

Latvijas Valsts mežzinātnes institūts „Silava”
Latvian State Forest Research Institute „Silava”

Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Latvia University of Life Sciences and Technologies

Mg. silv. Jānis Liepiņš

**KOKAUDŽU BIOMASAS NOTEIKŠANAS
METODIKAS IZSTRĀDE UN OGLEKĻA
UZKRĀJUMA APRĒĶINI LATVIJĀ**

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

Promocijas darba KOPSAVILKUMS
Dr. silv. zinātniskā grāda iegūšanai

SUMMARY

of the Doctoral thesis for the scientific degree of Dr.silv.

Salaspils
2019

Promocijas darba zinātniskie vadītāji / *Supervisors:*
Dr.silv. Kaspars LIEPĪNŠ, Dr.silv. Andis LAZDIŅŠ

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Valsts mežzinātnes institūtā „Silava”, doktorantūras studijas Latvijas Lauksaimniecības universitātes Meža fakultātē laika periodā no 2014. līdz 2019. gadam / *The doctoral thesis is designed at the Latvian State Forest Research Institute “Silava” and Latvia University of Life Sciences and Technologies, Forest Faculty, Department of forestry in period from 2014 to 2019.*

Oficiālie recenzenti / *Official reviewers:*

- *Dr.silv. Āris JANSONS, Latvijas Valsts mežzinātnes institūta „Silava” vadošais pētnieks, LZP eksperts / Senior researcher of Latvian State Forest Research Institute „Silava”, Expert of Latvian council of Science, Latvia;*
- *Dr. sc. ing. Uldis SPULLE, Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesors un vadošais pētnieks, LZP eksperts / Professor and Senior researcher of Latvia University of Life Sciences and Technologies, Expert of Latvian council of Science, Latvia;*
- *Dr. Iveta Varnagirytė-Kabašinskienė, Lietuvas Lauksaimniecības un meža zinātņu centra vadošā pētniece / Chief researcher of Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, Institute of Forestry.*

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Lauksaimniecības universitātes Mežzinātnes un Materiālzinātnes nozaru promocijas padomes atklātā sēdē **2019. gada 27. augustā plkst. 10:00**, Salaspilī, Rīgas ielā 111, LVMI „Silava” bibliotēkā. *The public defence of doctoral thesis in open session of the Promotion Council of Forest Sciences and Material Sciences of Latvia University of Life Sciences and Technologies will be held **August 27, 2019 at 10:00 am** in Salaspils, Rīga Street 111, Latvian State Forest Research Institute „Silava” library.*

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu var iepazīties LLU Fundamentālajā bibliotēkā Jelgavā, Lielā ielā 2 un interneta vietnē http://llu.fb.lv/promoc_darbi.html. Atsauksmes sūtīt promocijas padomes sekretārei *Mg.silv. Sarmītei Berņikovai - Bondarei* uz Dobeles iela 41, Jelgava, LV-3001, Latvija vai koka@llu.lv. / *The thesis are available at the Fundamental Library of Latvia University of Life Sciences and Technologies: Lielā Street 2, Jelgava and http://llu.fb.lv/promoc_darbi.html. References are welcome to be sent to *Mg.silv. Sarmītei Berņikovai - Bondarei* the secretary of the Promotion Council: Dobeles iela 41, Jelgava, LV-3001, Latvia or email koka@llu.lv.*

SATURS / CONTENT

1. DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS	5
1.1. Tēmas aktualitāte.....	5
1.2. Promocijas darba mērķis, uzdevumi un tēzes.....	5
1.3. Darba zinātniskā novitāte un praktiskā nozīme (rekomendācijas) ..	6
1.4. Zinātniskā darba aprobācija.....	6
1.5. Promocijas darba struktūra un apjoms	8
2 MATERIĀLS UN METODES	8
2.1. Empīriskā materiāla raksturojums	8
2.2. Koku virszemes biomasas empīriskā materiāla ievākšana un apstrāde	9
2.3. Koku celma/sakņu biomasas empīriskā materiāla ievākšana un apstrāde	11
2.4. Vienādojumu izstrāde.....	12
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	14
3.1. Blīvuma izmaiņas koku stumbros	14
3.2. Koku biomasas aprēķini un vienādojumu izstrāde	22
3.3. Latvijas kokaudzēs uzkrātais ogleklis atbilstoši Latvijas meža resursu monitoringa datiem.....	30
SECINĀJUMI	35
PATEICĪBAS.....	36
1. GENERAL DESCRIPTION OF THE THESIS	37
1.1. Relevance of the topic	37
1.2. Research aim, tasks and theses	37
1.3. Scientific novelty and practical significance of the work (recommendations)	38
1.4. Approbation of research results.....	39
1.5. Structure of the doctoral thesis	39
2. MATERIALS AND METHODS	39
2.1. Study area.....	39
2.2. Destructive sampling and processing of the aboveground biomass of trees.....	40

2.3. Destructive sampling and processing of the belowground biomass of trees.....	41
2.4. Model development.....	42
3. RESULTS AND DISCUSSION	43
3.1. Density variations in tree stems.....	43
3.2. Tree biomass estimates and equations development	49
3.3. Carbon stock in the forest stands of Latvia pursuant to the NFI data.....	55
CONCLUSIONS	59

1. DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

1.1. Tēmas aktualitāte

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 jā sagatavo pārskats par siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijām un oglekļa dioksīda (CO₂) piesaisti, kā arī reizi divos gados jā sagatavo SEG emisiju un CO₂ piesaistes prognožu ziņojums un regulāri jā ziņo par darbībām, kas veiktas, lai samazinātu SEG emisijas zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības sektorā. Precīzas metodes atsevišķu koku un kokaudžu biomasas novērtēšanai nepieciešamas, lai aprēķinātu CO₂ piesaisti kokaugu biomasā un raksturotu uzkrātā oglekļa daudzuma izmaiņas Latvijas mežos. Līdzšinējie pētījumi Latvijā par koku biomasas un oglekļa apjoma novērtēšanas metodēm saimnieciski nozīmīgākajām koku sugām veikti fragmentāri, tikai atsevišķu koku sugu un biomasas frakciju līmenī. Starptautisku klimata pārmaiņu padomes 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.

1.2. Promocijas darba mērķis, uzdevumi un tēzes

Promocijas darba mērķis. Izveidot alometriskos vienādojumus saimnieciski nozīmīgāko koku sugu biomasas raksturošanai un noteikt Latvijas kokaudzēs uzkrāto oglekli. Atbilstoši pētījuma mērķim izvirzīti trīs pētnieciskie uzdevumi.

1. Raksturot vidējo stumbra reducēto blīvumu, tā telpiskās izmaiņas stumbra garenvirzienā un šķērsgrīzumā.
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 darba 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.

1.3. Darba zinātniskā novitāte un praktiskā nozīme (rekomendācijas)

Novitāte.

Promocijas darba ietvaros izstrādāti Latvijas teritorijai piemēroti virszemes biomasas, stumbra biomasas un celma/sakņu biomasas aprēķina vienādojumi saimnieciski nozīmīgākajām koku sugām. Parastajai apsei sakņu biomasas vienādojumi izveidoti pirmo reizi, bet priedei, eglei un bērzam uz plašu un reprezentatīvu empīrisko materiālu balstīti biomasas vienādojumi publicēti vien dažos pētījumos. Pirmoreiz Latvijā aprēķinātas un publicētas visa stumbra vidējās svērtās reducētā blīvuma vērtības un izstrādātas koksnes blīvuma izmaiņu kartes, iekļaujot dažādu dimensiju kokus.

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 – $50.8\% \pm 0.6\%$ un lapkokiem – $48.8\% \pm 0.6\%$.
3. Biomasas vienādojumi izstrādāti četrām Latvijā izplatītākajām koku sugām. Pārējo Latvijā sastopamo koku sugu biomasas aprēķiniem ieteicams izmantot pētījumā izstrādātos vienādojumus, piemērojot tos attiecīgi pēc līdzīgākajām stumbra reducētā blīvuma vērtībām skujkokiem un lapkokiem.

1.4. Zinātniskā darba aprobācija

Pētījuma rezultāti apkopoti četrās publikācijās.

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.

Pētījuma rezultāti prezentēti 12 zinātniskajās 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 CO₂ 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. Rīga, 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.

1.5. Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darba struktūra ir pakārtota darbā izvirzītajiem pētnieciskajiem uzdevumiem. Darbs sastāv no trijām nodaļām. Pirmajā nodaļā veikta oglekļa piesaistes un kokaudžu biomasas noteikšanas problemātikas analīze. Otrajā nodaļā aprakstītas darbā izmantotās metodes un izmantotais empīriskais materiāls. Trešajā nodaļā analizēti pētījumā iegūtie rezultāti, atbilstoši izvirzītajam promocijas darba mērķim un pētnieciskajiem uzdevumiem.

Promocijas darba apjoms ir 105 lpp., informācija apkopota 14 tabulās, 31 attēlos, izmantoti 268 literatūras avoti. Darba noslēgumā formulēti 6 galvenie secinājumi un sniegtas 3 rekomendācijas.

2. MATERIĀLS UN METODES

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 dažādos Latvijas reģionos, pārstāvot daudzveidīgus augšanas apstākļus un atšķirīgas koku populācijas. Katrai pētījumā iekļautajai koku sugai meža nogabali atlasīti, pārstāvot vienādā skaitā jaunaudzes, vidēja vecuma audzes, briestaudzes un pieaugušas audzes, kā arī koku sugai tipiskākos augšanas apstākļus. Visās atlasītajās mežaudzēs valdošās koku sugas īpatsvars bija lielāks par 70%. Lai raksturotu atlasītās mežaudzes, katrā vietā izvietots aplveida parauglaukums ar platību 500 m²; parauglaukumi subjektīvi izvietoti audzes vietās, kas visprecīzāk raksturo visu nogabalu un to centrs atradās tālāk par 50 m no nogabala ārējās robežas. Pēc mežaudzes raksturošanas katrā parauglaukumā nozāģēšanai atzīmēti 3 dažādu dimensiju koki pārstāvot I, II un III Krafta klasi. Bojāti un trupējušie koki, kā arī koki ar dubultgalotnēm un dobumiem netika izvēlēti kā paraugkoki.

