Latvijas Valsts mežzinātnes institūts “Silava”

Latvijas Lauksaimniecības universitāte

Meža fakultāte

Mežkopības katedra

Mg. silv. **Jānis Liepiņš**

promocijas darbs

KOKAUDŽU BIOMASAS NOTEIKŠANAS METODIKAS IZSTRĀDE UN OGLEKĻA UZKRĀJUMA APRĒĶINI LATVIJĀ

METHODOLOGY DEVELOPMENT FOR FOREST STAND BIOMASS AND CARBON STOCK ESTIMATES IN LATVIA

mežzinātņu doktora *(Dr.silv.)* zinātniskā grāda iegūšanai

Mežzinātnes nozares meža ekoloģijas un mežkopības apakšnozarē

Promocijas darba vadītājs
amats **Dr. silv.** Kaspars Liepiņš _____

Promocijas darba vadītājs
amats **Dr. silv.** Andis Lazdiņš _____

Promocijas darba autors _____

Salaspils

2019

ANOTĀCIJA

Kokaudžu biomasas noteikšanas metodikas izstrāde un oglekļa uzkrājuma aprēķini Latvijā. LVMI "Silava" un LLU, 2019. Liepiņš J., zinātniskie vadītāji: Dr. silv. Kaspars Liepiņš un Dr. silv. Andis Lazdiņš. Promocijas darba apjoms: 105 lpp., 14 tabulas, 31 attēls un 268 literatūras avoti. Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Valsts mežzinātnes institūtā "Silava", doktorantūras studijas Latvijas Lauksaimniecības universitātes Meža fakultātē laika periodā no 2014. līdz 2019. gadam.

Pētījuma aktualitāti nosaka starptautiskās saistības, ko Latvija apņēmusies pildīt, ratificējot Apvienoto Nāciju Organizācijas Vispārējo konvencija par klimata pārmaiņām (UNFCCC), tās Kioto protokolu un Parīzes vienošanos. Atbilstoši UNFCCC prasībām, Latvijai katru gadu ir jāsagatavo pārskats par siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijām un oglekļa dioksīda (CO_2) piesaisti, kā arī reizi divos gados jāsagatavo SEG emisiju un CO_2 piesaistes prognožu ziņojums un regulāri jāziņo par darbībām, kas veiktas, lai samazinātu SEG emisijas zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības sektorā. Precīzas metodes nepieciešamas, lai aprēķinātu CO_2 piesaisti kokaugu virszemes un sakņu biomasā un raksturotu uzkrātā oglekļa izmaiņas Latvijas mežos. Nozīmīgāko SEG emisiju un CO_2 piesaistes avotu uzskaite jāveic ar metodēm, kas raksturo vietējos apstākļus un ir zinātniski pārbaudītas. Līdzšinējie pētījumi Latvijā par saimnieciski nozīmīgāko koku sugu biomasas un oglekļa apjoma novērtēšanas metodēm veikti fragmentāri, tikai atsevišķu koku sugu un biomasas frakciju līmenī. Starpvalstu klimata pārmaiņu padomes (IPCC) 2006. gada SEG inventarizācijas vadlīniju aprakstītā biomasas aprēķina metodika piedāvā vidējās blīvuma un biomasas pārrēķina koeficientu vērtības, kuru lietošana Latvijas apstākļos nav zinātniski pamatota. Pētnieciskais darbs izstrādāts, lai nodrošinātu kokaudžu biomasas un oglekļa uzkrājuma aprēķinu atbilstību nacionālo ziņojumu sastādīšanas vadlīnijām.

Empīriskais materiāls, Latvijas saimnieciski nozīmīgāko koku sugu virszemes un celma/sakņu biomasas aprēķiniem, ievākts 124 meža nogabalos, katrā nozāģējot trīs dažādu dimensiju paraugkokus. Koku virszemes biomasas vienādojumu izstrādei dati ievākti no 372 kokiem (102 priedēm, 81 eglēm, 105 bērziem un 84 apsēm), bet celma/sakņu biomasas vienādojumu izstrādei no 141 koka (37 priedēm, 29 eglēm, 42 bērziem un 33 apsēm). 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 14366 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, tāpēc pētījumā stumbra biomasas aprēķiniem izmantots vidējais svērtais visa stumbra blīvums, kurš aprēķināts visiem paraugkokiem ņemot vērā mizas īpatsvaru stumbrā. 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 mūsu pētījumā, nav veikta nevienā citā pētījumā. Promocijas darba ietvaros izstrādāti jauni Latvijas teritorijai piemēroti stumbra, zaru, kopējās virszemes un celma/sakņu biomasas aprēķina vienādojumi, kuri lietojami plašā koku dimensiju amplitūdā. Biomasas vienādojumi attiecināmi uz koku sugām kas reprezentē 85.5% Latvijas kokaudžu krāju. 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. 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 par 5.2% samazina oglekļa uzkrājuma aprēķinus, salīdzinot ar pētījumā izstrādātajiem vienādojumiem. Atbilstoši Latvijas nacionālajā SEG inventarizācijā izmantotajai meža definīcijai, oglekļa uzkrājums Latvijas kokaudžu biomasā 2016. gadā bija 238.1 ± 3.5 milj.t.

SUMMARY

Methodology development for forest stand biomass and carbon stock estimates in Latvia. LSFRI "Silava" and Latvia University of Life Sciences and Technologies, 2019. Liepiņš J., supervisors: Dr. silv. Kaspars Liepiņš and Dr. silv. Andis Lazdiņš. The volume of work: 105 pages, 14 charts, 31 figures and 268 references. The doctoral thesis has been elaborated at the Latvian State Forest Research Institute "Silava" and Latvia University of Life Sciences and Technologies, Forest Faculty, Department of forestry from 2014 to 2019.

The significance of the study is determined by the international obligations Latvia has undertaken by ratification of United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), Kyoto Protocol and Paris Agreement. In accordance to UNFCCC requirements, Latvia has to submit a national report on emissions of greenhouse gasses (GHG) and CO_2 sequestration annually and every second year – a report on projections of GHG and CO_2 emissions and measures implemented to reduce the GHG emissions in Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) sector. In order to estimate CO_2 sequestration in aboveground and belowground woody biomass, accurate methods are required. Accounting of the most significant GHG emissions and CO_2 removals has to be implemented using internationally approved methods that are adapted for local conditions. Previous studies in Latvia on biomass and carbon assessment for economically most important tree species are fragmented and limited to separate biomass fractions and several tree species. Methodology for biomass estimation included in the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) guidelines recommend the use of the default values for wood density, root to shoot ratio and biomass conversion and expansion factors that have not been previously evaluated in Latvian conditions. Our study is aimed to develop the methods for forest biomass and carbon stock assessment that are based on recommendations for national reporting.

The empirical material for study of aboveground and belowground tree biomass is collected in 124 forest stands. Three sample trees per stand have been harvested - 372 trees in total for aboveground biomass studies (102 Scots pines, 81 Norway spruces, 105 birches (*Betula sp*.) and 84 European aspen), while 141 stumps and roots are lifted for belowground biomass studies (37 Scots pines, 29 Norway spruces, 42 birches (*Betula spp*.) and 33 European aspens). 14366 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. Because of this in order to estimate biomass we used average weighted basic density values for whole stem (wood and bark). 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. The tree species included in the study for elaboration of biomass equations represent 85.5% of forest growing stock in our country. 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 our study. In accordance to the forest definition used in national IPCC reports, the total carbon stock in Latvia in year 2016 was 238.1±3.5 million tonnes.

SATURS

TABULU SARAKSTS 5
ATTĒLU SARAKSTS 6
PUBLIKĀCIJAS PAR PROMOCIJAS DARBA TĒMU 7
DALĪBA KONFERENCĒS 8
PROMOCIJAS DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI 9
IEVADS 10
1. OGLEKĻA PIESAISTES UN KOKAUDŽU BIOMASAS NOTEIKŠANAS PROBLEMĀTIKAS ANALĪZE 13
1.1. Oglekļa globālās aprites dinamika un piesaiste 13
1.1.1. Oglekļa aprites cikls 13
1.1.2. Atmosfēras oglekļa piesaiste 15
1.1.3. Oglekļa uzskaites aktualitāte 18
1.2. Kokaudžu biomasas novērtēšanas metodes 21
1.2.1. Virszemes biomasas novērtēšana 21
1.2.2. Sakņu un celma biomasas novērtēšana 23
1.2.3. Alometrisko sakarību izmantošanas iespējas 25
1.2.4. Tālizpētes metodes 27
1.3. Reducētā blīvuma nozīme biomasas un oglekļa uzkrājumu novērtēšanā 29
1.4. Oglekļa novērtēšanas metožu salīdzinājums Eiropas mežos 32
2. MATERIĀLS UN METODIKA 38
2.1. Empīriskā materiāla raksturojums 38
2.2. Koku virszemes biomasas empīriskā materiāla ievākšana un apstrāde 40
2.3. Koku celma/sakņu biomasas empīriskā materiāla ievākšana un apstrāde 43
2.4. Vienādojumu izstrāde 45
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA 50
3.1. Blīvuma izmaiņas koka stumbrā 50
3.2. Koku biomasas aprēķini un vienādojumu izstrāde 59
3.2.1. Biomasas struktūra 59
3.2.2. Biomasas vienādojumi 63
3.2.3. Vienādojumu validācija 75
3.3. Latvijas kokaudzēs uzkrātais ogleklis atbilstoši Latvijas meža resursu monitoringa datiem 79
SECINĀJUMI 88
REKOMENDĀCIJAS 89
INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS 90

TABULU SARAKSTS

1.1. tabula. Celma/sakņu biomasas novērtēšanas metodes (Addo-Danso et al., 2016).....23
1.2. tabula. Reducētā blīvuma vērtības Latvijai raksturīgām koku sugām (Eggleston et al., 2006) 31
1.3. tabula. Kokaudžu biomasas aprēķina metožu salīdzinājums dažādās Eiropas valstīs 32
1.4. tabula. Dažādās Eiropas valstīs lietotais oglekļa saturs biomasā 34
2.1. tabula. Atlasīto meža nogabalu vidējo rādītāju raksturojums atkarībā no valdošās koku sugas.....38
2.2. tabula. Paraugkoku raksturojums virszemes biomasas aprēķiniem.....39
2.3. tabula. Paraugkoku raksturojums celma/sakņu biomasas aprēķiniem.....43
3.1. tabula. Vidējās mizas īpatsvara vērtības no kopējā stumbra tilpuma ± standartkļūda atkarībā no koka krūšaugstuma caurmēra.....49
3.2. tabula. Koku sugu svērtās vidējās reducētā blīvuma vērtības ± standartnovirze 51
3.3. tabula. Paraugkoku biomasas frakciju raksturojums, kg 58
3.4. tabula. Regresijas vienādojumu koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji.....64
3.5. tabula. Promocijas darbā un citos pētījumos izstrādāto vienādojumu biomasas aprēķinu relatīvā starpība atkarībā no vidējā krūšaugstuma caurmēra.....75
3.6. tabula. Sauso zaru īpatsvara kopējā zaru biomasā (BB) korelācija ar koku krūšaugstuma diametru (D) un augstumu (H) 78
3.7. tabula. Mežu resursu monitoringa (MRM) datubāzē koku sugām piemērotie biomasas vienādojumi Latvijas kokaudžu oglekļa aprēķiniem 79

ATTĒLU SARAKSTS

1.1. att. Oglekļa plūsma starp galvenajām oglekļa krātuvēm (Lal, 2008) 13
1.2. att. Potenciālās oglekļa piesaistes iespējas, balstoties uz literatūrā pieejamo informāciju 14
1.3. att. Latvijas atrašanās vieta hemiboreālo mežu joslā pēc Ahti, Hämet-Ahti, & Jalas, (1968) un EEA (2007) 19
1.4. att. Veicamās darbības novērtējot kokaugu virszemes biomasu pēc Breu, Guggenbichler, & Wollmann (2012) 21
1.5. att. GlobAllomeTree datubāzē ievietotie biomasas alometriskie vienādojumi (http://www.globallometree.org) 25
1.6. att. Koksnes blīvums atkarībā no koksnes mitruma (Kops, 1997) 29
2.1. att. Pētījumu objektu izvietojums Latvijas teritorijā. 37
2.2. att. Koku klasifikācija pēc ārējā izskata un vainaga īpašībām (FAO, 2014) 38
2.3. att. Zaru svēršanas process bērza nogabalā 39
2.4. att. Blīvuma paraugu novietojums stumbra šķērsgriezuma ripās 40
2.5. att. Koksnes parauga blīvuma mērīšanas process 41
2.6. att. Atrakta un nomazgāta parastās priedes sakņu sistēma 44
3.1. att. Mizas īpatsvars stumbra šķērsgriezumā atkarībā no relatīvā augstuma 50
3.2. att. Vidējā stumbra koksnes (punktētā līnija) un stumbra mizas (nepārtrauktā līnija) reducētā blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā 52
3.3. att. Stumbra koksnes reducētā blīvuma izmaiņas atkarībā no koka krūšaugstuma caurmēra 53
3.4. att. Koksnes reducētais blīvums (a) priedes, (b) egles un (c) bērza stumbru garenvirzienā pēc Repola (2006) vienādojumiem (pelēkā līnija) un mūsu mērījumiem (melnā, pārtrauktā līnija) 55
3.5. att. Koksnes reducētā blīvuma izmaiņas priedes un bērza stumbros 56
3.6. att. Koksnes reducētā blīvuma izmaiņas egles un apses stumbros 57
3.7. att. Kopējās biomasas sadalījums sauso zaru, dzīvo zaru, stumbra mizas, stumbra koksnes, celma, balstsakņu (> 2 cm), un sīko sakņu (< 2 cm) frakcijās 60
3.8. att. Virszemes uz sakņu biomasas pārrēķina attiecības izmaiņas atkarībā no koku krūšaugstuma caurmēra 61
3.9. att. Vienādojumu ticamības novērtējums pēc divu AICc vērtību starpības 66
3.10. att. Aprēķināto un prognozēto biomasas vērtību izkliedes diagramma un regresijas taisne 68
3.11. att. Vienādojuma 2.7 atlikumu sadalījuma struktūra. Pārtrauktā līnija attēlota, izmantojot LOWESS regresiju 70
3.12. att. Vienādojuma 2.6 atlikumu sadalījuma struktūra. Pārtrauktā līnija attēlota, izmantojot LOWESS regresiju 71
3.13. att. Vienādojuma 2.5 atlikumu sadalījuma struktūra. Pārtrauktā līnija attēlota, izmantojot LOWESS regresiju 72
3.14. att. Sagaidāmā virszemes (AGB) un celma/sakņu (BGB) biomasa atkarībā no pielietotā vienādojuma 76
3.15. att. Uzkrātais ogleklis kokaudžu virszemes biomasā (AGB) un celma/sakņu biomasā (BGB) pielietojot dažādas aprēķinu metodes 81
3.16. att. Uzkrātais ogleklis pēc valdošās koku sugas aizņemtās platības pielietojot dažādas aprēķinu metodes 82
3.17. att. Koku stumbrā, zaros un celmos/saknēs uzkrātais ogleklis atkarībā no sugas 83
3.18. att. Dažāda vecuma audzēs uzkrātais ogleklis pēc valdošās koku sugas 84
3.19. att. Oglekļa uzkrājuma vidējo slīdošo vērtību dinamika Latvijā atkarībā no aprēķinu perioda 86

PUBLIKĀCIJAS PAR PROMOCIJAS DARBA TĒMU

1. **Liepiņš, J**., Lazdiņš, A., 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. DOI: 10.1080/02827581.2017.1337923 (IF 2017 = 1.600)
2. **Liepiņš, J**., Ivanovs, J., Lazdiņš, A., Jansons, J., Liepiņš, K. (2017). Mapping of basic density within European aspen stems in Latvia. *Silva Fennica. 51(5),* 9p DOI: 10.14214/sf.7798 (IF 2017 = 1.683)
3. **Liepiņš, J**., Liepiņš, K. (2017). Mean basic density and its axial variation in Scots pine, Norway spruce and birch stems. In *Research for Rural Development 23rd Annual International Scientific Conference Proceedings*. (Vol. 1, pp. 21–27). DOI: 10.22616/rrd.23.2017.003
4. **Liepiņš, J**., Liepiņš, K. (2015). Evaluation of bark volume of four tree species in Latvia. In *Research for Rural Development. 21rd Annual International Scientific Conference Proceedings*. (Vol. 2, pp. 22–28). ISSN: 16914031

DALĪBA KONFERENCĒS

1. The Annual 24rd International Scientific Conference "Research for Rural Development 2018", 16.05. – 18.05.2018. Jelgava, Latvia. Prezentācija – **Liepiņš, J**., Ivanovs, J., Lazdiņš, A., Jansons, J., Liepiņš, K. Variation of basic density in stems of European aspen wood and bark.
2. Linking belowground biodiversity and ecosystem function in European forests (BioLink) during yr. 2015 – 2018, 14.05. – 16.05.2018. Granada, Spain. Stenda referāts – Daugaviete, M., Lazdiņa, D., Celma, S., Bārdule, A., Bārdulis, A., **Liepiņš, J**., Liepiņš, K., Lazdiņš, A., Jansons, Ā., Ķēniņa, L., Zeps, M. Realized and ongoing research projects in frame of COST Action FP 1305 in Latvian Forest Research Institute Silava.
3. Starptautiski zinātniski praktiskā konference "Zinātne un prakse nozares attīstībai", 15.03 – 17.03.2017. Jelgava, Latvija. Prezentācija – **Liepiņš, J**., Liepiņš, K. Koksnes blīvuma izmaiņas priedes, egles un bērzu stumbru garenvirzienā.
4. 11th International Scientific Conference „Students on their way to science", 22.04.2016. Jelgava, Latvia. Prezentācija – **Liepiņš, J**., Liepiņš, K. Estimation of the biomass stock from growing stock volume.
5. International Scientific Conference of the forest sector „Knowledge based forest sector", 4.11 – 6.11. 2015. Rīga, Latvija. Prezentācija – **Liepiņš, J**., Lazdiņš, A., Liepiņš, K. Above - and belowground biomass functions for four most common tree species in Latvia.
6. International Scientific Conference of the forest sector „Knowledge based forest sector", 4.11 – 6.11. 2015. Rīga, Latvija. Prezentācija – Lazdiņš, A., **Liepiņš, J**., Liepiņš, K., Bārdule, A., Butlers, A. Results of research program on evaluation of impact of forest management measures on greenhouse gas emissions and CO_2 removals.
7. 10th International Scientific Conference „Students on their way to science", 24.04.2015, Jelgava, Latvia. Prezentācija – Muižnieks, E., **Liepiņš, J**., Lazdiņš, A. Carbon content in biomass of the most common tree species in Latvia.
8. The Annual 21st International Scientific Conference „Research for Rural Development 2015", 13.05 – 15.05.2015. Jelgava, Latvia. Prezentācija – **Liepiņš, J**., Liepiņš, K. Evaluation of bark volume of four tree species in Latvia.
9. Conference „Adaptation and mitigation: strategies for management of forest ecosystems", 23.04 – 24.04.2015. Riga, Latvia. Prezentācija – **Liepiņš, J**., Liepiņš, K., Lazdiņš, A. Biomass equations for the most common tree species in Latvia.
10. Zinātniski praktiskā konference „ Zinātne un prakse nozares attīstībai",16.04 – 19.04.2015. Jelgava, Latvija. Prezentācija – **Liepiņš, J**. Mizas apjoma modelēšana Latvijas saimnieciski nozīmīgajām koku sugām.
11. 9th Baltic Theriological Conference „Forest ecosystem and its management: towards understanding the complexity", 15.10.2014. Daugavpils, Latvia. Prezentācija – **Liepiņš, J**., Liepiņš, K., Lazdiņš, A. Biomass studies for most common tree species in Latvia.
12. 9th Baltic Theriological Conference „Forest ecosystem and its management: towards understanding the complexity", 15.10.2014. Daugavpils, Latvia. Prezentācija – Mūrniece, S., Lazdiņš, A., **Liepiņš, J**. Decomposition of below-ground biomass in coniferous forest stands in Latvia.

PROMOCIJAS DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

AGB	kopējā virszemes biomasa
BB	dzīvo un sauso zaru biomasa
BEF	biomasas pārrēķina koeficients
BGB	kopējā celma/sakņu biomasa
C	ogleklis
CO_2	oglekļa dioksīds
D	koka krūšaugstuma caurmērs
ETS	emisiju kvotu tirdzniecības sistēma
FAO	Pārtikas un lauksaimniecības organizācija
Gt	gigatonna
ĢIS	ģeogrāfiskās informācijas sistēma
H	koka augstums
IPCC	Klimata pārmaiņu starpvaldību padome
LiDAR	aerolāzerskenēšanas radars
MAPE	vidējā absolūtā kļūda
MRM	meža resursu monitorings
PRSE	regresijas koeficienta relatīvā standartkļūda
R^2	determinācijas koeficients
RMSE	vidējā kvadrātiskā kļūda
SAR	sintezētās apertūras radars
SB	stumbra biomasa
SEG	siltumnīcefekta gāzes
u.c.	un citi
UNFCCC	Apvienoto Nāciju Organizācijas Vispārējā konvencija par klimata pārmaiņām
ZIZIMM	zemes izmantošana, zemes izmantošanas maiņa un mežsaimniecība

IEVADS

Nepieciešamība stabilizēt oglekļa dioksīda (CO_2) 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 CO_2 emisijas un sekmējot fosilā kurināmā aizstāšanu ar biomasu, bet arī veicinot atmosfērā esošā CO_2 piesaisti un saistīto oglekli uzglabājot dažādās krātuvēs. Liela CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 piesaiste notiek pamatā kokaugu virszemes un sakņu biomasā un tad humifikācijas procesā daļa no oglekļa tiek uzkrāts augsnē (Gren & Zeleke, 2016). Kokaugi un lakstaugi fotosintēzes procesā izmanto saules gaismu, lai CO_2, ūdeni un barības vielas sintezētu par cukuriem un ogļhidrātiem, kas uzkrājas koka frakcijās, 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 rezultātā, galvenais uzsvars oglekļa bilances uzlabošanā pasaulē, paralēli fosilo resursu izmantošanas ierobežošanai, kas ir arī lielākais antropogēno emisiju avots, tiek likts uz CO_2 bioloģiskās piesaistes veicināšanu. Zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektors rada vislielāko ietekmi uz SEG emisijām un CO_2 piesaisti Latvijā. Mūsu valsts CO_2 piesaiste augošu koku biomasā būtiski pārsniedz visu pārējo tautsaimniecības sektoru kopējās SEG emisijas. Par cik Latvija ir Eiropas Savienības un starptautisko nolīgumu dalībvalsts, ir svarīgi, lai mēs prastu ar maksimālu precizitāti novērtēt mežaudžu CO_2 piesaisti, tādējādi mazinot saistību pārvērtēšanas riskus. Neskatoties uz ZIZIMM sektora nozīmīgumu, metodiskā bāze CO_2 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 tā aprēķināšanai. Dažādu koku sugu biomasas frakcionālais sadalījums būtiski atšķiras, tāpēc atsevišķi biomasas vienādojumi nepieciešami visām izplatītākajām koku sugām.

Precīzas metodes nepieciešamas ne tikai, lai aprēķinātu CO_2 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 konvencija 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. Tomēr, atbilstoši Kankunas konferencei, kura notika Meksikā 2010. gadā, līdz 2020. gadam SEG emisijas plānots samazināt vēl par 20–30%. CO_2 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, veģetācijas zonas, platuma grādi, ūdens deficīts, gada vidējā temperatūra un citi faktori

(Berninger et al., 1995; Stegen et al., 2011; Wirth, Schumacher, & Schulze, 2004 u.c.). Visa Latvijas teritorija atrodas Eiropas hemiboreālajā mežu joslā (Ahti, Hämet-Ahti, & Jalas, 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 (Fenoskandija un Baltijas valstis) 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 veģetācijas 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, Granhus, & Astrup, 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. Liepa un Blija (2008) ir aprakstījuši Latvijas egļu mežu koku biomasas struktūru balstoties uz 21 paraugkoku 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 demonstrēja ievērojami augstāku precizitāti nekā Somijā izstrādātie. Promocijas darbā Bārdulis (2013) ir raksturojis priežu jaunaudžu sakņu biomasas izmaiņas sausieņu meža tipos. Ir veikti daži pētījumi par oglekļa akumulāciju virszemes un sakņu biomasā priedes, egles un bērza stādījumos lauksaimniecības zemēs (Andis Bārdulis et al., 2017; Daugaviete et al., 2008). Ir pieejamas dažādu autoru (Bārdulis et al., 2015; Daugaviete, 2010; Miezīte, Liepa, & Lazdiņš, 2011) 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 CO_2 piesaistes avotu aprēķiniem. Turpretī, nekorektu un nepārbaudītu citu valstu vienādojumu izmantošana SEG emisiju un CO_2 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.

Pētījumā izvirzītas šādas tēzes.

1. Koksnes vidējo blīvuma vērtību izmantošana visa koka stumbra biomasas aprēķināšanai veido sistemātisku kļūdu, kuras lielums ir atšķirīgs dažādām koku sugām.
2. Starpvalstu klimata pārmaiņu padomes 2006. gada SEG inventarizācijas vadlīniju piedāvāto biomasas pārrēķina koeficientu un Fenoskandijā izstrādāto biomasas vienādojumu izmantošana rada kļūdu novērtējot Latvijas kokaudzēs uzkrāto oglekli.

Lai sasniegtu pētnieciskā darba mērķi, izvirzīti sekojoši pētnieciskie uzdevumi.

1. Raksturot vidējo stumbra reducēto blīvumu, tā telpiskās 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 uzkrātā oglekļa daudzumu, izmantojot Latvijas meža resursu monitoringa datus.

Promocijas darbs izstrādāts analizējot Meža nozares kompetences centra (MNKC) pētījumu programmas "Metodes un tehnoloģijas meža kapitālvērtības palielināšanai" ietvaros pētniecības projektā "Siltumnīcefekta gāzu emisiju un CO_2 piesaistes pētījumu programma" ietvaros iegūtos datus. Pētījuma īstenošanas termiņš 2011.–2015.gads.

1. OGLEKĻA PIESAISTES UN KOKAUDŽU BIOMASAS NOTEIKŠANAS PROBLEMĀTIKAS ANALĪZE

1.1. Oglekļa globālās aprites dinamika un piesaiste

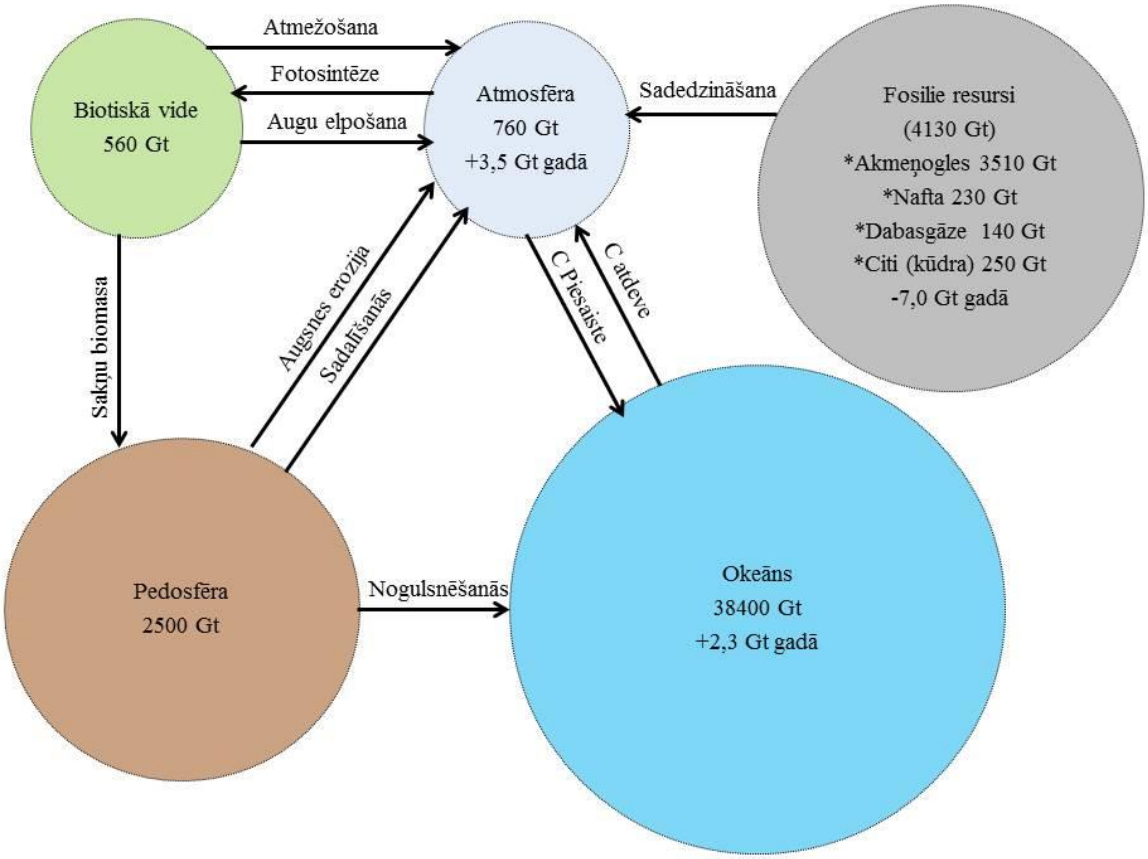
1.1.1. Oglekļa aprites cikls

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 CO_2. Minētā gāze veido apmēram 74% no visām cilvēka radītajām SEG un tā galvenokārt izdalās, sadegot fosilajiem kurināmajiem kā akmeņoglēm, naftai un dabasgāzei (WRI, 2012). Oglekļa daudzumu un tā plūsmu var izteikt oglekļa vienībās vai arī CO_2 vienībās (1 kg oglekļa ir ekvivalents ar 3.67 kg CO_2) (IPCC, 2003). Pasaules sabiedrība ir izpratusi nepieciešamību stabilizēt CO_2 un citu SEG koncentrāciju atmosfērā, lai mazinātu globālās sasilšanas procesu. Pamatā ir izdalītas trīs stratēģijas CO_2 koncentrācijas atmosfērā samazināšanai (Schrag, 2007): samazināt globālo enerģijas patēriņu, attīstīt enerģijas veidus ar zemām CO_2 emisijām un piesaistīt CO_2 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 CO_2, tad cikla elementi, ko mēs pazīstam kā oglekļa piesaistītājus, patiesībā ir CO_2 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. attēls) – fosilie resursi, atmosfēra, okeāns, biotiskā vide (dzīvie organismi) un pedosfēra, jeb augsne virs pamatieža (Lal, 2008). No minētajām oglekļa krātuvēm lielākā ir okeāns, tajā akumulēts apmēram 38400 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 veidā, savukārt vismazākā ir biotiskā vide – 560 Gt.



