% un 6% mazāks salīdzinājumā ar pētījumā izstrādāto aprēķinu metodiku. Pretēji iepriekšminētajām koku sugām, izmantojot boreālo mežu *BEF*, apšu kokaudžu uzkrātais ogleklis tiek pārvērtēts par 10.7%, kas varētu būt skaidrojams ar to, ka Ziemeļeiropā apse kā dominējošā koku suga ir sastopama reti un galvenokārt tā aug tikai piemistrojumā egļu vai bērzu mežos (Heräjärvi, 2009; Rytter et al., 2016). Tā kā *BEF* boreālo mežu reģionam visām lapkoku sugām ir vienādi, acīmredzot tie vairāk piemēroti bērza biomasas raksturošanai, kas Ziemeļeiropā ir izplatītāka koku suga.



3.16. attēls. Uzkrātais ogleklis pēc valdošās koku sugas aizņemtās platības, pielietojot dažādas aprēķinu metodes.

Figure 3.16. Forest stand carbon stock depending on dominant species and calculation methods.

No Latvijas kokaudzēs akumulētā oglekļa lielākais īpatsvars jeb 61% ir uzkrāts skujkoku biomasā. Priedes un egles biomasā kopā akumulēts apmēram 145.5 milj. t oglekļa, kas gandrīz līdzīgi sadalīts pa abām iepriekšminētajām koku sugām (3.17. att.). Lapkoku biomasā akumulēts apmēram 93.1 milj. t oglekļa, tajā skaitā bērzos 54.3 milj. t un apsēs 13.6 milj. t. Pretēji pārējām koku sugām, egles biomasā krietni lielāks oglekļa daudzums akumulēts nestumbra biomasas frakcijās. Egles zaros un saknēs kopā akumulēts apmēram puse jeb 49% no eglēs uzkrātā oglekļa. Priedes, apses un bērza nestumbra biomasas frakcijās atkarībā no sugas akumulēts vien 33–35% no kopējā oglekļa apjoma. Egles nestumbra frakciju lielais apjoms daļēji ir izskaidrojams ar to, ka eglei kā ēncietīgai koku sugai noēnoto zaru atmiršanas process ir lēnāks kā pārējām koku sugām, līdz ar to proporcionāli stumbram tās zaru biomasā ir lielāka.



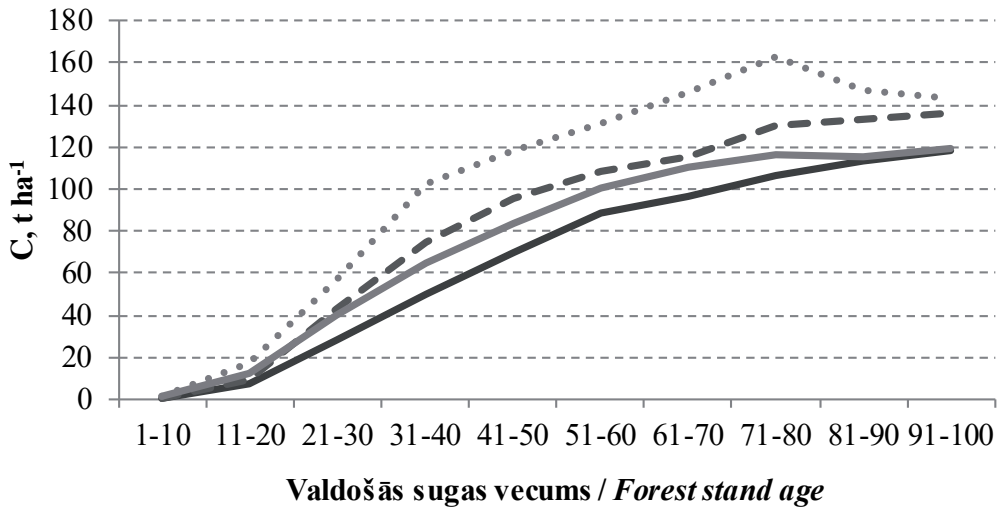
3.17. attēls. Koku stumbrā, zaros un celmos/saknēs uzkrātais ogleklis atkarībā no sugas.

Figure 3.17. Assessment of carbon stock in stem, branches and belowground biomass, depending on species.

Meklējot izskaidrojumu, kāpēc, novērtējot Latvijas kokaudzēs uzkrāto oglekli pēc valdošās koku sugas krājas datiem, tas tiek novērtēts mazāk nekā pēc atsevišķu koku biomasas vienādojumiem, pētījumā analizētas 3.16. un 3.17. attēlā redzamās atšķirības dalījumā pa koku sugām. Salīdzinot uzkrāto oglekli egles biomasā abos iepriekšminētos attēlos, redzams, ka reālais oglekļa uzkrājums eglēs ir par 25.3 milj. t lielāks nekā novērtēts pēc egļu kokaudžu aizņemtās platības. Tas izskaidrojams ar to, ka egle bieži veido otro stāvu vai mistraudzi audzēs, kur dominējošā suga pēc krājas datiem ir cita. Minētajā situācijā egles biomasa tiek pieskaitīta meža nogabalā dominējošai koku sugai. Aprēķinot biomasu pēc valdošās koku sugas krājas datiem, šo faktoru aprēķinos iekļaut nav iespējams, ja vien netiek novērtēta katras koku sugas krāja atsevišķi. Pētījumā no visiem MRM uzmērītajiem parauglaukumiem aprēķināts, ka Latvijā mežos vidēji viens egles stumbra m³ visās biomasas frakcijās kopā ir piesaistījis 1.47 t CO₂, kas ir līdzvērtīgs 0.40 t oglekļa. Pārējām koku sugām kopējā CO₂ un oglekļa piesaiste uz stumbra m³ ir mazāka nekā eglei, attiecīgi priecē tā ir 1.24 un 0.34 t, bērzam – 1.36 un 0.37 t, apsei – 1.00 un 0.27 t. Tā kā egle uz m⁻³ koksnes uzkrāj visvairāk oglekļa tad egles krājas pielīdzināšana valdošajai koku sugai nepietiekamā apmērā novērtēs no kopējās krājas datiem rēķinātos oglekļa apjomus. Vislielākā novirzei no reālās kokaudžu CO₂ piesaistes ir mīksto lapkoku (apses, iespējams, arī baltalkšņu) kokaudzēs, jo CO₂ piesaistes starpība uz stumbra m³ starp egli un mīksto lapkoku sugām ir vislielākā. Iepriekšminēto apstiprina reālais apsēs uzkrātais oglekļa

apjoms (3.17. att.), kurš ir gandrīz par 40% mazāks nekā oglekļa apjoms apšu kokaudzēs, kur apse ir valdošā suga (3.16. att.).

Vidēji Latvijas kokaudzēs akumulēts $67.4 \pm 0.6 \text{ t ha}^{-1}$ oglekļa. Latvijas kokaudzēs uzkrātais oglekļa daudzums ir lielāks salīdzinājumā ar vidējo rādītāju Eiropas boreālajos mežos (54.6 t ha^{-1}), bet mazāks salīdzinājumā ar vidējo rādītāju (76 t ha^{-1}) Eiropas mērenās joslas skujkoku mežos (Thurner et al., 2014). Salīdzinot kokaudžu oglekļa resursus uz platības vienību dalījumā pēc valdošās koku sugas, secināts, ka visvairāk ogleklis uzkrāts priedes audzēs, vidēji 89.2 t ha^{-1} . Egles, bērza un apses kokaudzēs uzkrātā oglekļa apjomi ir nedaudz mazāki nekā priedei, attiecīgi 79.3 t ha^{-1} , 62.9 t ha^{-1} un 69.1 t ha^{-1} . Zināmā mērā tas ir likumsakarīgi, jo priedes kokaudžu vidējais vecums Latvijā ir 73 gadi, kas ir daudz lielāks nekā egles, bērza un apses kokaudzēm, kuru vidējais vecums ir attiecīgi 46, 39 un 31 gadi. Tā kā kokaudzēs uzkrātā oglekļa apjoms ir atkarīgs no audzes vecuma (Law et al., 2003; Kolari et al., 2004), tad, analizējot uzkrāto oglekli platības vienībā, MRM parauglaukumu dati sadalīti pa desmitgadēm atkarībā no valdošās sugas vecuma (3.18. att.).



— *Pinus sylvestris* - - *Picea abies* — *Betula spp.* ···· *Populus tremula*

3.18. attēls. Dažāda vecuma audzēs uzkrātais ogleklis pēc valdošās koku sugas.

Figure 3.18. Carbon stock in forest stands of different ages by dominant tree species.

No MRM parauglaukumu datiem secināms, ka uz platības vienību pie identiska kokaudžu vecuma visvairāk ogleklis akumulēts apses audzēs. Tas izskaidrojams ar to, ka apse, salīdzinot ar priedi, egli un bērzu, ir ātraudzīgāka koku suga un Latvijā aug galvenokārt auglīgās minerālaugsnēs. Koku augšanas apstākļiem ir liela ietekme uz oglekļa piesaisti. Piemēram, kopējais uzkrātais oglekļa apjoms 60–80 gadus vecu priežu audžu biomasā vidēji damaksnī ir 140 t ha^{-1} , bet niedrājā, kur kokaudžu produktivitāte ir zema, uzkrātais oglekļa apjoms ir krietni mazāks – 80 t ha^{-1} (Jansons, 2017). Vislielākais oglekļa uzkrāšanās

un CO₂ piesaistes temps ir 10–40 gadus vecās apses, egles un bērzu audzēs un 10–60 gadus vecās priežu audzēs (3.18. att.). Pieaugot koku vecumam, kokaudžu CO₂ piesaistes temps nedaudz samazinās, bet joprojām vērtējams kā samērā augsts. Interesanti, ka apšu audzēs intensīva oglekļa uzkrāšanās koku biomasā notiek līdz apmēram 80 gadu vecumam, bet sasniedzot šo gadu sliekšni, audzes sāk sabrukt un kļūst par emisiju avotu. Priedes, egles un bērza audzēs intensīva oglekļa uzkrāšanās novērojama apmēram līdz 100, 80 un 70 gadu vecumam, kas praktiski sakrīt ar šo koku sugu noteikto galvenās cirtes vecumu Latvijā, bet, atšķirībā no apses, iepriekšminēto koku sugu audzes arī pēc tam turpina piesaistīt CO₂, tikai oglekļa uzkrāšanās temps ievērojami krītas. Ā. Jansons (2017) savos pētījumos secinājis, ka kopējais uzkrātais oglekļa apjoms pieaugušu priežu audžu biomasā būtiski neatšķiras no pāraugušās audzēs konstatētā, kas liecina par to, ka pēc ciršanas vecuma sasniegšanas arī parastās priedes audzēs ievērojami samazinās koku CO₂ piesaistes temps, tāpat kā eglei un bērzam.