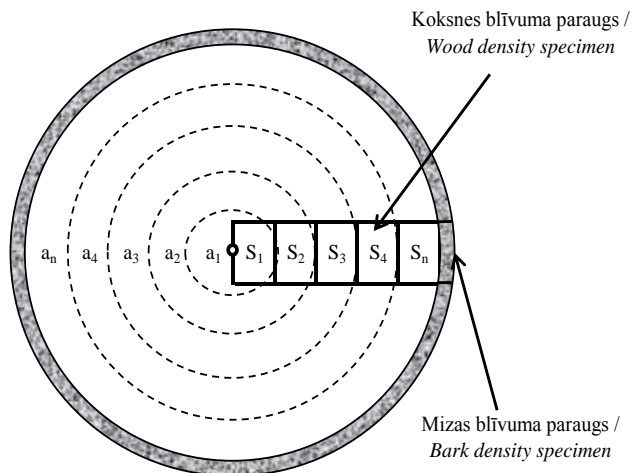
2.2. Koku virszemes biomasas empīriskā materiāla ievākšana un apstrāde

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 (102 priedēm, 81 eglēm, 105 bērziem un 84 apsēm). 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 sadalīts virszemes un celma/sakņu biomasas frakcijās.

Pēc koka nozāģēšanas tā zaļais vainags stumbra garenvirzienā sadalīts trijās vienādās daļās. No katras daļas vidus ievākts viens vidēja izmēra zars, kuri kopā izmantoti tālākām analizēm, 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. 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, kur tie nosvērti un žāvēti 103 °C grādu temperatūrā līdz nemainīgai to masai. Ja kādu iemeslu dēļ paraugus uzreiz pēc nogādāšanas laboratorijā nebija iespējams nosvērt tie uzglabāti aukstumkamerā. Visa koka dzīvo un sauso zaru biomasa aprēķināta pēc raksturojošo zaru paraugu dabiski mitras masas un absolūti sausas masas attiecības.

Uz nogāztā koka virsmas ar krāsu izveidotas atzīmes ik pa 1 m (kokiem, kuru stumbru garums ir līdz 20 m) vai ik pa 2 m, (ja stumbra garums ir 20 m un vairāk) un precīzi nomērīts stumbra kopējais garums. Koka stumbrs iezīmētajās

vietās sadalīts nogriežņos jeb sekcijās. Katrā stumbra griezuma vietā, papildus arī pirmās sekcijas vidū un 1.3 m augstumā, izzāģētas apmēram 2 – 2.5 cm biezas koksnes ripas. Šķērsriezuma laukuma aprēķiniem katrai koksnes ripai izmērīts caurmērs ar un bez mizas divos savstarpēji perpendikulāros virzienos. Lai aprēķinātu stumbra vidējo reducēto blīvumu, no katra stumbra šķērsriezuma ripas sagatavoti paraugi jeb ripas segmenti blīvuma mērīšanai. Blīvuma segmentu sagatavošana veikta pēc attēlotās shēmas (2.1. attēls).



2.1. att. **Blīvuma paraugu novietojums stumbra šķērsriezuma ripās.**
S - apzīmē blīvuma paraugu, bet a - apzīmē paraugam atbilstošo
ripas platību /

*Fig. 2.1. Position of the density specimens within the sample discs;
S denotes density specimen, and a refers to the corresponding area of wood or bark
specimen*

Pirms koksnes un mizas segmentu blīvuma mērīšanas tie uz 24 stundām iemērkti ūdenī, 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 divos atkārtojumos. Pirms katra atkārtojuma paraugs nosusināts ar mīkstu papīru. Ja starp mērījumu atkārtojumiem konstatēta liela starpība, tad veikts vēl trešais mērījums, tādējādi samazinot sistemātisko un gadījuma kļūdu rašanos. Koksnes un mizas segmentu reducētā blīvuma aprēķiniem visi paraugi žāvēti 103 °C temperatūrā līdz tika sasniegta nemainīga to masa. Paraugu sausa masa noteikta uzreiz pēc

to izņemšanas no žāvēšanas kameras, kamēr tie nav piesaistījuši gaisā esošo mitrumu.

Stumbra sekciju tilpuma aprēķiniem izmantotas katras šķērsriezuma vietas diametra mērījumu rezultāti divos savstarpēji perpendikulāros virzienos. Katras stumbra sekcijas tilpums aprēķināts pēc līdzīgas metodikas kādu lietojuši Smith et al., (2014), aprēķinot bērza stumbra biomasu. Katras stumbra sekcijas biomasa aprēķināta, reizinot tās tilpumu ar vidējo reducēto blīvumu, kurš aprēķināts kā vidējais aritmētiskais no abos galos esošo šķērsriezuma ripu vidējiem reducētajiem blīvumiem. Galotnes sekcijai blīvums aprēķināts tikai pēc vienas – apakšējās šķērsriezuma ripas vidējā reducētā blīvuma. Vidējā svērtā aprēķina formula lietota, aprēķinot katras šķērsriezuma ripas vidējo blīvumu no koksnes un mizas segmentiem un tiem atbilstošajām platībām uz stumbra šķērsriezuma ripas (2.1. attēls). Visa stumbra kopējā biomasa aprēķināta summējot individuālu sekciju biomasas.

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

Koku celms un saknes atraktas 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. Koku sakņu biomasa atrakta tiem pašiem kokiem, kuriem iepriekš novērtēta to 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, tāpēc darba procesā mēģināts izrakt tik daudz uzsūcošo sakņu, cik iespējams, bet pilnībā izraktas tikai tās saknes, kuru caurmērs pārsniedza 2 mm.

Pēc izrakšanas un transportēšanas uz tālāko apstrādes vietu, koka sakņu sistēma rūpīgi mazgāta, izmantojot augstspiediena ūdens sūkni, lai atbrīvotos no palikušās augsnes daļiņām. 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);
- baltsaknes – 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. Koka celma/sakņu biomasa aprēķināta, saskaitot celma, balstsakņu un sīko sakņu kopējo biomasu, kas katrai frakcijai noteikta pēc raksturojošo paraugu dabiski mitra – absolūti sausa svara attiecības.

2.4. Vienādojumu izstrāde

Latvijas meža resursu monitorings (MRM) uzkrāj datus par individuālu koku stumbru caurmēru (D) un koku augstumu (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 individuālu koku līmenī neievāc. Pēc apjomīgas literatūras analīzes, galarezultātā izvēlētas trīs matemātiskās izteiksmes (2.1, 2.2 un 2.3) koka stumbra biomasas (SB), dzīvo un sauso zaru biomasas (BB), kopējās virszemes biomasas (AGB) un kopējās celma daļas un sakņu biomasas (BGB) aprēķināšanai. AGB aprēķināta, saskaitot SB un BB (skujas un čiekuri ir iekļauti skujkokiem, bet lapas nav iekļautas lapkokiem), kamēr kopējā BGB ir aprēķināta, saskaitot celma, balstsakņu un sīko sakņu biomasu.

$$\ln \hat{Y}_{ki} = \ln(a) + b \times \ln(D) + u_k + \varepsilon_{ki} \quad (2.1)$$

$$\ln \hat{Y}_{ki} = \ln(a) + b \times \ln(D) + c \times \ln(H) + u_k + \varepsilon_{ki} \quad (2.2)$$

$$\ln \hat{Y}_{ki} = \ln(a) + b \times \left(\frac{D}{D+m}\right) + c \times H + d \times \ln(H) + u_k + \varepsilon_{ki} \quad (2.3)$$

\hat{Y}_{ki} – koka *i* biomasa kokaudzē *k* / *biomass of component of tree i in stand k*;

D – koka krūšaugstuma caurmērs / *diameter at breast height (DBH)*;

H – koka augstums / *tree height*;

a, *b*, *c*, un *d* – regresijas koeficienti / *regression parameters*;

m – konstante / *constant*;

u – randomizētais faktors kokaudzei *k* / *random effect for stand k*;

ε – randomizētais faktors kokam *i* kokaudzē *k* / *random effect for tree i in stand k*.

Datu sākotnējā analīze parādīja, ka palielinoties argumentu D un H vērtībām, palielinās arī atkarīgās pazīmes standartnovirze. Tāpēc, lai nodrošinātu atkarīgo pazīmju dispersiju homogenitāti vienādojumos (2.1, 2.2, 2.3), ir veikta logaritmiskā transformācija, kas šādos gadījumos ir ieteicama

(Claesson, Sahlen, & Lundmark, 2001; Repola, 2009; Weiskittel et al., 2015; Zianis & Mencuccini, 2004).

Tā kā biomasas tika izmērīta un aprēķināta trijiem paraugkokiem katrā no 124 meža nogabaliem jeb parauglaukumiem, tad savāktajam empīriskajam materiālam ir hierarhiska struktūra (Claesson et al., 2001; Repola, 2008, 2009; Temesgen et al., 2015). Pētīto argumentu ietekmi hierarhiski strukturētiem datiem precīzāk var novērtēt ar lineāriem jaukta tipa modeļiem, 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 (2.1, 2.2, 2.3) koeficienti aprēķināti, izmantojot lineāros jaukta tipa modeļus datorprogrammā R ar pakotni “lme4” (Bates et al., 2015). Atlasītajiem vienādojumiem kā fiksētie faktori norādīti D un H, bet kā randomizētais faktors 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) iesakot lietot izteiksmi $D/(D + m)$, kur m ir konstante. Konstante katrai koku sugai un koka frakcijai tiek aprēķināta atsevišķi un tā atspoguļo labāko korelāciju starp $\ln \hat{Y}$ un diametra izteiksmi $D/(D + m)$ pie dažādām m vērtībām (Marklund, 1987).

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 (2.4) (Marklund, 1987; Repola, 2008, 2009; Snowdon, 1991).

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n e^{\ln \hat{Y}_i}} \quad (2.4)$$

k – korekcijas koeficients / *correction factor*;

n – novērojumu skaits / *number of sample trees*;

Y_i – novērotās vērtības / *observed values*;

\hat{Y}_i – aprēķinātās vērtības / *fitted values*.

Tā kā logaritmiski transformētie vienādojumi prasa atkārtotu to pārveidošanu, reālo biomasas vērtību iegūšanai izmanto izteiksmi (2.5).

$$\hat{Y}_i = k \times \exp(\ln \hat{Y}_i) \quad (2.5)$$

k – korekcijas koeficients / *correction factor*;

\hat{Y} – aprēķinātā biomasas kokam i / *biomass for tree i*.

Izstrādāto regresijas vienādojumu novērtēšana veikta ar determinācijas koeficientu (R^2), vidējās vērtības vidējo kvadrātisko kļūdu (RMSE) un vidējo absolūto kļūdu (MAPE). Lai aprēķinātu varbūtību, ar kādu izvēlētais regresijas vienādojums ir pareizs un izvērtētu, kurš no vienādojumiem ir labāks, izmantots koriģētais Akaike informācijas kritērijs (AICc). Katra regresijas vienādojuma koeficientu ticamība novērtēta ar relatīvo standartkļūdu (PRSE) (Picard et al., 2015; Sileshi, 2014). Balstoties uz literatūrā pieejamo informāciju, pieņemts, ka izstrādātais vienādojums tiks noraidīts, ja viena vai vairāku regresijas koeficientu PRSE vērtības būs lielākas par 30%. Ja argumentu (H , $\ln H$) izslēgšana no (2.3) 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.