1.1. att. **Oglekļa plūsma starp galvenajām oglekļa krātuvēm (Lal, 2008)**

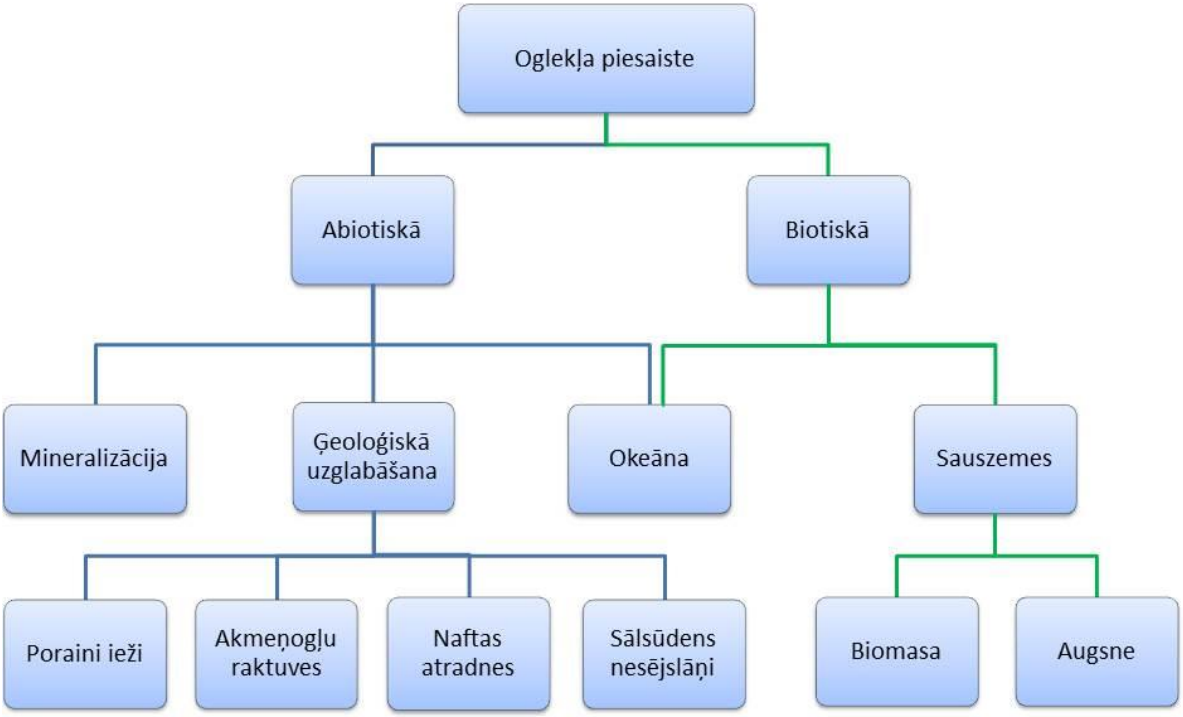
Starp atmosfēru un biotisko vidi ir lielas grūti aprēķināmas divvirzienu oglekļa plūsmas, bet no fosilajiem resursiem uz atmosfēru oglekļa plūsma ir vienvirziena un viegli aprēķināma (Berndes, Bird, & Cowie, 2011). Oglekļa daudzuma pieauguma temps atmosfērā lielā mērā ir atkarīgs no antropogēnām darbībām, kā arī no bioģeoķīmisko 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 oglekli apmēram 2–4 Gt 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 CO_2 mēslošanas efektu (angļu val. *CO_2 fertilization effect*) (Matthews, 2007) un izmaiņām zemes lietojuma veidā un apsaimniekošanā. CO_2 mēslošanas efekta princips ir vienkāršs: lielāks CO_2 daudzums atmosfērā, veicina augu augšanu, nodrošinot arvien lielāku CO_2 piesaisti to biomasā.

Sauszemes oglekļa plūsmas aprēķini uz citām krātuvēm ir mazāk precīzi nekā okeānos, atmosfērā un izlietojot fosilos resursus (Houghton, Hall, & Goetz, 2009). CO_2 emisijas zemes izmantošanas maiņas rezultātā ir neskaidras, jo joprojām nav precīzi zināms, piemēram, tropisko mežu atmežošanas apmērs, kā arī to biomasa (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 noklusētos emisiju faktorus 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 CO_2 uztveršanu un uzglabāšanu citās oglekļa krātuvēs, kas citādi tiktu emitēts atpakaļ atmosfērā, sauc par oglekļa piesaisti. Šajā kontekstā, visus oglekļa piesaistes veidus var iedalīt divās lielās kategorijās – abiotiskie un biotiskie oglekļa piesaistes paņēmieni (1.2. attēls). 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 paņēmienu pamatā ir oglekļa piesaiste no atmosfēras caur fotosintēzes procesu un turpmāku tā noglabāšanu augsnē un okeānos. Fotosintēzes blakusprodukts ir skābeklis, attiecīgi, mazinoties CO_2 piesaistei no atmosfēras, samazinās arī skābekļa saturs atmosfērā.



1.2. att. **Potenciālās oglekļa piesaistes iespējas, balstoties uz literatūrā pieejamo informāciju**

Viena no reālākajām abiotiskajām piesaistes iespējām CO_2 koncentrācijas samazināšanai atmosfērā ir tā uztveršana un uzglabāšana zemes dzīlēs vai okeānos. Tas ir process kurā antropogēnas izcelsmes CO_2 tiek savākts, tādā veidā nodrošinot gāzes izolāciju no atmosfēras (Boot-Handford et al., 2014; Pires et al., 2011). Uztverto CO_2 var iesūknēt izstrādātās akmeņogļu raktuvēs, naftas urbumos, stabilos iežu slāņos vai sālsūdens nesējslāņos (Klara, Srivastava, & McIlvried, 2003). CO_2 iesūknēšana okeānos lielā dziļumā ir alternatīva, kas plaši apspriesta jau apmēram 40 gadus (Lal, 2008). Lielā dziļumā (dziļāk par 1000 m) CO_2 ir blīvāks nekā ūdens, līdz ar to tas grimst un var tikt uzglabāts okeānu dzīlēs. CO_2 piesaistes potenciāls okeānos lēsts līdz 10 000 Gt, pārsniedzot aprēķinātos fosilo kurināmo

krājumus (IPCC, 2005) No idejas rašanās septiņdesmito gadu beigās, ir panākts ievērojams progress izmaksu samazināšanas ziņā CO_2 uzglabāšanai okeānos, bet joprojām metode vērtējama kā dārga. Rūpnieciskā CO_2 uzglabāšana prasa lielu enerģiju un dārgas iekārtas, kā arī uztvertā gāze ir jātransportē un jāuzglabā stabilos ģeoloģiskos veidojumos (Rubin, 2012). Uzglabāšanas izmaksas ir novērtētas apmēram 40–70 eiro par tonnu CO_2, atkarībā no pielietotās tehnoloģijas (Narbel, Hansen, & Lien, 2014), tāpēc joprojām turpinās darbs pie citu risinājumu meklēšanas. CO_2 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 izvēršana (Meyer, 1989), CO_2 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 dzīlēs prognozē lielu potenciālu, jo teorētiski šiem avotiem ir lielāka oglekļa ietilpība nekā biotiskajai piesaistei (Freund & Ormerod, 1997). Tomēr tehnoloģijas mākslīgai oglekļa noglabāšanai varētu būt plašāk izmantojamas vien pēc 2025. gada, jo šobrīd pieejamās tehnoloģijas ir dārgas, energoietilpīgas un saistās ar augstu CO_2 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 CO_2 piesaistē okeānos (Boyd et al., 2004; Martin et al., 1994). Ņemot vērā pašreizējo zināšanu līmeni, joprojām nav skaidrs kā okeānu mēslošana var ietekmēt okeānu ekoloģiju ilgtermiņā, līdzīgi kā CO_2 iesūknēšana (Chisholm, 2001; Williamson et al., 2012).

Mitrāji un to augsnes ir ievērojama krātuve, kas uzglabā apmēram 450 Gt oglekļa (Warner, Clymo, & Tolonen, 1993). Kūdras augsnes var saturēt vairāk nekā 200 reizes lielāku oglekļa daudzumu nekā uz tām augošā veģetācija (Garnett et al., 2001). Tomēr šādu augšņu nosusināšana un to turpmāka izmantošana vairumā gadījumos padara tās par CO_2 emisiju avotu. Lielas mitrāju platības daudzu gadu garumā visā pasaulē ir nosusinātas lauksaimniecības vai mežsaimniecības vajadzībām. Nosusinātās kūdras augsnes sadalās un kūdras biezums samazinās ar ātrumu 1–2 cm gadā, galvenokārt, oksidācijas procesu rezultātā (Leifeld, Müller, & Fuhrer, 2011; Wosten, Ismail, & Wijk, 1997). 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 (Lohila et al., 2011; Lupikis et al., 2017; Ojanen et al., 2010). 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 CO_2 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 CO_2 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). Kūtsmēslu, 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 CO_2 samazināšanai atmosfērā neradot negatīvu ietekmi uz vidi (Lal, 2008). Meža ekosistēmās ogleklis uzkrāts ne tikai kokaugu biomasā, bet arī nobirās, augos un augsnē. CO_2 mēslošanas efekta rezultātā prognozējams, ka potenciālā oglekļa piesaiste meža ekosistēmas 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. Tādējādi, 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 koksnē saistīto oglekli. Šāda stratēģija, pamatojoties uz minēto ideju, tika ieteikta vairākus gadus iepriekš (Köhl & Frühwald, 2009; Zeng, 2008).

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 paņēmiens. Īpaši pēdējos gados pieaug uzsvars par CO_2 emisiju samazināšanu ēku būvniecībā un atrodot koksnei arvien jaunus pielietojumus, kā arī pilnveidojot tās apstrādes tehnoloģijas (Cabeza et al., 2013; Gustavsson, Pingoud, & Sathre, 2006). 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). Dēļ nenoteiktības un oglekļa piesaistes izmaiņām laika gaitā, ārkārtīgi svarīgi ir veikt precīzus

oglekļa piesaistes aprēķinus, lai pieņemtu nepieciešamos lēmumus klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumos.

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 CO_2 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 (Beijere et al., 2006).

Kioto protokola un UNFCCC uzdevumi ir ierobežot un samazināt sešu galveno SEG (oglekļa dioksīds CO_2, metāns CH_4, dislāpekļa oksīds N_2O, fluorogļūdeņraži HFC, perfluorogļūdeņraži PFC, sēra heksafluorīds SF_6) plūsmu uz atmosfēru, kā arī palielināt CO_2 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 tautsaimniecībai neradīja būtisku ietekmi, citām dalībvalstīm 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 augošās ekonomikas kā Ķīna un Indija 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 uzsvērta negatīvā atmežošanas un noplicinošas meža apsaimniekošanas ietekme kopējā CO_2 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, īstenos kopīgi ar pārējām dalībvalstīm. Parīzes nolīguma izvirzītie mērķi ir ļoti ambiciozi; lai noturētu globālās temperatūras pieaugumu zem 2 °C, ikgadējās CO_2 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 CO_2 emisiju apjoma, tomēr piesaistes ātrums un kapacitāte nav pietiekama, lai asimilētu visus plānotos antropogēnos CO_2 izmešus 21. gadsimtā ja turpmāk netiks krasi ierobežota fosilo resursu izmantošana (Lal, 2008).

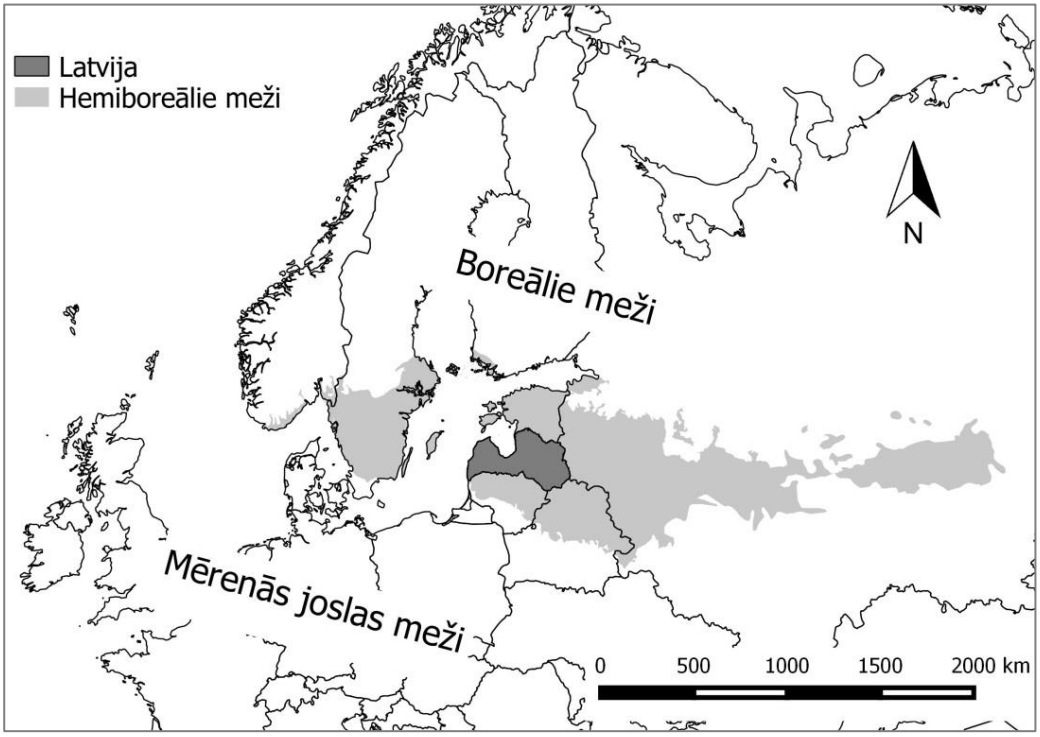
Lai būtu iespējams izvērtēt mežsaimniecības sektora ieguldījumu, katrai valstij 2011. gadā aprēķināts SEG emisiju samazināšanas un piesaistes palielināšanas mērķis jeb tā saucamais meža apsaimniekošanas references līmenis (angļu val. *forest management reference level* vai *forest reference emission 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 mlj.t CO_2 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, promocijas darbā izstrādātos biomasas vienādojumus (Liepiņš, Lazdiņš, & Liepiņš, 2017) un citus uzlabojumus, Latvijas meža apsaimniekošanas saistību apmērs no 2014.–2020. gadam samazināsies zem 4000 mlj.t. CO_2 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 CO_2 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 CO_2 emisijas samazināšanai atmosfērā ir emisiju kvotu tirdzniecības sistēma (ETS). Viena emisijas kvota ir atļauja emitēt 1 tonnu CO_2 izmešu. Eiropas Savienības iekšējā ETS ir lielākais oglekļa tirgus pasaulē (Fan et al., 2017) un līdz šim organizēta trijos pārskata periodos (Cretí & Joëts, 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 daļu 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 Comission, 2017). Kopumā Eiropas Savienības ETS sistēma nav devusi sākotnēji gaidīto rezultātu (Cretí & Joëts, 2017). Zemās emisijas kvotu cenas nav motivējušas samazināt kaitīgo CO_2 emisiju nonākšanu atmosfērā. Nepieciešamība mainīt esošo situāciju ETS novedusi pie reformām, kas stāsies spēkā nākamajos gados. Reformu rezultātā pieaugs CO_2 emisiju cena, kas ietekmēs visus iedzīvotājus un uzņēmumus Eiropas Savienībā. Paredzams, ka pieaugot emisiju vienību cenai, notiks neizbēgams elektroenerģijas cenu kāpums, 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 CO_2 piesaisti, kā arī noteiktajos termiņos jāsagatavo nacionālie ziņojumi atbilstoši IPCC definētajām vadlīnijām (Gasparini & Cosmo, 2015; Grassi et al., 2017). Ziņojumos jāsniedz informācija ne tikai par SEG emisijām un CO_2 piesaisti, bet arī par UNFCCC saistību īstenošanai veiktajiem un iecerētajiem politiskajiem risinājumiem (Eggleston et al., 2006; IPCC, 2003). 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.

Kamēr atmežošana ir galvenais SEG emisiju avots tropu mežos, lielākais piesaistītā oglekļa apjoms notiek 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. attēls). 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; Stegen et al., 2011; Wirth et al., 2004). Dažādu klimatisko faktoru kompleksās iedarbības rezultātā mežaudžu krājai, līdz ar to arī kokos uzkrātā oglekļa apjomam, Eiropā ir tendence palielināties virzienā no ziemeļu platuma grādiem uz dienvidiem.



1.3. att. **Latvijas atrašanās vieta hemiboreālo mežu joslā pēc Ahti, Hämet-Ahti, & Jalas, (1968) un EEA (2007)**

Pirmos Kioto protokola saistību gadus CO_2 piesaiste tika rēķināta vienkāršoti, izmantojot IPCC izstrādātos noklusētos pārrēķinu koeficientus. 2011. gadā Latvijas Valsts mežzinātnes institūts "Silava" uzsāka AS "LVM" un SIA "MKPC" finansētu projektu par mežsaimniecisko darbību ietekmi uz SEG emisijām un oglekļa piesaisti. Projekts noslēdzās 2015. gadā un tā ietvaros izstrādātie matemātiskie instrumenti ļāva būtiski uzlabot kokaudžu

CO_2 piesaistes aprēķinu metodiku piemērojot Latvijas teritorijai atbilstošākus pārrēķinu koeficientus, nevis vadlīnijās minētos, izvairoties no būtiska oglekļa apjoma koksnes biomasā pārvērtēšanas riska.

Koksnes biomasa mežaudzēs Latvijā ir viens no CO_2 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 nacionālo SEG inventarizācijas ziņojuma datiem ik gadu koku biomasā tiek piesaistīts apmēram 32 milj.t CO_2, protams, 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

Vadoties pēc Eggleston et al. (2006) klasifikācijas, meža ekosistēmā piecas galvenās oglekļa krātuves ir stumbra un zaru biomasa, sakņu biomasa, nobiras, kritalas un organiskās vielas augsnē. Fotosintēzes procesā augos 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, 2008b). Sakņu biomasas, jeb visu dzīvo sakņu galvenā funkcija globālajā oglekļa aprites ciklā ir tā nogādāšana un uzglabāšana augsnē (Eggleston et al., 2006). Nobiru un kritalu kopējā masa sastāda vien nelielu īpatsvaru no kopējā, mežaudzēs akumulētā oglekļa apjoma, tāpēc tai ir neliels īpatsvars kopējā oglekļa bilancē (Ravindranath & Ostwald, 2008b). Arī organiskā augsne ir nozīmīga oglekļa krātuve mežā, bet oglekļa piesaiste augsnē, tāpat kā nobirās un kritalās akumulētais ogleklis ir tiešā mērā atkarīgs no augu virszemes un sakņu daļas biomasas (Kumar, Pandey, & Pandey, 2006; Lal, 2005). Tāpēc koku biomasas novērtēšana ir priekšnoteikums, lai varētu apzināt nobirās, kritalās un augsnē akumulēto oglekļa apjomus.

1.2.1. Virszemes biomasas novērtēšana

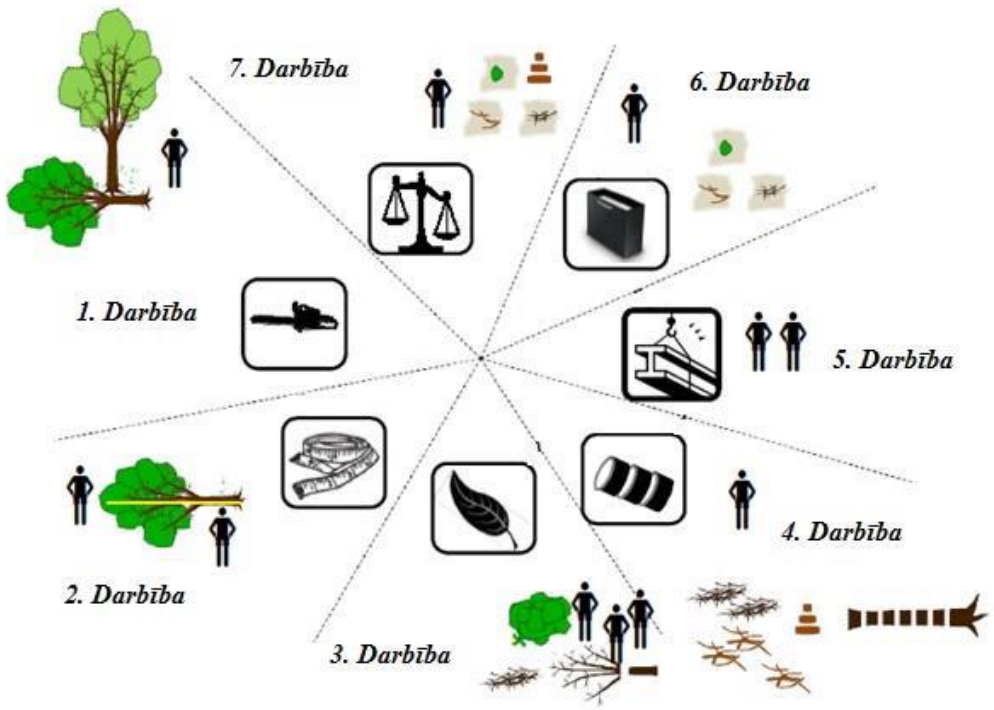
Koku virszemes biomasa ietver vairākas biomasas frakcijas, kuras nepieciešams noteikt atsevišķi: stumbra koksne, stumbra miza, sausie zari, dzīvie zari, lapas vai skujas (Eggleston et al., 2006; Ravindranath & Ostwald, 2008b). Novērtējot kokaudzēs saistītā oglekļa apjomus, vairumā gadījumos zinātnieki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

Ir pieejamas divas empīrisko 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 (Blujdea et al., 2012; Bronisz et al., 2016; Jerome

Chave et al., 2014; Cienciala et al., 2006; Jenkins et al., 2003; Johansson, 2007; Marklund, 1988; Mugasha et al., 2013; Repola, 2008, 2009; Smith et al., 2014; Zianis et al., 2005).

Pretēji iepriekšējai, otra biomasas novērtēšanas metode , paredz biomasas aprēķināšanu bez koku neiznīcināšanas jeb nozāģēšanas (angļu val. *non-destructive method)*. Metode piemērojama meža ekosistēmām, kurās aug retas vai aizsargājamas koku sugas un šādu koku nozāģēšana nav iespējama vai pieļaujama, vai arī, novērtējot biomasu plašākā mērogā. Piemēram, 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, Arévalo, & Fernández, 2005), vai arī vienkārši nomērīt krūšaugstuma caurmēru, koka augstumu, koka tilpumu, blīvumu un, pielietojot alometriskos vienādojumus, aprēķināt biomasu (Ravindranath & Ostwald, 2008b). 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 metode.

Pēc Breu, Guggenbichler, & Wollmann (2012) ieteikumiem, koku virszemes biomasas novērtēšanai pēc destruktīvās metodes vajadzētu būt organizētai secīgi izpildot septiņas darbības (1.4. attēls).



1.4. att. **Veicamās darbības novērtējot kokaugu virszemes biomasu pēc Breu, Guggenbichler, & Wollmann (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 šķērsgriezuma 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 šķērsgriezuma ripas. 5. darbībā tiek nosvērtas koka stumbra sekcijas (kopā ar attiecīgajām

šķērsgriezuma ripām), kā arī atsevišķi dzīvo un sauso zaru masa. Visvienkāršāk svēršanu veikt ar iekaramajiem svariem un uz vietas konstruētu atbalsta statīvu svaru iekāršanai, vai arī uzliekot 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 līdzņemšanai. 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 saknēs (Litton, Raich, & Ryan, 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, 2008a). Boreālās un mērenās joslas mežos koka saknes visvairāk ir izvietotas augsnes virskārtā; pirmajos 30 cm no augsnes virskārtas ir izvietots 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 biomasa, arī sakņu biomasa 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, 2008a). 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 un sākas sakņu biomasa. Teorētiķi uzskata, ka koka virszemes biomasa sākas līdz ar augsnes virsmu, bet praktiski šādā augstumā koka stumbru biomasas mērījumiem sagatavot ir ļoti grūti, īpaši, ja koks sasniedzis 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 (Albert et al., 2014; Johansson, 2002; Mugasha et al., 2013) 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 (Levillain et al., 2011; Milchunas, 2012; Vogt, Vogt, & Bloomfield, 1998; Yuan & Chen, 2012). Piemēram, pētījumā, kurā salīdzinātas uzsūcošo sakņu novērtēšanas metodes, Yuan & 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 neatšķiras atkarībā no šo divu metožu pielietojuma (Finér et al., 2011; Vogt et al., 1998). Vienprātības trūkums starp pētniekiem apliecina, ka nepieciešams kritiski izvērtēt katras metodes stiprās un vājās puses, un, vadoties pēc pieejamajiem resursiem (darbaspēka pieejamība, pieejamais finansējums, vietas īpatnības,

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

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

1.1. tabula

Celma/sakņu biomasas novērtēšanas metodes (Addo-Danso et al., 2016)

Metode		Darbības princips	Precizitātes prasības	Izmaksas	Precizitāte
Rupjo sakņu biomasa					
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 koriģēšana 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 biomasa					
Augsnes urbuma metode	Tiešā	Sakņu biomasu aprēķina pēc sakņu apjoma urbuma paraugā	Urbuma diametram jābūt lielākam par 10 cm	Lielas	Augsta
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

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. tabula), 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) (Picard et al., 2015; Zianis & Mencuccini, 2004).