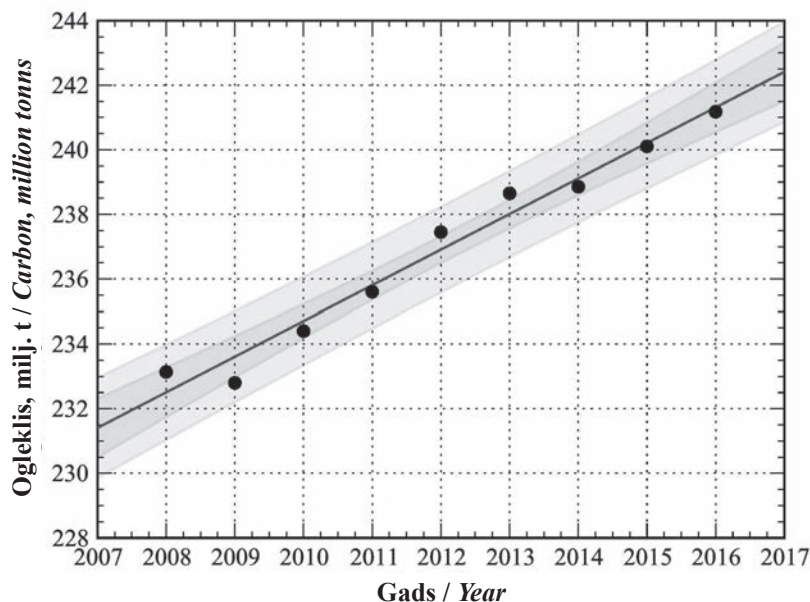
Analizējot pilnu oglekļa aprites ciklu, zinātnieki ir secinājuši, ka pāraugušās audzes patiesībā kļūst par oglekļa emisiju avotu (Goulden et al., 1996; Lindroth et al., 1998), jo to ikgadējā biomasas ražošana samazinās. Ir pierādīts, ka hemiboreālajā reģionā, neskatoties uz ikgadējo biomasas pieaugumu, baltalkšņu audzes jau apmēram pēc 35 gadu vecuma sasniegšanas kļūst par emisiju avotu, kokos uzkrātajam ogleklim nonākot atpakaļ atmosfērā koksnes atmiršanas, augsnes humifikācijas un heterotrofās elpošanas rezultātā (Uri et al., 2017). Apšu kokaudžu CO₂ piesaistes tempa saglabāšanos līdz 80 gadu vecumam daļēji iespējams izskaidrot ar lielu citu koku sugu klātbūtni, uz kuru rēķina ogleklis apses kokaudzēs turpina uzkrāties. Patiesībā reālais apsēs uzkrātais oglekļa apjoms varētu būt arī mazāks, jo apses kokaudzēs pēc 40 gadu sasniegšanas ievērojami palielinās trupējušo koku īpatsvars, kas ne tikai ietekmē iegūstamo sortimentu iznākumu, bet arī uzkrātā oglekļa daudzumu.

Raksturojot Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājumus, aprēķinos ir pieņemts, ka koku stumbri ir bez trupes. Reālajā situācijā mežaudzēs tomēr ir trupējuši un dobumaini koki, kas samazina reālos oglekļa apjomus. Pētījumos Latvijā konstatēts, ka egles stumbros, atkarībā no kokaudzes vecuma, trupējušās koksnes īpatsvars no kopējās stumbru krājas ir robežās no 6% 40 gadu vecumā līdz 16% 100 gadu vecumā (Arhipova et al., 2011). Valsts pētījumu programmas “Lapu koku audzēšanas un racionālas izmantošanas pamatojums, jauni produkti un tehnoloģijas” ietvaros 2008. gadā L. Līpiņa vadībā, analizējot 45–70 gadus vecas apšu audzes, konstatēta kodoltrupes sastopamība 78% koku un noskaidrots, ka trupes aizņemtais tilpums no kopējā stumbra tilpuma var pat pārsniegt 50%. Līdzīgi secinājumi konstatēti arī pētījumā par Amerikas apses (*Populus tremuloides*) trupes izplatību, kur trupe novērota 80% koku 20–50 gadus vecās audzēs, un trupes aizņemtais tilpums var sasniegt 40% no visa stumbra tilpuma (Worrall, Fairweather, 2009). Trupei iespējamās dažādas attīstības pakāpes, sākot no iekrāsojušās koksnes un beidzot ar pilnībā sadalījušos koksni. Apjomīgā pētījumā Igaunijā noskaidrots, ka koksnes sadalīšanās pakāpe būtiski ietekmē koksnes blīvumu, bet oglekļa saturs, koksnei sadaloties, pat nedaudz palielinās (Köster et al., 2015). Iepriekšminētajā pētījumā, salīdzinot svaigas koksnes blīvumu ar tādas koksnes blīvumu, kura, paņemot rokās, sadalās, noskaidrots, ka priedei, eglei un baltalkšnim ir vismazākais

koksnes blīvuma samazinājums, progresējot sadalīšanās pakāpei. Blīvums satrupējušai koksnei iepriekšminētajām koku sugām bija attiecīgi 37%, 30% un 36% no svaigas koksnes blīvuma. Pārējām lapkoku sugām (bērzs, melnalksnis, apse), progresējot koksnes sadalīšanās pakāpei, koksnes blīvums samazinājās ievērojami vairāk, saglabājoties attiecīgi tikai 24%, 23% un 16% no sākotnējā blīvuma. Tā kā stumbra biomasa tiek aprēķināta, tā tilpumu reizinot ar blīvumu, vidējā stumbra blīvuma samazināšanās gadījumā trapes ietekmē kopējais stumbra biomasas un oglekļa daudzums samazināsies. Pasaulē līdz šim nav veikti pētījumi par oglekļa zudumiem stumbra trapes dēļ, tāpēc pētījuma ietvaros un arī sastādot nacionālos ziņojumu par ZIZIMM sektoru valstī atbilstoši UNFCCC vadlīnijām, šādi aprēķini netiek veikti. Iepriekšminētajā pārskatā lielāks uzsvars tiek likts nevis uz kopējiem kokaudžu oglekļa uzkrājumiem, bet gan uz uzkrātā oglekļa izmaiņām pa gadiem vai attiecībā pret kādu periodu.

Latvijas kokaudzēs uzkrātā oglekļa izmaiņu raksturošanai no 2008. līdz 2016. gadam izmantotas piegades slīdošās vidējās vērtības. Konkrētā gada oglekļa uzkrājuma aprēķiniem tiek izmantoti iepriekšējo piecu gadu MRM parauglaukumu uzmērījumi. Lai izveidotu 9 gadus garu datu rindu, uzkrātā oglekļa raksturošanai izmantoti MRM dati, kuru ievākšanas periods 2008. gada raksturošanai datējams no 2004. līdz 2008. gadam, bet 2016. gada raksturošanai – no 2012. līdz 2016. gadam. Katra nākamā gada raksturošanai piegades intervāls nobīdīts par vienu gadu uz priekšu. Atspoguļojot kokaudžu oglekļa uzkrājuma izmaiņas, aprēķinos izmantoti visu MRM parauglaukumu dati, kuros reģistrēti augoši koki, neatkarīgi no zemes kategorijas (iepriekš kategorijas tika atlasītas atbilstoši UNFCCC un Kioto protokola prasībām).

No MRM datiem secināms, ka Latvijas kokaudzēs uzkrātais oglekļa apjoms pēdējo desmit gadu laikā ir palielinājies. Par atskaites punktu pieņemot 2008. gadu, valstī kokaudzēs uzkrātais oglekļa apjoms ir palielinājies apmēram par 8 milj. t, no 233.1–241.2 milj. t (3.19. att.). Salīdzinot MRM 1. un 2. pilna cikla rezultātus, secināms, ka valsts oglekļa uzkrājuma pieaugums nav izskaidrojams tikai ar meža platību pieaugumu valstī, jo arī uz platības vienību akumulētā oglekļa apjoms ir palielinājies. Pēc MRM 1. cikla ietvaros uzmērītajiem parauglaukumiem aprēķināts, ka kokaudzēs vidēji akumulēts $65.8 \pm 0.6 \text{ t ha}^{-1}$ oglekļa, bet pēc 5 gadiem, atkārtoti pārmērot tos pašus parauglaukumus, aprēķināts, ka vidējais oglekļa uzkrājums ir palielinājies līdz $67.1 \pm 0.6 \text{ t ha}^{-1}$. Daļēji oglekļa uzkrājuma pieaugums varētu būt saistīts ar vidējā vecuma pieaugumu, kurš identiskā aprēķinu periodā ir nedaudz pieaudzis no 43.9 ± 0.3 līdz 44.2 ± 0.3 gadiem. Tomēr, vērtējot vidējā vecuma izmaiņu tendences pēc piegades slīdošā vidējā vērtībām, vidējam vecumam tomēr ir tendence samazināties, bet uzkrātais ogleklis platības vienībā ir konstanti palielinājies.



3.19. attēls. Oglekļa uzkrājuma vidējo slīdošo vērtību dinamika Latvijā atkarībā no aprēķinu perioda.

Figure 3.19. Changes in carbon stock depending on the calculation period.