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, kas iebūvēta datorprogrammā CurveExpert Professional 2.2.

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Blīvuma izmaiņas koku stumbros

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. Aprēķinot visa stumbra vidējo blīvumu, būtu jāņem vērā arī mizas īpatsvars un tās blīvums. Daudzos pētījumos stumbra biomasas aprēķinos izmantoti tikai vidējie koksnes blīvuma rādītāji, kas ir konceptuāli nepareizi. Iepriekšminētā situācija varētu būt izveidojusies tāpēc, ka zinātniskajā literatūrā detalizēta informācija par vidējā mizas reducētā blīvuma izmaiņām 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 nekā divas

reizes un ir robežās no 8.2–10.4 %. Tas apliecina, ka būtisku koksnes un mizas blīvuma atšķirību gadījumā, lielāka sistemātiska kļūda veidosies, aprēķinot koku stubru biomasu jaunaudzēs.

3.1. tabula / Table 3.1.

**Vidējās mizas īpatsvara vērtības no kopējā
stumbra tilpuma ± standartkļūda, % /
Average values of proportion of bark volume ± standard error, %**

D, cm / DBH, cm	Priede / Pine	Egle / Spruce	Bērzs / Birch	Apse / Aspen
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

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

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. Liepa (2011) bērza mizas īpatsvara aprēķinu nenoteiktību izskaidro ar divu bērza sugu datu sapludināšanu, ignorējot šo sugu specifiku.

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. Koku augšanas reģiona ietekme uz mizas biežumu 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.

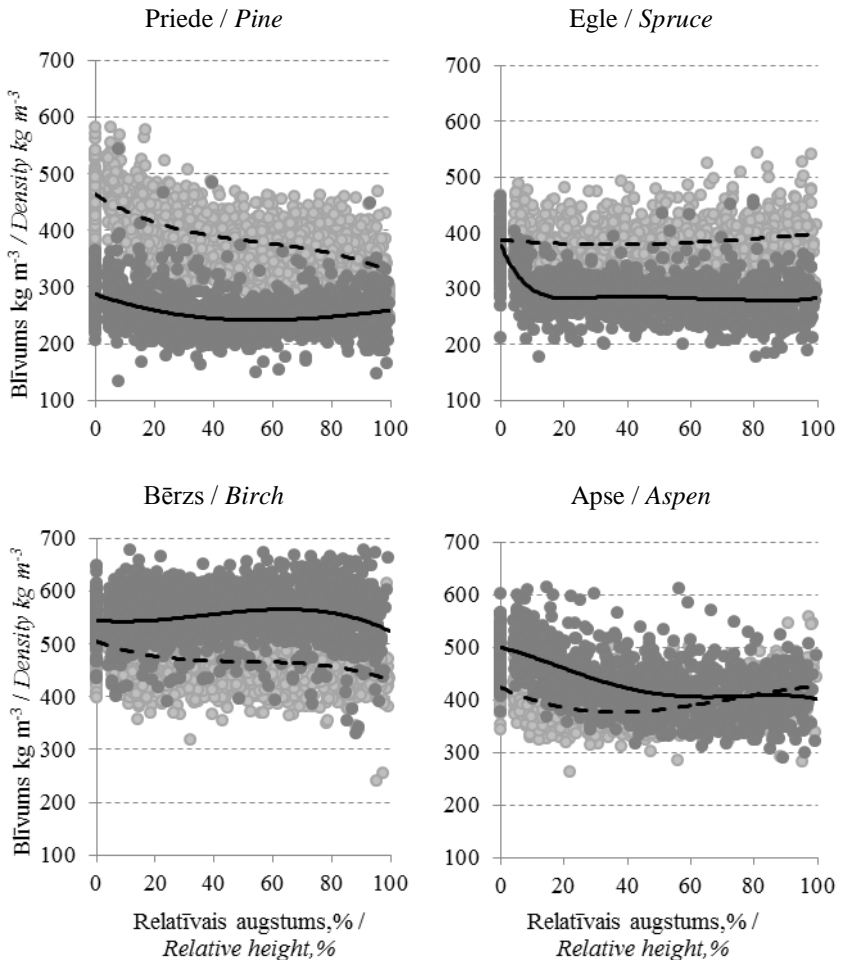
Pētījumā apstiprinājās, ka priedes, egles, bērza un apses stumbra vidējais mizas blīvums statistiski būtiski ($p < 0.001$) atšķiras no vidējā koksnes blīvuma (3.2. tabula). Minētais fakts apstiprina to, ka koksnes reducēto blīvuma vērtību izmantošana visa koku stumbra biomasas aprēķināšanai rada sistemātisku kļūdu, palielinot stumbra biomasu priedei vidēji par 4.5%, eglei par 2.5%, bet bērzam un apsei kopējo stumbra biomasu samazinās 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 / Table 3.2.

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

Koku suga / <i>Tree species</i>	Visa stumbra blīvums, kg m^{-3} / <i>Mean stem density,</i> kg m^{-3}	Stumbra koksnes blīvums, kg m^{-3} / <i>Stemwood density,</i> kg m^{-3}	Stumbra mizas blīvums, kg m^{-3} / <i>Stem bark density,</i> kg m^{-3}
Priede / <i>Pine</i>	380 ± 48	397 ± 49	260 ± 24
Egle / <i>Spruce</i>	368 ± 35	378 ± 36	295 ± 27
Bērzs / <i>Birch</i>	481 ± 38	470 ± 46	551 ± 36
Apse / <i>Aspen</i>	399 ± 30	393 ± 29	446 ± 39

Analizējot mizas un koksnes vidējo blīvuma vērtību starpību stumbra garenvirzienā, noskaidrots, ka, izņemot apsi, pārējām pētītajām koku sugām blīvuma atšķirības saglabājas būtiskas ($p < 0.05$) visa stumbra garumā (3.1.attēls).



3.1. att. Vidējā stumbra koksnes (punktētā līnija) un stumbra mizas (nepārtrauktā līnija) reducētā blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā / Fig. 3.1. Mean stem wood (dashed line) and stem bark (solid line) density and their axial variation in tree stems

Tikai apses stumbru galotnes daļā (70–100% relatīvais koku augstums) netika konstatētas būtiskas mizas un koksnes blīvuma atšķirības. Tas

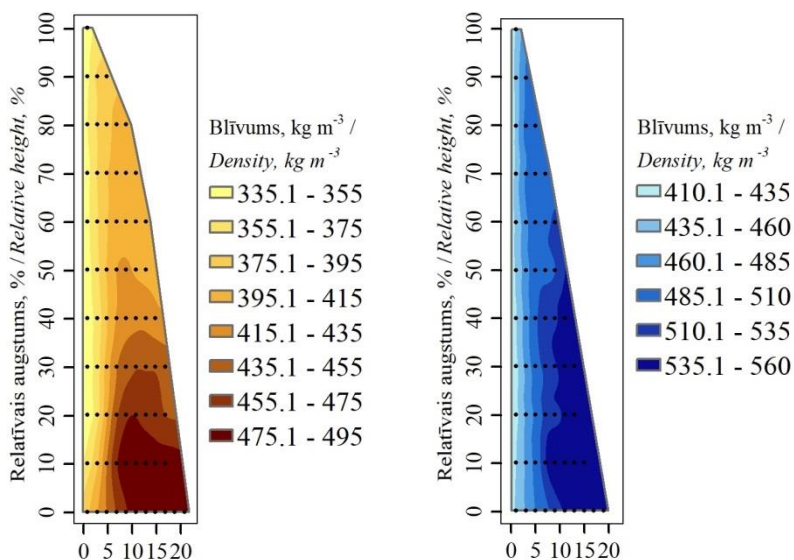
izskaidrojams ar to, ka mizas un koksnes blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā neseko vienām un tām pašām tendencēm, kā arī blīvuma izmaiņu amplitūda apses mizai ir nedaudz lielāka, kā pārējām pētījumā iekļautajām koku sugām. Apses mizas blīvums stumbra galotnes virzienā samazinās; stumbra lejasgalā 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 skuju koku 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. Analizējot mizas blīvuma datus ar lineārās regresijas analīzi, konstatēts, ka kokaudzes vecums būtiski neietekmē mizas vidējo blīvumu lapkoku sugām, turpretī priedei un eglei vecuma ietekme izrādījās būtiska ($p < 0.001$).

Vidējais svērtais priedes, egles, bērza un apses stumbra koksnes reducētais blīvums pētījumā aprēķināts attiecīgi 397, 378, 470 un 393 kg m^{-3} (3.2. tabula). Pētījumā konstatēts, ka vidējais stumbra koksnes blīvums priedei, eglei un bērzam mainās atkarībā no koka krūšaugstuma caurmēra. 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) rekomendētās blīvuma vērtības priedes, egles un bērza stumbra biomasas aprēķināšanai noved pie oglekļa apjoma pārvērtēšanas jaunaudzēs, jo vadlīniju 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 oglekļa apjoma nepietiekamas novērtēšanas Latvijas apšu kokaudzēs. Literatūrā minētās vidējās koksnes reducētā blīvuma vērtības parastajai apsei ir robežās no 376 kg m^{-3} līdz 403 kg m^{-3} (Herājārvi & Junkkonen, 2006; Karki, 2001; Rytter et al., 2016; Smilga, 1988). Mūsu pētījumā konstatētais vidējais apses koksnes blīvums 393 kg m^{-3} atbilst iepriekš norādītajam blīvuma vērtībām.

Līdzīgi kā citām koku sugām, arī apses koksne ir lielas reducētā blīvuma atšķirības, bet atšķirībā no pārējām apskatītajām koku sugām, blīvuma atšķirības apsei izskaidrot ir grūtāk. 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 reducētā blīvuma korelācija. Lai gan korelācijas koeficients ir neliels (-0.28), tomēr tas norāda uz to, ka mazāks blīvums ir kokiem, kuri auguši lielākā biežumā. 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.

Priedei un bērzam novērota izteikta stumbra koksnes blīvuma samazināšanās virzienā uz galotni (3.1. attēls), bet radiālajā virzienā blīvumam ir tendence palielināties mizas virzienā (3.2. attēls).