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

vai

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

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

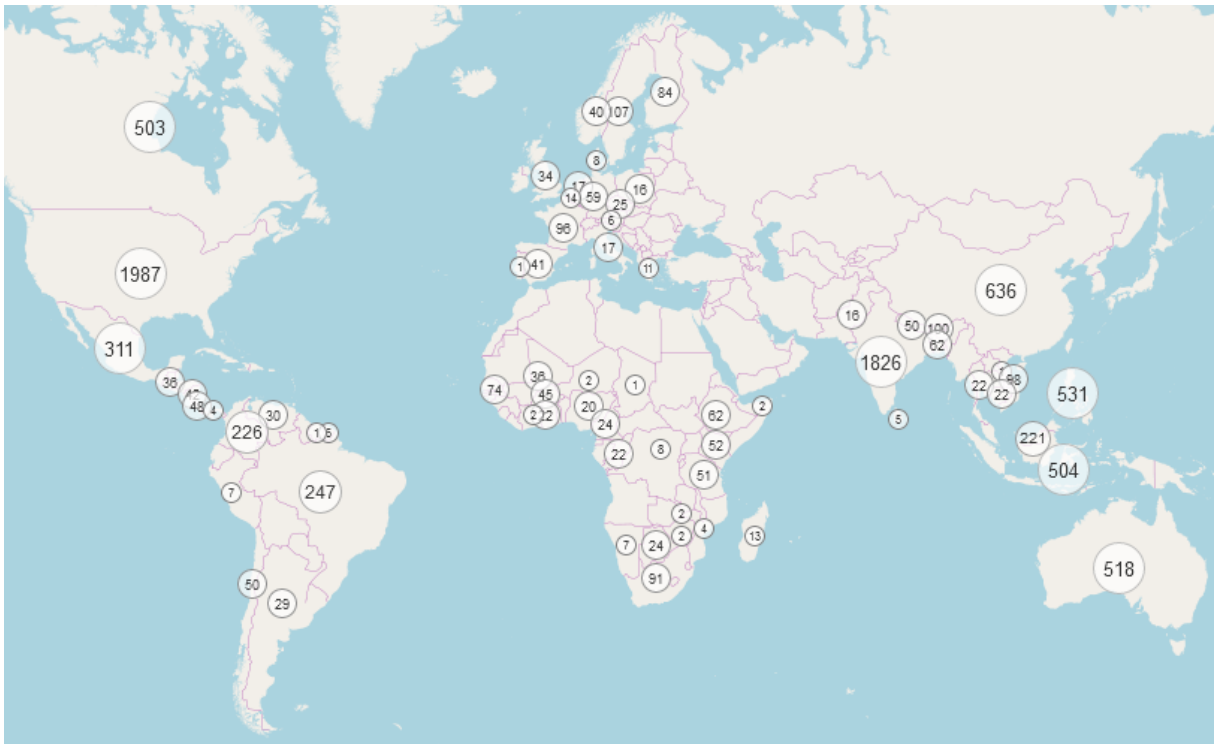
Alometriskie vienādojumi tiek pielietoti, lai, izmantojot viegli izmērāmas pazīmes, aprēķinātu grūtāk izmērāmas pazīmes, kā, piemēram, - koka biomasu. Mežsaimniecībā šim mērķim visbiežāk pielietotā pazīme ir koka krūšaugstuma caurmērs (D). Koka biomasa ir atkarīga ne vien no D, bet arī koka augstuma (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 (Feldpausch et al., 2011; Peng, Zhang, & Liu, 2001). 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) (Petersson 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 aprēķina parasti no kokaudzes krājas platības vienībā (Brown & Lugo, 1984; Cosmo, Gasparini, & Tabacchi, 2016). Kokaudzes līmeņa vienādojumi parasti ir ļoti vienkārši un praktiski pielietojami, jo koksnes krāja ir viens no visbiežāk novērtētajiem kokaudzes raksturojošajiem rādītājiem. Pan et al. (2004) minēto metodi ir uzlabojis kokaudzes krāju iedalot klasēs, ņemot vēra 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 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). Uz 2018. gada sākumu datubāzē reģistrēti vairāk nekā 9200 dažādās valstīs publicēti dažādām koku sugām un frakcijām veidoti biomasas alometriskie vienādojumi (1.5. attēls). Šajā datu bāzē nav reģistrēts neviens Baltijas valstīs (Latvijā, Lietuvā un Igaunijā) izveidots biomasas vienādojums.



1.5. att. **GlobAllomeTree datubāzē ievietotie biomasas alometriskie vienādojumi** (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 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 alometrisko vienādojumu aprakstīšanai un novērtēšanai (Baldasso, Birigazzi, & Henry, 2012; Eggleston et al., 2006; IPCC, 2003; Jenkins et al., 2004; Picard, Saint André, & Henry, 2012; Pretzsch et al., 2002; Sileshi, 2014), tomēr nevienā dokumentā nav praktisku ieteikumu par obligāti nepieciešamo un vēlamo informāciju, kas būtu jāsniedz publicējot alometriskos vienādojumus. Šī iemesla dēļ ekspertu komanda no visas pasaules (Cifuentes-Jara et al., 2015) ir izstrādājusi praktiskas rekomendācijas pēc kurām vadīties, izstrādājot alometriskos vienādojumus visā pasaulē.

1.2.4. Tālizpētes metodes

Kokaudžu biomasas novērtēšanai ar tālizpētes tehnoloģijām pēdējo trīsdesmit gadu laikā ir veltīta 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 (Lei & Shirong, 2017; Thurner et al., 2014). Tālizpētes 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, tālizpētes tehnoloģijas izmantojamas arī, piemēram, meža tipu kartēšanai vai kokaudžu parametru noteikšanai (Toan et al., 1992; McRoberts, Liknes, & Domke, 2014).

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

Biomasas novērtēšana izmantojot pasīvos optiskos tāldarbības sensorus (IKONOS, Quickbird, Landsat TM un ETM+, SPOT 5, 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 (Hyde et al., 2006; Thenkabail et al., 2004). Tomēr, izmantojot iepriekšminētos augtas 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 tālizpētes metodes precizitāti (Lu, 2006). Līdzīga situācija ir ar zemākas izšķirtspējas satelītainām, kuras nedod pietiekoši detalizētu informāciju par biomasas izmaiņām mazākā platības vienībā, kā rezultātā 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 tālizpētes 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 biomasa sastāv gan no vainaga (lapas un skujas), gan koksnes (stumbrs un zari) biomasas frakcijām. Lapu un skuju biomasa parasti sastāda līdz 10% no visa koka biomasas (Chave et al., 2014; Dobson et al., 1992). Tāpēc optiskās un infrasarkanā 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 tālizpētes 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 līdzenās 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 tālizpētes biomasas novērtēšanas metode, kas nodrošina tādu pat vai pat labāku precizitāti, salīdzinot ar citām iepriekš apskatītajām metodēm. LIDAR tehnoloģiju plaši izmanto arī arhitektūrā un būvniecībā (Lu et al., 2016; Sharma & Chaudhry, 2015). Ar lāzera gaismas impulsu iespējams novērtēt biomasu arī biezās 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 tālizpētes metodēm ir trūkumi un priekšrocības, tāpēc to apvienošana varētu būt visoptimālākais risinājums attālinātais 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 pievienošana ar LIDAR iegūto informāciju neuzlaboja vai vien nedaudz ietekmēja biomasas prognozēšanas precizitāti (Clark et al., 2011; Latifi, Fassnacht, & Koch, 2012). Savukārt Anderson et al. (2008) un Laurin et al. (2014)

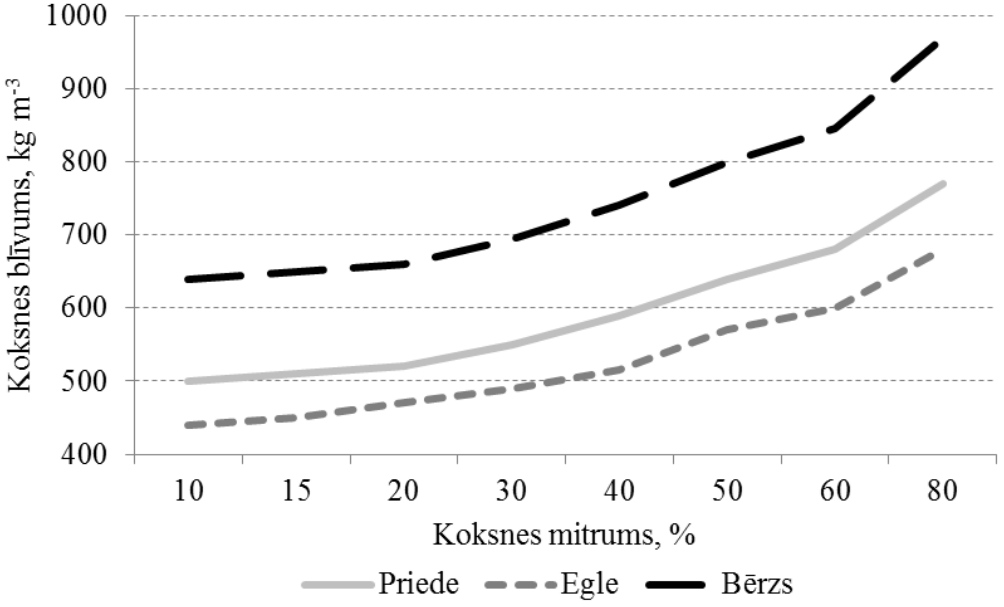
konstatējuši, ka LIDAR un hiperspektrālo radaru iegūtās informācijas sapludināšana būtiski uzlaboja biomasas aplēses mērenās un tropiskās joslas mežos.

Lielākā daļa prognožu par biomasu un oglekļa uzkrājumiem mežaudzēs visā pasaulē ir ļoti aptuvenas, tāpēc tālizpētes metožu attīstība ir vienīgais reālais risinājums kā šo biomasas aprēķinu nenoteiktību samazināt. Šajā kontekstā LIDAR izmantošana ir kļuvusi par dzīvotspējīgāko tālizpētes 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, gan arī mehāniskās koksnes īpašības, kā arī nosaka koksnes izmantojamības iespējas. Piemēram, konstrukciju zāģmateriāliem nepieciešams liels koksnes blīvums un izturība, bet zema blīvuma koksne ir vairāk piemērota celulozes un papīra rūpniecībā (Saranpää, 2003). Visā pasaulē arvien lielāka uzmanība tiek pievērsta oglekļa emisiju samazināšanai būvniecībā un produktu ražošanā. Lai samazinātu CO_2 daudzumu atmosfērā un attīstoties jaunām tehnoloģijām, arvien vairāk tiek projektētas un būvētas augstas izturības ēku konstrukcijas un ražoti produkti, kuros izmanto koksni (Cabeza et al., 2013; Gustavsson et al., 2006). Koksnes izmantošana būtībā ir CO_2 neitrāls process; koki augot piesaista CO_2, un tos sadedzinot vai tiem sadaloties, tieši tāds pats daudzums CO_2 izdalās atpakaļ atmosfērā. Ilgtermiņa efekts CO_2 līdzsvarošanai 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 brīvumu ir ūdens īpatsvars koksnē (1.6. attēls). Svaigi cirstā stāvoklī koksne ir smagāka, bet to 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. att. **Koksnes blīvums atkarībā no koksnes mitruma**
(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 (Petersson & 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, Bald, & Nord-Larsen, 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 stumbrā (Hakkila, 1979). Metodes trūkums ir tas, ka šādi nav iespējams noteikt blīvumu lieliem kokiem, jo ir apgrūtinoši augošam kokam blīvuma paraugu ievākt šādā augstumā. Tāpēc 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, pārrēķinot 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 pēc viena, bet vairākiem paraugiem. Iegūtie paraugi var būt stumbra šķērsgriezuma 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 šķērsgriezuma ripu sektori (Herajarvi, 2004; Heräjärvi & Junkkonen, 2006; Millers & Magaznieks, 2012). Iegūstamo paraugu skaitam vajadzētu būt proporcionālam stumbra garumam, optimālajā variantā ik pa 1 vai 2 metriem (Breu 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 (Dibdiakova & Vadla, 2012; Hakkila, 1979; Saranpää, 2003; Singh, 1984). Piemēram, parastās egles stumbra vidējais blīvums vienas kokaudzes ietvaros mainās no 5–10% (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 (Heräjärvi & Junkkonen, 2006; Jyske, Mäkinen, & Saranpää, 2008; Repola, 2006). 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 (Heräjärvi & Junkkonen, 2006; Karki, 2001; 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 ievākto paraugu skaitu. Īpaši svarīgi tas ir koku sugām ar izteiktu blīvuma mainību garenvirzienā kā priedei. Piemēram, 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 šķērsgriezuma ripai vienlaicīgi, tad jāņem vērā arī blīvuma radiālās izmaiņas katrā šķērsgriezuma 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 traukiem kā, piemēram, bērzam un papelei, pastāv cieša sakarība starp koku gadskārtu platumu un koksnes blīvumu (Saranpää, 2003). Koksnes gadskārtu agrīnā daļa veidojas pavasarī un vasarā nekā vēlīnā koksnes daļa, kura veidojas vasaras otrajā pusē. Ir pieņemts uzskatīt, ka ātraudzīgāko koku koksne ar platākām koksnes gadskārtām (lielāku agrīnās koksnes īpatsvaru) ir mazāk blīva nekā lēnāk augušiem 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). Wilhelmsson et al. (2002) atklāja, ka stumbra krūšaugstuma caurmērs, gadskārtu skaits un klimatiskie rādītāji eglei un priedei ietekmē attiecīgi 50% un 59% no blīvuma izmaiņām.

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

Reducētā blīvuma vērtības Latvijai raksturīgām koku sugām (Eggleston et al., 2006)

Koku suga	Blīvums kg m^{-3}
Priede	420
Egle	400
Bērzs	510
Apse	350
Baltalksnis	450
Melnalksnis	450
Osis	570
Kļava	520
Liepa	430
Ozols	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 (Afif-Khouri, 2013; Ebuy et al., 2011; Elfving, Ulvcrona, & Egnell, 2017; Marklund, 1988; Mugasha et al., 2013; Smith et al., 2014). Metodi visbiežāk pielieto gadījumos, kad ir neliels paraugkoku skaits, kā arī zaru un sakņu biomasas aprēķināšanai, jo šīm koka frakcijām, pretēji stumbram, ir ļoti darbietilpīgi noteikt tilpumu. Izstrādājot Zviedrijas nacionālos biomasas vienādojumus, 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 nezaudē daļu oglekļa, ietekmējot absolūti sausas masas mērījumus. 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 atjaunojamos 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 iegūta no atjaunojamajiem resursiem, no kuriem lielāko īpatsvaru – 64.4% sastāda biomasa (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 uzkrātu hronoloģisku 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 biomasa 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 paredzētiem Eirāzijas ziemeļu daļai. Gan Lietuva, gan Igaunija kokaudžu biomasu pārrēķina no MRM aprēķinātajiem kokaudžu krājas datiem.

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

1.3. tabula

Kokaudžu biomasas aprēķina metožu salīdzinājums dažādās Eiropas valstīs

Reģions	Valsts	Metode*	Ievades parametri*
Ziemeļeiropa	Somija	AV	D, H, (CR)
	Norvēģija	AV	D, (H)
	Zviedrija	AV	D, (H)
Centrālā-Rietumeiropa	Austrija	AV+BEF	D, (H, CR, A)
	Beļģija	AV+BEF	D, (H)
	Francija	BEF	D, (H)
	Vācija	AV	D, (H)
	Nīderlande	AV+BEF	D, (H)
Centrālā-Austrumeiropa	Čehija	AV+BEF	D, (H, A)
	Polija	BEF	M
	Rumānija	BEF	M
Dienvideiropa	Itālija	BEF	M
	Spānija	BEF	M

*AV – alometriskie vienādojumi, BEF – biomasas pārrēķina koeficienti, D – krūšaugstuma caurmērs, H – augstums, CR – vainaga parametri, V – tilpums, A – vecums, M – krāja. Vērtības iekavās norāda, ka parametri lietoti ne visām biomasas frakcijām.

Trīs no apskatītajām Eiropas valstīm (Somija, Austrija, Čehija) savos SEG inventarizācijas ziņojumos, papildus koka D un H, lieto arī citas kokus raksturojošas vērtības, kā piemēram - dažādus vainaga parametrus, stumbra tilpumu un koka vecumu. No apskatītajām biomasas aprēķina metodēm (1.3. tabula) 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 kaimiņvalstīm. Četru valstu (Austrija, Beļģija, Nīderlande, Čehija) kokaudžu biomasas aprēķina metodes izmanto kombināciju starp 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 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, skujas, lapas) biomasu, lieto H un D. Turpretī sakņu biomasa tiek aprēķināta tikai no koku D mērījumiem.

Piecas no apskatītajām valstīm (1.3. tabula) – Austrija, Beļģija, Francija, Vācija un Nīderlande pēc Pārtikas un lauksaimniecības organizācijas (FAO) klasifikācijas (FAO, 2011) pieder Centrāl-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 biomasa 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 sasnieguši 1.3 m augstumu) un tā 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. tabula), Čehija, Polija un Rumānija pēc FAO klasifikācijas (FAO, 2011) pieder Centrāl-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, kurā 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 izmanto 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 veiktajā pētījumā ir pierādīts, ka konstantu BEF vērtību pielietošana biomasas aprēķinos var radīt ievērojamu kļūdu (Petersson 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 koku individuālajā līmenī. Tām valstīm, kurām nav izstrādātu reprezentatīvu biomasas alometrisko vienādojumu, piemērotākais risinājums varētu būt vecuma atkarīgas BEF vērtības (Lehtonen et al., 2004; Petersson 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 biomasu koka saknēs, zaros, skujās, 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 (Albaugh et al., 2009; Lehtonen et al., 2007). 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 (Cosmo et al., 2016). Kā pagaidu risinājums minētajai situācijai varētu būt vispārīgie biomasas vienādojumi, kuri ir pieejami daudzām koku sugām un ģeogrāfiskajiem reģioniem (Chojnacky, Heath, & Jenkins, 2014; Forrester et al., 2017; Muukkonen, 2007; Wirth et al., 2004).

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% – skujkokiem vai 47% – visiem kokiem, tiek lietotas vairākās valstīs, tostarp Lietuvā un Igaunijā. Igaunijā lieto visu koku sugu vidējo oglekļa satura vērtību, bet Lietuva skujkokiem un lapkokiem lieto atsevišķas vērtības. Salīdzinot citu Eiropas valstu lietotās oglekļa īpatsvara vērtības secināms, ka tās visos gadījumos ir robežās no 47–51% (1.4. tabula).

1.4. tabula

Dažādās Eiropas valstīs lietotais oglekļa saturs biomasā

Valsts	Skujkoki	Lapkoki
Somija	50%	50%
Norvēģija	50%	50%
Zviedrija	49%	49%
Austrija	Stumbrs (50%), zari, skujas, saknes (48%)	48%
Beļģija	50%	50%
Francija	47.5%	47.5%

1.4. tabulas nobeigums

Valsts	Skujkoki	Lapkoki
Vācija	50%	50%
Nīderlande	51%	48%
Čehija	49%	48%
Polija	47%	47%
Rumānija	47%	47%
Itālija	47%	47%
Spānija	50.7%	48.5%
Igaunija	47%	47%
Lietuva	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%, kas ir zemāks nekā virszemes biomasas frakciju vidējais oglekļa saturs, kas ir 50% (Ritson & Sochacki, 2003). Dažos pētījumos ir pierādīts, ka vispārīgi pieņemtais oglekļa satura pieņēmums var radīt vidēji 5% kļūdu kokaudžu oglekļa uzkrājuma aprēķinos. Piemēram, tropu mežos kopējais oglekļa apjoms tiek pārvērtēta par apmēram 3.3 – 5.3% (Martin & Thomas, 2011), bet mērenās joslas mežos akumulētā oglekļa apjoma kļūda varētu būt robežās no 4–6 %, atkarībā no dominējošās koku sugas (Jones & O'Hara, 2012; Thomas & Malczewski, 2007).

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 koksnē līdz 52.6% koku lapās, bet vidējais oglekļa saturs absolūti sausas koksnes sakņu biomasā ir konstatēts 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% (Andis Bārdulis et al., 2017). 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 apkopoti dati par oglekļa saturu virszemes un sakņu biomasas frakcijās (stumbra koksne, stumbra miza, zari, saknes, lapas un skujas), kur tas priedei svārstās robežās no 50.99–51.9%, 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, kuras aprēķinātas 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 43.4–55.6% (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 atrodama informācija, ka Eiropas mežos tas būtu darīts. Nacionālajos

SEG inventarizācijas ziņojumos (UNFCCC, 2018) pilnībā vai daļēji IPCC vadlīniju ieteiktās vērtības mērenās un boreālās joslas mežiem lieto 8 no apskatītajām 15 valstīm (1.4. tabula). Somija, Norvēģija, Beļģija un Vācija lieto vispārpieņemto oglekļa īpatsvara vērtību 50%, bet Zviedrija, Francija un Spānija lieto savas oglekļa satura vērtības.

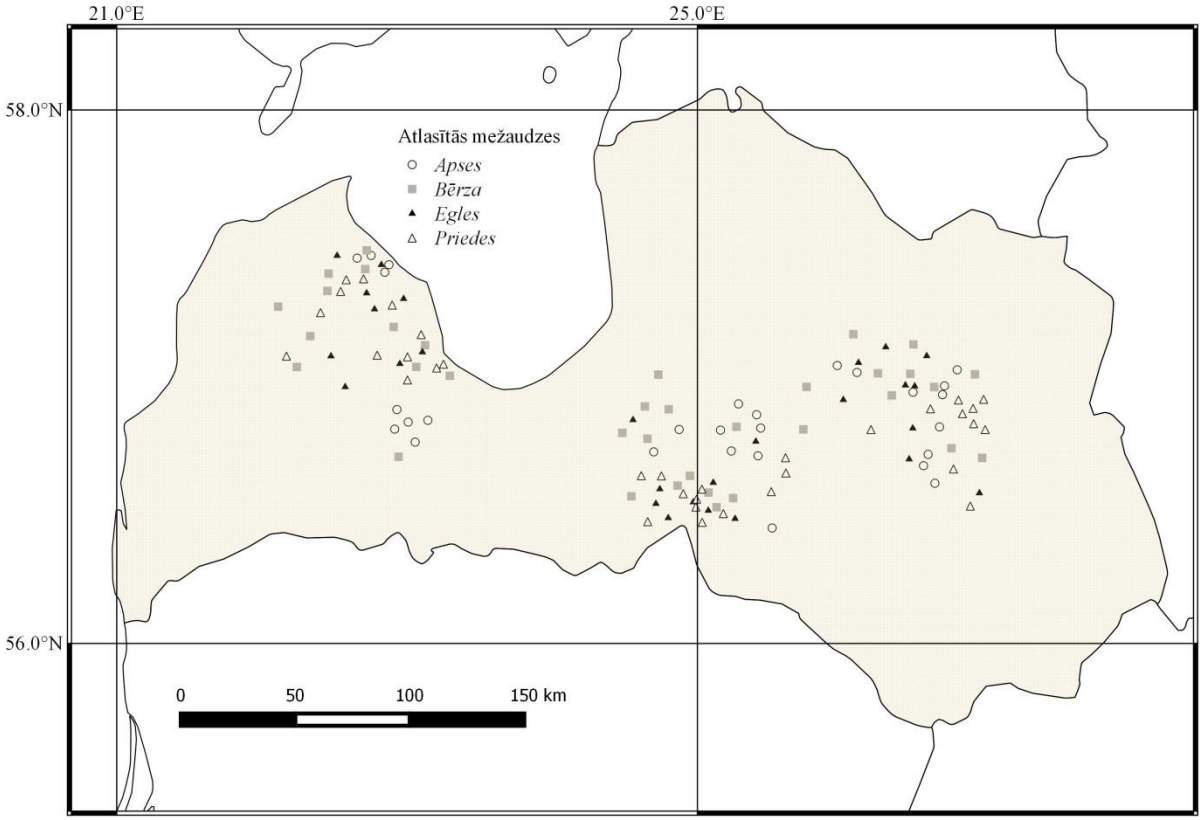
Nacionālajos SEG inventarizācijas ziņojumos (UNFCCC, 2018) 10 no apskatītajām 15 valstīm skujkokiem un lapkokiem lieto vienādas oglekļa īpatsvara vērtības (1.4. tabula). Apjomīgā literatūras analīzē, izvērtējot 31 dažāda pētījuma rezultātus no visas pasaules, par oglekļa satura izmaiņām starp dažādiem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

Tā kā līdz mūsdienām joprojām nav pētījumu par koksnes oglekļa saturu kāds būtu jālieto hemiboreālajā mežu joslā, mūsu pētījumā pieņemts lietot skujkoku un lapkoku vidējās oglekļa satura vērtības, attiecīgi 50.8% ± 0.6% un 48.8% ± 0.6% kuras Thomas un Martin (2012) iesaka lietot mērenās un boreālās mežos.

2. 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. attēls). Visas izvēlētās 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 susinātās minerālaugsnēs, tādējādi reprezentējot lielāko daļu Latvijas meža augšanas apstākļu. Tikai 6% gadījumos meža nogabali atlasīti slapjās minerālaugsnēs un susinātās 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. att. **Pētījumu objektu izvietojums Latvijas teritorijā.**

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 m^2; parauglaukumi subjektīvi izvietoti audzes vietās, kas visprecīzāk raksturo visu nogabalu un to centrs atradās tālāk par 50 m no nogabala ārējās robežas (2.1. tabula).

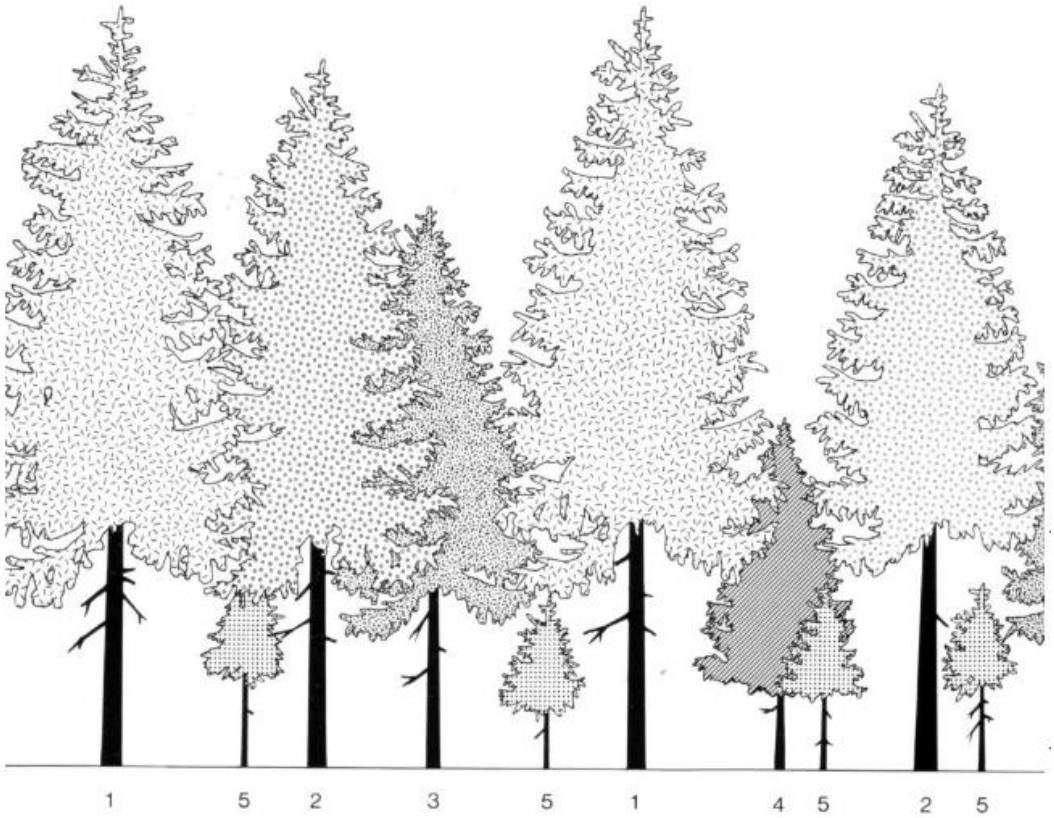
2.1. tabula

Atlasīto meža nogabalu vidējo rādītāju raksturojums atkarībā no valdošās koku sugas

Valdošā suga	Nogabalu skaits, gab	Sugas īpatsvars, %	Caurmērs, cm	Augstums, m	Šķērslaukums, m^2ha^{-1}	Vecums, gadi
Priede	34	70-100	1.3-40.3	1.4-30.7	0.4-49.7	6-141
Egle	27	70-100	1.6-34.1	1.8-27.7	0.6-44.9	8-97
Bērzs	35	70-100	2.8-32.3	5.2-29.6	0.9-44.4	8-92
Apse	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 ir mazāk, tad augstums mērīts visiem kokiem. Pēc augstuma mērījumiem katrai sugai atsevišķi konstruēta augstumlīkne, pēc kuras aprēķināts augstums visiem pārējiem parauglaukumā uzmērītajiem šīs sugas kokiem.

Pēc uzmērīšanas katrā parauglaukumā nozāģēšanai atzīmēti 3 dažādu dimensiju I, II un III Krafta klases paraugkoki (2.2. attēls). Bojātie un trupējušie koki, kā arī koki ar dubultgalotnēm netika izvēlēti kā paraugkoki.



2.2. att. **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

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 kokiem (2.2. tabula).

2.2. tabula

Paraugkoku raksturojums virszemes biomasas aprēķiniem

Koku suga	Koku skaits	D, cm				H, m			
		Vidēji	Std.	Min.	Maks.	Vidēji	Std.	Min.	Maks.
Priede	102	19	9.4	1.5	45.2	17.3	9.2	1.9	34.5
Egle	81	17.5	9	2.3	36.3	16.6	8.9	2.8	30.8
Bērzs	105	14.7	7.5	2.7	37.1	18.1	8.1	4.8	32.3
Apse	84	13.8	8.3	2.7	34	16.6	8.5	3.7	29.9

Pirms paraugkoka nozāģēšanas 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 nozāģēšanas. Celma augstums ir arī vieta, kur koks sadalās virszemes un celma/sakņu biomasas frakcijās.

Pēc koka nozāģēšanas tā zaļais vainags stumbra garenvirzienā sadalīts trijās vienādās daļās. No katras daļas vidus marķēts viens vidēja izmēra zars, kuri 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 svariem, iekarinātiem pārvietojamā trijkājī (2.3. attēls). 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.