Ja Latvijas kokaudzēs uzkrāto oglekli aprēķina, atlasot MRM parauglaukumus atbilstoši UNFCCC un Kioto protokola prasībām, uzkrājums ir par 3.1 milj. t mazāks nekā gadījumā, ja aprēķinos izmanto visus MRM parauglaukumus, kuros aug koki. Starpība veidojas jo, piemēram, ceļa malās, grāvju trasēs, upju krastos, laucēs u. c. zemes vienībās kokaudžu biomasā uzkrātais ogleklis, atbilstoši UNFCCC un Kioto protokola prasībām, tiek ieskaitīts nevis meža zemēs, bet citās zemes kategorijas (apbūve, mitrājs, pļava u. c.). Lai gan aprēķinu starpība ir vien 1.3%, tomēr, aprakstot kokaudzes kā oglekļa krātuvi, nepieciešams precīzēt aprēķina metodi.

SECINĀJUMI

1. Priedei un bērzam novērota izteikta stumbra koksnes blīvuma samazināšanās galotnes virzienā. Eglei un apsei koksnes blīvums samazinās līdz 30–40% no relatīvā koka augstuma un virzienā uz galotni tālāk pakāpeniski pieaug. Stumbra šķērsgriezumā koku sugām koksnes blīvums palielinās virzienā no serdes uz mizu.
2. Analizētajām koku sugām stumbra vidējais mizas blīvums būtiski atšķiras no vidējā koksnes blīvuma. Vidējā koksnes blīvuma lietošana stumbra biomasas aprēķinos veido vidēji 1.5–4.5% kļūdu, atkarībā no koku sugas. Vidējais svērtais stumbra reducētais blīvums priedei ir 380.5 kg m^{-3} , eglei 368.9 kg m^{-3} un bērzam 481.7 kg m^{-3} un apsei 399.4 kg m^{-3} .
3. Celma/sakņu un virszemes biomasas attiecība mainās atkarībā no koku dimensijām, tādēļ konstantu biomasas pārrēķinu koeficienta pielietošana var radīt sistemātisku kļūdu oglekļa uzkrājuma aprēķinos. Celma, baltsakņu un sīko sakņu īpatsvars kopējā visu koku sugu biomasā vidēji ir 20%. Bērzam un apsei lielāks celma/sakņu biomasas īpatsvars ir jauniem kokiem, bet priedei un eglei – pieaugušiem kokiem.
4. Ziemeļvalstīs izstrādāto vienādojumu izmantošana Latvijas apstākļos veido 4.7–61.7% kļūdu, atkarībā no koku sugas un virszemes vai celma/sakņu biomasas frakcijas. Tāpēc kokaudžu oglekļa uzkrājumu raksturošanai darba ietvaros izstrādāti Latvijas teritorijai piemēroti biomasas aprēķina vienādojumi, kuri lietojami plašā koku dimensiju amplitūdā.
5. Starpvalstu klimata pārmaiņu padomes 2006. gada SEG inventarizācijas vadlīniju piedāvātie mērenās joslas mežu biomasas pārrēķina koeficienti Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājumus palielina par 36.9% jeb par 87.8 milj. t, bet boreālo mežu biomasas pārrēķina koeficientu lietošana par 5.2% jeb 12.3 milj. t samazina oglekļa uzkrājuma aprēķinus, salīdzinot ar šajā pētījumā izstrādātajiem vienādojumiem.
6. Atbilstoši SEG emisiju ziņojumos pielietotajai meža definīcijai, oglekļa uzkrājumi Latvijas kokaudžu biomasā 2016. gadā bija 238.1 ± 3.5 milj. t.

REKOMENDĀCIJAS

1. Sagatavojot nacionālo SEG inventarizācijas ziņojumu atbilstoši UNFCCC prasībām, Latvijas kokaudžu biomasas aprēķināšanai ieteicams izmantot pētījumā izstrādātos biomasas vienādojumus, jo pašreiz spēkā esošā biomasas aprēķina metodika nepietiekamā apmērā novērtē kokaudžu biomasu Latvijā.
2. Latvijā un visā hemiboreālajā mežu reģionā trūkst informācijas par oglekļa satura variēšanu dalījumā pa koku sugām un biomasas frakcijām. Tāpēc, lai izvairītos no oglekļa uzkrājuma pārvērtēšanas riskiem, Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājuma aprēķiniem ieteicams lietot mēreno un boreālo mežu vidējās oglekļa satura vērtības skujkokiem – $50.8 \pm 0.6\%$ un lapkokiem – $48.8 \pm 0.6\%$.
3. Biomasas vienādojumi izstrādāti četrām Latvijā izplatītākajām koku sugām. Pārējo Latvijā sastopamo koku sugu biomasas aprēķiniem ieteicams izmantot pētījumā izstrādātos vienādojumus, piemērojot tos attiecīgi pēc līdzīgākajām stumbra reducētā blīvuma vērtībām skujkokiem un lapkokiem.

LITERATŪRA

- Aboal, J.R., Arévalo, J.R., and Fernández, Á., 2005. Allometric relationships of different tree species and stand above ground biomass in the Gomera laurel forest (Canary Islands). *Flora* 200(3): 264–274. <http://doi.org/10.1016/j.flora.2004.11.001>.
- Addo-Danso, S.D., Prescott, C.E., and Smith, A.R., 2016. Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: A review. *Forest Ecology and Management* 359: 332–351. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.015>.
- Aff-Khouri, E., Camara-Obregon, A., Canga, E., and Dieguez-Aranda, I., 2013. Above-ground biomass equations for *Pinus radiata* D. Don. *Forest Systems* 22(3): 408–415.
- Ahti, T., Hämet-Ahti, L., and Jalas, J., 1968. Vegetation zones and their sections in northwestern Europe. *Annales Botanici Fennici* 3: 169–211.
- Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* 19(6): 716–723. <http://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>.
- Albaugh, T.J., Bergh, J., Lundmark, T., Nilsson, U., Stape, J.L., Allen, H.L., and Linder, S., 2009. Do biological expansion factors adequately estimate stand-scale aboveground component biomass for Norway spruce? *Forest Ecology and Management* 258(12): 2628–2637. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.021>.
- Albert, K., Annighöfer, P., Schumacher, J., and Ammer, C., 2014. Biomass equations for seven different tree species growing in coppice-with-standards forests in Central Germany. *Scandinavian Journal of Forest Research* 29(3): 210–221. <http://doi.org/10.1080/02827581.2014.910267>.
- Alteyrac, J., Zhang, S., Cloutier, A., and Ruel, J.-C., 2005. Influence of stand density on ring width and wood density at different sampling heights in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). *Wood and Fiber Science* 37(1): 83–94.
- Alvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., de las Salas, G., del Valle, I., ... Rodríguez, L., 2012. Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management* 267: 297–308. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>.
- Andersen, H.-E., Reutebuch, S.E., and McGaughey, R.J., 2006. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing* 32(5): 355–366. <http://doi.org/10.5589/m06-030>.
- Anderson, J.E., Plourde, L.C., Martin, M.E., Braswell, B.H., Smith, M.L., Dubayah, R.O., ... Blair, J.B., 2008. Integrating waveform lidar with hyperspectral imagery for inventory of a northern temperate forest. *Remote Sensing of Environment* 112(4): 1856–1870. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2007.09.009>.
- Arhipova, N., Gaitnieks, T., Donis, J., Stenlid, J., and Vasaitis, R., 2011. Butt rot incidence, causal fungi, and related yield loss in *Picea abies* stands of Latvia. *Canadian Journal of Forest Research* 41(12): 2337–2345. <http://doi.org/10.1139/x11-141>.
- Baldasso, M., Birigazzi, L., and Henry, M., 2012. Tutorial for Tree Allometric Equation Database Development. Rome, Italy.
- Bārdulis, A., 2013. Sakņu biomasas izpēte sausieņu priežu (*Pinus sylvestris*) jaunaudzēs. Promocijas darbs, Latvijas Lauksaimniecības Universitāte.
- Bārdulis, A., Daugaviete, M., Lazdiņš, A., Bārdule, A., un Liepa, I., 2011. Biomasas struktūra un ogleklļa uzkrāšanās virszemes un sakņu biomasā baltalkšņa *Alnus incana* (L.) Moench. jaunaudzēs lauksaimniecības zemēs. *Mežzinātne* 23: 71–88.
- Bārdulis, A., Jansons, Ā., Bārdule, A., Zeps, M., and Lazdiņš, A., 2017. Assessment of Carbon Content in Root Biomass in Scots Pine and Silver Birch Young Stands of Latvia. *Baltic Forestry* 23(2): 482–489.
- Bārdulis, A., Lazdiņa, D., Daugaviete, M., Bārdule, A., Daugavietis, U., and Rozītis, G., 2015. Above ground and below ground biomass in grey alder *Alnus incana* (L.) Moench. young stands on agricultural land in central part of Latvia. *Agronomy Research* 13(2): 277–286.
- Bartelink, H.H., 1996. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. *Forest Ecology and Management* 86(1–3): 193–203. [http://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03783-8](http://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03783-8).
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., and Walker, S., 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67(1): 48. <http://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>.
- Batjes, N.H., 2014. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 65(1): 10–21. <http://doi.org/10.1111/ejss.12114>.