Attālums no serdes, cm / Distance from pith, cm Attālums no serdes, cm / Distance from pith, cm

Priede / Pine

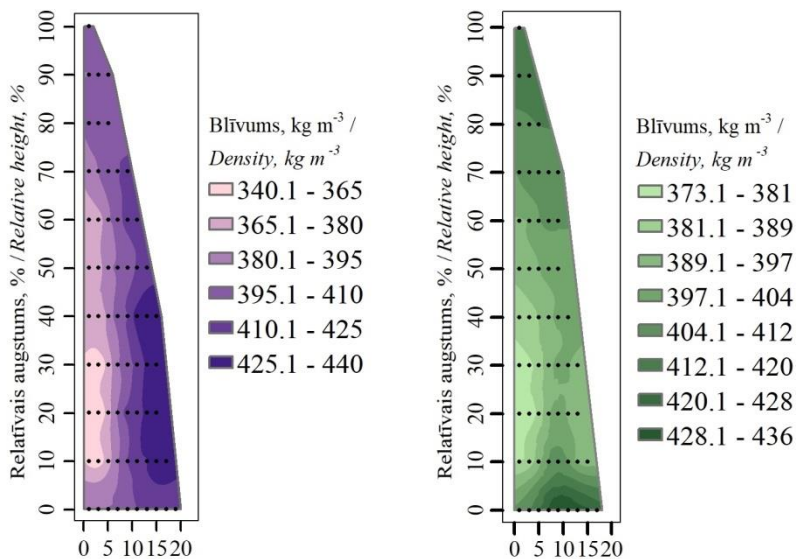
Bērzs / Birch

3.2. att. **Koksnes reducētā blīvuma izmaiņas priedes un bērza stumbros /**
 Fig. 3.2. *Basic density variation in stems of pine and birch derived from density measurements in wood specimens*

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.

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 (3.1. attēls). Vismākās stumbra šķērsgriezuma vidējais blīvums 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). Analizējot egles un apses blīvuma izmaiņas virzienā no serdes uz mizu, secināts, 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 (3.3. 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).

No citiem pētījumiem atšķirīgas blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā ir atspoguļotas parastās egles dažādas biežības izmēģinājumos (Johansson, 1993). Minētajā pētījumā krasās blīvuma svārstības stumbra garenvirzienā, īpaši stumbra augšējā daļā, varētu būt izskaidrojamas ar pētījumu metodoloģiskām atšķirībām, ievācot blīvuma paraugus. Piemēram, šajā pētījumā blīvuma paraugi ievākti ik pa 1 m vai 2 m, atkarībā no koku garuma, bet minētajā pētījumā blīvuma paraugi ievākti tikai 0 m, 4 m, 7 m, 10 m, 13 m augstumā, nenorādot stumbra kopējo garumu, kā arī analizēta tikai viena vecuma koki. Arī citos pētījumos blīvuma paraugripas izzāgētas 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 iegūtais blīvuma vērtības starp pētījumiem var nedaudz atšķirties, jo īpaši attiecībā uz priedi un bērzu, kur blīvums stumbra garenvirzienā samazinās ļoti strauji.



Attālums no serdes, cm / Distance from pith, cm Attālums no serdes, cm / Distance from pith, cm

Egle / Spruce

Apse / Aspen

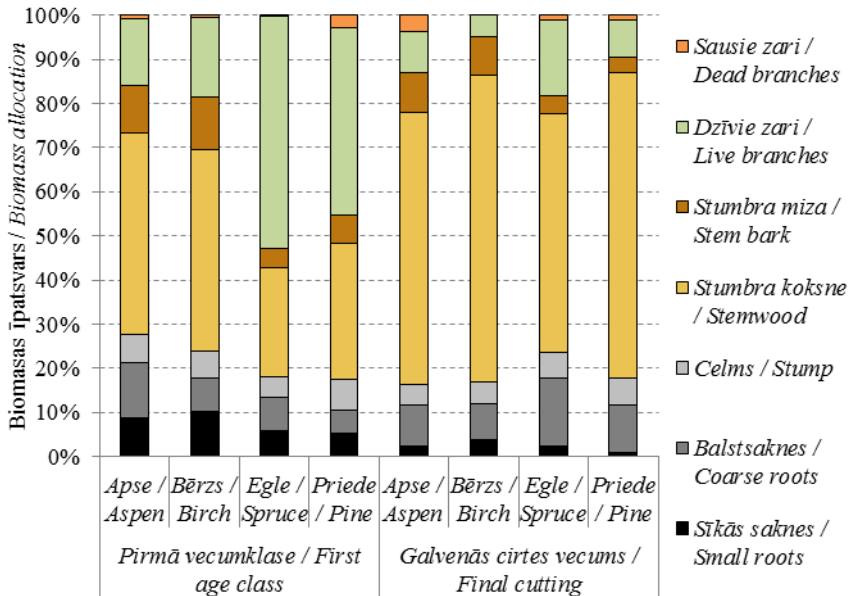
3.3. att. **Koksnes reducētā blīvuma izmaiņas egles un apses stumbros /**
 Fig. 3.3. *Basic density variation in stems of spruce and aspen derived from density measurements in wood specimens*

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 apļievas 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 vēlnās 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.

3.2. Koku biomasas aprēķini un vienādojumu izstrāde

Kokaudžu biomasas ievērojamu daļu, kura atsevišķiem kokiem var sasniegt pat 70%, veido nestumbru frakcijas - zari un saknes. 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).

Analizējot pētīto koku sugu dažādu biomasas frakciju īpatsvaru kopējā biomasā, secināts, ka to alometriskās sakarības mainās atkarībā no koku sugas un kokaudzes vecuma. Vairumā gadījumos 3.4. attēlā norādītajos kokaudzes vecumos stumbrs (koksne un miza) ir lielākā biomasas frakcija, izņemot pirmās vecumklases priedes un egles.



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 / First age class for aspen and birch is 1-10 years; for spruce and pine 1-20 years ; final cutting age is 41 years for aspen, 71 for birch, 81 for spruce, 101 for pine.

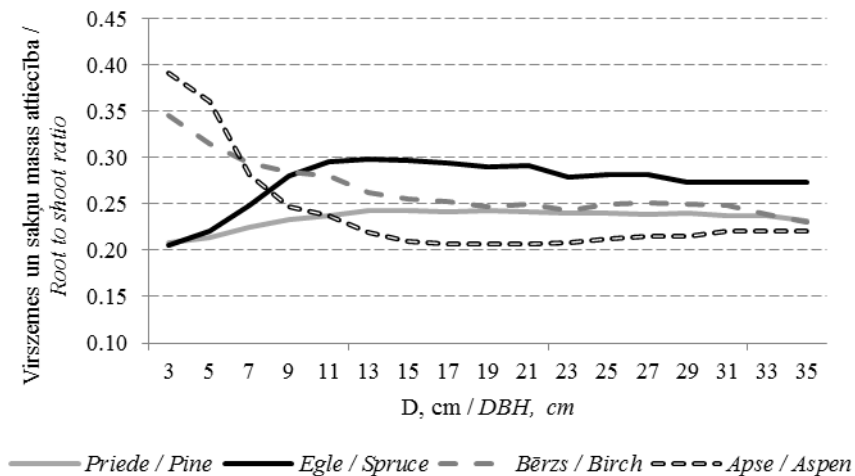
3.4. att. Koku sugu biomasas sadalījums frakcijās /
Fig. 3.4. Biomass allocation of tree species

Vislielākais stumbra frakcijas īpatsvars galvenās cirtes vecumā novērots bērnam – 78.2%, bet vismazākais eglei – 58%. Konstatēts, ka tikai jaunaudzū 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; bērnam 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%.

Pētījumā koku celma, balstsakņu un sīko sakņu īpatsvars kopējā biomasā visām koku sugām kopā vidēji ir apmēram 20% un identiski secinājumi iegūti arī Somijā, nosakot kopējo priedes, egles un bērza celma/sakņu biomasu (Repola, 2013). Lapkokiem bērnam un apsei lielāks celma/sakņu biomasas īpatsvars ir jauniem kokiem, bet mazāks pieaugušiem kokiem. Savukārt skujkoku sugām priedei un eglei ir pretēji (3.4. 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. Bērnam 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%.

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 (3.5. attēls).



3.5. att. Virszemes uz sakņu biomasas attiecības izmaiņas atkarībā no koka caurmēra /

Fig. 3.5. Changes in the root-to-shoot ratio depending on tree diameter

Pētījuma rezultāti liecina par to, ka vidējās IPCC vadlīniju virszemes un sakņu masas attiecības vērtības, kuras rekomendētas biomasas aprēķināšanai gan mērenās, gan arī boreālās joslas mežos, Latvijas apstākļos pārvērtē jaunaudzju celma/sakņu biomasu. Vislielākā biomasas pārvērtēšana notiek skujkoku jaunaudzēs, kurās virszemes biomasu 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 daļas 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.

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.

Šajā 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 siko sakņu masa visiem paraugkokiem tiek aprēķināta, izmantojot regresijas vienādojumus, kuru izveidei izrakts ierobežots skaits paraugkoku (Repola, 2008, 2009) vai izraktas tikai atsevišķas koka saknes (Pettersson & Stahl, 2006; Smith et al., 2016).

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. Pēc nacionālā MRM datiem virsvaldu koki, valdošie koki, un līdzvaldu koki 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.

Pētījuma rezultāti apstiprināja, 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 R²) norādīja uz to, ka koku H iekļaušana vienādojumos ne vienmēr uzlabo to prognozēšanas precizitāti, jo īpaši, aprēķinot koku kopējo celma/sakņu un sīkāko sakņu biomasu (Liepiņš et al., 2017).

Darba ietvaros atspoguļotie vienādojumu statistiskie rādītāji un veiktās pārbaudes norāda uz to, ka vairumā gadījumos (izņemot bērza BGB) 2.3 vienādojums, salīdzinot ar 2.1 un 2.2 vienādojumu, ir vispiemērotākais pētīto koku sugu biomasas frakciju aprēķiniem. Novērots, ka 2.3 vienādojuma izteiksme ir piemērota arī jaunu koku biomasas aprēķiniem, jo tā ir pietiekoši elastīga, atšķirībā no 2.1 un 2.2 vienādojumu izteiksmēm. Skujkokiem,

prognozējot biomasu pēc 2.1 vienādojuma, atlikumu novirze no vidējās vērtības vislielākā bija tieši jauniem kokiem ar D mazāku par 10 cm. Neskatoties uz to, ka H iekļaušana pakāpes vienādojumā (2.2) samazināja atlikumu novirzi no vidējās vērtības, joprojām vairumam koku frakciju, vislielākā novirze tika konstatēta jauniem kokiem. 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. 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. Apstiprinājās, ka aprēķinot biomasu pēc 2.1 izteiksmes, vienādojumi būs mazāk precīzi, piemērojot tos biomasas aprēķiniem ārpus kokaudzes, kur nozāģēti paraugkoki. Koku augstuma iekļaušana pakāpes vienādojumos (2.2 izteiksme) samazināja kopējo biomasas aprēķinu nenoteiktību vidēji par 37%, ievērojami uzlabojot biomasas aprēķinu precizitāti. Viskorektāk biomasas variēšanu mūsu pētījumā raksturoja 2.3 vienādojums, kura izmantošana salīdzinot ar 2.1 vienādojumu, biomasas aprēķinos vidēji par 61% samazināja aprēķinu nenoteiktību.