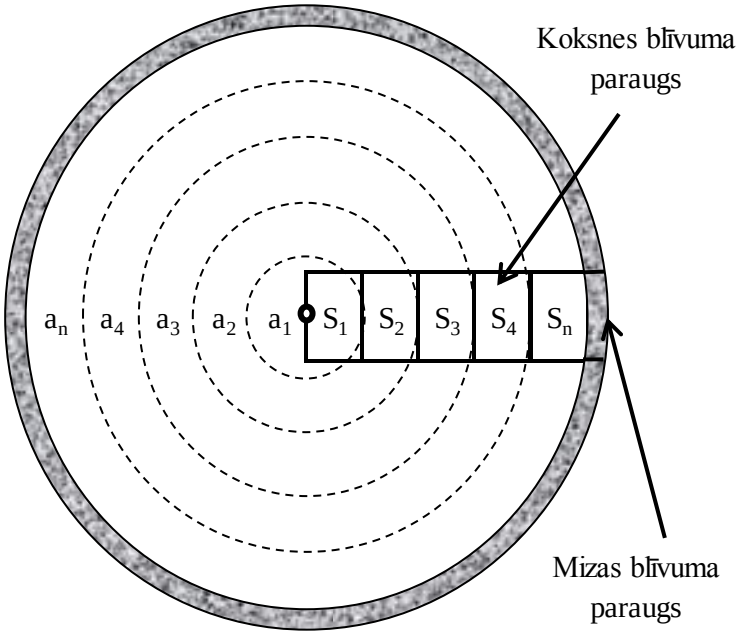
2.3. att. **Zaru svēršanas process bērza nogabalā**

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.

$$W = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100 \qquad (2.1)$$

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. Šķērsgriezuma laukuma aprēķiniem katrai koksnes ripai izmērīts caurmērs ar un bez mizas divos savstarpēji perpendikulāros virzienos. Lai aprēķinātu stumbra vidējo reducēto blīvumu, no katra stumbra šķērsgriezuma ripas sagatavoti paraugi jeb ripas segmenti blīvuma mērīšanai. Blīvuma segmentu sagatavošana veikta pēc attēlotās shēmas (2.4. attēls).



2.4. att. **Blīvuma paraugu novietojums stumbra šķērsgriezuma ripās**
S - apzīmē blīvuma paraugu, bet a - apzīmē paraugam atbilstošo ripas platību

Blīvuma segmenta platums virzienā no ripas centra uz mizu bija stingri noteikts 20 mm. To skaits un pēdējā segmenta platums bija atkarīgs no šķērsgriezuma 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 šķērsgriezuma ripas, kuru caurmērs mazāks par 20 mm, tika nomizotas, bet netika dalītas sīkākos segmentos. Šķērsgriezuma ripām ar

diametru mazāku 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 iemērkti ūdeni, lai to neuzsūktu mērīšanas procesā (Ilic et al., 2000). Paraugu blīvums mērīts ar Precisa XB 220A laboratorijas svariem, kas aprīkoti ar Precisa blīvuma mērīšanas komplektu (partijas numurs: 350–8556) divos atkārtojumos (2.5. attēls). 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 ^{o}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).

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

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. att. **Koksnes parauga blīvuma mērīšanas process**

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

$$V_s = \frac{l_s\,(g_1+g_2)}{2} \qquad (2.3)$$

kur:
V_s – stumbra sekcijas tilpums, m^3;
ls – stumbra sekcijas garums, m;
g_1 – apakšējās virsmas šķērsgriezuma laukums sekcijai, m^2;
g_2 – augšējās virsmas šķērsgriezuma laukums sekcijai, m^2;
g – elipses laukums = $\pi/4$(diametrs$_1$ × diametrs$_2$), m^2.

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

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

kur:
ρ_{ripa} – stumbra šķērsgriezuma 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 šķērsgriezumā, cm^2;
a_m – mizas parauga aizņemtais laukums stumbra šķērsgriezumā, cm^2.

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 atlasīti paraugkoki (37 parastās priedes, 29 parastās egles, 42 bērza un 33 parastās apses), pārstāvot dažādas krūšaugstuma caurmēra pakāpes, koku augstumu un vecumu grupas katrai pētījumā ietvertajai koku sugai (2.3. tabula). Koku sakņu biomasa atrakta tiem pašiem kokiem kuriem iepriekš novērtēta virszemes biomasa. 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

Paraugkoku raksturojums celma/sakņu biomasas aprēķiniem

Koku suga	Koku skaits	Parametrs	Vidēji	Std.	Min.	Maks.
Priede	37	D, cm	15.1	9.7	1.5	45.3
		H, m	13.0	9.4	1.9	34.5
		vecums, gadi	35.3	30.6	6.0	119.0
Egle	29	D, cm	13.7	8.1	4.0	30.5
		H, m	13.1	8.3	4.0	27.7
		vecums, gadi	30.3	22.2	11.0	72.0
Bērzs	42	D, cm	12.0	7.0	2.7	31.7
		H, m	15.9	8.8	4.9	30.9
		vecums, gadi	26.7	21.2	8.0	72.0
Apse	33	D, cm	10.9	8.1	2.8	34.1
		H, m	13.1	7.6	3.7	29.7
		vecums, gadi	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. attēls). 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 pilna garuma saknes mazākas par 20 mm 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, saskaitot celma, balstsakņu un sīko sakņu kopējo biomasu, kas katrai frakcijai noteikta pēc raksturojošo paraugu dabiski mitras – absolūti sausas masas attiecības.

2.6. att. **Atrakta un nomazgāta parastās priedes sakņu sistēma**

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 mūsu 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.

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

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

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

kur:
$\hat{Y}_{ki}$ – koka *i* biomasa 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, tikmēr 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 savādāks paņēmiens 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, 2.7), ir veikta logaritmiskā transformācija, kas šādos gadījumos ir ieteicama (Claesson, Sahlen, & Lundmark, 2001; Repola, 2009; Weiskittel et al., 2015; Zianis & Mencuccini, 2004). Pielietojot transformāciju, tiek panākts, ka atkarīgā pazīme, kas šajā pētījumā ir biomasa, pie mazām un lielām argumentu vērtībām tiek aprēķināta precīzāk.

Tā kā biomasa 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 biomasa dažādās koka frakcijās, parasti variē ne vien starp dažādām kokaudzēm, bet arī katras kokaudzes līmenī, piemēram, atkarībā no Krafta klases. Lai gan eksistē arī citas koeficientu novērtēšanas metodes, regresijas koeficientu novērtēšanā visbiežāk izmanto tā saucamo 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).

Mūsu pētījumā vienādojumu (2.5, 2.6, 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, 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 $ln\widehat{Y}$ 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 (Petersson & 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 Repola (2008, 2009) savos pētījumos secināja, ka arī augstuma transformācijas lietošana H/(H + *m*) atsevišķos gadījumos uzlabo vienādojuma precizitāti, aprēķinot biomasu noteiktām koka frakcijām.

Veicot vienādojumu logaritmisko transformāciju, jārēķinās ar papildus novirzi jeb kļūdu, kura rodas, transformējot iegūtos rezultātus atpakaļ aritmētiskajās vienībās (Hunziker

et al., 2014; Jenkins et al., 2003; Snowdon, 1991; Zianis et al., 2005). Kļūda, kura radusies inversās transformācijas rezultātā, visbiežāk tiek koriģēta ar dažādiem korekcijas koeficientiem, kurus pievieno linearizētajam vienādojumam pirms atpakaļ transformēšanas. 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; Repola, 2008, 2009; Snowdon, 1991).

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

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).

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

kur:
k – korekcijas koeficients;
$\hat{Y}$ – aprēķinātā biomasa kokam 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).

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

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

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

kur:
R^2 – determinācijas koeficients;
RMSE – vidējā kvadrātiskā kļūda, kg;
MAPE – vidējā absolūtā kļūda, %;
Y_i – novērotā biomasa kokam i, kg;
$\hat{Y}_i$ – aprēķinātā biomasa kokam i, kg;
$\bar{Y}$ – paraugkopas vidējā novērotā biomasa, 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 mūsu pētījumā, no abiem iepriekšminētajiem rādītājiem, 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 papildus parametriem. AICc kritērijs tiek izmantots gadījumos, kad novērojumu skaits ir mazs, kā tas šajā pētījumā ir atsevišķu koku calma/sakņu biomasas datiem. Motulsky & Arthur (2003) rekomendē vienmēr lietot AICc, jo tas konverģē uz AIC, kad novērojumu skaits kļūst pietiekoši liels. 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.

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

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 standartkļūdu (PRSE) kas aprēķināta pēc (2.14) izteiksmes (Picard et al., 2015; Sileshi, 2014). 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, lnH) 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.

$$PRSE = 100\,\frac{regresijas\ koeficienta\ standartkļūda}{regresijas\ koeficients} \qquad (2.14)$$

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 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. 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 mūsu datus ar līdzīgos pētījumos iegūtajiem. Starp dažādiem pētījumiem salīdzinot un analizējot koksnes blīvuma izmaiņas un vidējos rādītājus, 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 mūsu 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 –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. tabula). Pie vidējā krūšaugstuma caurmēra 5 cm, mizas īpatsvars starp sugām variē robežās no 16.7–26.9%, bet, vidējam caurmēram pieaugot līdz 30 cm, mizas īpatsvars samazinās vairāk kā divas reizes un ir robežās no 8.2–10.4%. Tas liecina par to, ka būtisku koksnes un mizas blīvuma atšķirību gadījumā, lielāka sistemātiska kļūda veidosies jaunaudžu stumbra biomasas aprēķinos. Latvijā mizas biezumu un tās īpatsvaru dažādu koku sugu apaļos kokmateriālos atspoguļojis Līpiņš un Liepa (2007). Autoru aprēķinātie vidējais 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.

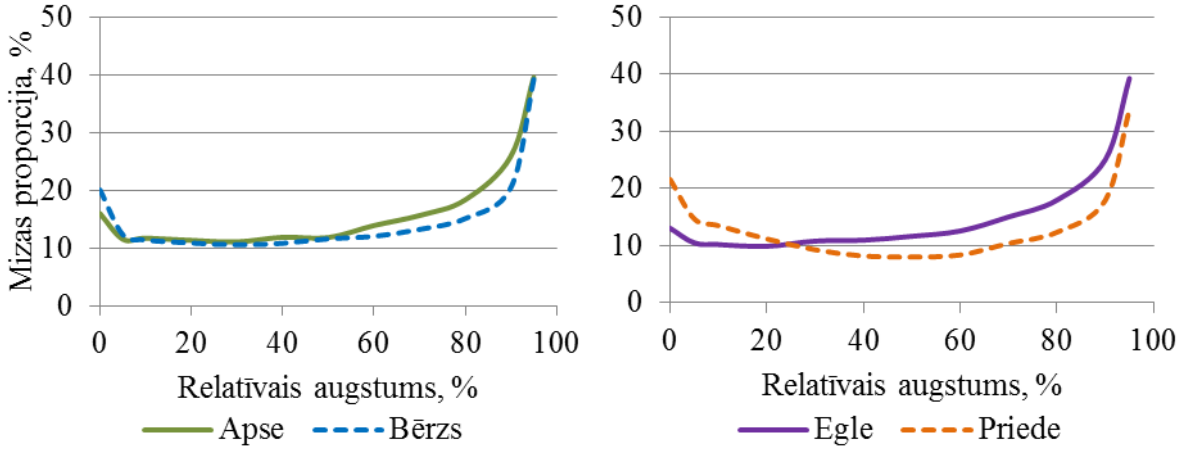
3.1. tabula

Vidējās mizas īpatsvara vērtības no kopējā stumbra tilpuma ± standartkļūda atkarībā no koka krūšaugstuma caurmēra

D, cm	Priede	Egle	Bērzs	Apse
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. attēls). Mizas īpatsvara izmaiņas stumbra garenvirzienā ir atkarīgas no mizas biezuma un stumbra diametra kombinētas ietekmes. Tuvojoties koka galotnei, stumbra šķērsgriezuma 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, Melkas, & Aldén, 2005). Analizējot priedes un egles mizas biezuma izmaiņas vienāda diametra kokiem, novērots, ka virs 20% relatīvā augstuma priedes miza kļūst plānāka nekā egles miza (Drēksa, Līpiņš, & Sarmulis, 2003). Turpretī stumbra lejasdaļā, priedei miza ir biezāka nekā eglei.



3.1. att. **Mizas īpatsvars stumbra šķērsgriezumā atkarībā no relatīvā augstuma**

Lielu daļu no mizas apjoma izmaiņām izskaidro koka krūšaugstuma caurmēra, augstuma vai stumbra tilpuma variācija (Liepiņš & Liepiņš, 2015). Tā kā koka krūšaugstuma caurmērs ir visvieglāk un visprecīzāk izmērāmā koka pazīme, tad 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 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 stumbra 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). 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 biezāka, bet meža tipa ietekme uz mizas biezumu pētījumā netika apstiprināta. Promocijas darba ietvaros 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. attēls). 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.

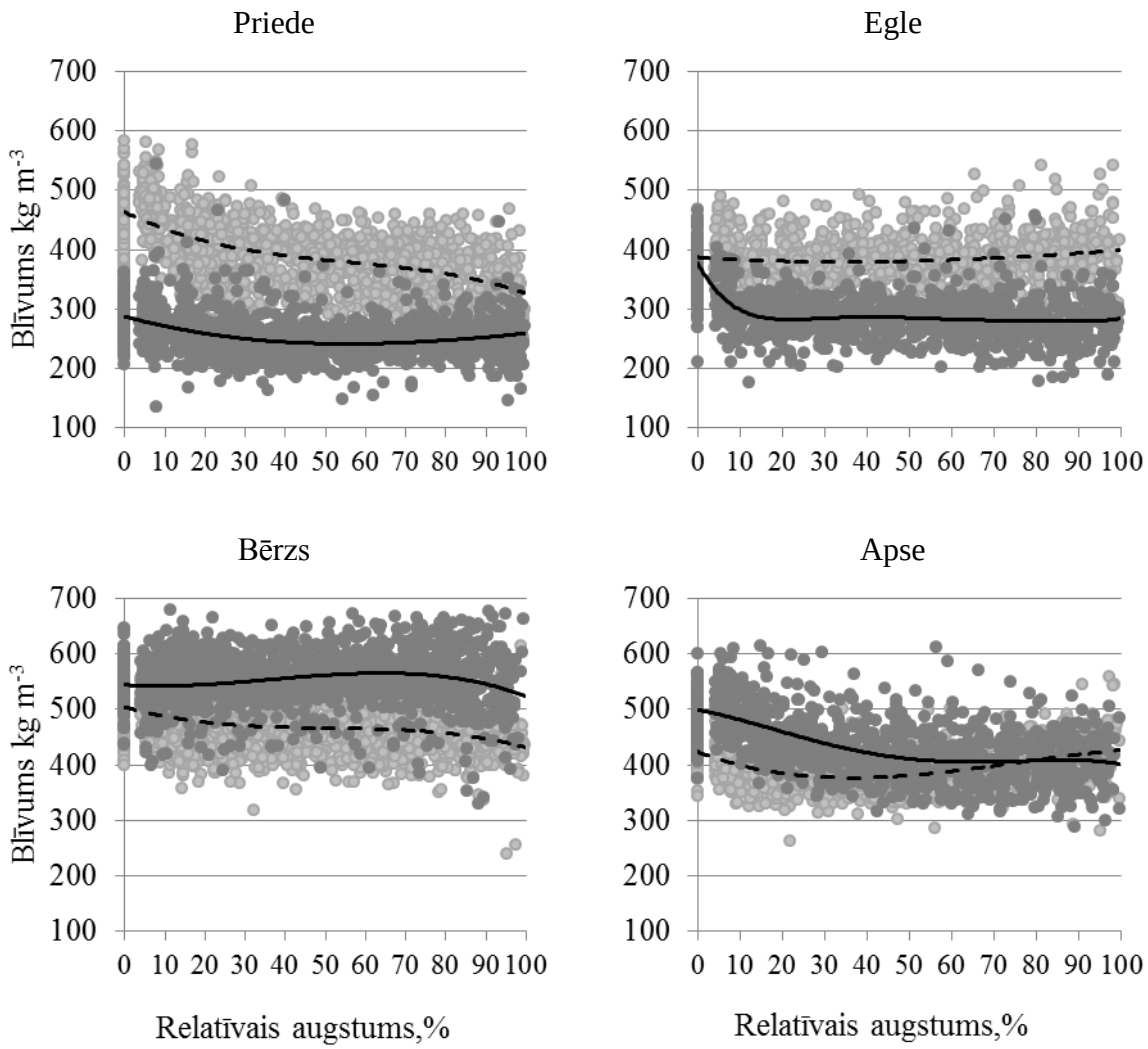
Pētījumā apstiprinājās, ka priedes, egles, bērza un apses stumbra vidējais mizas blīvums statistiski būtiski ($p < 0.001$) atšķiras no vidējā koksnes blīvuma (3.2. tabula). Minētais fakts apstiprina to, ka koksnes reducēto blīvuma vērtību izmantošana visa koku stumbra biomasas aprēķināšanai rada sistemātisku 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 mizai pretēji lapkoku sugām, kurām miza ir blīvāka par koksni. Priedei koksnes un mizas reducētā blīvuma starpība (137 kg m^{-3}) ir ievērojami lielāka kā 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 priedei, arī egles mizas blīvums tiek ziņots mazāks nekā koksnei (Hakkila, 1989), kā arī konstatēts, ka mizas blīvums nepārtraukti samazinās virzienā uz galotni. 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

Koku sugu svērtās vidējās reducētā blīvuma vērtības ± standartnovirze

Koku suga	Visa stumbra blīvums, kg m^{-3}	Stumbra koksnes blīvums, kg m^{-3}	Stumbra mizas blīvums, kg m^{-3}
Priede	380 ± 48	397 ± 49	260 ± 24
Egle	368 ± 35	378 ± 36	295 ± 27
Bērzs	481 ± 38	470 ± 46	551 ± 36
Apse	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. attēls). 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, kā 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.

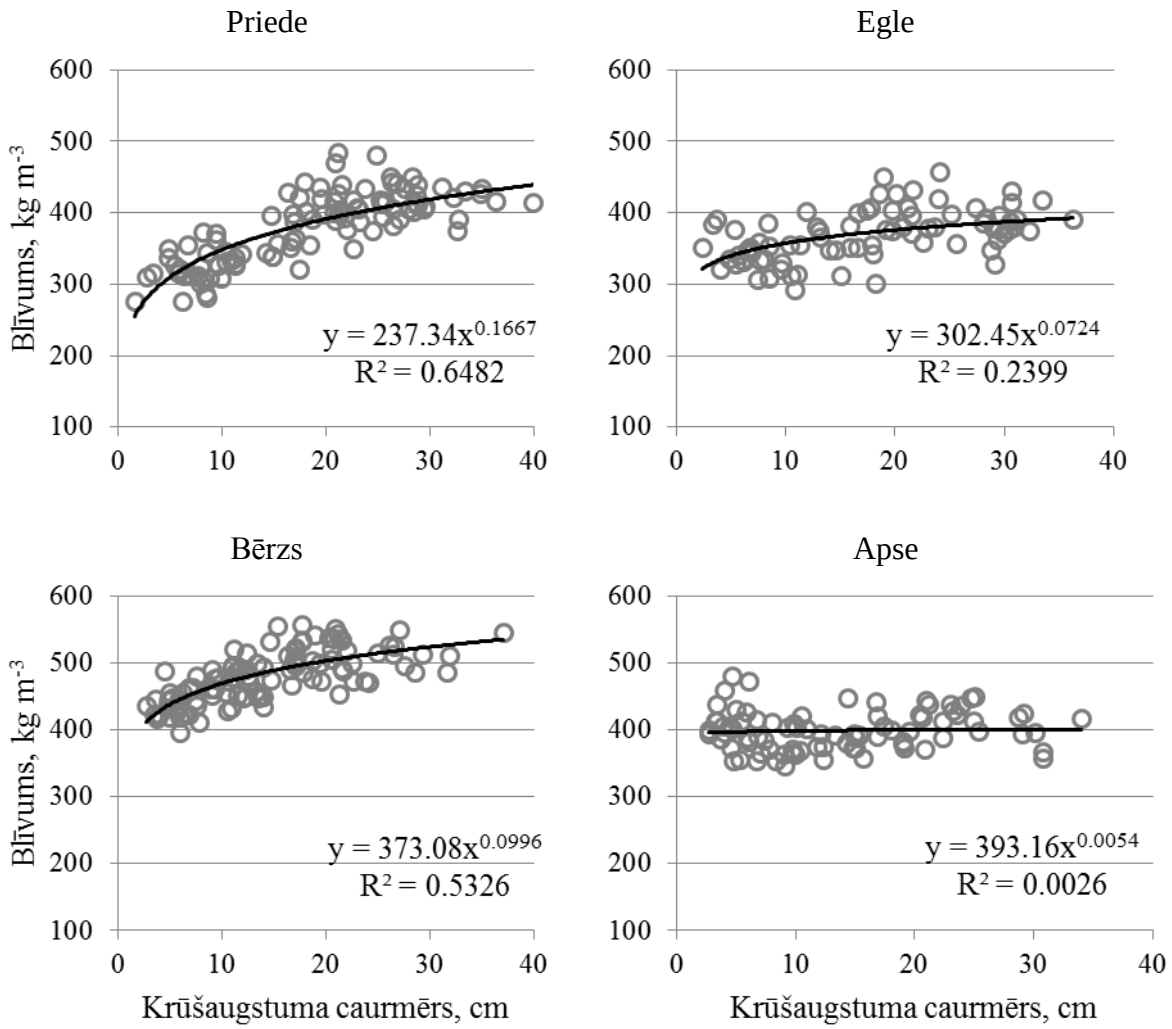


3.2. att. **Vidējā stumbra koksnes (punktētā līnija) un stumbra mizas (nepārtrauktā līnija) reducētā blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā**

Dibdiakova un 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. Millers un 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 mūsu 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 ($p < 0.001$). Mūsu un iepriekšminētā pētījuma atšķirīgie rezultāti izskaidrojami ar to, ka Millers un Magaznieks (2012) nebija iekļāvuši salīdzināšanai priedes 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 iegūts mūsu pētījumā ir attiecīgi 397, 378, 470 un 393 kg m^{-3} (3.2. tabula). Kā redzams 3.3. attēls, 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. Mūsu rezultāti apliecina, ka IPCC vadlīniju (Eggleston et al., 2006) dotās blīvuma vērtības (1.2. tabula) 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 mūsu pētījumā konstatētais, norādot uz ievērojamu biomasas potenciāla un C apjoma nenovērtēšanu Latvijas apšu mežaudzēs.



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

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

Līdzīgi kā citām koku sugām, arī apses koksnē 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 krūšaugstuma 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,

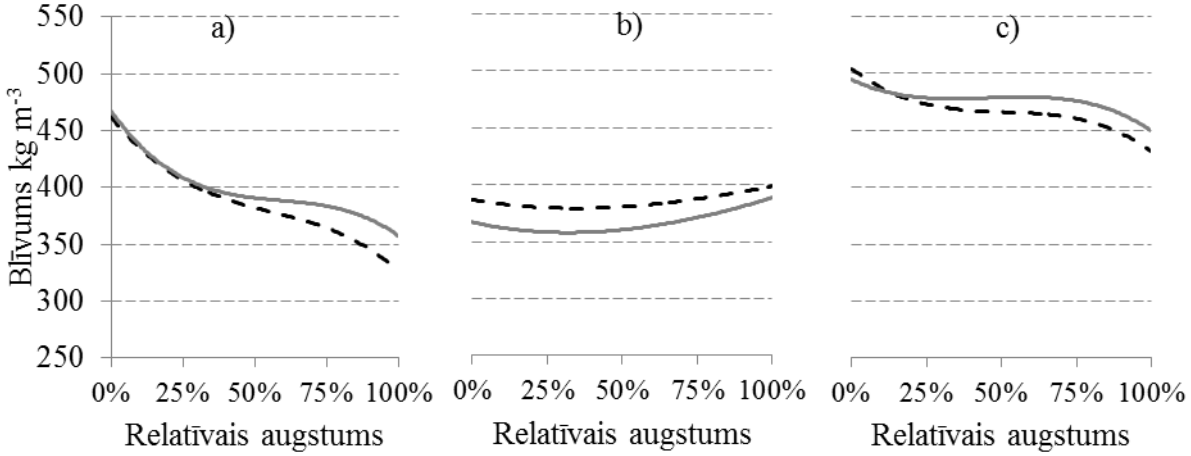
kuri auguši lielākā biezumā. Vispārzināms ir fakts, ka jaunaudzēs koku skaits ir lielāks un jauniem kokiem strauji augot, to koksnes blīvums vienmēr ir mazāks (Saranpää, 2003). Sasniedzot 15 gadu vecumu, parastajai apsei gadskārtu platums un augšanas temps ievērojami samazinās (Heräjärvi & Junkkonen, 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.

Rytter et al. (2013) apkopojuši 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 310–400 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 350–400 kg m^{-3}, bet bērza koksne ir smagāka nekā vairumam Eiropā sastopamo skujkoku sugām, reducētajam blīvumam esot robežās no 430–520 kg m^{-3} (Rytter et al., 2013). Latvijā konstatēts, ka bērzu plantācijās lauksaimniecības augsnēs stumbru koksnes vidējais blīvums ir 455 kg m^{-3} (Liepins & Rieksts-Riekstins, 2013). Ņemot vērā ātrāku koku augšanu un īsāku koku rotācijas periodu, tas ir nedaudz mazāks nekā mežaudzēs augušai koksnei. Somijā konstatēts, ka āra bērzs un purva bērza koksnes blīvums neatšķiras, ja vien to augšanas temps ir vienāds (Repola, 2006). Praksē gan parasti puva 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).

Citās valstīs kā 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 ievākto 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}.Šīs vērtības ir tikai nedaudz lielākas par mūsu noteiktajām. Pētījumā konstatēts, ka iepriekšminētajām koku sugām, pieaugušiem kokiem blīvums ir par 11% lielāks nekā jauniem kokiem, kā arī kūdras augsnēs augušām 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 mūsu pētījumā. Vidējā blīvuma atšķirība varētu būt izskaidrojama ar to, ka Repola (2006) savā pētījumā pamatā analizējis kokus, kuri vecāki par 20 gadiem ar krūšaugstuma caurmēru, kas lielāks par 8 cm. Turpretī mūsu pētījumā analizēti jaunāki un arī mazāka caurmēra koki.

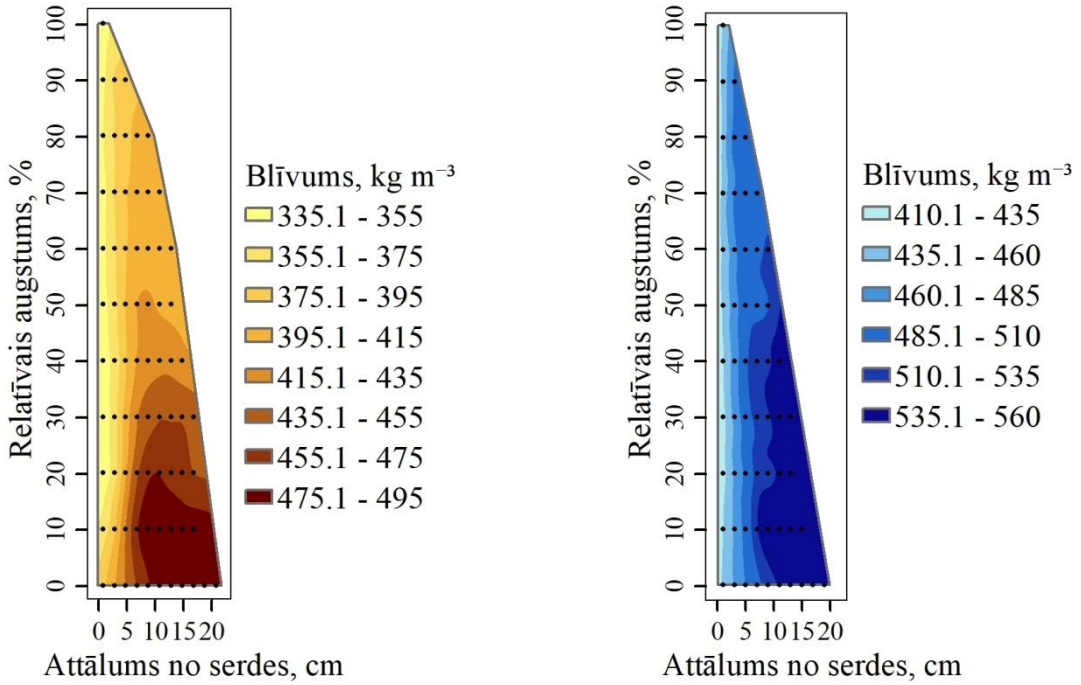
Verificējot Repola (2006) izstrādātos blīvuma prognožu vienādojumus ar mūsu pētījumā ievāktajiem paraugkoku mērījumu datiem, secināts, ka priedei, eglei un bērzam blīvums tiek aprēķināts diezgan līdzīgi visā stumbra garenvirzienā (3.4. attēls). Vidējais koksnes blīvums priedei un bērzam, aprēķināts pēc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



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

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 (Repola, 2006; Saranpää, 2003).

Priedei un bērzam novērota izteikta stumbra koksnes blīvuma samazināšanās virzienā uz galotni (3.2. attēls), bet radiālajā virzienā blīvumam ir tendence palielināties mizas virzienā (3.5. attēls). 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 0–40% 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 Hakkila (1979) secinot, ka pēc apmēram 80 gadu sasniegšanas priedes stumbra blīvums aplievas ārējā daļā nedaudz samazinās.