- Bejjere, G., Defais, M., Fišers, M., Flečers, D., Menks, Ē., Jēgers, F., ... Veinendāls, K., 2006. Samaziniet klimata izmaiņas: lietojiet koksni! Rīga: Zaļās mājās.
- Bergstedt, A., and Olesen, P.O., 2000. Models for Predicting Dry Matter Content of Norway spruce. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15: 633–644. <http://doi.org/10.1080/02827580050216888>.
- Berndes, G., Bird, D.N., and Cowie, A.L., 2011. Bioenergy, Land Use Change and Climate Change Mitigation. Background Technical Report. Paris: International Energy Agency (IEA).
- Berninger, F., Nikinmaa, E., Hari, P., Mencuccini, M., and Grace, J., 1995. Evaporative demand determines branchiness of Scots pine. *Oecologia* 102(2): 164–168. <http://doi.org/10.1007/BF00333247>.
- Blujdea, V.N.B., Pilli, R., Dutca, I., Ciuvat, L., and Abrudan, I.V., 2012. Allometric biomass equations for young broadleaved trees in plantations in Romania. *Forest Ecology and Management* 264: 172–184. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.042>.
- Boot-Handford, M.E., Abanades, J.C., Anthony, E.J., Blunt, M.J., Brandani, S., Mac Dowell, N., ... Fennell, P.S., 2014. Carbon capture and storage update. *Energy & Environmental Science* 7(1): 130–189. <http://doi.org/10.1039/C3EE42350F>.
- Boyd, P.W., Law, C.S., Wong, C.S., Nojiri, Y., Tsuda, A., Levasseur, M., ... Yoshimura, T., 2004. The decline and fate of an iron-induced subarctic phytoplankton bloom. *Nature* 428: 549–553. <http://doi.org/10.1038/nature02437>.
- Breidenich, C., Magraw, D., Rowley, A., and Rubin, J.W., 1998. The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. *The American Journal of International Law* 92(2): 315–331.
- Bronisz, K., Strub, M., Cieszewski, C., Bijak, S., Bronisz, A., Tomusiak, R., ... Zasada, M., 2016. Empirical equations for estimating aboveground biomass of *Betula pendula* growing on former farmland in central Poland. *Silva Fennica* 50(4): article id 1559. <http://doi.org/10.14214/sf.1559>.
- Brown, S., and Lugo, A.E., 1984. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science* 223(4642): 1290–1293. <http://doi.org/10.1126/science.223.4642.1290>.
- Burnham, K.P., and Anderson, D.R., 2002. Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach. Model selection & Multimodel inference. New York: Springer. ISBN 978-0-387-22456-5.
- Cabeza, L.F., Barreneche, C., Miró, L., Morera, J.M., Bartolí, E., and Fernández, A.I., 2013. Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23: 536–542. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.017>.
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H., Baumgardner, G.A., Cairns, M.A., Brown, S., ... Baumgardner, G.A., 1997. Root Biomass Allocation in the World 's Upland Forests. *Oecologia* 111(1): 1–11. <http://doi.org/10.1007/s004420050201>.
- Chave, J., 2005. Measuring wood density for tropical forest trees. A field manual. Toulouse, France: Sixth Framework Programme (2002–2006), Lab. Evolution et Diversité Biologique Université Paul Sabatier.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., ... Yamakura, T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145(1): 87–99. <http://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B.C., ... Vieilledent, G., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology* 20(10): 3177–3190. <http://doi.org/10.1111/gcb.12629>.
- Chisholm, S.W., 2001. Dis-Crediting Ocean Fertilization. *Science* 294(5541): 309–310. <http://doi.org/10.1126/science.1065349>.
- Chojnacky, D.C., Heath, L.S., and Jenkins, J.C., 2014. Updated generalized biomass equations for North American tree species. *Forestry* 87(1): 129–151. <http://doi.org/10.1093/forestry/cpt053>.
- Cienciala, E., Černý, M., Tatarinov, F., Apltauer, J., and Exnerová, Z., 2006. Biomass functions applicable to Scots pine. *Trees* 20: 483–495. <http://doi.org/10.1007/s00468-006-0064-4>.
- Cifuentes-Jara, M., Henry, M., Réjou-Méchain, M., Wayson, C., Zapata-Cuartas, M., Piotto, D., ... Westfall, J., 2015. Guidelines for documenting and reporting tree allometric equations. *Annals of Forest Science* 72(6): 763–768. <http://doi.org/10.1007/s13595-014-0415-z>.
- Claesson, S., Sahlén, K., and Lundmark, T., 2001. Functions for biomass estimation of young *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula* spp. from stands in northern Sweden with high stand densities. *Scandinavian Journal of Forest Research* 16(2): 138–146. <http://doi.org/10.1080/028275801300088206>.
- Clark, D., Brown, S., Kicklighter, D.W., Chambers, J.Q., Thomlinson, J.R., and Ni, J., 2001. Measuring net primary production in forest concepts and field methods. *Ecological Applications* 11(2): 356–370. <http://doi.org/10.2307/3060894>.

- Clark, M.L., Roberts, D.A., Ewel, J.J., and Clark, D.B., 2011. Estimation of tropical rain forest aboveground biomass with small-footprint lidar and hyperspectral sensors. *Remote Sensing of Environment* 115(11): 2931–2942. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.029>.
- Cleveland, W.S., 1979. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association* 74(368): 829–836. <http://doi.org/10.2307/2286407>.
- Cretí, A., and Joëts, M., 2017. Multiple bubbles in the European Union Emission Trading Scheme. *Energy Policy* 107: 119–130. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.018>.
- Daugaviete, M., 2010. Biomasas uzkrāšanās baltalkšņa (*Alnus incana* (L.) Moench.) jaunaudzēs. *Mežzinātne* 21: 16–30.
- Daugaviete, M., Gaitnieks, T., Kļaviņa, D., un Teliševa, G., 2008. Oglekļa akumulācija virszemes un sakņu biomasā bērza, baltalkšņa, priedes un egles jaunaudzēs lauksaimniecības zemēs. *Mežzinātne* 18: 35–52.
- Di Cosmo, L., Gasparini, P., and Tabacchi, G., 2016. A national-scale, stand-level model to predict total above-ground tree biomass from growing stock volume. *Forest Ecology and Management* 361: 269–276. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.008>.
- Dibdiakova, J., and Vadla, K., 2012. Basic density and moisture content of coniferous branches and wood in Northern Norway. *EPJ Web of Conferences* 33: 02005. <http://doi.org/10.1051/epjconf/20123302005>.
- Dobson, M.C., Ulaby, F.T., LeToan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E.S., and Christensen, N., 1992. Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30(2): 412–415. <http://doi.org/10.1109/36.134090>.
- Dong, J., Kaufmann, R.K., Myneni, R.B., Tucker, C.J., Kauppi, P.E., Liski, J., ... Hughes, M.K., 2003. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: Carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sensing of Environment* 84(3): 393–410. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00130-X](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00130-X).
- Drēska, A., Līpiņš, L., un Sarmulis, Z., 2003. Priedes un egles stumbru mizas biežums. *Mežzinātne* 12: 131–137.
- Ebuy, J., Lokombe, J.P., Ponette, Q., Sonwa, D., and Picard, N., 2011. Allometric equation for predicting aboveground biomass of three tree species. *Journal of Tropical Forest Science* 23(2): 125–132.
- EEA, 2007. *European Forest Types. Categories and types for sustainable forest management reporting and policy. 2nd edition.* European Environment Agency (EEA) Technical report, Vol. 9. https://www.foresteurope.org/docs/other_meetings/2006/wfc/WFC_4_eea_technical_report_92006.pdf [Cited 15.12.2019.].
- Eggleston, H., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K., 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Agriculture, Forestry and other land-use. Japan: IGES, Vol. 4.
- Elfving, B., Ulvcróna, K.A., and Egnell, G., 2017. Biomass equations for lodgepole pine in northern Sweden. *Canadian Journal of Forest Research* 47(1): 89–96. <http://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0131>.
- Ene, L.T., Næsset, E., Gobakken, T., Gregoire, T.G., Ståhl, G., and Nelson, R., 2012. Assessing the accuracy of regional LiDAR-based biomass estimation using a simulation approach. *Remote Sensing of Environment* 123: 579–592. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.017>.
- Erickson, J.R., 1972. The moisture content and specific gravity of the bark and wood of northern pulpwood species. USDA forest service research note NC-141.
- European Commission, 2016. The EU Emissions Trading System (EU ETS). <http://doi.org/10.2834/6083>.
- EUROSTAT, 2017. Europe in figures – Eurostat yearbook 2017. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Europe_in_figures_-_Eurostat_yearbook [Cited 5 Feb 2017].
- Falkowski, P., 2000. The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System. *Science* 290(5490): 291–296. <http://doi.org/10.1126/science.290.5490.291>.
- Fan, Y., Jia, J.J., Wang, X., and Xu, J.H., 2017. What policy adjustments in the EU ETS truly affected the carbon prices? *Energy Policy* 103: 145–164. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.008>.
- FAO, 2011. State of Europe's forests 2011. Status & Trends in Sustainable Forest Management in Europe. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>. https://www.foresteurope.org/documentos/State_of_Europes_Forests_2011_Report_Revised_November_2011.pdf. [Cited 15.12.2019.].
- FAO, 2014. Manual for visual assessment of forest crown condition. <http://www.fao.org/3/a-i4214e.pdf>. [Cited 15.12.2019.].
- Federici, S., Vitullo, M., Tulipano, S., De Lauretis, R., and Seufert, G., 2008. An approach to estimate carbon stocks change in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case. *IForest – Biogeosciences and Forestry* 1(2): 86–95. <http://doi.org/10.3832/ifor0457-0010086>.