Ir pieņemts uzskatīt, ka biomasu dažādu koku sugu frakcijās (zari, stubrs, 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, mazāka aprēķinu nenoteiktība būs visas kokaudzes, nevis atsevišķu koku biomasas aprēķiniem.

Izstrādājot biomasas vienādojumus, ir svarīgi, lai atsevišķu koku frakciju (stubrs, zari) prognožu summa ir vienāda ar kopējo prognozēto biomasu (Bronisz et al., 2016; Kozak, 1970; Repola, 2008, 2009). Promocijas darbā prognozētā stubra un zaru biomasas summa diezgan labi atbilst kopējām virszemes biomasas prognozēm, tāpēc papildus procedūras biomasas vienādojumu aditivitātes nodrošināšanai netika veiktas. Izmantojot rekomendētos biomasas aprēķina vienādojumus, stubra un zaru biomasas summa vidēji apseji ir par 0.2%, bērzam par 0.5%, eglei par 0.5% un priedei par 0.8% lielāka nekā koku sugām atbilstošās virszemes biomasas prognozes. Iegūtā novirze mūsu pētījumā ir līdzīga citam pētījumam Somijā, kur novirze pēc aditivitātes koriģēšanas eglei bija 2.3%, 3.7%, 4.5% bet priedei 0.2%, 1.1%, 1.2% atkarībā no pielietotās vienādojuma izteiksmes (Repola, 2009).

Darba ietvaros izstrādātie priedes, egles un bērza virszemes biomasas (AGB) un celma/sakņu biomasas (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, izmantoti kā materiāls biomasas vienādojumu validēšanai.

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 (3.3. 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. 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.

Pētījumā izstrādātie priedes, egles un bērza AGB un BGB vienādojumi salīdzināti ar konkrētajiem citu valstu vienādojumiem, 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 biomasu pēc Johansson (2000, 2002) vienādojumiem lielākajiem kokiem tiek stipri pārvērtēta, salīdzinot ar mūsu izstrādāto vienādojumu. 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 caurmēram, bet pārējos pētījumos koku saknes atraktas rūpīgāk – līdz 2 mm caurmēram.

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 (3.3. 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.

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

The percent difference between our and given biomass functions depending on tree diameter

D, cm / DBH, cm	Priede / Pine				Egle / Spruce				Bērzs / Birch				Apse / Aspen			
	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	

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

¹Marklund (1988), ²Repola (2008, 2009), ³Johansson (2000, 2002), ⁴Peterson & Stahl (2006), ⁵Smith (2014, 2016). When the sign is negative, it indicates overestimation compared to our function. MAPE - mean absolute percent error, DBH - diameter at breast height, AGB - total aboveground biomass, BGB - total belowground biomass.

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 sauso zaru biomasu. Sauso zaru īpatsvars visu zaru biomasā 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, 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 visu zaru biomasā 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 sākas agrāk nekā pārējām koku sugām. Turklāt atšķirībā no pārējām koku sugām, bērzam korelācija bija negatīva, iezīmējot tendenci samazināties sauso zaru īpatsvaram līdz ar koku D un H pieaugumu.

Vienādojumu atlikumu sadalījuma struktūra 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 aprūtināta kvalitatīva datu ievākšana. Minētie ierobežojumi jāpatur prātā, aprēķinot BGB biomasu kūdras augsnēs, jo šādās augsnēs augušu koku sakņu biomasu parasti ir lielāka nekā minerālaugsnēs (Hakkila, 1972). Apsaimniekotu mežaudžu biomasas prognožu vienādojumi parasti dod kļūdainas prognozes neapsaimniekotās un pārbiezinātās jaunaudzēs (Repola & Ulvcrone, 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 apstiprināja, ka rekomendētie vienādojumi ticami prognozē biomasu arī lielāku dimensiju kokiem nekā uzmērtajiem paraugkokiem. Darba ietvaros lielākais nozāģētā paraugkoka D

priedei, eglei un bērzam bija robežās no 36.3–45.2 cm, bet AGB un BGB vienādojumu validēšanā izmantoto koku maksimālais D bija 57.3 cm.

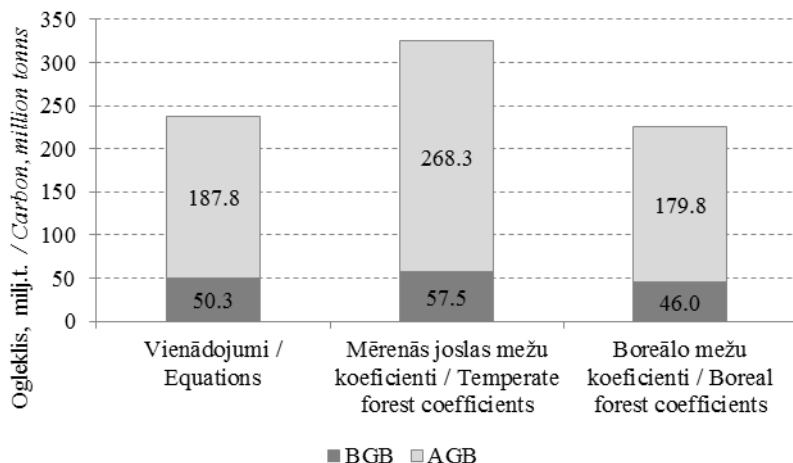
3.3. Latvijas kokaudzēs uzkrātais ogleklis atbilstoši Latvijas meža resursu monitoringa datiem

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 līdzīgākajām stumbra reducētā blīvuma vērtībām.

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 sugai.

Pētījumā aprēķinātais Latvijas kokaudžu biomasā uzkrātais ogleklis 2016. gadā ir 238.1 ± 3.5 milj.t (3.6. attēls). Lielākais īpatsvars (79% jeb 187.8 milj.t) no tā ir akumulēts kokaugu virszemes daļā, bet 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 tuvs 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 aprēķinus 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.



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

Fig. 3.6. Carbon stock in aboveground (AGB) and belowground (BGB) forest biomass using different calculation methods

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 Latvijā veikti galvenokārt šo koku sugu jaunaudzēs un kokaugu stādījumos lauksaimniecībā neizmantotajās zemēs. Par cik šobrīd trūkst informācijas par oglekļa satura variāciju daļījumā pa koku sugām un biomasas frakcijām visā hemiboreālajā mežu reģionā, Latvijas nacionālajā SEG ziņojumā lietotās oglekļa satura vērtības (50.7–53.0% 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 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.

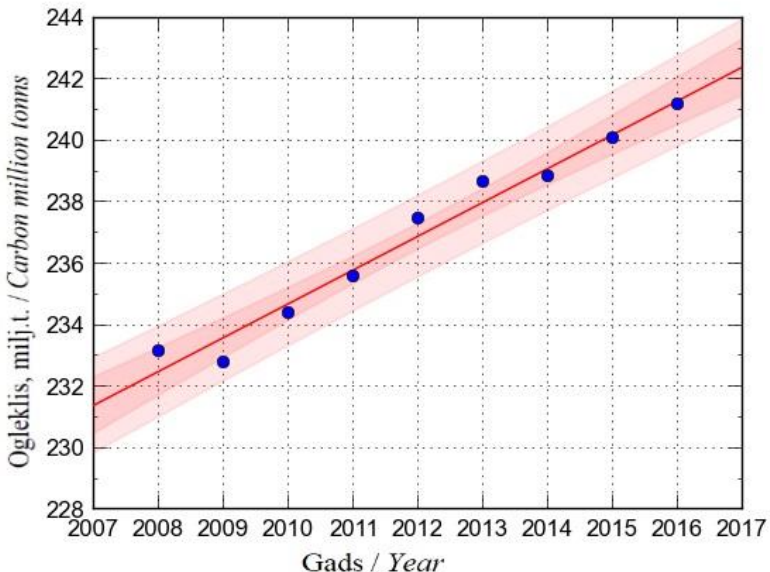
Daudz neprecīzāki Latvijas kokaudžu oglekļa aprēķini iegūti pielietojot IPCC vadlīniju (Eggleston et al., 2006) piedāvātos biomasas pārrēķina koeficientus mērenās joslas un boreālajiem mežiem (3.6. attēls). Lai novērtētu IPCC vadlīniju piedāvāto koeficientu ietekmi uz kokaudžu oglekļa aprēķiniem, visās metodēs piemērots identisks pieņēmums par oglekļa saturu biomasā. Izmantojot mērenās joslas mežu biomasas pārrēķinu koeficientus, Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājumi tiek pārvērtēti par 36.9% jeb par 87.8 milj.t. Salīdzinot ar pētījumā izstrādātajiem biomasas vienādojumiem, šie Dienvideiropai piemērotie koeficienti nozīmīgi pārvērtē kokaudžu virszemes daļā akumulēto oglekli (par 42.9%), bet mazāk – kokaudžu celmu un sakņu oglekļa apjomus (par 14.4%). Pretēji ir ar vadlīniju piedāvātajiem boreālo mežu biomasas pārrēķina koeficientiem, kuru izmantošana par 5.2% jeb 12.3 milj.t samazina kokaudzēs uzkrātā oglekļa aprēķinus, 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 (kļūda - 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 CO₂ piesaisti” biomasas aprēķina metodika tika koriģēta vēlreiz. Dažādos aprēķinu etapos izmantoto BEF koriģēšana līdz šim ir ļāvusi pakāpeniski uzlabot Latvijas kokaudžu oglekļa aprēķinu metodiku, izvairoties no būtiska akumulētā oglekļa pārvērtēšanas riska. Minētā iemesla dēļ nelielās atšķirības Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājuma aprēķinos starp pētījumā izstrādāto un pašreiz spēkā esošo metodiku ir viegli izskaidrot, jo, gan izstrādātie biomasas vienādojumi, gan IPCC vadlīniju koriģētās BEF vērtības, balstās uz vienu un to pašu empīrisko materiālu. Ir pierādīts, ka izmantojot individuālu koku biomasas vienādojumus kopā ar MRM datubāzi, iespējams iegūt precīzākas biomasas prognozes nekā biomasu aprēķinot no kopējās krājas ar BEF (Neumann et al., 2016). Līdzīgi kā 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).

Latvijas kokaudzēs vidēji akumulēts $67.4 \pm 0.6 \text{ t ha}^{-1}$ 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.