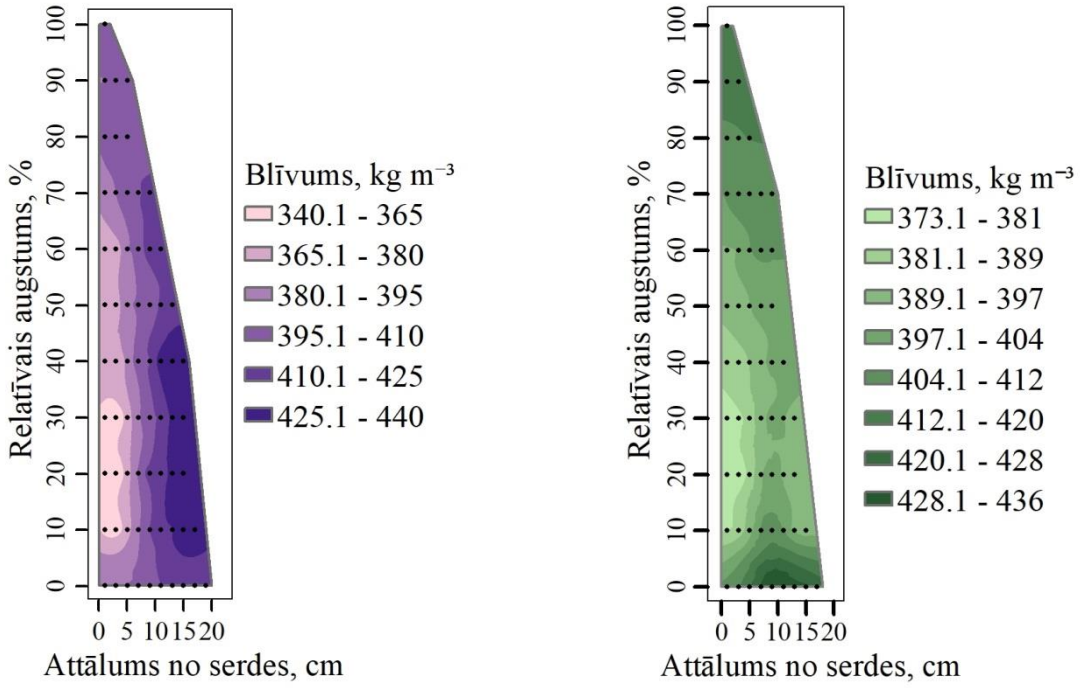
Priede Bērzs

3.5. att. **Koksnes reducētā blīvuma izmaiņas priedes un bērza stumbros**

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. attēls). Viszemākās stumbra šķērsgriezuma 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 (Heräjärvi & Junkkonen, 2006; Karki, 2001; Repola, 2006; Saranpää, 2003).

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, mūsu 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 analizēta 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 (Jyske et al., 2008; Wilhelmsson et al., 2002). Tādējādi iegūtās blīvuma vērtības starp pētījumiem var nedaudz atšķirties, jo īpaši attiecībā uz priedi un bērzu, 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 tāpat kā pārējām pētītajām koku sugām, vismazākais blīvums ir stumbra vidusdaļā pie serdes (juvenīlai koksnei). Tāpat stumbra galotnes daļā blīvuma izmaiņu amplitūda, salīdzinot ar stumbra lejasdaļu, ievērojami samazinās (3.6. attēls). Interesanti, ka juvenīlai 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).



Egle Apse

3.6. att. **Koksnes reducētā blīvuma izmaiņas egles un apses stumbros**

Egles un apses stumbros, apmēram pie 80% relatīvā augstuma, blīvums ir praktiski konstants, izmaiņām radiālajā virzienā nepārsniedzot 8 kg m^{-3}. Apsei stumbra lejasdaļā, līdzīgi kā priedei, blīvums palielinās līdz noteiktam caurmēram. 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 stumbrā 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). Mūsu pētījumā šāds apses dalījums netika praktizēts, līdz ar to nav iespējams pārliecināties par dažādu apšu genotipu, ietekmi uz koksnes blīvumu.

Vairumam koku sugu, bet jo īpaši skujkokiem, vidējo koksnes blīvumu gan tā izmaiņas radiālajā virzienā būtiski ietekmē gadskārtu platums. Piemēram, duglāzijai (*Pseudostuga menziesii*) agrīnās koksnes blīvums vidēji ir piecas reizes mazāks nekā vēlīnai koksnei, savukārt dažādu sugu eglēm vēlīnās koksnes blīvums parasti ir apmēram divas reizes lielāks (Saranpää, 2003). Vēlīnās koksnes īpatsvars parasti mazāks ir pirmajās gadskārtās virzienā no serdes un palielinās virzienā uz mizu. Tas izskaidro, kāpēc pētītajām koku sugām juvenīlai 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 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 mūsu pētījumā novērotajam (3.6. attēls).

Meklējot nozīmīgākos koksnes blīvuma izmaiņu cēloņus, 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, Saranpää, & Linder, 2002). Pētījumā noskaidrots, ka parauglaukumos, kuros tika ienestas papildus barības vielas, koku radiālais pieaugums palielinājās vairāk kā trīs reizes, bet vidējais koksnes blīvums samazinājās vairāk nekā par 20%. Proporcionāli vairāk blīvums samazinājās vēlīnā koksnē. Identiska blīvuma samazināšanās skujkoku koksnes stumbra šķērsgriezumā novērota arī pēc intensīvas kokaudzes retināšanas, bet kopumā retināšanai un mēslošanai ir liela ietekme un blīvuma izmaiņām tikai jaunaudzēs, kamēr koku vainagi vēl nav saslēgušies (Saranpää, 2003).

3.2. Koku biomasas aprēķini 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 izstrādājot biomasas vienādojumus, gan plānojot racionālu meža apsaimniekošanu un koksnes izmantošanu, kā arī meža uzraudzībā (Schepaschenko et al., 2018).

Kokaudžu biomasas ievērojamu daļu, kura atsevišķiem kokiem var sasniegt pat 70%, veido nestumbru frakciju kā zaru un sakņu biomasa (3.3. tabula). 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 kā fragmentāru un šīs biomasas daļas noteikšanas metodes ir izstrādātas nepilnīgi (Liepa & Blija, 2008).

3.3. tabula

Paraugkoku biomasas frakciju raksturojums, kg

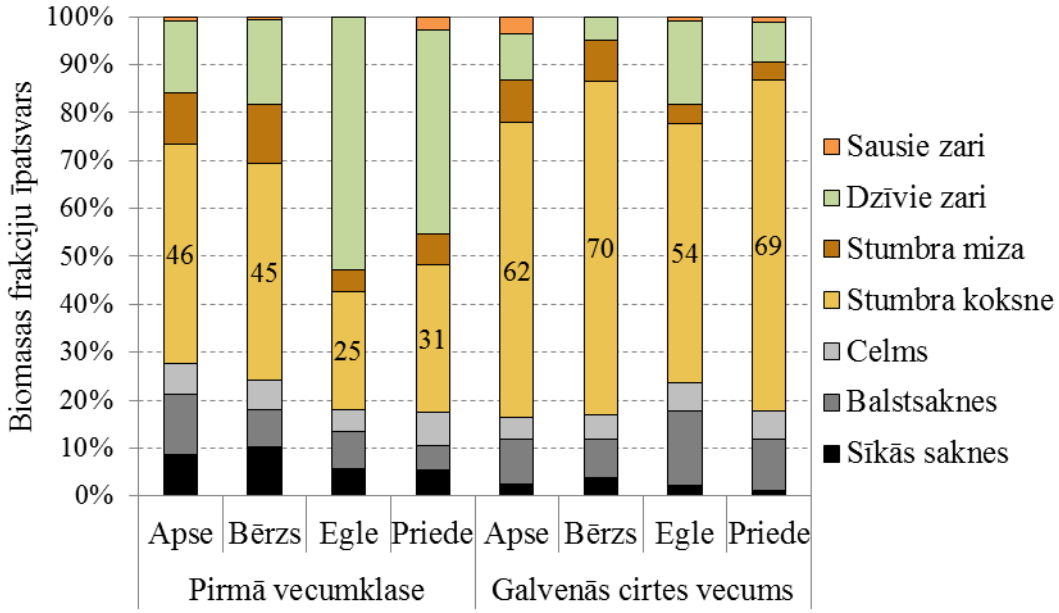
Koku suga	Frakcija	Vidēji	Standartnovirze	Min.	Maks.
Priede	1. Celms	10.2	18.5	0.1	103.3
	2. Balstsaknes	17.4	27.8	0.1	123.9
	3. Sīkas saknes	3.3	4.2	0.1	17.3
	4. Stumbrs	165.7	181.7	0.1	998.9
	5. Miza	9.8	10.1	0.1	59.0
	6. Dzīvie zari	24.9	21.9	0.4	107.7
	7. Sausie zari	4.4	4.8	0.0	23.1
	1. + 2. + 3.	30.1	49.0	0.1	244.4
	4. + 5. + 6. + 7.	204.8	211.8	0.6	1143.6

3.3. tabulas nobeigums

Koku suga	Frakcija	Vidēji	Standartnovirze	Min.	Maks.
Egle	1. Celms	8.7	12.8	0.2	50.9
	2. Balstsaknes	19.4	27.5	0.3	100.0
	3. Sīkas saknes	4.1	4.0	0.4	16.6
	4. Stumbrs	133.1	147.1	0.4	536.9
	5. Miza	10.2	10.8	0.1	36.7
	6. Dzīvie zari	44.6	40.9	1.3	165.7
	7. Sausie zari	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
Bērzs	1. Celms	6.6	9.3	0.1	47.1
	2. Balstsaknes	11.3	17.6	0.1	96.9
	3. Sīkas saknes	4.6	4.4	0.2	16.5
	4. Stumbrs	109.4	126.6	0.7	522.3
	5. Miza	15.2	18.2	0.2	99.2
	6. Dzīvie zari	15.9	23.9	0.3	150.3
	7. Sausie zari	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
Apse	1. Celms	4.5	8.2	0.1	34.0
	2. Balstsaknes	9.8	20.1	0.1	89.0
	3. Sīkas saknes	2.6	3.5	0.1	13.3
	4. Stumbrs	86.7	110.5	0.5	453.1
	5. Miza	11.2	14.0	0.2	63.1
	6. Dzīvie zari	12.6	16.8	0.2	69.3
	7. Sausie zari	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. attēls). 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 biomasa 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 45.8–58.3%, 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, tad 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 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. att. **Kopējās biomasas sadalījums sauso zaru, dzīvo zaru, stumbra mizas, stumbra koksnes, celma, balstsakņu (> 2 cm), un sīko sakņu (< 2 cm) frakcijās**
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

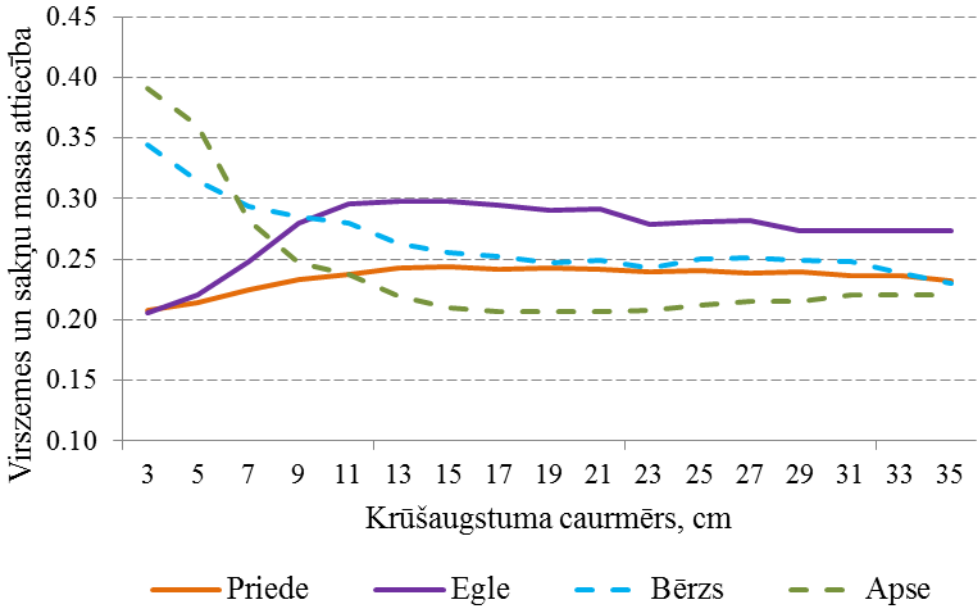
Promocijas darbā atsevišķi netika nodalīts āra un purva bērzs, bet Zviedrijā, ierīkojot dažādas biezības stādījumus ar abām iepriekšminētajām sugām, konstatēta ne tikai kopējā biomasas atšķirība viena vecuma kokiem, bet arī biomasas īpatsvara atšķirības starp virszemes un celma/sakņu biomasas frakcijām (Johansson, 2007). Autors secinājis, ka 12 gadu vecumā vienādos apstākļos augušu āra bērzu kopējā biomasa un virszemes biomasas īpatsvars ir lielāks nekā purva bērzam, norādot uz proporcionālu 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 no 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 skujkoku sugām priedei un eglei ir pretēji (3.7. attēls). 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%. Attiecībā uz priedi 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 < 2cm) īpatsvaru, kurš pirmās vecumklases kokiem bija robežās no 5.4–10.2%, bet galvenās cirtes vecumā vairs tikai no 1.0–3.9%.

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 palielināšani 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, Raison, & Prokushkin, 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 tipiem, 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 pārrēķina 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 0.24–0.39. Mūsu pētījumā iegūtās virszemes un sakņu masas attiecības vērtības ir robežās no 0.20–0.25 priedei, 0.21–0.30 eglei, 0.23–0.34 bērzam un 0.21–0.39 apsei (3.8. attēls).



3.8. att. **Virszemes uz sakņu biomasas pārrēķina attiecības izmaiņas atkarībā no koku krūšaugstuma caurmēra**

Pētījumā analizētās skujkoku (priede, egle) 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. attēls), arī analizējot caurmēra ietekmi uz virszemes un sakņu masas attiecību, konstatēts, ka mazu dimensiju lapkokiem raksturīgs lielāks celma/sakņu biomasas īpatsvars kā lielu dimensiju kokiem, bet skujkoku sugām ir pretēji. Pēc 3.8. attēls redzamajām līkņu izmaiņu tendencēm secināms, ka celma/sakņu biomasas īpatsvars kokiem ar krūšaugstuma caurmēru virs 10–15 cm ir gandrīz konstants.

Mūsu 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 jaunaudžu celma/sakņu biomasu. Vislielākā biomasas pārvērtēšana notiek skujkoku jaunaudzēs, kurās virszemes biomasa nepārsniedz 50–75 t ha^{-1}. Tas ir tāpēc, ka IPCC vadlīniju rekomendētās celma/sakņu biomasas aprēķina koeficientu vērtības priežu un egļu jaunaudzēm ir divas reizes lielākas nekā aprēķināts mūsu pētījumā. Daļēji tas skaidrojams ar to, ka joprojām zinātniekiem nav vienotas izpratnes par vietu, kur dalās koka virszemes un celma/sakņu biomasas. Lielākoties pētījumos šis 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, eglei, bērzam un apsei mūsu 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 eglei 0.25 (Levy, Hale, & Nicoll, 2004), kas ir diezgan līdzīgas vērtības, kuras iegūtas mūsu pētījumā, īpaši eglei. Bērzam virszemes un sakņu attiecība visiem paraugkokiem ir robežās no 0.17–0.42 kas ir nedaudz mazāk, kā 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 mūsu, gan iepriekšminētajā pētījumā. Vidējā virszemes un sakņu masas attiecība Norvēģijā augušajiem bērziem aprēķināta 0.42, kas ir ievērojami vairāk nekā aprēķināts mūsu pētījumā (0.26), kā arī citā pētījumā Igaunijā – 0.21 (Varik et al., 2013). Smith et al. (2016) pētījumu atšķirīgos rezultātus skaidro ar mazāku koku biezību parauglaukumos, kuros analizēti Norvēģijā augušie bērza paraugkoki. Pie mazākas biezības un koku savstarpējās konkurences tie veido lielāku sakņu sistēmu, salīdzinot ar kokiem, kuri auguši lielā biezībā 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 mūsu rezultāti apliecina, ka vidējo virszemes un sakņu masas attiecību piemērošana atsevišķu kokaudžu līmenī var rezultēties kļūdainos biomasas aprēķinos, 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. Biomasas vienādojumi

Empīrisko datu ievākšana pēc destruktīvās metodes individuālu koku biomasas vienādojumu izveidei ir plaši izmantots paņēmiens, kas praktizēts daudzos pētījumos un pielietots arī mūsu darbā. Šādu vienādojumu piemērošanai valsts mērogā, nepieciešams nodrošināt, lai ievāktais empīriskais materiāls būt reprezentatīvs visai mērķa populācijai (Temesgen et al., 2015). Lai nodrošinātu alometrisko vienādojumu ticamību un precizitāti, izstrādātajiem vienādojumiem jābūt balstītiem uz pietiekoši 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 stumbra formu izpēte katrai koku sugai ar priekšnoteikumu, ka paraugkopas koku dimensijas atbilst visai ģenerālkopai (Roxburgh et al., 2015). Mūsu 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. tabula). Pēc nacionālā MRM datiem virsvaldu koki, valdošie koki, un līdzvaldu koki (2.2. attēls) 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 pieņemts, ka tas būtiski neietekmēs vienādojumu piemērojamību nacionālā mērogā.

Mūsu pētījumā veiktā visu koka sakņu virs 2 mm diametrā izrakšana ir dārga un darbietilpīga metode un tādā apjomā vēl nav veikta nevienā citā pētījumā. 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 (Petersson & Stahl, 2006; Smith et al., 2016).

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

3.4. tabula

Regresijas vienādojumu koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji

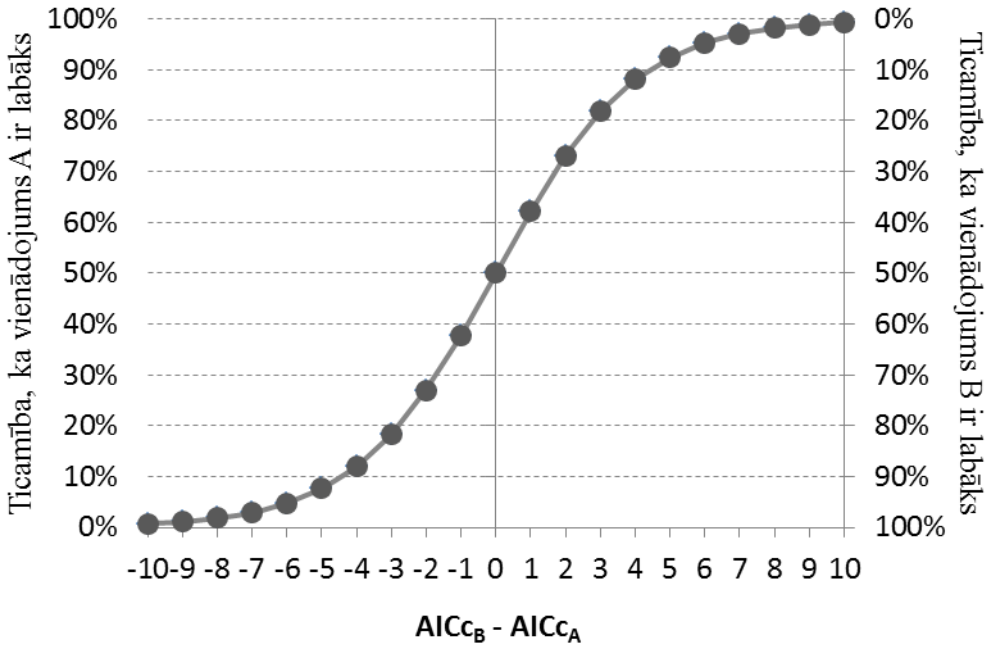
		Vienādojums	Regresijas koeficientu vērtības ± standartkļūda								m	k	R^2	RMSE	MAPE	AICc	u_k	ε_{ki}
			ln(a)		b		c		d									
Priede	AGB	2.5	-2.4216	±0.131	2.4746	±0.045						1.096	0.979	30.7	20.7	702.4	0.036	0.018
		2.6	-2.4418	±0.081	1.7374	±0.089	0.7841	±0.082				1.036	0.986	25.3	11.3	664.8	0.007	0.015
(Pinus sylvestris)		**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**
	SB	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**
	BB	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**
	BGB	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**
Egle	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
(Picea abies)		**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**
	SB	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**
	BB	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**
	BGB	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**

3.4. tabulas nobeigums

		Vienādojums	Regresijas koeficientu vērtības ± standartkļūda								m	k	R^2	RMSE	MAPE	AICc	u_k	ε_{ki}
			ln(a)		b		c		d									
Bērzs	AGB	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
(Betula		**2.7**	**-2.1284**	**±0.121**	**9.3375**	**±0.231**	**0.0221**	**±0.005**	**0.2838**	**±0.081**	**11**	**1.004**	**0.987**	**19.0**	**6.4**	**626.4**	**0.000**	**0.007**
spp.)	SB	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**	**0.7374**	**±0.08**	**11**	**1.002**	**0.989**	**15.2**	**5.7**	**579.2**	**0.000**	**0.000**
	BB	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**			**-2.0462**	**±0.207**	**12**	**1.075**	**0.883**	**8.3**	**20.8**	**449.9**	**0.008**	**0.076**
	BGB	**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
Apse	AGB	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
(Populus		**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**
tremula)	SB	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**	**0.6148**	**±0.1**	**11**	**1.006**	**0.991**	**11.6**	**7.6**	**420.1**	**0.004**	**0.005**
	BB	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**			**-1.0849**	**±0.214**	**12**	**1.004**	**0.879**	**7.3**	**21.6**	**339.5**	**0.076**	**0.039**
	BGB	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: Rekomendētais vienādojums katrai koka frakcijai iekrāsots treknrakstā. AGB, SB, BB, BGB attiecīgi kopējā virszemes, stumbra, zaru, kopējo celma/sakņu biomasa. Vienādojums 2.5: $ln\,\hat{Y} = ln(a) + b \times ln(D)$. Vienādojums 2.6: $ln\,\hat{Y} = ln(a) + b \times ln(D) + c \times ln(H)$. Vienādojums 2.7: $ln\,\hat{Y} = ln(a) + b \times \left(\frac{D}{D+m}\right) + c \times H + d \times ln(H)$. Reālo biomasas vērtību iegūšanai izmanto izteiksmi: $\text{Biomasa, kg} = k \times \exp(\ln \hat{Y})$. a, b, c, d - koeficienti, $\ln \hat{Y}$ – rezultatīvā pazīme, D – krūšaugstuma caurmērs, H – koka augstums, m - konstante, k – korekcijas koeficients. u_k – ir randomizētais faktors kokaudzei k, ε_{ki}– randomizētais faktors kokam i kokaudzē k.

Katras koku sugas biomasas frakcijai teorētiski labākais vienādojums raksturojas ar zemāko AICc vērtību. Ja starpība starp divām AICc vērtībām ir nulle, tad katram no pārbaudītajiem vienādojumiem ir vienāda (50%) ticamība būt precīzam 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. attēls). Vēl viens veids kā interpretēt AICc vērtību starpību ir apgalvot, ka vienādojums A ir 2,7 (73/27=2,7) reizes labāks kā 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 vien 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. att. **Vienādojumu ticamības novērtējums pēc divu AICc vērtību starpības**

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 pārāks 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 pērējām 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 pārākam 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%.

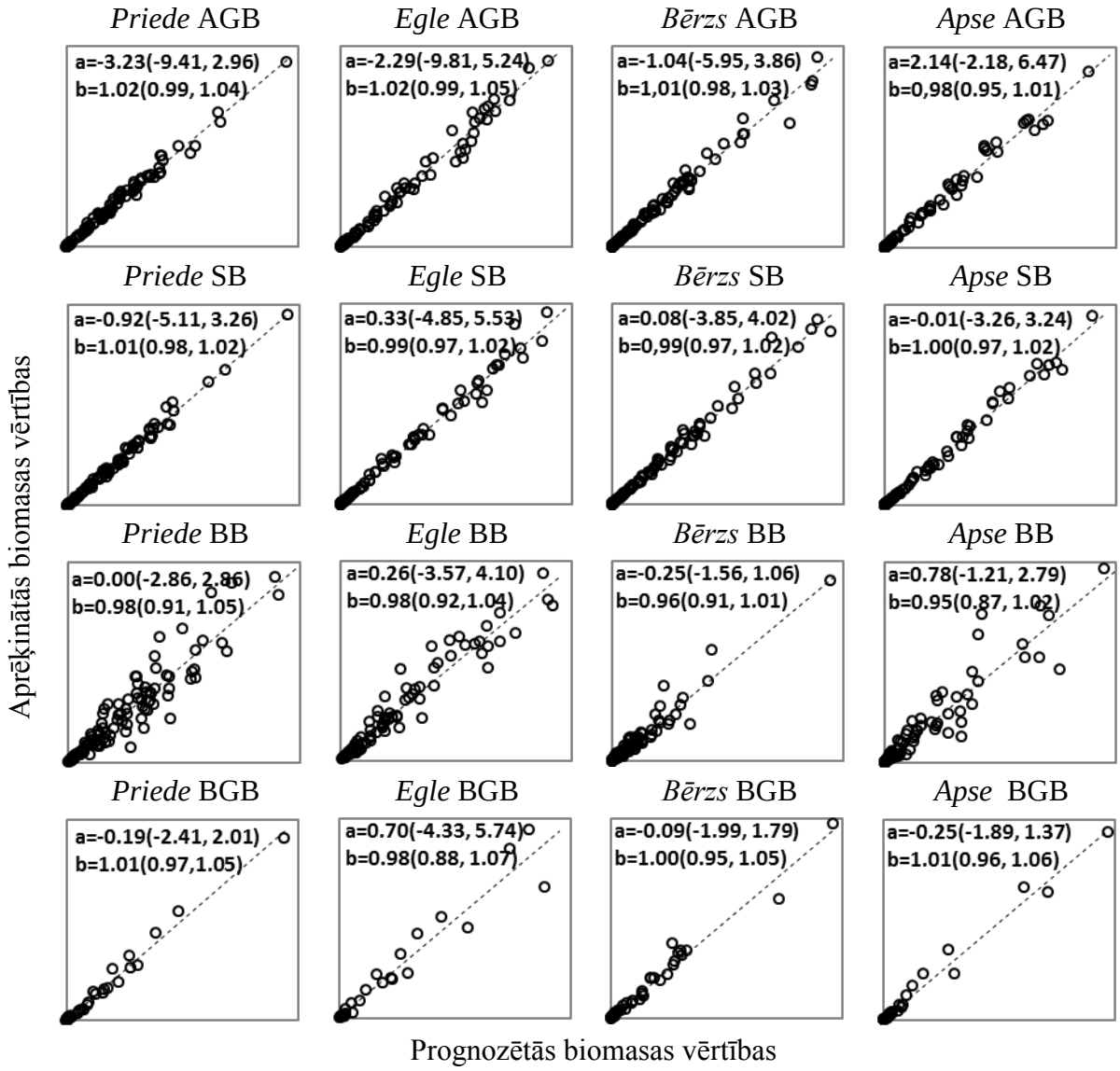
Izvēloties piemērotāko egles BGB, bērza BGB, egles BB un apses BB vienādojumu, jāvērtē pārējie vienādojumu statistiskie rādītāji un jāpielieto citas vienādojumu novērtēšanas metodes. Iepriekšminēto koku sugu biomasas frakciju labākajam vienādojumam ir tikai attiecīgi 1.1, 2.0, 2.1 un 1.9 reizes lielāka 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 standartkļūda. Pārāk liela koeficienta standartkļūda ir pietiekošs iemesls vienādojuma noraidīšanai, ja vien no tā netiek izslēgta kāda faktoriālā pazīme, tādējādi samazinot paliekošo koeficientu standartkļūdu un līdz ar to palielinot koeficientu ticamību. Mūsu pētījumā katra vienādojuma regresijas koeficientu ticamība pārbaudīta ar PRSE un visiem analizētajiem 2.5 vienādojuma koeficientiem (3.4. tabula) 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 koeficentu PRSE.

Sileshi (2014) norāda, ka vienādojumus, kuriem PRSE vienam vai vairākiem regresijas koeficientam ir lielāka par 25%, vispār nedrīkstētu publicēt, jo tie nav ticami. Autors arī norāda, ka vides zinātņu 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. tabula) R^2 uzrādīja ciešu sakarību starp mērītajām un aprēķinātajām biomasas vērtībām, iekļautajiem argumentiem izskaidrojot 73.3–99.3% no rezultatīvās pazīmes variēšanas. 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, jārēķinās 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. tabula), 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 mūsu pētījuma kontekstā uz sistemātisku biomasas pārvērtēšanu vai pretēji – biomasa tiek novērtēta mazāk. Darba ietvaros katrai koka biomasas frakcijai rekomendēto vienādojumu (3.4. tabula) 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. attēls).