- Feldpausch, T.R., Banin, L., Phillips, O.L., Baker, T.R., Lewis, S.L., Quesada, C.A., ... Lloyd, J., 2011. Height-diameter allometry of tropical forest trees. *Biogeosciences* 8(5): 1081–1106. <http://doi.org/10.5194/bg-8-1081-2011>.
- Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., and Hirano, Y., 2011. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *Forest Ecology and Management* 262(11): 2008–2023. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.042>.
- Forrester, D.I., Tachauer, I.H.H., Annighoefer, P., Barbeito, I., Pretzsch, H., Ruiz-Peinado, R., ... Sileschi, G.W., 2017. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management* 396: 160–175. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011>.
- Freund, P., and Ormerod, W.G., 1997. Progress toward storage of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management* 38(Supplement): S199–S204. [http://doi.org/10.1016/S0196-8904\(96\)00269-5](http://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00269-5).
- Gardiner, B., Leban, J.M., Auty, D., and Simpson, H., 2011. Models for predicting wood density of British-grown Sitka spruce. *Forestry* 84(2): 119–132. <http://doi.org/10.1093/forestry/cpq050>.
- Garnett, M.H., Ineson, P., Stevenson, A.C., and Howard, D.C., 2001. Terrestrial organic carbon storage in a British moorland. *Global Change Biology* 7(4): 375–388. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2001.00382.x>.
- Gasparini, P., and Di Cosmo, L., 2015. Forest carbon in Italian forests: Stocks, inherent variability and predictability using NFI data. *Forest Ecology and Management* 337: 186–195. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.012>.
- Gibbs, H.K., Brown, S., Niles, J.O., and Foley, J.A., 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters* 2(4): 045023. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023>.
- Gorte, R.W., 2009. Carbon Sequestration in Forests. *Congressional Research Service* 4: 2–37.
- Goulden, M.L., Munger, J.W., Fan, S.M., Daube, B.C., and Wofsy, S.C., 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology* 2(3): 169–182. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00070.x>.
- Grassi, G., House, J., Dentener, F., Federici, S., den Elzen, M., and Penman, J., 2017. The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. *Nature Climate Change* 7(3): 220–226. <http://doi.org/10.1038/nclimate3227>.
- Greene, C.H., and Pershing, A.J., 2007. Climate drives sea change. *Science* 315(5815): 1084–1085. <http://doi.org/10.1126/science.1136495>.
- Gren, I.-M., and Zeleke, A.A., 2016. Policy design for forest carbon sequestration: A review of the literature. *Forest Policy and Economics* 70: 128–136. <http://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.06.008>.
- Gustavsson, L., Pingoud, K., and Sathre, R., 2006. Carbon dioxide balance of wood substitution: Comparing concrete- and wood-framed buildings. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11(3): 667–691. <http://doi.org/10.1007/s11027-006-7207-1>.
- Hakkila, P., 1972. Mechanized Harvesting of Stumps and Roots: A Sub-project of the Joint Nordic Research Programme for the Utilization of Logging Residues. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 77: 71.
- Hakkila, P., 1979. Wood density surveys and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 96(3): 59.
- Hakkila, P., 1989. Utilization of Residual Forest Biomass. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-74072-5>.
- Hakkila, P., and Uusvaara, O., 1968. On the basic density of plantation-grown Norway spruces. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 66(6): 1–23.
- Hawkins, E., Ortega, P., Suckling, E., Schurer, A., Hegerl, G., Jones, P., ... van Oldenborgh, G.J., 2017. Estimating changes in global temperature since the preindustrial period. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98(9): 1841–1856. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0007.1>.
- Henry, M., Besnard, A., Asante, W.A., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Valentini, R., ... Saint-André, L., 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management* 260(8): 1375–1388. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.040>.
- Henry, M., Bombelli, A., Trotta, C., Alessandrini, A., Birigazzi, L., Sola, G., ... Saint-André, L., 2013. GlobAllomeTree: International platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment. *IForest* 6(6): 326–330. <http://doi.org/10.3832/ifer0901-006>.
- Herajarvi, H., 2004. Variation of basic density and brinell hardness within mature Finnish *Betula pendula* and *B. pubescens* stems. *Wood and Fiber Science* 36(2): 216–227.

- Heräjärvi, H., 2009. Wood product manufacture potential of European and hybrid aspen in Finland. In: Proceedings of the 5th meeting of the Nordic-Baltic Network in Wood Material Science and Engineering (WSE), October 1–2, 2009, Copenhagen, Denmark. Vol. 49, pp. 121–126.
- Heräjärvi, H., and Junkkonen, R., 2006. Wood density and growth rate of European and hybrid aspen in southern Finland. *Baltic Forestry* 12(1): 2–8.
- Houghton, R.A., Hall, F., and Goetz, S.J., 2009. Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 114(G2): G00E03. <http://doi.org/10.1029/2009JG000935>.
- Huijgen, W.J.J., and Comans, R.N.J., 2003. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. *Environmental science & technology* 43.
- Hulme, M., 2016. 1.5°C and climate research after the Paris Agreement. *Nature Climate Change* 6(3): 222–224. <http://doi.org/10.1038/nclimate2939>.
- Hunter, M.O., Keller, M., Victoria, D., and Morton, D.C., 2013. Tree height and tropical forest biomass estimation. *Biogeosciences* 10(12): 8385–8399. <http://doi.org/10.5194/bg-10-8385-2013>.
- Hunziker, M., Sigurdsson, B.D., Halldorsson, G., Schwanghart, W., and Kuhn, N., 2014. Biomass allometries and coarse root biomass distribution of mountain birch in southern Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences* 27: 111–125.
- Hyde, P., Dubayah, R., Walker, W., Blair, J.B., Hofton, M., and Hunsaker, C., 2006. Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy. *Remote Sensing of Environment* 102(1–2): 63–73. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.021>.
- Ilic, J., Boland, D., McDonald, M., Downes, G., and Blakemore, P., 2000. Woody density: Phase 1 – State of knowledge. NCAS technical report no. 18.
- IPCC, 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Japan: IGES.
- IPCC, 2005. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Vol. 2.
- Jackson, R.B., 2005. Trading Water for Carbon with Biological Carbon Sequestration. *Science* 310(5756): 1944–1947. <http://doi.org/10.1126/science.1119282>.
- Jackson, R.B., Canadell, J., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E., and Schulze, E.D., 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108(3): 389–411. <http://doi.org/10.1007/BF00333714>.
- Jalkanen, A., Makipaa, R., Stahl, G., Lehtonen, A., and Petersson, H., 2005. Estimation of the biomass stock of trees in Sweden: comparison of biomass equations and age-dependent biomass expansion factors. *Annals of Forest Science* 62(8): 845–851. <http://doi.org/10.1051/forest:2005075>.
- Jansons, Ā., 2017. Siltumnīcefekta gāzu emisiju un CO₂ piesaistes novērtējums vecās mežaudzēs. Pārskats par pētījuma 2017. gada rezultātiem. Salaspils: LVMI Silva.
- Jenkins, J.C., Chojnacky, D.C., Heath, L.S., and Birdsey, R.A., 2003. National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science* 49(1): 12–35.
- Jenkins, J.C., Chojnacky, D.C., Heath, L.S., and Birdsey, R.A., 2004. Comprehensive Database of Diameter-based Biomass Regressions for North American Tree Species. General Technical Report NE-319. Newtown Square, PA: Forest Service, Northeastern Research Station.
- Johansson, K., 1993. Influence of initial spacing and tree class on the basic density of *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 8(1–4): 18–27. <http://doi.org/10.1080/02827589309382752>.
- Johansson, T., 2000. Biomass equations for determining fractions of European aspen growing on abandoned farmland and some practical implications. *Biomass and Bioenergy* 18(2): 147–159. [http://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00078-1](http://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00078-1).
- Johansson, T., 2002. Increment and biomass in 26- to 91-year-old European aspen and some practical implications. *Biomass and Bioenergy* 23(4): 245–255. [http://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00056-9](http://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00056-9).
- Johansson, T., 2005. Stem volume equations and basic density for grey alder and common alder in Sweden. *Forestry* 78(3): 249–262. <http://doi.org/10.1093/forestry/cpi023>.
- Johansson, T., 2007. Biomass production and allometric above- and below-ground relations for young birch stands planted at four spacings on abandoned farmland. *Forestry* 80(1): 41–52. <http://doi.org/10.1093/forestry/cpl049>.
- Jones, D.A., and O'Hara, K.L., 2012. Carbon density in managed coast redwood stands: Implications for forest carbon estimation. *Forestry* 85(1): 99–110. <http://doi.org/10.1093/forestry/cpr063>.
- Jyske, T., Mäkinen, H., and Saranpää, P., 2008. Wood density within Norway spruce stems. *Silva Fennica* 42(3): 439–455. <http://doi.org/10.14214/sf.248>.

- Karki, T., 2001. Variation of wood density and shrinkage in European aspen (*Populus tremula*). Holz Als Roh- und Werkstoff 59(1/2): 79–84.
- Kellndorfer, J.M., Walker, W.S., LaPoint, E., Kirsch, K., Bishop, J., and Fiske, G., 2010. Statistical fusion of lidar, InSAR, and optical remote sensing data for forest stand height characterization: A regional-scale method based on LVIS, SRTM, Landsat ETM+, and ancillary data sets. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 115(G2): 1–10. <http://doi.org/10.1029/2009JG000997>.
- Klara, S.M., Srivastava, R.D., and McIlvried, H.G., 2003. Integrated collaborative technology development program for CO₂ sequestration in geologic formations – United States Department of Energy R&D. Energy Conversion and Management 44(17): 2699–2712. [http://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00042-6](http://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00042-6).
- Köhl, M., and Frühwald, A., 2009. Permanent wood sequestration: No solution to the global carbon dioxide problem. ChemSusChem 2(7): 609–613. <http://doi.org/10.1002/cssc.200800240>.
- Kolari, P., Pumpanen, J., Rannik, Ü., Ilvesniemi, H., Hari, P., and Berninger, F., 2004. Carbon balance of different aged Scots pine forests in Southern Finland. Global Change Biology 10(7): 1106–1119. <http://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00797.x>.
- Kops, L., 1997. Būvkokos. Rīga: Mācību apgāds.
- Korsmo, H., 1995. Weight equations for determining biomass fractions of young hardwoods from natural regenerated stands. Scandinavian Journal of Forest Research 10(1–4): 333–346. <http://doi.org/10.1080/02827589509382900>.
- Köster, K., Metslaid, M., Engelhart, J., and Köster, E., 2015. Dead wood basic density, and the concentration of carbon and nitrogen for main tree species in managed hemiboreal forests. Forest Ecology and Management 354: 35–42. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.039>.
- Kozak, A., 1970. Methods for ensuring additivity of biomass components by regression analysis. The Forestry Chronicle 46(5): 402–405. <http://doi.org/10.5558/tfc46402-5>.
- Kumar, R., Pandey, S., and Pandey, A., 2006. Plant roots and carbon sequestration. Current Science 91(7): 885–890.
- Kumar, R., Rawat, K.S., Singh, J., Singh, A., and Rai, A., 2013. Soil aggregation dynamics and carbon sequestration. Journal of Applied and Natural Sciences 5(1): 250–267.
- Laasasenaho, J., Melkas, T., and Aldén, S., 2005. Modelling bark thickness of *Picea abies* with taper curves. Forest Ecology and Management 206(1–3): 35–47. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.058>.
- Lackner, K.S., 2003. A Guide to CO₂ Sequestration. Science 300(5626): 1677–1678. <http://doi.org/10.1126/science.1079033>.
- Lal, R., 2001. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. Advances in Agronomy 71: 145–191.
- Lal, R., 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. Science 304(5677): 1623–1627. <http://doi.org/10.1126/science.1097396>.
- Lal, R., 2005. Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management 220(1–3): 242–258. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>.
- Lal, R., 2008. Carbon sequestration. Philosophical Transactions of the Royal Society B 363(1492): 815–830. <http://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>.
- Latifi, H., Fassnacht, F., and Koch, B., 2012. Forest structure modeling with combined airborne hyperspectral and LiDAR data. Remote Sensing of Environment 121: 10–25. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.015>.
- Law, B.E., Sun, O.J., Campbell, J., Van Tuyl, S., and Thornton, P.E., 2003. Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine. Global Change Biology 9(4): 510–524. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00624.x>.
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Riou, J., and Guyon, D., 1992. Relating Forest Biomass to SAR Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 30(2): 403–411. <http://doi.org/10.1109/36.134089>.
- Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M.W.J., Balzer, H., Paillou, P., Papathanassiou, K., ... Ulander, L., 2011. The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. Remote Sensing of Environment 115(11): 2850–2860. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.020>.
- Ledermann, T., and Neumann, M., 2006. Biomass equations from data of old long-term experimental plots. Austrian Journal of Forest Science 123(1–2): 47–64.
- Lehtonen, A., Cienciala, E., Tatarinov, F., and Makipaa, R., 2007. Uncertainty estimation of biomass expansion factors for Norway spruce in the Czech Republic. Annals of Forest Science 64(2): 133–140. <http://doi.org/10.1051/forest:2006097>.