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 (3.7. attēls).



3.7. att. Oglekļa uzkrājuma dinamika Latvijā desmit gadu periodā /
Fig. 3.7. Carbon stock dynamics in Latvia over the last decade

Salīdzinot MRM 1. un 2. pilna cikla rezultātus, secināms, ka valsts oglekļa uzkrājuma pieaugums nav izskaidrojams tikai ar meža platību pieaugumu valstī, jo arī uz platības vienību akumulētā oglekļa apjoms ir palielinājies. Pēc MRM 1. cikla ietvaros uzmērītajiem parauglaukumiem aprēķināts, ka kokaudzēs vidēji akumulēts $65.8 \pm 0.6 \text{ t ha}^{-1}$ oglekļa, bet pēc 5 gadiem, atkārtoti pārņemot tos pašus parauglaukumus, aprēķināts, ka vidējais oglekļa uzkrājums ir palielinājies līdz $67.1 \pm 0.6 \text{ t ha}^{-1}$. Daļēji oglekļa uzkrājuma pieaugums varētu būt saistīts ar vidējā vecuma pieaugumu, kurš identiskā aprēķinu periodā ir nedaudz pieaudzis - no 43.9 ± 0.3 līdz 44.2 ± 0.3 gadiem. Tomēr, vērtējot vidējā vecuma izmaiņu tendences pēc piecgades slīdošā vidējā vērtībām, vidējam vecumam ir tendence samazināties, bet uzkrātais ogleklis platības vienībā ir konstanti palielinājies.

Raksturojot Latvijas kokaudžu oglekļa uzkrājumus, mūsu pētījuma aprēķinos ir pieņemts, ka koku stumbri ir bez truses. 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 kodoltruses sastopamība 78% koku un noskaidrots, ka truses aizņemtais tilpums no kopējā stumbra tilpuma var pat pārsniegt 50%. Līdzīgi secinājumi konstatēti arī pētījumā par Amerikas apses (*Populus tremuloides*) truses izplatību, kur trupe novērota 80% koku 20–50 gadus vecās audzēs un truses aizņemtais tilpums var sasniegt 40% no visa stumbra tilpuma (Worrall & Fairweather, 2009).

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 kategorijās (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. Fenokandijā 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.

PATEICĪBAS

Promocijas darba autors saka vissiltāko un sirsnīgāko “paldies” darba zinātniskajiem vadītājiem Dr. silv. Kasparam Liepiņam un Dr. silv. Andim Lazdiņam par iedvesmojošiem vārdiem, ieinteresētību un enerģijas devu, kad tas bija vajadzīgs, kā arī neatsveramu atbalstu un sniegtajiem padomiem darba izstrādē un tā kvalitātes pilnveidošanā.

Darba autors izsaka pateicību Latvijas Valsts mežzinātnes institūtam “Silava” par iespēju izstrādāt darbu paralēli tiešo darba pienākumu veikšanai, kā arī par iespēju promocijas darba izstrādē analizēt akciju sabiedrība „Latvijas valsts meži” pasūtītā pētījuma „Mežsaimniecisko darbību ietekme uz siltumnīcefekta gāzu emisijām un CO₂” ietvaros iegūtos datus.

Izsaku pateicību Jurgim Jansonam un citiem Meža resursu monitoringa (MRM) radošās grupas kolēģiem par promocijas darbā izstrādāto biomasas vienādojumu integrēšanu MRM datu apstrādes sistēmā, lai būtu iespējams veikt Latvijas kokaudzēs uzkrātā oglekļa aprēķinus.

Pateicos brīnišķīgajiem LVMI “Silava” Meža atjaunošanas un ieaudzēšanas radošās grupas kolēģiem Uldim Prindulim, Gatim Rozītim, Kristapam Makovskim, Aldim Butleram u.c. par palīdzību empīriskā materiāla ievākšanā un pēcapstrādē. Tāpat izsaku lielu pateicību Tālim Gaitniekam un Robertam Matisonam par sniegtajiem priekšlikumiem un padomiem promocijas darba izstrādes gaitā.

Visbeidzot paldies manai sievai Ingai Liepiņai un meita Madarai Liepiņai par atbalstu un uzmundrinošiem vārdiem brīžos, kad tas bija visvairāk nepieciešams.

1. GENERAL DESCRIPTION OF THE THESIS

1.1. Relevance of the topic

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 CO₂ sequestration annually and every second year – a report on projections of GHG emissions and CO₂ sequestration and measures implemented to reduce the GHG emissions in Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) sector. Accurate methods for estimating the biomass of individual trees and forest stands are required to calculate CO₂ sequestration in aboveground and belowground woody biomass and to describe the changes of carbon stock in Latvian forests. A few studies conducted on economically most important tree species biomass in Latvia have been published; however, they are based on very limited study material, and the elaborated models can only be used under restricted conditions and cannot be extended to a national level. 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.

1.2. Research aim, tasks and theses

Aim of the doctoral thesis. To derive allometric equations in order to characterise the biomass of economically most beneficial tree species and determine the carbon stock in stands in Latvia. According to the aim of study, three research tasks have been advanced.

1. To characterise the mean basic density of stem and its spatial variations in the longitudinal direction and cross-section of stem.
2. To derive the aboveground, belowground, stem and branch biomass equations of individual Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.), birch (*Betula* spp.) and European aspen (*Populus tremula* L.) trees.

3. To evaluate the amount of carbon stock in the biomass of stands according to the data of National Forest Inventory of Latvia.

Proposed theses.

1. The usage of the mean values of wood density for the whole tree stem biomass appraisal creates a systematic error whose significance differs for various tree species.
2. The usage of the biomass expansion factors offered by GHG inventory guidelines of 2006 by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and the biomass equations developed in Fennoscandia creates an error in the estimation of the carbon stock in stands of Latvia.

1.3. Scientific novelty and practical significance of the work (recommendations)

Novelty.

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 belowground biomass data analysed in this study is of special value; in addition to that, our research is the first attempt to study the belowground biomass allocation patterns of European aspen but biomass equations based on diverse and comprehensive material for pine, spruce and birch are published only in few studies. For the first time in Latvia weighted mean basic density of the whole stem have been estimated and published and wood density variation maps have been elaborated including trees of various dimensions.

Recommendations.

1. Preparing a national GHG inventory report in accordance with the requirements of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) it is recommended to use the biomass equations developed in the study for the estimation of the biomass amount of stands in Latvia since the present biomass estimation methodology insufficiently evaluates the biomass of forest stands in Latvia.
2. In Latvia and in the entire hemiboreal forest region there is insufficient information about the variation of carbon contents over the tree species and biomass components. Therefore, in order to avoid the risks of carbon stock overestimation, for the estimation of the carbon stock in the stands of Latvia it is recommended to use the average carbon contents values of temperate and boreal forest for conifers – $50.8\% \pm 0.6\%$ and deciduous trees – $48.8\% \pm 0.6\%$.
3. The biomass equations have been developed for four tree species widespread in Latvia. For the purposes of biomass estimation of other tree

species found in Latvia, it is recommended to use the equations developed in the study, respectively applying them depending on the most similar stem basic density values for conifers and deciduous trees.

1.4. Approbation of research results

The research results have been summarised in four scientific publications and presented in twelve scientific conferences.

1.5. Structure of the doctoral thesis

The structure of the doctoral dissertation is subject to the research tasks proposed in the study. The dissertation consists of three chapters. The first chapter deals with the analysis of the problems of carbon sequestration and biomass estimation of stands. The second chapter describes the methodology and empirical material that are used in the study. The third chapter analyses the study outcome in compliance with the set aim and research tasks of the doctoral thesis.

The doctoral thesis consists of 105 pages, the information is aggregated in 14 tables, 31 figures and 268 sources of literature are used. 6 main conclusions are formulated and 3 recommendations are given in the conclusion of the dissertation.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study area

The study material comprised a total of 124 Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.), birch (*Betula* sp.) and European aspen (*Populus tremula* L.) stands. The forest stands were selected to represent different climatic conditions and a wide variety of tree populations. The collection of study material was performed from 2011 to 2014. Only forest stands dominated by target species with a proportion of more than 70% were included in the study, and an equal number of stands with determined age groups (young, middle-aged and mature) were selected. To characterize the forest stands, temporary circular plots with an area of 500 m² were laid out in each stand; these plots were subjectively positioned in locations that most accurately represented the entire stand and the plot was further than 50 m from the outer border of the forest stand. In each of the established sample plots,

three sample trees representing the range of the dimensions of the dominant trees in a stand were felled. Damaged and rotten trees were not accepted as sample trees. The social status of trees (dominant, codominant and subdominant) was used as a criterion for subjectively selecting the sample trees.

2.2. Destructive sampling and processing of the aboveground biomass of trees

The aboveground tree biomass measurements were performed during the dormant period when deciduous trees are leafless and young shoots have matured. The aboveground biomass data were based on detailed measurements of 372 sample trees (102 Scots pine, 81 Norway spruce, 105 birch spp. and 84 European aspen). The stem length (H) and diameter at breast height (DBH) were measured from the stump height, which was defined as 1% of the measured tree height before felling. The stump height is the point at which the trees were divided into above- and belowground tree components. After felling, the living crown was divided into three sections of equal length (top, middle and bottom), and one average-sized sample branch was selected subjectively from the middle of each section. The three sample branches were weighed together in the field and sampled for the determination of the average moisture of the living crown. In addition, one average-sized dead sample branch per tree was collected from the lower part of the crown. After measuring the branches that were selected for subsequent dry weight determination, all remaining branches were cut off and weighed using field scales (Kern HCB 99K50, 99 kg ± 0.05 for large pieces or Kern HDB 10K10N, 10 kg ± 0.01 for smaller pieces) attached to a portable tripod; dead and living branches were measured separately. The dry weight of the sample branches was measured in the laboratory after drying at a temperature of 103 °C until a constant weight was reached. The dry matter of the living crown was calculated on the basis of the fresh to oven-dry weight ratio.

The stems were cross-cut into 1 or 2 m sections (starting from the base of the stem), depending on the stem length (1 m sections for stems shorter than 20 m, 2 m sections for stems longer than 20 m). To obtain the mean density of the stem, sample discs were collected at the beginning of each stem section. Sample discs were also collected at a height of 1.3 m and at the midpoint of the first section. All sample discs (approximately 2–2.5 cm thick) were placed in bags and transported to the laboratory for density measurements. To calculate mean basic density of stem the specimens for the density measurements prepared from the sample discs correspond to the scheme presented in Figure 2.1.