3.10. att. **Aprēķināto un prognozēto biomasas vērtību izkliedes diagramma un regresijas taisne.**

Prognozētās vērtības aprēķinātas izmantojot rekomendētos vienādojumus (3.4. tabula) 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 biomasa, SB – stumbra biomasa, BB – zaru biomasa, BGB – celma/sakņu biomasa

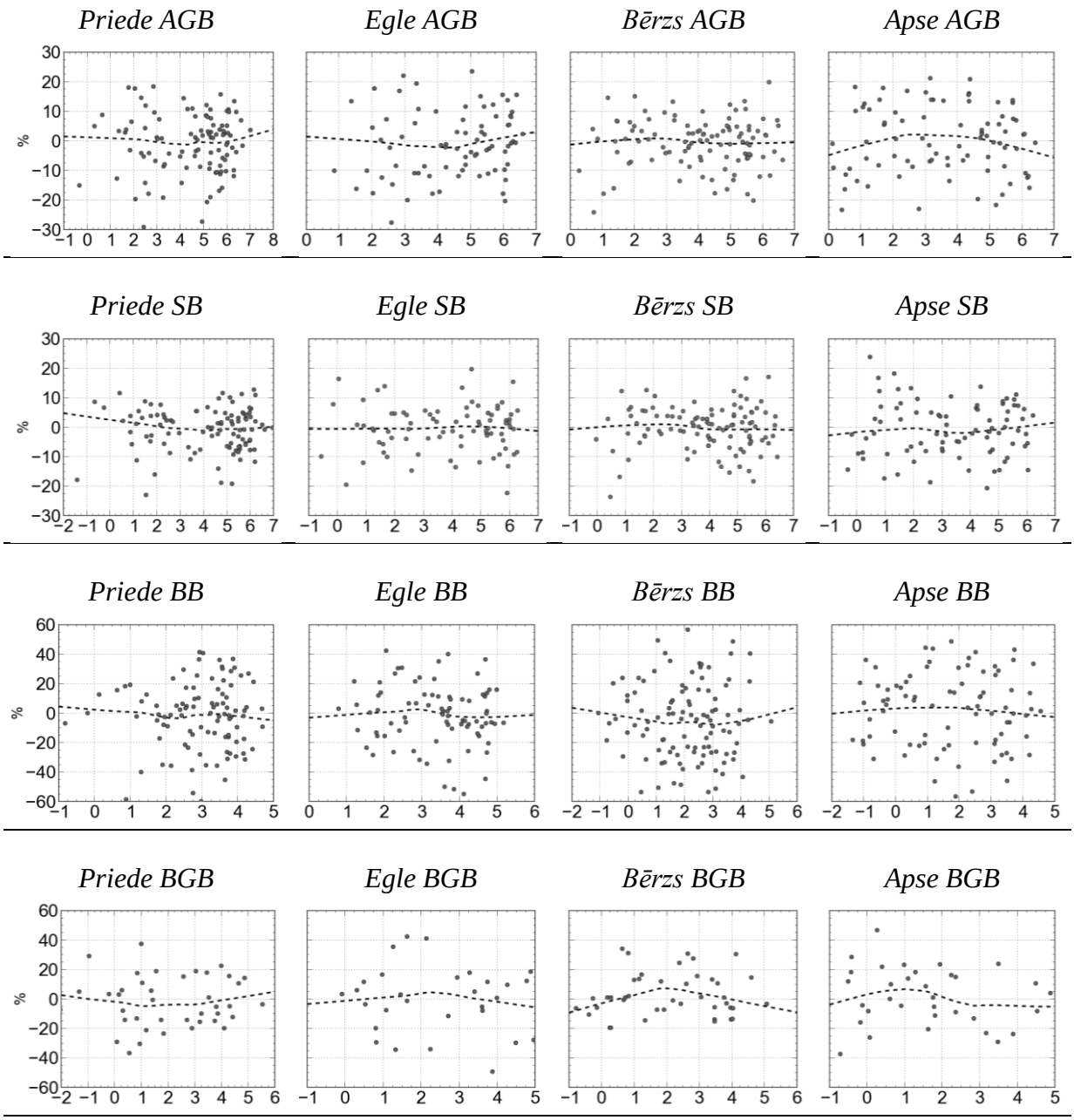
Attēlojot un analizējot aprēķināto un prognozēto vērtību izkliedes diagrammas, svarīgi aprēķinātās vērtības likt uz Y ass, bet prognozētās uz X ass, jo pretējā gadījumā iegūtie rezultāti būs kļūdaini (Piñeiro et al., 2008). Lineārās regresijas a un b koeficientu atbilstība izvirzītajiem kritērijiem veikta, 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. tabula) 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, dēļ lielākas to ietekmes, salīdzinot ar mazākiem kokiem.

Vadoties pēc 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). Pēc 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.

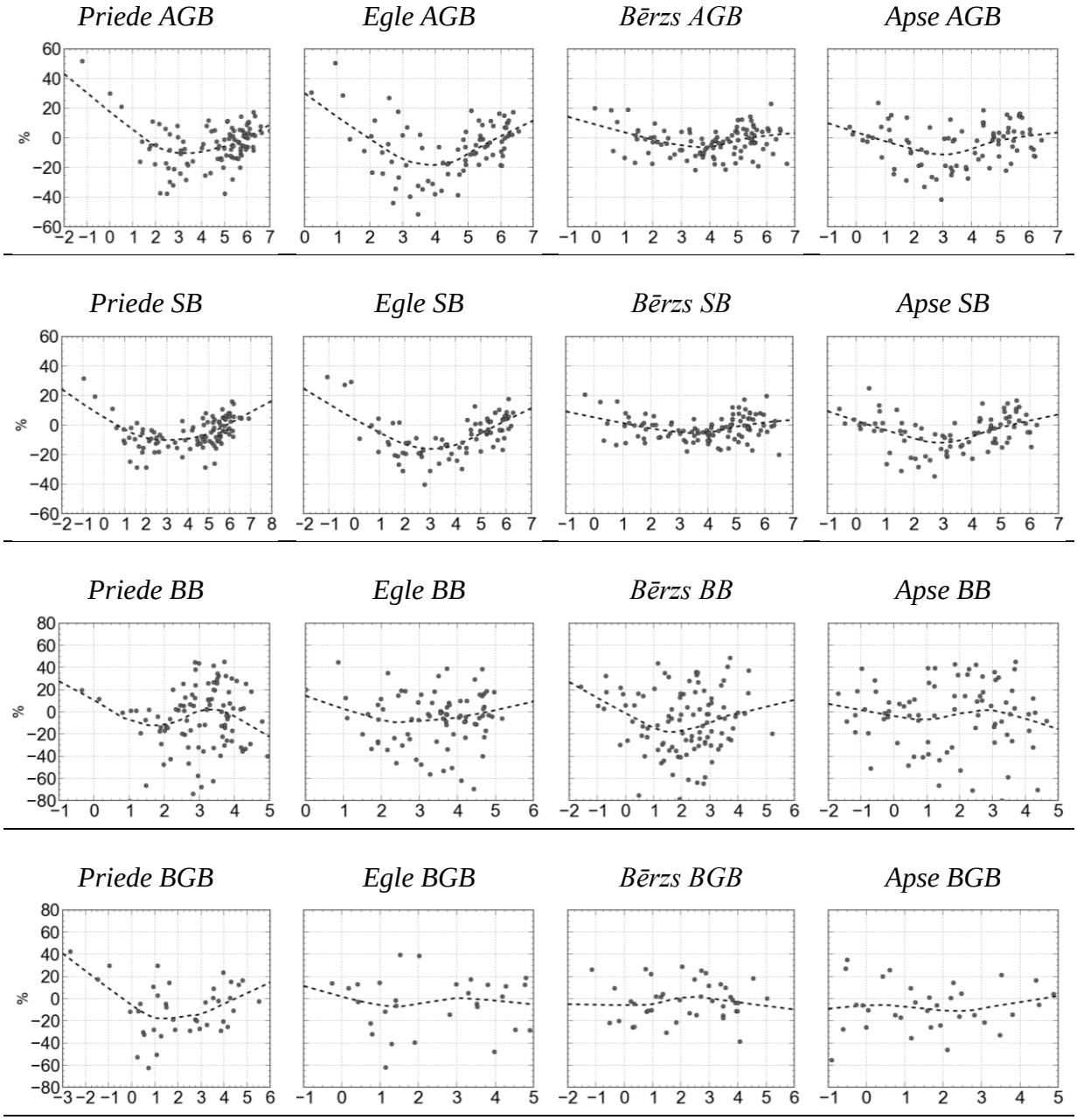
Novērtējot izstrādāto vienādojumu ticamību dažādu mainīgo lielumu diapazonā, pētījumā pārbaudīta vienādojumu atlikumu sadalījuma normalitāte (angļu val. *residual analysis*). Relatīvā starpība starp aprēķinātajām un prognozētajām biomasas vērtībām katram apskatītajam izstrādātajam vienādojumam attiecināta pret logaritmiski transformētām prognozētajām biomasas vērtībām (3.11. attēls, 3.12. attēls, 3.13. attēls). 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. attēls). Aprēķinot AGB un SB, lokālas prognozēšanas kļūdas nebija lielākas par, attiecīgi ± 5.1% un ± 4.8%. Savukārt aprēķinot BB vai BGB pēc 2.7 vienādojuma, lokālas prognozēšanas kļūdas bija nedaudz lielākas, attiecīgi ± 6.9% un ± 6.8%.

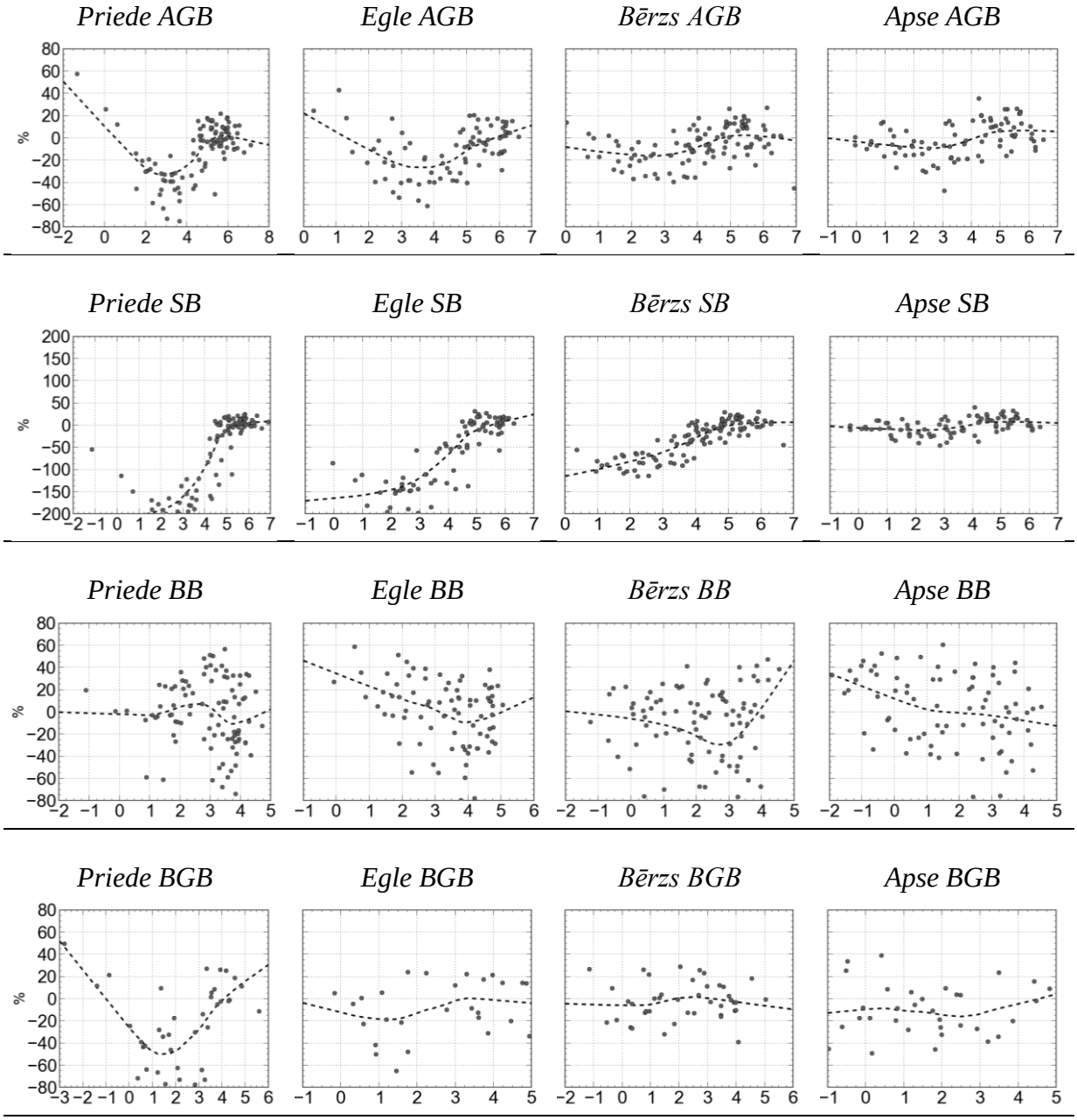
Aprēķinot biomasu pēc 2.6 un 2.5 vienādojumiem (3.12. attēls, 3.13. attēls), gandrīz visām biomasas frakcijām vienādojumu atlikumos novērojamas sistemātiskas kļūdas, kuras pārsniedza 10% robežu no vidējās vērtības. Tas vairumā gadījumos nozīmē nepietiekami precīzu biomasas novērtēšanu jauniem kokiem, īpaši skujkokiem. Ja atlikumu vidējā vērtība ir negatīva, tad pētījuma kontekstā tas norāda, ka konkrētais vienādojums prognozē biomasu vairāk 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 kā 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.



3.11. att. **Vienādojuma 2.7 atlikumu sadalījuma struktūra**
Pārtrauktā līnija attēlota, izmantojot LOWESS regresiju. AGB – virszemes biomasa, SB – stumbra biomasa, BB – zaru biomasa, BGB – celma/sakņu biomasa



3.12. att. **Vienādojuma 2.6 atlikumu sadalījuma struktūra**
Pārtrauktā līnija attēlota, izmantojot LOWESS regresiju. AGB – virszemes biomasa, SB – stumbra biomasa, BB – zaru biomasa, BGB – celma/sakņu biomasa



3.13. att. **Vienādojuma 2.5 atlikumu sadalījuma struktūra**
Pārtrauktā līnija attēlota, izmantojot LOWESS regresiju. AGB – virszemes biomasa, SB – stumbra biomasa, BB – zaru biomasa, BGB – celma sakņu biomasa

Mūsu 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.

Kā jau iepriekš ir norādījis 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 standartkļūda 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 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 veiktajā pētījumā pierādījās, ka īpaši jaunās priedes, egles un bērza kokaudzēs D un H kombinācija ievērojami samazina biomasas aprēķinu nenoteiktību, bet tāpat ar to 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. Precīza koku H datu iegūšana pati par sevi dažkārt ir diezgan sarežģīts uzdevums, īpaši kokaudzēs ar augstiem kokiem un blīviem vainagiem, kā arī pie lielas koku biezības. 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 uzmērītājiem (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 uzmērījumiem. Par cik koku augšanas apstākļi Latvijā ir diezgan līdzīgi apstākļiem Somijas dienvidos, pētījums netieši norāda, ka augošu koku uzmērījumus arī mūsu platuma grādos ir iespējams veikt ar pietiekošu precizitāti, lai koku H iekļautu kā argumentu izstrādātajos vienādojumos. Vairāki autori (Andersen, Reutebuch, & McGaughey, 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 palielināšanai nacionālajā mērogā.

Darba ietvaros atspoguļotie vienādojumu statistiskie rādītāji un veiktās pārbaudes norāda uz to, ka vairumā gadījumos (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 pietiekoši 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. attēls). 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. attēls).

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 kā mūsu pētījumā par pakāpes vienādojumiem ir aprakstījis Muukkonen (2007), aprēķinot biomasu dažādām Eiropā izplatītām koku sugām, savos pētījumos secinot, ka pakāpes vienādojumi nav pietiekoši elastīgi biomasas aprēķiniem, īpaši mazāku diametru kokiem. Tāpat arī logaritmiski pārveidota pakāpes funkcija ne vienmēr 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 gadījumos (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 mūsu pētījumā raksturoja 2.7 vienādojums, kura izmantošana salīdzinot ar 2.5 vienādojumu, biomasas aprēķinos vidēji par 61% samazināja aprēķinu nenoteiktību.

Ir pieņemts uzskatīt, ka biomasa dažādu koku sugu frakcijās (zari, stumbrs, saknes) vienādu dimensiju kokiem variē starp dažādām kokaudzēm un arī konkrētas kokaudzes līmenī. Mūsu pētījumā 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. tabula), 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 mūsu 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 veidojās 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 (Bronisz et al., 2016; Kozak, 1970; Repola, 2008, 2009). Mūsu 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 mūsu pētījumā ir līdzīga citam pētījumam Somijā, kur novirze pēc additivitātes 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. 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. tabula), 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 Norvēģi lieto Zviedrijā

izstrādātos vienādojumus. Parastai apsei AGB salīdzināta tikai ar Zviedrijā izstrādātiem biomasas vienādojumiem atsevišķi mazākiem un lielākiem kokiem, jo šajā valstī nav kopīga vienādojuma visu dimensiju kokiem. Apsēm ar D mazāku par 11 cm biomasa rēķināta pēc Johansson (2000) ieteiktajiem vienādojumiem, bet kokiem ar D virs 11 cm biomasa aprēķināta pēc Johansson (2002) vienādojumiem, sekojot autora rekomendācijām. Citu Ziemeļeiropas valstu apses vienādojumi (Korsmo, 1995; Simola, 1977) netika iekļauti, jo tie paredzēti biomasas novērtēšanai tikai jaunaudzēs ar koku krūšaugstuma diametru mazāku par 16 cm. Literatūrā netika atrasts neviens apses BGB vienādojums ar ko salīdzināt mūsu pētījuma datus. Tā kā mūsu pētījumā lapu biomasa netika iekļauta, visos gadījumos no salīdzināšanai izmantotajiem AGB vienādojumiem bērzam un apsei tā tika izslēgta, turpretī skujkokiem tā ir iekļauta kopējā AGB.

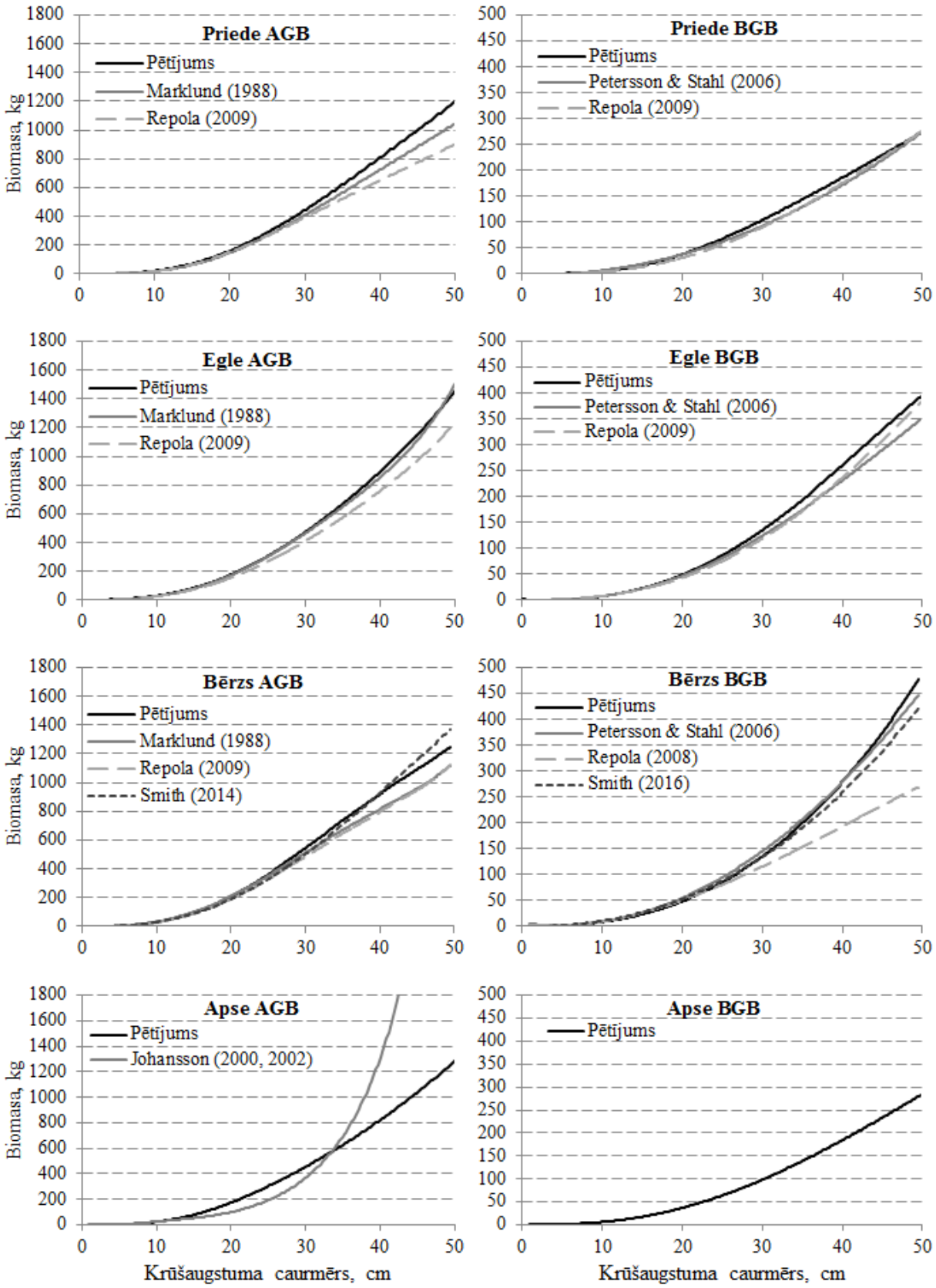
Balstoties uz vizuālu biomasas aprēķinu līkņu salīdzinājumu (3.14. attēls), vairums salīdzināto AGB un BGB vienādojumu (izņemot apses AGB un bērza BGB vienādojumus) uzrādīja līdzīgas biomasas izmaiņas. Apses AGB, aprēķināta pēc Johansson (2000, 2002) vienādojumiem, uzrādīja ievērojamu biomasas pārvērtēšanu kokiem ar D lielāku par 35 cm. Savukārt bērza BGB aprēķini pēc Repola (2008) vienādojuma, lielākajiem kokiem aprēķināja par 46% mazāku biomasu, nekā aprēķināts pēc mūsu izstrādātā vienādojuma (3.5. tabula). 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. tabula). 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

Promocijas darbā un citos pētījumos izstrādāto vienādojumu biomasas aprēķinu relatīvā starpība atkarībā no vidējā krūšaugstuma caurmēra

D, cm	*Priede*				*Egle*				*Bērzs*					*Apse*	
	AGB[1]	AGB[2]	BGB[4]	BGB[2]	AGB[1]	AGB[2]	BGB[4]	BGB[2]	AGB[1]	AGB[2]	AGB[5]	BGB[4]	BGB[2]	BGB[5]	AGB[3]
5	17.9	19.0	-4.0	6.1	18.4	19.7	-6.9	-55.7	-13.0	8.6	6.3	-119.2	-71.4	-54.1	17.3
10	12.1	14.8	-16.0	-19.6	10.6	14.4	-1.9	-9.3	-13.5	6.2	-3.4	-29.2	-26.5	-32.3	4.4
15	7.5	7.6	-1.0	6.6	5.9	12.5	1.8	6.4	-8.1	6.1	3.6	-15.1	-12.3	-20.4	27.2
20	5.2	6.5	1.6	11.8	3.0	12.2	4.5	11.7	-2.3	7.7	8.1	-12.7	-6.1	-12.4	41.3
25	4.4	7.8	2.7	11.6	1.3	12.4	6.6	13.1	2.5	9.6	9.2	-12.3	1.4	-6.9	35.9
30	5.6	10.6	1.3	8.4	1.4	13.1	8.2	12.5	5.8	11.3	8.4	-11.8	7.2	-3.3	21.6
35	8.0	14.2	-1.8	2.5	3.3	14.0	9.6	10.8	8.1	11.7	4.6	-10.5	18.3	0.2	-9.4
40	8.0	15.6	-4.6	-1.9	5.5	14.8	10.6	8.6	10.5	12.9	-0.3	-8.1	25.8	3.4	-59.2
45	11.5	19.6	-8.1	-9.8	-1.3	15.0	11.6	6.1	10.0	11.2	-7.3	-6.2	37.2	5.2	-122.6
50	14.4	23.0	-6.1	-11.0	0.5	15.7	12.2	4.1	10.8	10.8	-9.1	-1.4	45.6	8.4	-278.9
MAPE	**9.5**	**13.9**	**4.7**	**8.9**	**5.1**	**14.4**	**7.4**	**13.8**	**8.5**	**9.6**	**6.0**	**22.7**	**25.2**	**14.7**	**61.8**

[1]Marklund (1988), [2]Repola (2008, 2009), [3]Johansson (2000, 2002), [4]Peterson & Stahl (2006), [5]Smith (2014, 2016). Negatīva zīme norāda uz biomasas pārvērtēšanu salīdzinot ar mūsu vienādojumu. MAPE – vidējā absolūtā kļūda, D – krūšaugstuma caurmērs, AGB – kopējā virszemes biomasa, BGB – kopējā celma/sakņu biomasa.



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

Pētījumā rekomendētie vienādojumi salīdzināti ar vienādojumiem no Baltijas jūras reģiona

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. tabula). Vienādojumi noteiktās caurmēra grupās biomasu var prognozēt precīzāk vai mazāk precīzi. Viskorektāk citu valstu vienādojumi atspoguļo biomasas izmaiņas diametru grupās no 15–35 cm. Mazu un lielu dimensiju kokiem biomasas aprēķini vidēji atšķiras vairāk nekā par 10%, salīdzinot ar mūsu 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. attēls), kuriem ir identiska celma augstuma definīcija kā mūsu pētījumā. 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 biomasa pēc Johansson (2000, 2002) vienādojumiem lielākajiem kokiem tiek stipri pārvērtēta, salīdzinot ar mūsu izstrādāto vienādojumu. Piemēram, 30 m garai apsei mūsu 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 Johansson metodika pie identiska apses garuma tikai stumbra apakšējos 10 cm no zemes virskārtas ieskaita BGB, bet pārējo celma daļu – AGB frakcijā. Turklāt Johansson apses vienādojumi kā vienīgo vienādojumu argumentu izmanto D, 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 Repola (2008) vienādojumam raksturīga ievērojama novirze, palielinoties koka vidējam D. Tas daļēji varētu būt skaidrojams ar pētījumu metodoloģiskajām atšķirībām, jo Repolas 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. Mūsu novērojumi atbalsta Smith et al. (2016) secinājumu, ka biomasas vienādojumu ģeogrāfiska ekstrapolācija rada kļūdainus biomasas aprēķinus. Daudzi zinātnieki ir pētījuši AGB un BGB izmaiņas atkarībā no dažādiem faktoriem secinot, ka koku biomasa ir atkarīga no ģeogrāfiskā platuma un garuma, veģetācijas zonas, ūdens deficīts, gada vidējās temperatūras un citiem faktoriem (Berninger et al., 1995; Stegen et al., 2011; Wirth et al., 2004). 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 dēļ lielām šīs biomasas frakcijas variācijām (Zianis et al., 2005), darba ietvaros mēs apvienojām dzīvo un sausu zaru frakcijas kopējā BB. Sauso zaru īpatsvars no BB frakcijas vidēji mūsu 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. tabula), 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. Mūsu 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 atmiršana bērzam sākās 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

Sauso zaru īpatsvara kopējā zaru biomasā (BB) korelācija ar koku krūšaugstuma diametru (D) un augstumu (H)

	Priede		Egle		Bērzs		Apse	
	D	H	D	H	D	H	D	H
R*	0.30	0.29	0.62	0.66	-0.12	-0.18	0.46	0.53
p vērtība	*0.002*	*0.003*	*0.000*	*0.000*	*0.234*	*0.063*	*0.000*	*0.000*

*Spīrmena rangu korelācijas koeficients

Mūsu pētījumā aprēķinātās sauso zaru īpatsvara vērtības ir ļoti līdzīgas tām, kuras aprēķinātas pēc Marklund (1988) vienādojumiem, attiecīgi priedei – 13.6%, eglei – 7.6% un bērzam – 4.6%. Turpretī 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, iegūtas no kopējās zaru biomasas.

Vienādojumu atlikumu sadalījuma struktūra (3.11. attēls, 3.12. attēls, 3.13. attēls) 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 biomasa 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, mūsu pētījumā izstrādāto biomasas vienādojumu salīdzināšana ar līdzīgiem vienādojumiem no Baltijas jūras reģiona (3.14. attēls) 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. tabula), bet AGB un BGB vienādojumu validēšanā izmantoto koku maksimālais D bija 57.3 cm.