- Lehtonen, A., Mäkipää, R., Heikkinen, J., Sievänen, R., and Liski, J., 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* 188(1–3): 211–224. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.008>.
- Lei, S., and Shirong, L., 2017. Methods of Estimating Forest Biomass: A Review. In: Jaya, S.T. (Ed.) *Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy*. InTech, pp. 23–46.
- Leifeld, J., Müller, M., and Fuhrer, J., 2011. Peatland subsidence and carbon loss from drained temperate fens. *Soil Use and Management* 27(2): 170–176. <http://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00327.x>.
- Levillain, J., Thongo M'Bou, A., Deleporte, P., Saint-André, L., and Jourdan, C., 2011. Is the simple auger coring method reliable for below-ground standing biomass estimation in Eucalyptus forest plantations? *Annals of Botany* 108(1): 221–230. <http://doi.org/10.1093/aob/mcr102>.
- Levy, P.E., Hale, S.E., and Nicoll, B.C., 2004. Biomass expansion factors and root:shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. *Forestry* 77(5): 421–430. <http://doi.org/10.1093/forestry/77.5.421>.
- Libiete, Z., Matisons, R., Rieksts-Riekstiņš, J., Priedītis, A., and Jansons, J., 2017. Above-ground Biomass Models of 40-year-old Norway Spruce in Latvia. *Baltic Forestry* 23(2): 515–521.
- Liepa, I., 2011. Mizas nozīme krājas tekošā pieauguma noteikšanā. *Mežzinātne*, 24(57), 58–64.
- Liepa, I., un Blija, T., 2008. Latvijas egļu mežu koku biomasas struktūra. *LLU Raksti* 20(315): 32–37.
- Liepiņš, J., Lazdiņš, A., and Liepiņš, K., 2018. Equations for estimating above- and belowground biomass of Norway spruce, Scots pine, Birch spp. and European aspen in Latvia. *Scandinavian Journal of Forest Research* 33(1): 58–70. <http://doi.org/10.1080/02827581.2017.1337923>.
- Liepiņš, J., and Liepiņš, K., 2015. Evaluation of bark volume of four tree species in Latvia. *Research for Rural Development* 2: 22–28.
- Liepiņš, J., and Liepiņš, K., 2017. Mean basic density and its axial variation in scots pine, Norway spruce and birch stems. *Research for Rural Development* 1: 21–27. <http://doi.org/10.22616/rrd.23.2017.003>.
- Liepins, K., and Rieksts-Riekstins, J., 2013. Stemwood Density of Juvenile Silver Birch Trees (*Betula pendula* Roth) from Plantations on Former Farmlands. *Baltic Forestry* 19: 179–186.
- Lima, A.J.N., Suwa, R., De Mello Ribeiro, G.H.P., Kajimoto, T., Dos Santos, J., Da Silva, R.P., ... Higuchi, N., 2012. Allometric models for estimating above- and below-ground biomass in Amazonian forests at São Gabriel da Cachoeira in the upper Rio Negro, Brazil. *Forest Ecology and Management* 277: 163–172. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.028>.
- Lindroth, A., Grelle, A., and Moren, A.-S., 1998. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. *Global Change Biology* 4(4): 443–450. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00165.x>.
- Lipiņš, L., un Liepa, I., 2007. Apaļo kokmateriālu uzmērīšana. *Jelgava: LLU*.
- Litton, C.M., Raich, J.W., and Ryan, M.G., 2007. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology* 13(10): 2089–2109. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01420.x>.
- Lohila, A., Minkkinen, K., Aurela, M., Tuovinen, J.-P., Penttil, T., Ojanen, P., and Laurila, T., 2011. Greenhouse gas flux measurements in a forestry-drained peatland indicate a large carbon sink. *Biogeosciences* 8(11): 3203–3218.
- Lu, D., 2006. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing* 27(7): 1297–1328. <http://doi.org/10.1080/01431160500486732>.
- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., and Moran, E., 2016. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth* 9(1): 63–105. <http://doi.org/10.1080/17538947.2014.990526>.
- Luoma, V., Saarinen, N., Wulder, M.A., White, J.C., Vastaranta, M., Holopainen, M., and Hyypä, J., 2017. Assessing precision in conventional field measurements of individual tree attributes. *Forests* 8(2): 38. <http://doi.org/10.3390/f8020038>.
- Lupikis, A., Bardule, A., Lazdins, A., Stola, J., and Butlers, A., 2017. Carbon stock changes in drained arable organic soils in Latvia: Results of a pilot study. *Agronomy Research* 15(3): 788–798.
- Magalhães, T.M., and Seifert, T., 2015. Tree component biomass expansion factors and root-to-shoot ratio of Lebombo ironwood: Measurement uncertainty. *Carbon Balance and Management* 10(1): 9. <http://doi.org/10.1186/s13021-015-0019-4>.
- Mäkinen, H., Saranpää, P., and Linder, S., 2002. Wood-density variation of Norway spruce in relation to nutrient optimization and fibre dimensions. *Canadian Journal of Forest Research* 32(2): 185–194. <http://doi.org/10.1139/x01-186>.
- Malhi, Y., Aragão, L.E.O.C., Metcalfe, D.B., Paiva, R., Quesada, C.A., Almeida, S., ... Teixeira, L.M., 2009.

- Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology* 15(5): 1255–1274. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01780.x>.
- Marklund, L.G., 1987. Biomass equations for spruce in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Survey. Report 43.
- Marklund, L.G., 1988. Biomass functions for pine spruce and birch in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Survey. Report 45.
- Martin, A.R., and Thomas, S.C., 2011. A reassessment of carbon content in tropical trees. *PLoS ONE* 6(8): e23533. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0023533>.
- Martin, J.H., Coale, K.H., Johnson, K.S., Fitzwater, S.E., Gordon, R.M., Tanner, S.J., ... Tindale, N.W., 1994. Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean. *Nature* 371: 123–129. <http://doi.org/10.1038/371123a0>.
- Matthews, H.D., 2007. Implications of CO₂ fertilization for future climate change in a coupled climate-carbon model. *Global Change Biology* 13(5): 1068–1078. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01343.x>.
- McRoberts, R.E., Liknes, G.C., and Domke, G.M., 2014. Using a remote sensing-based, percent tree cover map to enhance forest inventory estimation. *Forest Ecology and Management* 331: 12–18. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.025>.
- Meyer, T.J., 1989. Chemical Approaches To Artificial Photosynthesis. *Accounts of Chemical Research* 22(5): 163–170. <http://doi.org/10.1021/ar00161a001>.
- Miezīte, O., Liepa, I., and Lazdiņš, A., 2011. Carbon accumulation in overground and root biomass of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) *Aegopodiosa*. In: Proceedings of Annual 17th International Scientific Conference "Research for Rural Development", Jelgava, Latvia, May 2011. Jelgava: LUA, Vol. 2, pp. 46–51.
- Milchunas, D.G., 2012. Biases and errors associated with different root production methods and their effects on field estimates of belowground net primary production. In: Mancuso, S. (Ed.) *Measuring Roots: An Updated Approach*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 303–339. http://doi.org/10.1007/978-3-642-22067-8_16.
- Millers, M., and Magaznieks, J., 2012. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Stem Wood and Bark Moisture and Density Influencing Factors. In: Proceedings of Annual 18th International Scientific Conference "Research for Rural Development", Jelgava, Latvia, May 2012. Jelgava: LUA, Vol. 2, pp. 91–98.
- Mokany, K., Raison, R.J., and Prokushkin, A.S., 2006. Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology* 12(1): 84–96. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x>.
- Montès, N., Gauquelin, T., Badri, W., Bertaudière, V., and Zaoui, E.H., 2000. A non-destructive method for estimating above-ground forest biomass in threatened woodlands. *Forest Ecology and Management* 130(1–3): 37–46. [http://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00188-7](http://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00188-7).
- Mosera, G., Christoph, L., Marina, R., Sophie, G., Nathalie, S., and Dietrich, H., 2010. Biomass and productivity of fine and coarse roots in five tropical mountain forests stands along an altitudinal transect in southern Ecuador. *Plant Ecology and Diversity* 3(2), 151–164. <http://doi.org/10.1080/17550874.2010.517788>.
- Motulsky, H., and Christopoulos, A., 2003. *Fitting Models to Biological Data using Linear and Nonlinear Regression. A practical guide to curve fitting*. San Diego CA: GraphPad Software, Oxford University Press. <http://doi.org/10.1002/pst.167>.
- Mugasha, W.A., Eid, T., Bollandsås, O.M., Malimbwi, R.E., Chamshama, S.A.O., Zahabu, E., and Katani, J.Z., 2013. Allometric models for prediction of above- and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management* 310: 87–101. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.003>.
- Muukkonen, P., 2007. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *European Journal of Forest Research* 126(2): 157–166. <http://doi.org/10.1007/s10342-007-0168-4>.
- Nabuurs, G., Wyngaert, I., Daamen, W., Helmink, A., Groot, W., Knol, W., ... Kuikman, P., 2005. National System of Greenhouse Gas Reporting for Forest and Nature Areas under UNFCCC in The Netherlands. Alterra-report 1035.1.
- Narbel, P.A., Hansen, J.P., and Lien, J.R., 2014. *Energy Technologies and Economics*. Springer. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-08225-7>.
- Neumann, M., Moreno, A., Mues, V., Härkönen, S., Mura, M., Bouriaud, O., ... Hasenauer, H., 2016. Comparison of carbon estimation methods for European forests. *Forest Ecology and Management* 361: 397–420. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.016>.