Before the density measurements were conducted, all specimens were saturated by immersion in water for 24 h. The basic density of each wood and bark specimen was determined using Precisa XB 220A scales equipped with a Precisa density determination set. Before each measurement, the specimens were drained on soft paper, and two replicates were performed for each specimen. For the calculation of wood and bark density, all specimens were dried at 103°C until a constant weight was achieved. The dry weight of the specimens was determined immediately after they were removed from the drying oven.

To calculate the volume of the stem sections and the average radius of each sample disc, all cross-sectional over and under-bark diameters were recorded in two perpendicular directions. The volume of each section was estimated using Smalian's approach (Smith et al. 2014). The total section biomass was calculated by multiplying the total section volume by the section density calculated from the mean density of the sample discs located at the ends of the stem sections; for the top section, however, only the base sample disc was used. The weighted average formula was used to calculate the mean density of each sample disc from the density specimens and their corresponding areas (Figure 2.1). The biomass of individual sections was summed to obtain the total stem biomass.

2.3. Destructive sampling and processing of the belowground biomass of trees

The stumps and roots of 144 trees (37 Scots pine, 29 Norway spruce, 42 birch spp. and 33 European aspen) were excavated and measured in the spring or summer following tree felling. Sample trees are selected to represent different DBH classes, tree heights and age groups for each tree species included in the study. Tree belowground biomass is extracted from the same trees that have previously been assessed for aboveground biomass. The entire root system of the sample trees was excavated manually to minimize the loss of small roots. We collected as much fine root biomass as possible by cautiously digging out each individual root and by following all roots over 2 mm in diameter. After excavation and transportation to a location used for further processing, the stumps and roots were washed using a high-pressure water pump to remove all soil particles. To calculate the dry root biomass, each root system was divided into three fractions:

- stump – monolith (both above- and belowground portions), nondifferentiated parts of some roots;
- coarse roots – diameter greater than or equal to 2 cm;
- small roots – diameter less than 2 cm.

The fresh weight of the stump and roots was determined by weighing all fractions separately using the same field scales used for the branches. To calculate the dry weight of each root fraction, one sample disc was collected from the middle of the stump, three diameter root discs were collected randomly from the coarse roots, and three full-length roots less than 20 mm in diameter were collected and dried at 103°C until a constant weight. The total belowground dry biomass was represented by the sum of the root fractions based on the individual fresh to oven-dry weight ratios of each belowground component.

2.4. Model development

National Forest Inventory (NFI) in Latvia accumulates data on individual tree DBH and H, so these easily measurable tree features were selected as variables in the study to create convenient and practical equations. Sometimes tree age or different crown parameters have been also used as variables in biomass equations, but our NFI does not currently collect such information at individual tree level. After extensive literature analysis the suitability of three different mathematical models (2.1, 2.2 and 2.3) for the prediction of stem biomass (SB), leafless live and dead branch biomass (BB), total aboveground biomass (AGB) and total belowground biomass (BGB) were selected for evaluation. AGB was calculated by summing the SB and BB (needles and cones were included for coniferous species), whereas BGB was calculated by summing the small root, coarse root and stump biomass.

An introductory analysis of the data showed that the error variance increased with increasing DBH and H. Since this is a violation of the general rule for least square regression, logarithmic transformation of the equations (2.1, 2.2, 2.3) was applied to achieve constant variances (Claesson, Sahlen, & Lundmark, 2001; Repola, 2009; Weiskittel et al., 2015; Zianis & Mencuccini, 2004). Trees were sampled in 124 stands and the collected material has a hierarchical data structure (Claesson et al., 2001; Repola, 2008, 2009; Temesgen et al., 2015) assuming that tree biomass components are more correlated within stands than between stands. Since the hierarchical structure is a violation of the fundamental assumptions of linear regression (Claesson et al., 2001) a mixed linear model was applied in which the predictor variables were treated as fixed effects and stand was treated as a random effect. Calculations were performed using the “lme4” package (Bates et al. 2015) in R software.

In order to calculate biomass for small and large (DBH > 60 cm) trees as accurately as possible, Marklund (1987, 1988) concluded that the logarithmic transformation of DBH alone is not sufficient; instead he recommended to use the expression $DBH/(DBH + m)$ in equation (2.7), where m is a constant. The

constant m was determined using a grid search method and reflects the best correlation between $\ln \hat{Y}$ and the diameter expression $DBH/(DBH + m)$ for different m values (Marklund, 1987).

When the estimated dependent variable is retransformed, it must be rectified for logarithmic bias (Hunziker et al., 2014; Jenkins et al., 2003; Snowdon, 1991; Zianis et al., 2005). This is commonly performed using a correction factor that is added to the linearized equation during the exponential back-transformation. Different assumptions are used to calculate the correction factors. If the value of the variance or the estimated standard deviation of the dependent variable is large, the use of a ratio estimator (2.4) is advised (Marklund, 1987; Repola, 2008, 2009; Snowdon, 1991). Transformed functions used for biomass prediction can be retransformed as shown in equation (2.5).

The goodness of fit of the models was evaluated using the coefficient of determination (R^2), the root mean square error (RMSE) and mean average percent error (MAPE). In addition, the corrected Akaike information criterion (AICc) was used to calculate the relative probability that the tested models would be correct. The estimated AICc value indicates the likelihood that the model is correct with higher penalty for extra parameters when calculating the goodness of fit of a statistical function. The percent relative standard error (PRSE) was used to assess the reliability of the regression parameter estimates (Picard et al., 2015; Sileshi, 2014). We assumed that the model would be unreliable if PRSE was greater than 30% for one or more parameters. If the exclusion of variables (H, $\ln(H)$ or both) on the basis of equation (2.3) yielded a positive effect on AICc (a lower value) or resulted in PRSE less than 30% for all parameters, these parameters were excluded, and the remaining parameter values were recalculated.

All functions for each biomass component were examined using residual analysis. The relative difference between the measured and estimated biomass was plotted against the logarithm of the estimated values. To reveal the systematic error of the residuals, we smoothed plots using a LOWESS procedure (locally weighted scatterplot smoothing (Cleveland 1979)) built using CurveExpert Professional 2.2 software.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Density variations in tree stems

Stem density variations in the longitudinal direction (from stump to treetop) and cross-section (from pith to bark) give an insight into the aspect how various density sampling methods can influence the estimation of stem biomass and alongside – the total carbon stock. When calculating the mean

density of the whole stem, the bark proportion and its density should also be considered. In numerous studies the stem biomass calculations only use the mean stem wood basic density indicators, which is conceptually incorrect. The aforementioned situation might have formed because of the fact that scientific literature has not reflected detailed information about the bark basic density variations.

In the study the proportion of stem bark showed considerable differences not only among the studied tree species but also within the framework of each species. The bark proportion from the total stem volume for Scots pine ranges from 5.5–34.5%, for Norway spruce 6.6–28.3%, for birch 7.9–21.5% and for European aspen 7.0–23.6%. For small size trees of all studied tree species the bark proportion in stem is considerably larger than for mature trees (Table 3.1). At average diameter at breast height (DBH) of 5 cm the bark proportion among species varies in the range of 16.7–26.9% but, if the average DBH increases to 30 cm, the bark proportion diminishes for more than two times and ranges from 8.2–10.4%. It confirms that in case of significant differences between the density of stem wood and bark a larger systematic error will be formed in the calculations of tree stem biomass in young stands.

The study finds that the bark proportion in tree stems is larger in the stump part and especially at the treetop. The bark proportion variations in the longitudinal direction of stem depend on the combined effect of bark thickness and stem diameter. As the treetop approaches, the stem cross-section diameter reduces faster. However, the bark at the treetop becomes only slightly thinner in comparison to the middle part of stem therefore the bark proportion rapidly grows. For instance, the bark percentage for round timber made from the small end of spruce stem is for about 7% larger than for round timber from the middle part of stem (Sarmulis et al., 2005). The least bark proportion for each tree species is achieved at different relative height of stem. The least Scots pine bark proportion is in the middle part of stem (50% relative height) while for Norway spruce, birch and European aspen the least bark proportion is in the lower part of stem (about 20–30% relative height). Similar results are found in Finland where the least bark proportion for Norway spruce is indicated at 20% relative height (Laasasenaho, Melkas, & Aldén, 2005).

Since the DBH is the most easily and accurately measurable indication of a tree, then the study clarifies that DHB of Scots pine, Norway spruce, birch and European aspen respectively explains for 85%, 86%, 51% and 79% of bark proportion variations and it is the most appropriate indication for prediction. The most uncertainty in the prediction of the bark amount in tree stem relates to birch, which is also approved by a lower coefficient of determination. Liepa (2011) explains the uncertainty of the estimation of birch bark proportion by the merger of data of two birch species, ignoring the specificity of these species.

Within the framework of the doctoral thesis no considerable bark proportion differences were found between the forest plots in the northern-southern as well as eastern-western direction of the state which can be explained by the relatively small territory of Latvia and geographical spread of forest stands. All selected forest stands were located between parallel 56–58 and meridian 21–27. The impact of the tree growth region upon the thickness of pine, spruce, birch and aspen bark has not been found in the previous research in Latvia either (Līpiņš & Liepa, 2007). It confirms that the mean bark proportion indicators estimated in the study can be referred to the entire territory of Latvia.

The study confirmed that the mean bark density of pine, spruce, birch and aspen stem statistically significantly ($p < 0.001$) differs from the mean stem wood density (Table 3.2). It confirms that the usage of the wood basic density values for the estimation of the whole tree stem biomass creates a systematic error increasing the stem biomass for Scots pine on average by 4.5%, for Norway spruce by 2.5% but for birch and European aspen the total stem biomass reduces respectively by 2.4% and 1.5%. Notably, the mean wood density of the studied coniferous species is larger than that of bark in contrary to deciduous species whose bark is denser than wood. For Scots pine the difference between wood and bark basic density (137 kg m^{-3}) is considerably larger than for other tree species (aspen – 52 kg m^{-3} , birch – 80 kg m^{-3} and spruce – 82 kg m^{-3}). It can be explained by more drastic wood density variations in the longitudinal direction of Scots pine stems in comparison to other tree species. Similar conclusions on the impact of the difference between bark and wood density upon biomass calculations have also been drawn in Finland (Hakkila, 1979), where, for the characterisation of the pine stem biomass with bark, it is recommended to correct or reduce the obtained biomass values by 2%, but for birch to increase the stem biomass by 0.5% thus implying identical bark and wood density differences. Similarly to Scots pine, it is reported that also Norway spruce bark density is less than that of wood (Hakkila, 1989) as well as it has been established that bark density constantly reduces in the direction towards the treetop. Erickson (1972) has studied the differences of basic density between stem bark and wood of various North American tree species in wood chip samples coming to the conclusion that aspen bark is much denser than wood but the bark density of all studied coniferous species has turned out to be less than that of wood.