3.3. Latvijas kokaudzēs uzkrātais ogleklis atbilstoši Latvijas meža resursu monitoringa datiem

Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājuma raksturošanai izmantoti MRM 2012.–2016. gada rezultāti, ietverot II cikla pēdējos 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

Mežu resursu monitoringa (MRM) datubāzē koku sugām piemērotie biomasas vienādojumi Latvijas kokaudžu oglekļa aprēķiniem

Suga	Sugu grupa	Sugas kods	Piemērotais vienādojums
priede	skujkoks	1	priedes
egle	skujkoks	3	egles
bērzs	lapkoks	4	bērza
melnalksnis	lapkoks	6	apses
apse	lapkoks	8	apses
baltalksnis	lapkoks	9	apses
ozols	lapkoks	10	bērza
osis	lapkoks	11	bērza
liepa	lapkoks	12	bērza
lapegle	skujkoks	13	egles
citas priedes	skujkoks	14	priedes
citas egles	skujkoks	15	egles
goba, vīksna	lapkoks	16	bērza
dižskābardis	lapkoks	17	bērza
skābardis	lapkoks	18	bērza
papele	lapkoks	19	apses
vītols	lapkoks	20	apses
blīgzna	lapkoks	21	apses
ciedru priede	skujkoks	22	priedes
baltegle	skujkoks	23	egles
kļava	lapkoks	24	bērza
mežābele	lapkoks	51	bērza
ķirsis	lapkoks	56	bērza
citas koku un krūmu sugas	lapkoks	–	apses

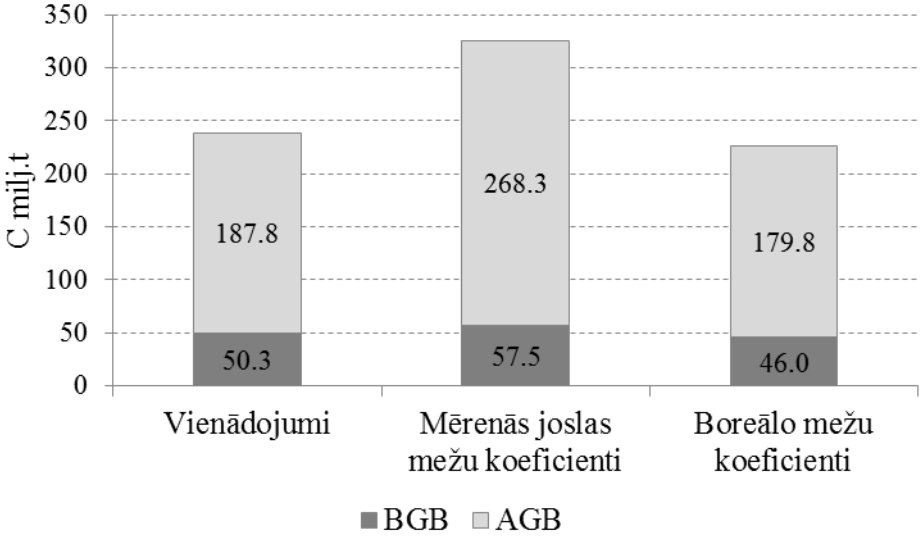
Pētījumā izstrādātie biomasas vienādojumi attiecināmi uz 85.5% Latvijas kokaudžu krājas, kurā priedes īpatsvars – 33.0%, egles – 19.5%, bērza – 23.7%, bet apses – 9.3%. No pārējo koku sugu krājas īpatsvara Latvijas mežos kas ir 14.5%, lielāko daļu jeb 12.2% aizņem alkšņu ģints koku sugas baltalksnis (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 mūsu pētījuma datiem vairāk atbilst apsei nekā bērzam (3.2. tabula). Zviedrijā analizējot 24 baltalkšņa un 31 melnalkšņa dabiskas izcelsmes kokaudzes aprēķinātais vidējais reducētais koksnes blīvums baltalksnim bija 359 kg m^{-3}, bet melnalksnim – 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 mūsu pētījumā. Citā pētījumā atspoguļotas Ziemeļeiropu un Baltijas valstis raksturojošas reducētā blīvuma vērtības, kuras baltalksnim (360 kg m^{-3}) un melnalksnim (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. tabula) tāpat kā alkšņiem, izstrādātie biomasas vienādojumi piemēroti pēc tuvākām 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% ±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. attēls). 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 promocijas darba un pašreiz spēkā esošās metodikas atšķirībām, ir ļoti tuvi mūsu aprēķiniem. Lielākās abu aprēķinu metožu atšķirības ir skaidrojamas ar atšķirīgajiem pieņēmumiem par oglekļa saturu dzīvajā biomasā. Mūsu 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. Piemērojot mūsu aprēķinos 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 nepietiekošā 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 47.2–51.7%. 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. Par cik 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 darīts. Tāpēc, pamatojoties uz citu Eiropas valstu oglekļa satura pieņēmumiem to aprēķinu metodikās (1.4. tabula) 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% skujkokiem.



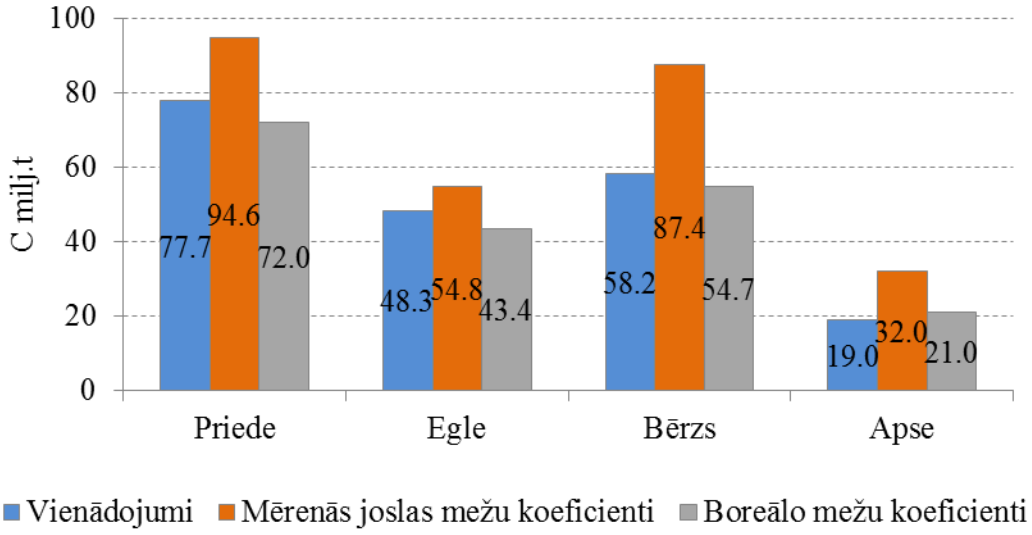
3.15. att. **Uzkrātais ogleklis kokaudžu virszemes biomasā (AGB) un celma/sakņu biomasā (BGB) pielietojot dažādas aprēķinu metodes**

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. attēls). 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 koeficentus, 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 koeficentiem, kuru izmantošana par 5.2% jeb 12.3 milj.t samazina kokaudzēs uzkrāto oglekli, salīdzinot ar mūsu 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 mūsu pētījuma aprēķiniem redzams, ka šo pārrēķinu koeficientu izmantošanu Latvijas apstākļos nav pieļaujama. Promocijas darba 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 CO_2 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 mūsu veiktajos aprēķinos, arī Zviedrijas pieredze rāda, ka ar atsevišķu koku biomasas vienādojumiem

aprēķinātā kokaudžu AGB ir vidēji par 5% lielāka, nekā aprēķināta no kokaudžu krājas datiem (Jalkanen et al., 2005).

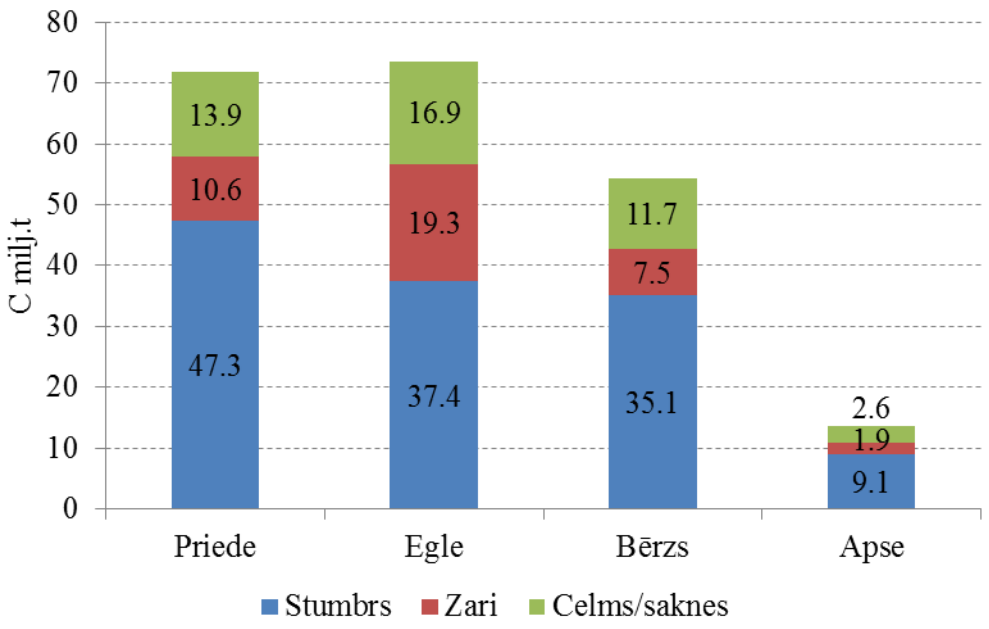
Salīdzinot kokaudžu oglekļa resursus pēc valdošās koku sugas aizņemtās platības secināts, ka izteikti vairāk tas akumulēts priežu kokaudzēs (3.16. attēls). Tas izskaidrojams ar to, ka priede Latvijā aizņem vislielākās meža platības, kā arī skujkoku biomasā oglekļa saturs ir lielāks nekā lapkokos. Darba 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.



3.16. att. **Uzkrātais ogleklis pēc valdošās koku sugas aizņemtās platības pielietojot dažādas aprēķinu metodes**

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 mūsu pētījuma 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). Par cik BEF boreālo mežu reģionam visām lapkoku sugām ir vienādi, acīmredzot, tie vairāk piemēroti bērza biomasas raksturošanai, kas Ziemeļeiropā ir izplatītāka koku suga.

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, kurš gandrīz līdzīgi sadalīts pa abām iepriekšminētajām koku sugām (3.17. attēls). 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 (zari un saknes), kurās uzkrāts apmēram puse jeb 49% no egļu biomasā uzkrātā apjoma. Priedes, egles un bērza nestumbra biomasas frakcijās atkarībā no sugas akumulēts vien 33–35% no oglekļa apjoma. Egles nestumbra frakciju biomasas īpatsvars 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 biomasa ir lielāka.

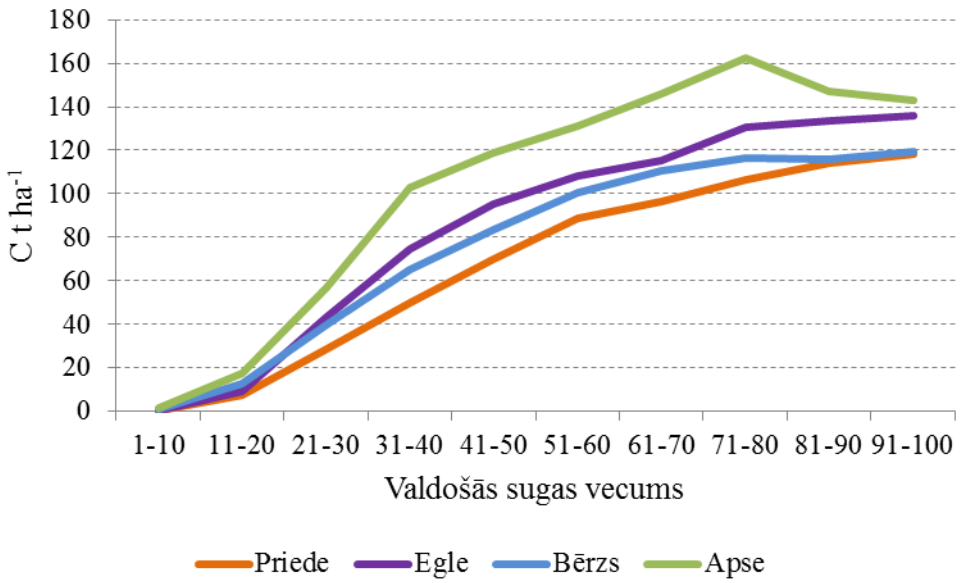


3.17. att. **Koku stumbrā, zaros un celmos/saknēs uzkrātais ogleklis atkarībā no sugas**

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. attēls un 3.17. attēls 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 m^3 visās biomasas frakcijās kopā ir piesaistījis 1.47 t CO_2, kas ir līdzvērtīgs 0.40 t oglekļa. Pārējām koku sugām kopējā CO_2 un oglekļa piesaiste uz stumbra m^3 ir mazāka nekā eglei, attiecīgi priedei 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 valdošai koku sugai nepietiekamā apmērā novērtēs no kopējās krājas datiem rēķinātos oglekļa apjomus. Vislielākā novirzei no reālās kokaudžu CO_2 piesaistes, ir mīksto lapkoku (apses, iespējams arī baltalkšņu) kokaudzēs, jo CO_2 piesaistes starpība uz stumbra m^3 starp egli un mīksto lapkoku sugām ir vislielākā. Iepriekšminēto apstiprina reālais apsēs uzkrātais oglekļa apjoms (3.17. attēls), kurš ir gandrīz par 40% mazāks nekā apšu kokaudžu oglekļa apjoms kur tā ir valdošā suga (3.16. attēls).

Vidēji Latvijas kokaudzēs akumulēts 67.4 ± 0.6 t ha^{-1} oglekļa. Latvijas kokaudzēs uzkrātais ogleklis 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 kā 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 vairāk 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 (Kolari et al., 2004; Law et al., 2003), tad, analizējot uzkrāto oglekli platības vienībā, MRM parauglaukumu dati sadalīti pa desmitgadēm atkarībā no valdošās sugas vecuma (3.18. attēls).



3.18. att. **Dažāda vecuma audzēs uzkrātais ogleklis pēc valdošās koku sugas**

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 CO_2 piesaistes temps ir 10–40 gadus vecās apses, egles un bērzu audzēs un 10–60 gadus vecās priežu audzēs (3.18. attēls). Pieaugot koku vecumam, kokaudžu CO_2 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 slieksni, 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 CO_2, tikai oglekļa uzkrāšanās temps ievērojami krītas. 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 CO_2 piesaistes temps, tāpat kā eglei un bērzam.

Analizējot pilnu oglekļa aprites ciklu, zinātnieki ir secinājuši, ka pāraugušas audzes patiesībā kļūst par oglekļa emisiju avotu (Goulden et al., 1996; Lindroth, Grelle, & Moren, 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 heterotropiskās elpošanas rezultātā (Uri et al., 2017). Apšu kokaudžu CO_2 piesaistes tempa saglabāšanos līdz 80 gadu vecumam daļēji iespējams izskaidrot ar lielu citu koku sugu klātbūtni, uz kuru rēķina ogleklis apses

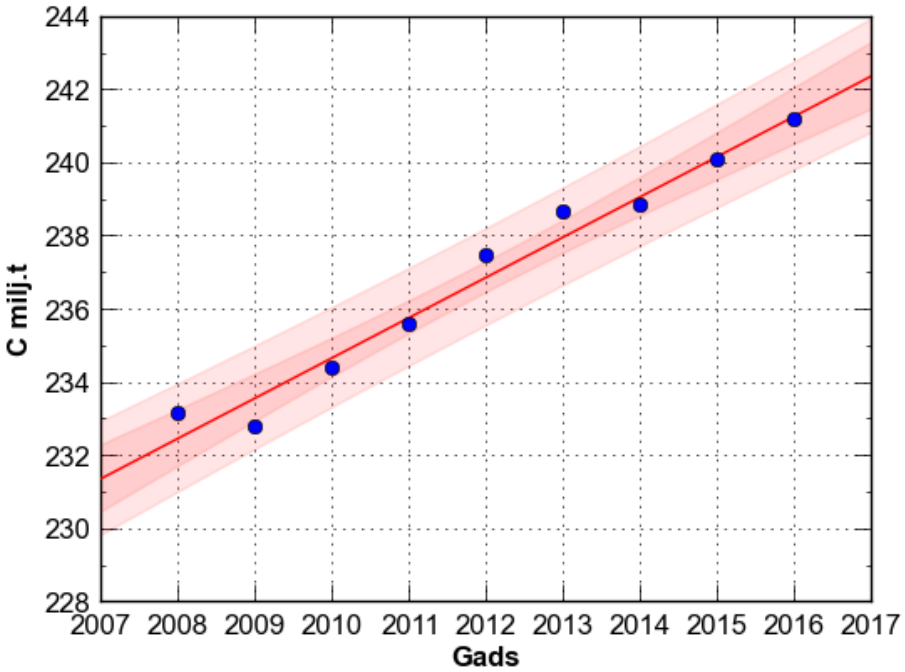
kokaudzēs turpina uzkrāties. Patiesībā reālais apsēs uzkrātais oglekļa apjoms varētu būt arī mazāks, jo apses kokaudzēs pēc 40 gadu sasniegšanas ievērojami palielinās trupējušo koku īpatsvars, kas ne tikai ietekmē iegūstamo sortimentu iznākumu, bet arī uzkrātā oglekļa daudzumu.

Raksturojot Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājumus, mūsu pētījuma 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 iespējamas 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 un tādas kuru paņemot rokās sadalās blīvumu, noskaidrots, ka priedei, eglei un baltalksnim ir vismazākais koksnes blīvuma samazinājums, progresējot sadalīšanās pakāpei. Blīvums satrupējušai koksnei iepriekšminētajām koku sugām bija attiecīgi par 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. Par cik stumbra biomasa tiek aprēķināta tā tilpumu reizinot ar blīvumu, tad vidējā stumbra blīvuma samazināšanās gadījumā trupes ietekmē kopējais stumbra biomasas un oglekļa daudzums samazināsies. Pasaulē uz doto brīdi nav veikti pētījumi par oglekļa zudumiem stumbra trupes 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.–2016. gadam, izmantotas piecgades 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, piecgades intervāls nobīdīts par vienu gadu uz priekšu. Atspoguļojot kokaudžu oglekļa uzkrājuma izmaiņas, aprēķinos izmantoti visi MRM parauglaukumu dati, neatkarīgi no zemes kategorijas (iepriekš kategorijas tika atlasītas atbilstoši UNFCCC un Kioto protokola prasībām), kuros reģistrēti augoši koki.

No MRM datiem secināms, ka Latvijas kokaudzēs uzkrātais ogleklis 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. attēls). Salīdzinot MRM 1. un 2. pilna cikla rezultātus, secināms, ka valsts oglekļa uzkrājuma pieaugums nav izskaidrojams tikai vien 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 ± 0.6 t ha^{-1} oglekļa, bet pēc 5 gadiem, atkārtoti pārmērot tos pašus parauglaukumus, aprēķināts, ka vidējais oglekļa uzkrājums ir palielinājies līdz 67.1 ± 0.6 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 piecgades slīdošā vidējā vērtībām, vidējam vecumam tomēr ir tendence samazināties, bet uzkrātais ogleklis platības vienībā ir konstanti palielinājies.



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

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 precizēt aprēķina metodi.

SECINĀJUMI

1. Priedei un bērzam novērota izteikta stumbra koksnes blīvuma samazināšanās galotnes virzienā. Eglei un apsei koksnes blīvums samazinās līdz 30–40% relatīvajam koka augstumam, 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, balstsakņu 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. Fenoskandijā 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 mūsu 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 nepietiekošā 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% ± 0.6% un lapkokiem – 48.8% ± 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.

INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS

1. Aboal, J. R., Arévalo, J. R., & 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. https://doi.org/10.1016/j.flora.2004.11.001
2. Addo-Danso, S. D., Prescott, C. E., & 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.015
3. Afif-Khouri, E., Camara-Obregon, A., Canga, E., & Dieguez-Aranda, I. (2013). Above-ground biomass equations for Pinus radiata D . Don. *Forest Systems*, *22*(3), 408–415.
4. Ahti, T., Hämet-Ahti, L., & Jalas, J. (1968). Vegetation zones and their sections in northwestern Europe. *Annales Botanici Fennici*, *3*, 169–211.
5. Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactionson Automatic Control*, *19*(6), 716–723. https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705
6. Albaugh, T. J., Bergh, J., Lundmark, T., Nilsson, U., Stape, J. L., Allen, H. L., & 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.021
7. Albert, K., Annighöfer, P., Schumacher, J., & 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), 1–12. https://doi.org/10.1080/02827581.2014.910267
8. Alteyrac, J., Zhang, S., Cloutier, A., & 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.
9. 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013
10. Andersen, H.-E., Reutebuch, S. E., & 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. https://doi.org/10.5589/m06-030
11. 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. https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.09.009
12. Arhipova, N., Gaitnieks, T., Donis, J., Stenlid, J., & 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. https://doi.org/10.1139/x11-141
13. Baldasso, M., Birigazzi, L., & Henry, M. (2012). *Tutorial for Tree Allometric Equation Database Development*. Rome, Italy.
14. Bārdulis, A. (2013). *Sakņu biomasas izpēte sausieņu priežu (pinus sylvestris) jaunaudzēs*. Promocijas darbs. Latvijas Lauksaimniecības Universitāte.
15. Bārdulis, A., Daugaviete, M., Lazdiņš, A., Bārdule, A., & Liepa, I. (2011). Biomasas struktūra un oglekļa uzkrāšanās virszemes un sakņu biomasā baltalkšņa Alnus incana (L.) Moench. jaunaudzēs lauksaimniecības zemēs. *MežzinātTne*, *23(56)*, 71–88.
16. Bārdulis, A., Jansons, Ā., Bārdule, A., Zeps, M., & 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.
17. Bārdulis, A., Lazdiņa, D., Daugaviete, M., Bārdule, A., Daugavietis, U., & 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.

18. Bartelink, H. H. (1996). Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. *Forest Ecology and Management, 86*(1–3), 193–203. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03783-8
19. Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software, 67*(1), 51. https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01
20. Batjes, N. H. (2014). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science, 65*(1), 10–21. https://doi.org/10.1111/ejss.12114_2
21. Beijere, G., Defais, M., Fišers, M., Flečers, D., Menks, Ē., Jēgers, F., … Veinendāls, K. (2006). *Samaziniet klimata izmaiņas: lietojiet koksni!* Rīga: Zaļās mājās.
22. Bergstedt, A., & Olesen, P. O. (2000). Models for Predicting Dry Matter Content of Norway spruce. *Scandinavian Journal of Forest Research, 15*, 633–644. https://doi.org/10.1080/02827580050216888
23. Berndes, G., Bird, D. N., & Cowie, A. L. (2011). *Bioenergy, Land Use Change and Climate Change Mitigation. Background Technical Report*. *International Energy Agency (IEA)*. Paris.
24. Berninger, F., Nikinmaa, E., Hari, P., Mencuccini, M., & Grace, J. (1995). Evaporative demand determines branchiness of Scots pine. *Oecologia, 102*(2), 164–168. https://doi.org/10.1007/BF00333247
25. Blujdea, V. N. B., Pilli, R., Dutca, I., Ciuvat, L., & Abrudan, I. V. (2012). Allometric biomass equations for young broadleaved trees in plantations in Romania. *Forest Ecology and Management, 264*, 172–184. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.042
26. 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. https://doi.org/10.1039/C3EE42350F
27. 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*(6982), 549–553. https://doi.org/10.1038/nature02437
28. Breidenich, C., Magraw, D., Rowley, A., Rubin, J. W., The, S., Journal, A., & Apr, N. (1998). The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. *The American Journal of International Law.*, *92*(2), 315–331.
29. Breu, F., Guggenbichler, S., & Wollmann, J. (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Vasa*. https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104
30. 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), 1–17. https://doi.org/10.14214/sf.1559
31. Brown, S., & Lugo, A. E. (1984). Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science, 223*(4642), 1290–3. https://doi.org/10.1126/science.223.4642.1290
32. Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference: A practical Information-Theoretic-Approach*. *Model selection & Multimodel inference*. Springer, New York. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.11.004
33. Cabeza, L. F., Barreneche, C., Miró, L., Morera, J. M., Bartolí, E., & Inés Fernández, A. (2013). Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.017
34. 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. https://doi.org/10.1007/s004420050201
35. Chave, J. (2005). *Measuring wood density for tropical forest trees. A field manual*. *Sixth Framework Programme (2002-2006)*. Toulouse, France.
36. 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. https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x
37. 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. https://doi.org/10.1111/gcb.12629
38. Chisholm, S. W. (2001). OCEANS: Dis-Crediting Ocean Fertilization. *Science*, *294*(5541), 309–310. https://doi.org/10.1126/science.1065349
39. Chojnacky, D. C., Heath, L. S., & Jenkins, J. C. (2014). Updated generalized biomass equations for North American tree species. *Forestry*, *87*(1), 129–151. https://doi.org/10.1093/forestry/cpt053
40. Cienciala, E., Černý, M., Tatarinov, F., Apltauer, J., & Exnerová, Z. (2006). Biomass functions applicable to Scots pine. *Trees - Structure and Function*, *20*(4), 483–495. https://doi.org/10.1007/s00468-006-0064-4
41. 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. https://doi.org/10.1007/s13595-014-0415-z
42. Claesson, S., Sahlen, K., & 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. https://doi.org/10.1080/028275801300088206
43. Clark, D., Brown, S., Kicklighter, D. W., Chambers, J. Q., Thomlinson, J. R., & Ni, J. (2001). Measuring net primary production in forest concepts and field methods. *Ecological Applications*, *11*(2), 356–370. https://doi.org/DOI: 10.2307/3060894
44. Clark, M. L., Roberts, D. A., Ewel, J. J., & 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
45. Cleveland, W. S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, *74*(368), 829–836. https://doi.org/10.2307/2286407
46. Cretí, A., & Joëts, M. (2017). Multiple bubbles in the European Union Emission Trading Scheme. *Energy Policy*, *107*, 119–130. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.018
47. Daugaviete, M. (2010). Biomasas uzkrāšanās baltalkšņa (Alnus incana (L .) Moench .) jaunaudzēs. *MežzinātTne*, *21*(54), 16–30.
48. Daugaviete, M., Gaitnieks, T., Kļaviņa, D., & Teliševa, G. (2008). Oglekļa akumulācija virszemes un sakņu biomasā bērza, baltalkšņa, priedes un egles jaunaudzēs lauksaimniecības zemēs. *MežzinātTne*, *51*(18), 35–52.
49. Di Cosmo, L., Gasparini, P., & 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.008
50. Dibdiakova, J., & Vadla, K. (2012). Basic density and moisture content of coniferous branches and wood in Northern Norway. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 33, p. 6). https://doi.org/10.1051/epjconf/20123302005
51. Dobson, M. C., Ulaby, F. T., LeToan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E. S., & Christensen, N. (1992). Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass. *IEEE*

Transactions on Geoscience and Remote Sensing, *30*(2), 412–415. https://doi.org/10.1109/36.134090
52. 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. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00130-X
53. Drēksa, A., Līpiņš, L., & Sarmulis, Z. (2003). Priedes un egles stumbru mizas biezums. *MežzināTne*, *45*, 131–137.
54. Ebuy, J., Lokombe, J. P., Ponette, Q., Sonwa, D., & Picard, N. (2011). Allometric equation for predicting aboveground biomass of three tree species. *Journal of Tropical Forest Science*, *23*(2), 125–132.
55. EEA. (2007). *European Forest Types. Categories and types for sustainable forest management reporting and policy*. *EEA Technical report* (Vol. 3). https://doi.org/10.3832/efor0425-003
56. Eggleston, H., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.Volume - IV Agriculture, Forestry and other and-use*. *IGES, Japan*.
57. Elfving, B., Ulvcrona, K. A., & Egnell, G. (2017). Biomass equations for lodgepole pine in northern Sweden. *Canadian Journal of Forest Research*, *47*(1), 89–96. https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0131
58. Ene, L. T., Næsset, E., Gobakken, T., Gregoire, T. G., Ståhl, G., & Nelson, R. (2012). Assessing the accuracy of regional LiDAR-based biomass estimation using a simulation approach. *Remote Sensing of Environment*, *123*, 579–592. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.017
59. 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.
60. European Commission. (2016). The European Union Emissions Trading System. https://doi.org/doi:10.2834/6083
61. EUROSTAT. (2017). Europe in figures - Eurostat yearbook 2017. Retrieved February 5, 2017, from http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Europe_in_figures_-_Eurostat_yearbook
62. Falkowski, P. (2000). The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System. *Science*, *290*(5490), 291–296. https://doi.org/10.1126/science.290.5490.291
63. Fan, Y., Jia, J. J., Wang, X., & Xu, J. H. (2017). What policy adjustments in the EU ETS truly affected the carbon prices? *Energy Policy*, *103*, 145–164. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.008
64. FAO. (2011). *State of Europe's forests 2011. Status & Trends in Sustainable Forest Management in Europe*. https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2
65. FAO. (2014). Manual for visual assessment of forest crown condition. Retrieved from http://www.fao.org/3/a-i4214e.pdf
66. Federici, S., Vitullo, M., Tulipano, S., De Lauretis, R., & 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. https://doi.org/10.3832/ifor0457-0010086
67. 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. https://doi.org/10.5194/bg-8-1081-2011
68. Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., & 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.042