- Ngomanda, A., Engone Obiang, N.L., Lebamba, J., Moundounga Mavouroulou, Q., Gomat, H., Mankou, G.S., ... Picard, N., 2014. Site-specific versus pantropical allometric equations: Which option to estimate the biomass of a moist central African forest? *Forest Ecology and Management* 312: 1–9. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.10.029>.
- Ni, Y., Eskeland, G.S., Giske, J., and Hansen, J.P., 2016. The global potential for carbon capture and storage from forestry. *Carbon Balance and Management* 11: 3(2016). <http://doi.org/10.1186/s13021-016-0044-y>.
- Offenthaler, I., and Hochbichler, E., 2006. Estimation of root biomass of Austrian forest tree species. *Austrian Journal of Forest Science* 123(1–2): 65–86.
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J., and Penttilä, T., 2010. Soil–atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 260(3): 411–421. <http://doi.org/10.1016/J.FORECO.2010.04.036>.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., ... Hayes, D., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333(6045): 988–993. <http://doi.org/10.1126/science.1201609>.
- Pan, Y., Luo, T., Birdsey, R., Hom, J., and Melillo, J., 2004. New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: Effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation. *Climatic Change* 67(2–3): 211–236. <http://doi.org/10.1007/s10584-004-2799-5>.
- Patenaude, G., Hill, R.A., Milne, R., Gaveau, D.L.A., Briggs, B.B.J., and Dawson, T.P., 2004. Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 93(3): 368–380. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.016>.
- Peng, C., Zhang, L., and Liu, J., 2001. Developing and validating nonlinear height-diameter models for major tree species of Ontario's Boreal Forests. *Northern Journal of Applied Forestry* 18(3): 87–94.
- Petersson, H., Holm, S., Ståhl, G., Alger, D., Fridman, J., Lehtonen, A., ... Mäkipää, R., 2012. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. *Forest Ecology and Management* 270: 78–84. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.004>.
- Petersson, H., and Stahl, G., 2006. Functions for below-ground biomass of *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula pendula* and *Betula pubescens* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 21(S7): 84–93. <http://doi.org/10.1080/14004080500486864>.
- Petrokofsky, G., Kanamaru, H., Achard, F., Goetz, S.J., Joosten, H., Holmgren, P., ... Wattenbach, M., 2012. Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. *Environmental Evidence* 1: 6(2012). <http://doi.org/10.1186/2047-2382-1-6>.
- Phalla, T., Ota, T., Mizoue, N., Kajisa, T., Yoshida, S., Vuthy, M., and Heng, S., 2017. The Importance of Tree Height in Estimating Individual Tree Biomass while Considering Errors in Measurements and Allometric Models. *Journal of Agricultural Science* 40(1): 131–140. <http://doi.org/10.17503/agrivita.v40i1.1730>.
- Picard, N., Rutishauser, E., Ploton, P., Ngomanda, A., and Henry, M., 2015. Should tree biomass allometry be restricted to power models? *Forest Ecology and Management* 353: 156–163. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.035>.
- Picard, N., Saint André, L., and Henry, M., 2012. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nation.
- Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J.P., and Paruelo, J.M., 2008. How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling* 216(3–4): 316–322. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.05.006>.
- Pires, J.C.M., Martins, F.G., Alvim-Ferraz, M.C.M., and Simoes, M., 2011. Recent developments on carbon capture and storage: An overview. *Chemical Engineering Research and Design* 89(9): 1446–1460. <http://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.01.028>.
- Pretzsch, H., Biber, P., Durský, J., Von Gadow, K., Hasenauer, H., Kändler, G., ... Sterba, H., 2002. Recommendations for Standardized Documentation and Further Development of Forest Growth Simulators. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 121(3): 138–151. <http://doi.org/10.1046/j.1439-0337.2002.00138.x>.
- Ravindranath, N., and Ostwald, M., 2008a. Methods for Below-Ground Biomass. In: Ravindranath, N., and Ostwald, M. (Eds.) *Carbon Inventory Methods Handbook for Greenhouse Gas Inventory, Carbon Mitigation and Roundwood Production Projects*. Springer Science + Business Media B.V., pp. 149–156.
- Ravindranath, N., and Ostwald, M., 2008b. Methods for Estimating Above-Ground Biomass. In:

- Ravindranath, N., and Ostwald, M., eds. Carbon Inventory Methods Handbook for Greenhouse Gas Inventory, Carbon Mitigation and Roundwood Production Projects. Springer Science + Business Media B.V., pp. 113–147.
- Repola, J., 2006. Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fennica* 40: 673–685.
- 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: 625–647.
- Repola, J., 2013. Modelling tree biomasses in Finland. *Dissertationes Forestales* 158.
- Repola, J., and Ulvcróna, K.A., 2014. Modelling biomass of young and dense Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) dominated mixed forests in northern Sweden. *Silva Fennica* 48(5): article id 1190. <http://doi.org/10.14214/sf.1190>.
- Ritson, P., and Sochacki, S., 2003. Measurement and prediction of biomass and carbon content of *Pinus pinaster* trees in farm forestry plantations, south-western Australia. *Forest Ecology and Management* 175(1–3): 103–117. [http://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00121-4](http://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00121-4).
- Rogelj, J., den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., ... Meinshausen, M., 2016. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C. *Nature* 534: 631–639. <http://doi.org/10.1038/nature18307>.
- Roxburgh, S.H., Paul, K.I., Clifford, D., England, J.R., and Raison, R.J., 2015. Guidelines for constructing allometric models for the prediction of woody biomass: How many individuals to harvest? *Ecosphere* 6(3): 1–27. <http://doi.org/10.1890/ES14-00251.1>.
- Royal Society, 2009. Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty. https://royalsociety.org/-/media/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf. [Cited 15.12.2019]
- Rubin, E.S., 2012. Understanding the pitfalls of CCS cost estimates. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 10: 181–190. <http://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.004>.
- Rytter, L., Ingerslev, M., Kilpeläinen, A., Torssonen, P., Lazdina, D., Löf, M., ... Stener, L.-G., 2016. Increased forest biomass production in the Nordic and Baltic countries – A review on current and future opportunities. *Silva Fennica* 50(5): 1–33. <http://doi.org/10.14214/sf.1660>.
- Rytter, L., Johansson, K., Karlsson, B., and Stener, L.G., 2013. Tree species, genetics and regeneration for bioenergy feedstock in northern Europe. In: Kellomäki, S., Kilpeläinen, A., Alam, A. (Eds.) *Forest BioEnergy Production*. New York: Springer, pp. 7–37. http://doi.org/10.1007/978-1-4614-8391-5_2.
- Saranpää, P., 1994. Basic density, longitudinal shrinkage and tracheid length of juvenile wood of *Picea abies* (L.) Karst. *Scandinavian Journal of Forest Research* 9(1–4): 68–74. <http://doi.org/10.1080/02827589409382814>.
- Saranpää, P., 2003. Wood density and growth. In: Barnett, J. R., Jeronimidis, G. (Eds.) *Wood quality and its biological basis USA*: Blackwell Publishing, p. 240.
- Sarker, L.R., 2010. Estimation of forest biomass using remote sensing. PhD Thesis, Hong Kong Polytechnic University.
- Sarmulis, Z., Drēška, A., Līpiņš, L., un Leontjevs, D., 2005. Egles stumbra dimensionāls vērtējums. *LLU Raksti* 14(309): 1–8.
- Sasaki, N., Chheng, K., Mizoue, N., Abe, I., and Lowe, A.J., 2016. Forest reference emission level and carbon sequestration in Cambodia. *Global Ecology and Conservation* 7: 82–96. <http://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.05.004>.
- Savaresi, A., 2016. The Paris Agreement: a new beginning? *Journal of Energy & Natural Resources Law* 34(1): 16–26. <http://doi.org/10.1080/02646811.2016.1133983>.
- Schepaschenko, D., Moltchanova, E., Shvidenko, A., Blyshchyk, V., Dmitriev, E., Martynenko, O., ... Kraxner, F., 2018. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests. *Forests* 9(6): 1–23. <http://doi.org/10.3390/f9060312>.
- Scholes, R.J., and Noble, I.R., 2001. Storing carbon on land. *Science* 294(5544): 1012–1013. <http://doi.org/10.1126/science.1065307>.
- Schrag, D.P., 2007. Preparing to Capture Carbon. *Science* 315(5813): 812–813. <http://doi.org/10.1126/science.1137632>.
- Sharma, V., and Chaudhry, S., 2015. An evaluation of existing methods for assessment of above-ground biomass in forests. *International Journal of Engineering Research and Science & Technology* 4(2): 1–20.
- Sileshi, G.W., 2014. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management* 329: 237–254. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.026>.

- Simola, P., 1977. The biomass of small-sized hardwood trees. *Folia Forestalia* 302: 16.
- Singh, T., 1984. Variation in the Ovendry Wood Density of Ten Prairie Tree Species. *The Forestry Chronicle* 60: 217–221.
- Skovsgaard, J.P., Bald, C., and Nord-Larsen, T., 2011. Functions for biomass and basic density of stem, crown and root system of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Denmark. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26(S11): 3–20. <http://doi.org/10.1080/02827581.2011.564381>.
- Smilga, J., 1967. Parastās apses koksnes tilpumsvars Latvijas PSR. *Jaunākais Mežsaimniecībā* 9: 97–99.
- Smilga, J., 1988. Apses koksnes blīvums. *Jaunākais Mežsaimniecībā* 30: 54–60.
- Smith, A., Granhus, A., and Astrup, R., 2016. Functions for estimating belowground and whole tree biomass of birch in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research* 31(6): 568–582. <http://doi.org/10.1080/02827581.2016.1141232>.
- Smith, A., Granhus, A., Astrup, R., Bollandsås, O.M., and Petersson, H., 2014. Functions for estimating aboveground biomass of birch in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research* 29(6): 565–578. <http://doi.org/10.1080/02827581.2014.951389>.
- Smith, P., Powlson, D., Glendining, M., and Smith, J., 1997. Potential for carbon sequestration in European soils: Preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments. *Global Change Biology* 3(1): 67–79. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1997.00055.x>.
- Smyth, C.E., Kurz, W.A., Neilson, E.T., and Stinson, G., 2013. National-scale estimates of forest root biomass carbon stocks and associated carbon fluxes in Canada. *Global Biogeochemical Cycles* 27(4): 1262–1273. <http://doi.org/10.1002/2012GB004536>.
- Snowdon, P., 1991. A ratio estimator for bias correction in logarithmic regressions. *Canadian Journal of Forest Research* 21: 720–724.
- Somogyi, Z., Cienciala, E., Makipaa, R., Muukkonen, P., Lehtonen, A., and Weiss, P., 2007. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *European Journal of Forest Research* 126: 197–207. <http://doi.org/10.1007/s10342-006-0125-7>.
- Stegen, J.C., Swenson, N.G., Enquist, B.J., White, E.P., Phillips, O.L., Jørgensen, P.M., ... Núñez Vargas, P., 2011. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients. *Global Ecology and Biogeography* 20(5): 744–754. <http://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00645.x>.
- Stovall, A.E.L., Shugart, H.H., Stovall, A.E.L., Anderson-Teixeira, K.J., and Anderson-Teixeira, K.J., 2018. Assessing terrestrial laser scanning for developing non-destructive biomass allometry. *Forest Ecology and Management* 427: 217–229. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.06.004>.
- Temesgen, H., Affleck, D., Poudel, K., Gray, A., and Sessions, J., 2015. A review of the challenges and opportunities in estimating above ground forest biomass using tree-level models. *Scandinavian Journal of Forest Research* 30(4): 326–335. <http://doi.org/10.1080/02827581.2015.1012114>.
- Thenkabail, P.S., Stucky, N., Griscom, B.W., Ashton, M.S., Diels, J., Van der Meer, B., and Enclona, E., 2004. Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived savannas using IKONOS data. *International Journal of Remote Sensing* 25(23): 447–5472. <http://doi.org/10.1080/01431160412331291279>.
- Thomas, S.C., and Malczewski, G., 2007. Wood carbon content of tree species in Eastern China: Interspecific variability and the importance of the volatile fraction. *Journal of Environmental Management* 85(3): 659–662. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.04.022>.
- Thomas, S.C., and Martin, A.R., 2012. Carbon content of tree tissues: A synthesis. *Forests* 3(2): 332–352. <http://doi.org/10.3390/f3020332>.
- Thurner, M., Beer, C., Santoro, M., Carvalhais, N., Wutzler, T., Schepaschenko, D., ... Schmillius, C., 2014. Carbon stock and density of northern boreal and temperate forests. *Global Ecology and Biogeography* 23(3): 297–310. <http://doi.org/10.1111/geb.12125>.
- Titlyanova, A.A., Romanova, I.P., Kosykh, N.P., and Mironycheva-Tokareva, N.P., 1999. Pattern and process in above-ground and below-ground components of grassland ecosystems. *Journal of Vegetation Science* 10(3): 307–320. <http://doi.org/10.2307/3237060>.
- Tomppo, E., Gschwantner, T., Lawrence, M., and McRoberts, R.E. (Eds.), 2010. *National Forest Inventories: Pathways for Common Reporting*. Netherlands: Springer. <http://doi.org/10.1007/978-90-481-3233-1>.
- UNFCCC, 2018. *National Inventory Submissions 2018*. http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/10116.php [Cited 15.12.2019.]
- Unger, N., 2014. Human land-use-driven reduction of forest volatiles cools global climate. *Nature Climate Change* 4(10): 907–910. <http://doi.org/10.1038/nclimate2347>.

- Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Morozov, G., and Karoles, K., 2017. Ecosystems carbon budgets of differently aged downy birch stands growing on well-drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 399: 82–93. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.05.023>.
- Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Soosaar, K., ... Karoles, K., 2017. Carbon budgets in fertile grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) stands of different ages. *Forest Ecology and Management* 396: 55–67. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.004>.
- Uusvaara, O., and Pekkala, O., 1979. Technical properties of the wood and pulp of certain foreign and uncommon native tree species. *Communications Instituti Forestalis Fenniae* 96(2): 1–59.
- Vaglio Laurin, G., Chen, Q., Lindsell, J.A., Coomes, D.A., Del Frate, F., Guerriero, L., ... Valentini, R., 2014. Above ground biomass estimation in an African tropical forest with lidar and hyperspectral data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 89: 49–58. <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.01.001>.
- Vallet, P., Dhôte, J.F., Moguédec, G.Le, Ravart, M., and Pignard, G., 2006. Development of total above-ground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management* 229(1–3): 98–110. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.03.013>.
- van der Werf, G.R., Morton, D.C., DeFries, R.S., Olivier, J.G.J., Kasibhatla, P.S., Jackson, R.B., ... Randerson, J.T., 2009. CO2 emissions from forest loss. *Nature Geoscience* 2(11): 737–738. <http://doi.org/10.1038/ngeo671>.
- Varik, M., Aosaar, J., Ostonen, I., Lõhmus, K., and Uri, V., 2013. Carbon and nitrogen accumulation in belowground tree biomass in a chronosequence of silver birch stands. *Forest Ecology and Management* 302: 62–70. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.033>.
- Vogt, K.A., Vogt, D.J., and Bloomfield, J., 1998. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. *Plant and Soil* 200(1): 71–89. <http://doi.org/10.1023/A:1004313515294>.
- Wagenmakers, E.-J., and Farrell, S., 2004. AIC model selection using Akaike weights. *Psychonomic Bulletin and Review* 11: 192–196. <http://doi.org/10.3758/BF03206482>.
- Warner, B.G., Clymo, R.S., and Tolonen, K., 1993. Implications of Peat Accumulation at Point Escuminac, New Brunswick. *Quaternary Research* 39(2): 245–248. <http://doi.org/10.1006/qres.1993.1028>.
- Weiskittel, A.R., MacFarlane, D.W., Radtke, P.J., Affleck, D.L.R., Temesgen, H., Woodall, C.W., ... Coulston, J.W., 2015. A Call to Improve Methods for Estimating Tree Biomass for Regional and National Assessments. *Journal of Forestry* 113(4): 414–424. <http://doi.org/10.5849/jof.14.091>.
- Westerling, A.L., 2006. Warming and Earlier Spring Increase Western U.S. Forest Wildfire Activity. *Science* 313(5789): 940–943. <http://doi.org/10.1126/science.1128834>.
- Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Spångberg, K., Lundqvist, S.-O., Grahn, T., Hedenberg, Ö., and Olsson, L., 2002. Models for Predicting Wood Properties in Stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17(4): 330–350. <http://doi.org/10.1080/02827580260138080>.
- Williamson, P., Wallace, D.W.R., Law, C.S., Boyd, P.W., Collos, Y., Croot, P., ... Vivian, C., 2012. Ocean fertilization for geoengineering: A review of effectiveness, environmental impacts and emerging governance. *Process Safety and Environmental Protection* 90(6): 475–488. <http://doi.org/10.1016/j.psep.2012.10.007>.
- Wirth, C., Schumacher, J., and Schulze, E.D., 2004. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology* 24(2): 121–139. <http://doi.org/10.1093/treephys/24.2.121>.
- Worrall, J.J., and Fairweather, M.L., 2009. Decay and Discoloration of Aspen. *USDA Forest Service* (May): 1–12. <http://www.fs.fed.us/r6/nr/fid/fidls/fidl-2.pdf>. [Cited 15.12.2019.]
- Wosten, J.H.M., Ismail, A.B., and VanWijk, A.L.M., 1997. Peat subsidence and its practical implications: A case study in Malaysia. *GEODERMA* 78(1–2): 25–36. [http://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00013-X](http://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00013-X).
- WRI, 2012. World GHG Emissions Flow Chart. World Resource Institute report. http://www.ecofys.com/files/files/world-ghg-emission-flow-chart-2012_v9-c-asn-ecofys-2016_02.pdf. [Cited 15.08.2019.]
- Xue, B.-L., Guo, Q., Hu, T., Wang, Y., Tao, S., Sun, Y., ... Zhao, X., 2017. Evaluation of modeled global carbon dynamics: analysis based on global carbon flux and above-ground biomass data. *Ecological Modelling* 355: 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.04.012>.
- Yuan, Z.Y., and Chen, H.Y.H., 2012. Indirect Methods Produce Higher Estimates of Fine Root Production and Turnover Rates than Direct Methods. *PLoS ONE* 7(11): e48989. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0048989>.

- Zanne, A.E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D.A.A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S.L.S.L., ... Chave, J., 2009. Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Dryad, Dataset. <http://doi.org/10.5061/dryad.234>.
- Zeng, N., 2008. Carbon sequestration via wood burial. *Carbon Balance and Management* 3(1): 1. <http://doi.org/10.1186/1750-0680-3-1>.
- Zhang, S.Y., 1995. Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Science and Technology* 29: 451–465. <http://doi.org/10.1007/BF00194204>.
- Zianis, D., and Mencuccini, M., 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management* 187(2–3): 311–332. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.007>.
- Zianis, D., Muukkonen, P., Makipaa, R., and Mencuccini, M., 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs* 4: 1–63.
- Zobel, B.J., and Jett, J.B., 1995. *Genetics of wood production*. Berlin, Heidelberg: Springer. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-79514-5>.

Datorsalikums. Metiens 150 eks.
Iespests SIA *Latgales druka*, Baznīcas iela 28, Rēzekne, tālr. 64625938