69. Forrester, D. I., Tachauer, I. H. H., Annighoefer, P., Barbeito, I., Pretzsch, H., Ruiz-Peinado, R., … Sileshi, 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011
70. Freund, P., & Ormerod, W. G. (1997). Progress toward storage of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, *38*, 199–204. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00269-5
71. Gardiner, B., Leban, J. M., Auty, D., & Simpson, H. (2011). Models for predicting wood density of British-grown Sitka spruce. *Forestry*, *84*(2), 119–132. https://doi.org/10.1093/forestry/cpq050
72. Garnett, M. H., Ineson, P., Stevenson, A. C., & Howard, D. C. (2001). Terrestrial organic carbon storage in a British moorland. *Global Change Biology*, *7*(4), 375–388. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2001.00382.x
73. Gasparini, P., & Cosmo, L. Di. (2015). Forest carbon in Italian forests : Stocks , inherent variability and predictability using NFI data. *Forest Ecology and Management*, *337*, 186–195. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.012
74. Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, *2*(4), 045023. https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023
75. Gorte, R. W. (2009). Carbon Sequestration in Forests. *Congressional Research Service*, *4*, 2–37. https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20094041
76. Goulden, M. L., Munger, J. W., Fan, S. M., Daube, B. C., & Wofsy, S. C. (1996). Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00070.x
77. Grassi, G., House, J., Dentener, F., Federici, S., den Elzen, M., & Penman, J. (2017). The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. *Nature Climate Change*, *7*(3), 220–226. https://doi.org/10.1038/nclimate3227
78. Greene, C. H., & Pershing, A. J. (2007). OCEANS: Climate Drives Sea Change. *Science*, *315*(5815), 1084–1085. https://doi.org/10.1126/science.1136495
79. Gren, I.-M., & Zeleke, A. A. (2016). Policy design for forest carbon sequestration: A review of the literature. *Forest Policy and Economics*, *70*, 128–136. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.06.008
80. Gustavsson, L., Pingoud, K., & 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. https://doi.org/10.1007/s11027-006-7207-1
81. 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.
82. Hakkila, P. (1979). Wood density surveys and dry weight tables for pine, spruce andbirch stems in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae, 96(3)*, 59.
83. Hakkila, P. (1989). *Utilization of Residual Forest Biomass*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004
84. Hakkila, P., & Uusvaara, O. (1968). On the basic density of plantation-grown Norway spruces. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, *66*(6), 1–23.
85. Hawkins, E., Ortega, P., Suckling, E., Schurer, A., Hegerl, G., Jones, P., … van Oldenborgh, G. J. (2017). Estimating changes in global temperature since the pre-industrial period. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *98 (9)*, 1841–1856. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0007.1
86. 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.040

87. 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). https://doi.org/10.3832/ifor0901-006
88. 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.
89. Heräjärvi, H. (2009). Wood product manufacture potential of European and hybrid aspen in Finland. In *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).
90. Heräjärvi, H., & Junkkonen, R. (2006). Wood density and growth rate of European and hybrid aspen in southern Finland. *Baltic Forestry*, *12*(1), 2–8.
91. Houghton, R. A., Hall, F., & Goetz, S. J. (2009). Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *114*(3), 1–13. https://doi.org/10.1029/2009JG000935
92. Huijgen, W. J. J., & Comans, R. N. J. (2003). *Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation*. *Environmental science & technology* (Vol. 43). https://doi.org/ECN-C-03-016
93. Hulme, M. (2016). 1.5 °C and climate research after the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, *6*(3), 222–224. https://doi.org/10.1038/nclimate2939
94. Hunter, M. O., Keller, M., Victoria, D., & Morton, D. C. (2013). Tree height and tropical forest biomass estimation. *Biogeosciences*, *10*(12), 8385–8399. https://doi.org/10.5194/bg-10-8385-2013
95. Hunziker, M., Sigurdsson, B. D., Halldorsson, G., Schwanghart, W., & Kuhn, N. (2014). Biomass allometries and coarse root biomass distribution of mountain birch in southern Iceland. *ICEL. AGRIC. SCI.*, *27*, 111–125.
96. Hyde, P., Dubayah, R., Walker, W., Blair, J. B., Hofton, M., & 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. https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.021
97. Ilic, J., Boland, D., McDonald, M., Downes, G., & Blakemore, P. (2000). *Woody density: Phase 1 - State of knowledge. NCAS technical report no.18*.
98. IPCC. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. *IGES, Japan*.
99. IPCC. (2005). *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage* (Vol. 2).
100. Jackson, R. B. (2005). Trading Water for Carbon with Biological Carbon Sequestration. *Science*, *310*(5756), 1944–1947. https://doi.org/10.1126/science.1119282
101. Jackson, R. B., Canadell, J., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Sala, O. E., & Schulze, E. D. (1996). A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, *108*(3), 389–411. https://doi.org/10.1007/BF00333714
102. Jalkanen, A., Makipaa, R., Stahl, G., Lehtonen, A., & 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. https://doi.org/10.1051/forest:2005075
103. Jansons, Ā. (2017). *Siltumnīcefekta gāzu emisiju un CO2 piesaistes novērtējums vecās mežaudzēs*. *Pārskats par pētījuma 2017. gada rezultātiem*.
104. Jenkins, J. C., Chojnacky, D. C., Heath, L. S., & Birdsey, R. a. (2003). National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science*, *49*(1), 12–35.

105. Jenkins, J. C., Chojnacky, D. C., Heath, L. S., & 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. America*.
106. 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. https://doi.org/10.1080/02827589309382752
107. 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. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00078-1
108. 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. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00056-9
109. Johansson, T. (2005). Stem volume equations and basic density for grey alder and common alder in Sweden. *Forestry*. https://doi.org/10.1093/forestry/cpi023
110. 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. https://doi.org/10.1093/forestry/cpl049
111. Jones, D. A., & O'Hara, K. L. (2012). Carbon density in managed coast redwood stands: Implications for forest carbon estimation. *Forestry*, *85*(1), 99–110. https://doi.org/10.1093/forestry/cpr063
112. Jyske, T., Mäkinen, H., & Saranpää, P. (2008). Wood density within Norway spruce stems. *Silva Fennica*, *42*(January 2007), 439–455.
113. Karki, T. (2001). Variation of wood density and shrinkage in European aspen (Populus tremula). *Holz Als Roh-Und Werkstoff*, *59*(1–2), 79–84.
114. Kellndorfer, J. M., Walker, W. S., LaPoint, E., Kirsch, K., Bishop, J., & 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*, 1–10. https://doi.org/10.1029/2009JG000997
115. Klara, S. M., Srivastava, R. D., & 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*. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00042-6
116. Köhl, M., & Frühwald, A. (2009). Permanent wood sequestration: No solution to the global carbon dioxide problem. *ChemSusChem*. https://doi.org/10.1002/cssc.200800240
117. Kolari, P., Pumpanen, J., Rannik, Ü., Ilvesniemi, H., Hari, P., & Berninger, F. (2004). Carbon balance of different aged Scots pine forests in Southern Finland. *Global Change Biology*. https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00797.x
118. Kops, L. (1997). *Būvkoks*. Rīga: Mācību apgāds.
119. Korsmo, H. (1995). Weight equations for determining biomass fractions of young hardwoods from natural regenerated stands. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *10*(1), 333–346. https://doi.org/10.1080/02827589509382900
120. Köster, K., Metslaid, M., Engelhart, J., & 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*. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.039
121. Kozak, A. (1970). Methods for ensuring additivity of biomass components by regression analysis. *The Forestry Chronicle*. https://doi.org/10.5558/tfc46402-5
122. Kumar, R., Pandey, S., & Pandey, a. (2006). Plant roots and carbon sequestration. *Current Science*, *91*(7), 885–890.
123. Kumar, R., Rawat, K. S., Singh, J., Singh, A., & Rai, A. (2013). Soil aggregation

dynamics and carbon sequestration. *Journal of Applied and Natural Sciences*, 250–267.
124. Laasasenaho, J., Melkas, T., & Aldén, S. (2005). Modelling bark thickness of Picea abies with taper curves. *Forest Ecology and Management*, *206*, 35–47. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.058
125. Lackner, K. S. (2003). A Guide to CO2 Sequestration. *Science*, *300*(5626), 1677–1678. https://doi.org/10.1126/science.1079033
126. Lal, R. (2001). World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Advances in Agronomy*, *71*, 145–191.
127. Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, *304*(5677), 1623–1627. https://doi.org/10.1126/science.1097396
128. Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, *220*(1–3), 242–258. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015
129. Lal, R. (2008). Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, *363*(1492), 815–30. https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185
130. Latifi, H., Fassnacht, F., & Koch, B. (2012). Forest structure modeling with combined airborne hyperspectral and LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, *121*, 10–25. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.015
131. Law, B. E., Sun, O. J., Campbell, J., Van Tuyl, S., & Thornton, P. E. (2003). Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine. *Global Change Biology*. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00624.x
132. Le Toan, T., Beaudoin, A., Riom, J., & Guyon, D. (1992). Relating Forest Biomass to SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *30*(2), 403–411. https://doi.org/10.1109/36.134089
133. Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M. W. J., Balzter, 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. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.020
134. Ledermann, T., & Neumann, M. (2006). Biomass equations from data of old long-term experimental plots. *Austrian Journal of Forest Science*, *123*(1–2), 47–64.
135. Lehtonen, A., Cienciala, E., Tatarinov, F., & Makipaa, R. (2007). Uncertainty estimation of biomass expansion factors for Norway spruce in the Czech Republic. *Annals of Forest Science*, *64*(2), 133–140. https://doi.org/10.1051/forest:2006097
136. Lehtonen, A., Mäkipää, R., Heikkinen, J., Sievänen, R., & 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.008
137. Lei, S., & Shirong, L. (2017). Methods of Estimating Forest Biomass: A Review. In S. T. Jaya (Ed.), *Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy* (pp. 23–46). InTech. https://doi.org/10.5772/711
138. Leifeld, J., Müller, M., & Fuhrer, J. (2011). Peatland subsidence and carbon loss from drained temperate fens. *Soil Use and Management*, *27*(2), 170–176. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00327.x
139. Levillain, J., Thongo M'Bou, A., Deleporte, P., Saint-Andr??, L., & 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. https://doi.org/10.1093/aob/mcr102
140. Levy, P. E., Hale, S. E., & Nicoll, B. C. (2004). Biomass expansion factors and root:shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. *Forestry*, *77*(5), 421–430. https://doi.org/10.1093/forestry/77.5.421
141. Lībiete, Z., Matisons, R., Rieksts-riekstiņš, J., Priedîtis, A., & Jansons, J. (2017). Above-ground Biomass Models of 40-year-old Norway Spruce in Latvia. *Baltic Forestry*, *23*(2), 515–521.

142. Liepa, I. (2011). Mizas nozīme krājas tekošā pieauguma noteikšanā. *MežzinātTne*, *24*(57), 58–64.
143. Liepa, I., & Blija, T. (2008). Latvijas egļu mežu koku biomasas struktūra. *LLU Raksti*, *20*(315), 32–37.
144. Liepiņš, J., Lazdiņš, A., & Liepiņš, K. (2017). Equations for estimating above- and belowground biomass of Norway spruce, Scots pine, birch spp. and European aspen in Latvia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *7581*(June), 1–13. https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1337923
145. Liepiņš, J., & Liepiņš, K. (2015). Evaluation of bark volume of four tree species in Latvia. In *Research for Rural Development.* (Vol. 2, pp. 22–28).
146. Liepiņš, J., & 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. https://doi.org/10.22616/rrd.23.2017.003
147. Liepins, K., & Rieksts-Riekstins, J. (2013). Stemwood Density of Juvenile Silver Birch Trees (Betula pendula Roth) from Plantations on Former Farmlands. *Baltic Forestry*, *19*, 179–186.
148. 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.028
149. Lindroth, A., Grelle, A., & Moren, A.-S. (1998). Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. *Global Change Biology*. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00165.x
150. Līpiņš, L., & Liepa, I. (2007). *Apaļo kokmateriālu uzmērīšana*. Jelgava, LLU: Latgales druka.
151. Litton, C. M., Raich, J. W., & Ryan, M. G. (2007). Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*, *13*(10), 2089–2109. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01420.x
152. Lohila, A., Minkkinen, K., Aurela, M., Tuovinen, J.-P., Penttil, T., Ojanen, P., & Laurila, T. (2011). Greenhouse gas flux measurements in a forestry-drained peatland indicate a large carbon sink. *Biogeosciences*, *8*(11), 3203–3218.
153. Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*. https://doi.org/10.1080/01431160500486732
154. Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., & Moran, E. (2016). A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*. https://doi.org/10.1080/17538947.2014.990526
155. Luoma, V., Saarinen, N., Wulder, M. A., White, J. C., Vastaranta, M., Holopainen, M., & Hyyppä, J. (2017). Assessing precision in conventional field measurements of individual tree attributes. *Forests*, *8*(2). https://doi.org/10.3390/f8020038
156. Lupikis, A., Bardule, A., Lazdins, A., Stola, J., & Butlers, A. (2017). Carbon stock changes in drained arable organic soils in Latvia: Results of a pilot study. *Agronomy Research*, *15(3)*, 788–798.
157. Magalhães, T. M., & Seifert, T. (2015). Tree component biomass expansion factors and root-to-shoot ratio of Lebombo ironwood: Measurement uncertainty. *Carbon Balance and Management*, *10*(1). https://doi.org/10.1186/s13021-015-0019-4
158. Mäkinen, H., Saranpää, P., & 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. https://doi.org/10.1139/x01-186
159. 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.

https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01780.x
160. Marklund, L. G. (1987). *Biomass equations for spruce in Sweden*. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Survey. Report 43.
161. Marklund, L. G. (1988). *Biomass functions for pine spruce and birch in Sweden*. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Survey. Report 45.
162. Martin, A. R., & Thomas, S. C. (2011). A reassessment of carbon content in tropical trees. *PLoS ONE*, *6*(8). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023533
163. 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*(6493), 123–129. https://doi.org/10.1038/371123a0
164. 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. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01343.x
165. McRoberts, R. E., Liknes, G. C., & 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.025
166. Meyer, T. J. (1989). Chemical Approaches To Artificial Photosynthesis. *Accounts of Chemical Research*, *22*(5), 163–170. https://doi.org/10.1021/ar00161a001
167. Miezīte, O., Liepa, I., & Lazdiņš, A. (2011). Carbon accumulation in overground and root biomass of grey alder (Alnus Incana (L.) Moench) aegopodiosa. In *Research for Rural Development. Annual 17th International Scientific Conference Proceedings* (Vol. 2, pp. 46–51).
168. 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 *Measuring Roots: An Updated Approach* (pp. 303–339). https://doi.org/10.1007/978-3-642-22067-8_16
169. Millers, M., & Magaznieks, J. (2012). Scots Pine (Pinus sylvestris L .) Stem Wood and Bark Moisture and Density Influencing Factors. In *Research for Rural Development. Annual 18th International Scientific Conference Proceedings* (Vol. 2, pp. 91–98).
170. Mokany, K., Raison, R. J., & Prokushkin, A. S. (2006). Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, *12*(1), 84–96. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x
171. Montès, N., Gauquelin, T., Badri, W., Bertaudière, V., & 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. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00188-7
172. Mosera, G., Christoph, L., Marina, R., Sophie, G., Nathalie, S., & 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. https://doi.org/10.1016/j.celrep.2011.1011.1001.7.
173. Motulsky, H., & Arthur, C. (2003). *Fitting Models to Biological Data using Linear and Nonlinear Regression. A practical guide to curve fitting. Oxford University Press*. San Diego CA: GraphPad Software. https://doi.org/10.1002/pst.167
174. Mugasha, W. A., Eid, T., Bollandsås, O. M., Malimbwi, R. E., Chamshama, S. A. O., Zahabu, E., & 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.003
175. Muukkonen, P. (2007). Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *European Journal of Forest Research*, *126*(2), 157–166. https://doi.org/10.1007/s10342-007-0168-4
176. 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*.
177. Narbel, P. A., Hansen, J. P., & Lien, J. R. (2014). *Energy technologies and economics*. *Energy Technologies and Economics*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08225-7
178. 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.016
179. 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.10.029
180. Ni, Y., Eskeland, G. S., Giske, J., & Hansen, J. P. (2016). The global potential for carbon capture and storage from forestry. *Carbon Balance and Management*, *11*(1), 8. https://doi.org/10.1186/s13021-016-0044-y
181. Offenthaler, I., & Hochbichler, E. (2006). Estimation of root biomass of Austrian forest tree species. *Austrian Journal of Forest Science*, *123*(1–2), 65–86.
182. Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J., & Penttilä, T. (2010). Soil–atmosphere CO2, CH4 and N2O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *Forest Ecology and Management*, *260*(3), 411–421. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2010.04.036
183. 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*, 988–993. https://doi.org/10.1126/science.1201609
184. Pan, Y., Luo, T., Birdsey, R., Hom, J., & 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. https://doi.org/10.1007/s10584-004-2799-5
185. Patenaude, G., Hill, R. A., Milne, R., Gaveau, D. L. A., Briggs, B. B. J., & Dawson, T. P. (2004). Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, *93*(3), 368–380. https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.016
186. Peng, C., Zhang, L., & Liu, J. (2001). Developing and validating nonlinear height-diameter models for major tree species of Ontarios Boreal Forests. *Northern Journal of Applied Forestry*, *18*(3), 87–94.
187. 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.004
188. Petersson, H., & Stahl, G. (2006). Functions for below-ground biomass of Pinus sylvestris, Picea abies, Betula pendula and Betula publescens in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *21*(7), 84–93. https://doi.org/10.1080/14004080500486864
189. 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*(1), 6. https://doi.org/10.1186/2047-2382-1-6
190. Phalla, T., Ota, T., Mizoue, N., Kajisa, T., Yoshida, S., Vuthy, M., & 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. https://doi.org/10.17503/agrivita.v40i1.1730
191. Picard, N., Rutishauser, E., Ploton, P., Ngomanda, A., & Henry, M. (2015). Should tree biomass allometry be restricted to power models? *Forest Ecology and Management*, *353*,

156–163. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.035
192. Picard, N., Saint André, L., & 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. https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104
193. Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J. P., & Paruelo, J. M. (2008). How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling*, *216*(3–4), 316–322. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.05.006
194. Pires, J. C. M., Martins, F. G., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Simoes, M. (2011). Recent developments on carbon capture and storage: An overview. *Chemical Engineering Research and Design*, *89*(9), 1446–1460. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.01.028
195. 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. https://doi.org/10.1046/j.1439-0337.2002.00138.x
196. Ravindranath, N., & Ostwald, M. (2008a). Methods for Below-Ground Biomass. In N. Ravindranath & M. Ostwald (Eds.), *Carbon Inventory Methods Handbook for Greenhouse Gas Inventory, Carbon Mitigation and Roundwood Production Projects* (pp. 149–156). Springer Science + Business Media B.V.
197. Ravindranath, N., & Ostwald, M. (2008b). Methods for Estimating Above-Ground Biomass. In N. Ravindranath & M. Ostwald (Eds.), *Carbon Inventory Methods Handbook for Greenhouse Gas Inventory, Carbon Mitigation and Roundwood Production Projects* (pp. 113–147). Springer Science + Business Media B.V.
198. 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*(July), 673–685.
199. Repola, J. (2008). Biomass equations for birch in Finland. *Silva Fennica*, *42*(4), 605–624.
200. Repola, J. (2009). Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica*, *43*(May), 625–647.
201. Repola, J. (2013). *Modelling tree biomasses in Finland*. *Dissertationes Forestales* (Vol. 158).
202. Repola, J., & Ulvcrona, K. A. (2014). Modelling biomass of young and dense Scots pine (Pinus sylvestris L.) dominated mixed forests in northern Sweden. *Silva Fennica*, *48*(5), 21 p. https://doi.org/10.14214/sf.1190
203. Ritson, P., & 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*. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00121-4
204. 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*(7609), 631–639. https://doi.org/10.1038/nature18307
205. Roxburgh, S. H., Paul, K. I., Clifford, D., England, J. R., & Raison, R. J. (2015). Guidelines for constructing allometric models for the prediction of woody biomass: How many individuals to harvest? *Ecosphere*, *6*(3), 38. https://doi.org/10.1890/ES14-00251.1
206. Royal Society. (2009). *Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty*. *Clean Technologies and Environmental Policy*. https://doi.org/10.1007/s10098-010-0287-3
207. Rubin, E. S. (2012). Understanding the pitfalls of CCS cost estimates. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *10*, 181–190. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.004
208. 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.

https://doi.org/10.14214/sf.1660
209. Rytter, L., Johansson, K., Karlsson, B., & Stener, L. G. (2013). Tree species, genetics and regeneration for bioenergy feedstock in northern Europe. In *Forest BioEnergy Production: Management, Carbon Sequestration and Adaptation* (pp. 7–37). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8391-5_2
210. 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. https://doi.org/10.1080/02827589409382814
211. Saranpää, P. (2003). Wood density and growth. In John R. Barnett & G. Jeronimidis (Eds.), *Wood quality and its biological basis* (p. 240). USA: Blackwell Publishing.
212. Sarker, L. R. (2010). *Estimation of forest biomass using remote sensing*. PhD Thesis, Hong Kong Polytechnic University.
213. Sarmulis, Z., Drēksa, A., Līpiņš, L., & Leontjevs, D. (2005). Egles stumbra dimensionāls vērtējums. *LLU Raksti*, *14*(309), 1–8.
214. Sasaki, N., Chheng, K., Mizoue, N., Abe, I., & Lowe, A. J. (2016). Forest reference emission level and carbon sequestration in Cambodia. *Global Ecology and Conservation*. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.05.004
215. Savaresi, A. (2016). The Paris Agreement: a new beginning? *Journal of Energy & Natural Resources Law*, *34*(1), 16–26. https://doi.org/10.1080/02646811.2016.1133983
216. 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. https://doi.org/10.3390/f9060312
217. Scholes, R. J., & Noble, I. R. (2001). Storing carbon on land. *Science*, *294*(5544), 1012–1013. https://doi.org/10.1126/science.1065307
218. Schrag, D. P. (2007). Preparing to Capture Carbon. *Science*, *315*(5813), 812–813. https://doi.org/10.1126/science.1137632
219. Sharma, V., & 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.
220. Sileshi, G. W. (2014). A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management*, *329*, 237–254. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.026
221. Simola, P. (1977). The biomass of small-sized hardwood trees. *Folia Forestalia*, *302*, 16.
222. Singh, T. (1984). Variation in the Ovendry Wood Density of Ten Prairie Tree Species. *The Forestry Chronicle*, *60*, 217–221.
223. Skovsgaard, J. P., Bald, C., & 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*(11), 3–20. https://doi.org/10.1080/02827581.2011.564381
224. Smilga, J. (1967). Parastās apses koksnes tilpumsvars Latvijas PSR. *JaunāKais Mežsaimniecībā*, *9*, 97–99.
225. Smilga, J. (1988). Apses koksnes blīvums. *JaunāKais Mežsaimniecībā*, *30*, 54–60.
226. Smith, A., Granhus, A., & Astrup, R. (2016). Functions for estimating belowground and whole tree biomass of birch in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *31*(6), 568–582. https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1141232
227. Smith, A., Granhus, A., Astrup, R., Bollandsås, O. M., & Petersson, H. (2014). Functions for estimating aboveground biomass of birch in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *29*(6), 565–578. https://doi.org/10.1080/02827581.2014.951389
228. Smith, P., Powlson, D., Glendining, M., & Smith, J. (1997). Potential for carbon sequestration in European soils: Preliminary estimates for five scenarios using results from long-□term experiments. *Global Change Biology*, (1997), 67–79. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1997.00055.x

229. Smyth, C. E., Kurz, W. A., Neilson, E. T., & 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. https://doi.org/10.1002/2012GB004536
230. Snowdon, P. (1991). A ratio estimator for bias correction in logarithmic regressions. *Canadian Journal of Forest Research*, *21*, 720–724.
231. Somogyi, Z., Cienciala, E., Makipaa, R., Muukkonen, P., Lehtonen, A., & Weiss, P. (2007). Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *European Journal of Forest Research*, *126*(2), 197–207. https://doi.org/10.1007/s10342-006-0125-7
232. 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. https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00645.x
233. Stovall, A. E. L., Shugart, H. H., Stovall, A. E. L., Anderson-Teixeira, K. J., & Anderson-Teixeira, K. J. (2018). Assessing terrestrial laser scanning for developing non-destructive biomass allometry. *Forest Ecology and Management*, *427*, 217–229. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.06.004
234. Temesgen, H., Affleck, D., Poudel, K., Gray, A., & 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. https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1012114
235. Thenkabail, P. S., Stucky, N., Griscom, B. W., Ashton, M. S., Diels, J., Van der Meer, B., & 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), 5447–5472. https://doi.org/10.1080/01431160412331291279
236. Thomas, S. C., & 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. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.04.022
237. Thomas, S. C., & Martin, A. R. (2012). Carbon content of tree tissues: A synthesis. *Forests*, *3*(2), 332–352. https://doi.org/10.3390/f3020332
238. Thurner, M., Beer, C., Santoro, M., Carvalhais, N., Wutzler, T., Schepaschenko, D., … Schmullius, C. (2014). Carbon stock and density of northern boreal and temperate forests. *Global Ecology and Biogeography*. https://doi.org/10.1111/geb.12125
239. Titlyanova, A. A., Romanova, I. P., Kosykh, N. P., & 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. https://doi.org/10.2307/3237060
240. Tomppo, E., Gschwantner, T., Lawrence, M., & McRoberts. (2010). *National Forest Inventories: Pathways for Common Reporting*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3233-1
241. UNFCCC. (2018). National Inventory Submissions 2018. Retrieved from http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/10116.php
242. Unger, N. (2014). Human land-use-driven reduction of forest volatiles cools global climate. *Nature Climate Change*, *4*(10), 907–910. https://doi.org/10.1038/nclimate2347
243. Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Morozov, G., & Karoles, K. (2017). Ecosystems carbon budgets of differently aged downy birch stands growing on well-drained peatlands. *Forest Ecology and Management*, *399*, 82–93. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.05.023
244. 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.

https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.004
245. Uusvaara, O., & Pekkala, O. (1979). Technical properties of the wood and pulp of certain foreign and uncommon native tree species. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, *96*(2), 1–59.
246. Vaglio Laurin, G., Chen, Q., Lindsell, J. A., Coomes, D. A., Frate, F. Del, 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. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.01.001
247. Vallet, P., Dhôte, J. F., Moguédec, G. Le, Ravart, M., & Pignard, G. (2006). Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, *229*(1–3), 98–110. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.03.013
248. 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. https://doi.org/10.1038/ngeo671
249. Varik, M., Aosaar, J., Ostonen, I., Lõhmus, K., & 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.033
250. Vogt, K. a, Vogt, D. J., & 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. https://doi.org/10.1023/A:1004313515294
251. Wagenmakers, E.-J., & Farrell, S. (2004). AIC model selection using Akaike weights. *Psychonomic Bulletin and Review*, *11*, 192–196. https://doi.org/10.3758/BF03206482
252. Warner, B. G., Clymo, R. S., & Tolonen, K. (1993). Implications of Peat Accumulation at Point Escuminac, New Brunswick. *Quaternary Research*, *39*(2), 245–248. https://doi.org/10.1006/qres.1993.1028
253. 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. https://doi.org/10.5849/jof.14-091
254. Westerling, A. L. (2006). Warming and Earlier Spring Increase Western U.S. Forest Wildfire Activity. *Science*, *313*(5789), 940–943. https://doi.org/10.1126/science.1128834
255. Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Spångberg, K., Lundqvist, S.-O., Grahn, T., Hedenberg, Ö., & Olsson, L. (2002). Models for Predicting Wood Properties in Stems of Picea abies and Pinus sylvestris in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *17*(1975), 330–350. https://doi.org/10.1080/02827580260138080
256. 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. https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.10.007
257. Wirth, C., Schumacher, J., & 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. https://doi.org/10.1093/treephys/24.2.121
258. Worrall, J. J., & Fairweather, M. L. (2009). Decay and Discoloration of Aspen. *USDA Forest Service*, (May), 1–12. Retrieved from http://www.fs.fed.us/r6/nr/fid/fidls/fidl-2.pdf
259. Wosten, J. H. M., Ismail, A. B., & VanWijk, A. L. M. (1997). Peat subsidence and its practical implications: A case study in Malaysia. *GEODERMA*, *78*(1–2), 25–36. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00013-X
260. WRI. (2012). *World GHG Emissions Flow Chart*. *World Resource Institute report*.

Retrieved from http://www.ecofys.com/files/files/world-ghg-emission-flow-chart-2012_v9-c-asn-ecofys-2016_02.pdf

261. 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/10.5194/bg-2016-142
262. Yuan, Z. Y., & Chen, H. Y. H. (2012). Indirect Methods Produce Higher Estimates of Fine Root Production and Turnover Rates than Direct Methods. *PLoS ONE*, *7*(11). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048989
263. Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D. A. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S. L. S. L., … Chave, J. (2009). Global wood density database. *Dryad Digital Repository*. https://doi.org/10.5061/dryad.234
264. Zeng, N. (2008). Carbon sequestration via wood burial. *Carbon Balance and Management*, *3*(1), 1. https://doi.org/10.1186/1750-0680-3-1
265. 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*(6), 451–465. https://doi.org/10.1007/BF00194204
266. Zianis, D., & Mencuccini, M. (2004). On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, *187*(2–3), 311–332. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.007
267. Zianis, D., Muukkonen, P., Makipaa, R., & Mencuccini, M. (2005). Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs*, *4*, 1–63.
268. Zobel, B. J., & Jett, J. B. (1995). *Genetics of wood production*. *Springer Verlag*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79514-5