Through the analysis of the difference between the bark and wood mean density in the longitudinal direction of stem it was found out that except aspen the density differences of other studied tree species remained significant ($p < 0.05$) along the entire stem (Figure 3.1). Only at the treetop of aspen stems (70–100% relative tree height) no significant bark and wood density differences were found. It can be explained by the fact that bark and wood density

variations in the longitudinal direction of stem do not follow the same trends as well as the range of density variations of aspen bark is slightly larger than that of other tree species in the study. Aspen bark density decreases in the direction of stem top; rapidly at the bottom of stem but only slightly at the top. However the wood density only decreases at the relative tree height of up to 30–40% but then in the direction towards the treetop it gradually increases. Also for other deciduous and coniferous species the bark density variations in the longitudinal direction of stem fail to comply with wood density variations. For individual tree species the difference of bark density between the stump and the treetop may reach 100 kg m^{-3} (Hakkila, 1989). For instance, pine bark density in the direction towards the treetop decreases but at the treetop it slightly increases. However, birch bark density in the direction towards the treetop increases but at the treetop it slightly decreases. For Norway spruce bark density decreases in the longitudinal direction of stem; at up to 10% of relative height the reduction is rapid but in the remaining part of stem the reduction is slight. Through the analysis of the data on bark density with linear regression method it has been established that the age of stand does not significantly influence the bark density for deciduous species, however, for Scots pine and Norway spruce the impact of age turned out to be statistically significant ($p < 0.001$).

Weighted average pine, spruce, birch and aspen stem wood basic density in the study is estimated respectively 397, 378, 470 and 393 kg m^{-3} (Table 3.2. tabula). The study has established that the stem wood density for pine, spruce and birch varies depending on the tree DBH. Therefore upon comparison of the density data with other study data, the dimensions of studied sample trees should be taken into account. Our results confirm that in the guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Eggleston et al., 2006) recommended density values for the calculation of Scots pine, Norway spruce and birch stem biomass lead to the overestimation of carbon stock in young stands because the density values of the guidelines only comply with trees whose DBH is larger than 20–30 cm or mature trees. However, for the estimation of aspen biomass the density of 350 kg m^{-3} recommended in IPCC guidelines is considerably lower than that established in our study indicating the underestimation of considerable biomass potential and carbon stock in the aspen stands of Latvia. The wood basic density values for European aspen given in references range from 376 kg m^{-3} to 403 kg m^{-3} (Heräjärvi & Junkkonen, 2006; Karki, 2001; Rytter et al., 2016; Smilga, 1988). The mean aspen wood density of 393 kg m^{-3} established in our study complies with the aforementioned density values.

Similarly to other tree species, there are also large differences of basic density in aspen wood but unlike for other discussed tree species it is more difficult to explain the density differences for aspen. It is likely that they are determined by complex impact of several traits. The study did not find any

statistically significant ($p > 0.05$) aspen mean stem wood and tree DBH, tree H, stand basal area as well as stand age correlation. Likewise, testing the impact of the social status of trees on the mean stem density using one-way ANOVA, no statistically significant ($p > 0.05$) differences were found. From all tree and stand parameters, which were registered within the framework of the study, the correlation of number of trees per hectare and aspen mean wood basic density turned out to be statistically significant ($p = 0.01$). Although the coefficient of correlation is small (-0.28), it indicates that those trees growing in stands with higher stocking have less density. A well-known fact is that in young stands the number of trees is larger and upon rapid growth young trees' stem wood is always less dense (Saranpää, 2003). At the age of 15, the ring width and growth speed of European aspen considerably decreases (Heräjärvi & Junkkonen, 2006). In general it has been proposed that the tree growth has little impact on *Populus* spp. wood density (Zhang, 1995; Zobel & Jett, 1995), which explains why the stated correlation between the number of trees and aspen wood mean density is relatively weak.

It is observed that pine and birch have explicit reduction of stem wood density in the direction towards the treetop (Figure 3.1) but in the radial direction density tends to increase towards bark (Figure 3.2).

Increasing the relative height of the tree the range of density variations in the cross-section of stem considerably decreases. For instance, pine at the relative height 10% and 20% has the most pronounced density variation, which in the cross-section of stem can reach even 126 kg m^{-3} , however, at the relative height 70% and 80% density variation is almost three times less without exceeding 47 kg m^{-3} . The density of birch at relative height 0–40% in the direction from pith to bark decreases on average by 105 kg m^{-3} , but at relative height 80% density decreases only by 63 kg m^{-3} . It is notable that for birch, regardless of the relative height of stem, density tends to decrease in the direction from pith to bark but for pine density in the radial direction increases up to a certain diameter and afterwards closer to the bark it slightly decreases. Similar observations in the south of Finland have also been made by Hakkila (1979) concluding that after reaching 80 years the pine stem density in the external part of sapwood slightly decreases.

For spruce and aspen density variations in the longitudinal direction of the stem are not so explicit as for pine and birch. Increasing the relative height of the tree the mean density up to the middle part of stem slightly decreases or remains constant but further on towards the treetop it increases (Figure 3.1). The lowest stem cross-sectional density for spruce (377 kg m^{-3}) and aspen (381 kg m^{-3}) is at the height of 3–6 m or at the relative tree height of 20–40%, which has been also observed in other studies (Heräjärvi & Junkkonen, 2006; Karki, 2001; Repola, 2006; Saranpää, 2003). Through analysis of spruce and aspen density variations in the direction from pith to bark it has been concluded

that alike for other studied tree species the least density is in the middle part of stem near pith (in juvenile wood). Likewise the range of density variations at the treetop of stem considerably decreases in comparison to the bottom of stem (Figure 3.3). It is interesting that juvenile wood does not have definite transition of its ending but its physical and mechanical properties, including density, considerably differ from outer wood (Saranpää, 2003).

Basic density variations in the longitudinal direction of stem, which differ from other studies, are reflected in trials of various stand density of Norway spruce (Johansson, 1993). In the mentioned study the drastic density fluctuations in the longitudinal direction of stem, especially, in the upper part of stem, could be explained by methodological differences of studies in wood density sampling. For instance, in this study density sampling has been done every 1 m or 2 m, depending on the tree length, but in the aforementioned study density sampling has been done only at the height of 0 m, 4 m, 7 m, 10 m, 13 m without indicating the total length of stem as well as the analysis has been conducted on trees of the same age. Also in other studies density sample discs have been sawn either from the butt end and small end of roundwood assortment of different lengths (Repola, 2006) or even at larger distances (Jyske et al., 2008; Wilhelmsson et al., 2002). Thus the obtained density values among the studies can slightly differ, especially, with regard to pine and birch whose density in the longitudinal direction of stem diminishes very fast.

In spruce and aspen stems at approximate relative height of 80% density is practically constant, the variations in radial direction not exceeding 8 kg m^{-3} . Similarly to pine, for aspen density increases up to a definite diameter at the stem base. Density reaches its maximum about 8–10 cm away from pith and afterwards slightly diminishes. This is an important finding that enables wood processors to choose the possibly strongest wood for special niche products. From the studied tree species density variations in spruce stem are the least and the densest wood finds itself in the external part of sapwood at the relative stem height of 10–40%. In comparison to other studied tree species aspen wood is the most homogeneous regarding the basic density since, contrary to pine and spruce, the impact of proportion of the early and late wood or tree ring width upon the wood density is comparatively small. In Latvia three forms of aspen were distinguished depending on the bark colour: green, light grey and dark grey, concluding that wood density of the green and light grey aspen is less than that of dark grey aspen (Smilga, 1967). In our study such division of aspen was not practised thus it was not possible to ascertain the impact of various aspen genotypes upon wood density.

3.2. Tree biomass estimates and equations development

A major part of forest stand biomass, which can form even up to 70% for individual trees, is constituted by non-stem components – branches and roots. Prior to the adoption of the Kyoto Protocol the data collection on non-stem biomass was not topical since the amounts of tree branch and root usage were small. Therefore the information about the amount of branch and root biomass at the disposal of many countries, including Latvia, can be regarded as fragmentary and the estimation methods for this part of biomass have been underdeveloped (Liepa & Blija, 2008).

Having analysed the proportion of various biomass components of the studied tree species in the total amount of biomass, it has been concluded that allometric relationships varies depending on the tree species and the age of forest stand. In most cases at the age of trees, indicated in Figure 3.4, the stem (wood and bark) is the largest biomass component, except for the first age class pines and spruces.

The largest proportion of stem component in final cutting has been observed for birch – 78.2%, but the least for spruce – 58%. It has been stated that only for pine and spruce of young stand age the branch biomass is larger than the stem biomass. The largest proportion of branches (totalling the mass of dry and live branches) in total tree biomass has been observed for up to 20-year old spruces; for all sample trees the proportion of branches was in the range 45.8–58.3% but on average 52.8%. For pine of identical age the total proportion of branch biomass is slightly smaller than for spruce – on average 45.5%, which is partially related to larger proportion of dry branches. Since pine is light-demanding tree species, then at the lower part of its crown due to the lack of light dying process of the lower branches starts early and the proportion of dry branches for up to 20-year old can reach even 4.4% of the total tree biomass. The proportion of dry branches for the analysed spruce sample trees under the age of 20 did not exceed 0.8% from the total tree biomass. In general a tendency for all tree species has been observed that the proportion of branch biomass diminishes as the tree grows older. For instance, the average proportion of branch biomass for mature spruce and pine, respectively 18.3% and 9.5%, is considerably smaller than for young trees. The aforementioned tendency is less pronounced for deciduous species; for birch the proportion of branches in the total biomass diminishes on average from 18.4% to 4.8% but for mature aspen upon growing older the proportion of branches decreases from 15.9% to 13.1%.

In the study the proportion of tree stumps, coarse roots and small roots from the total amount of biomass for all tree species together is on average approximately 20% and identical conclusions have also been made in Finland while determining the total belowground biomass of pine, spruce and birch

(Repola, 2013). For deciduous trees such as birch and aspen a larger belowground proportion is found in young trees but smaller – in mature trees. For their part, the opposite is found in coniferous species such as pine and spruce (Figure 3.4). For aspen the belowground biomass proportion, as the tree grows older, diminishes most rapidly from 27.6% on average within the first 10 years to 16.3% upon reaching final cutting. For birch the belowground biomass proportion within the first 10 years on average is 24.0% but at the final cutting only 16.9%. Regarding pine the average belowground biomass proportion, as the tree grows older, increases only slightly; within the first 20 years it is 17.6% but at the age of 101 — on average 17.7%; and presumably it is almost constant. At the final cutting the belowground biomass proportion of spruce, in comparison to other tree species, is the largest — on average 23.7% while under the age of 20 it is 18% on average. As the tree grows older, not only the total belowground biomass proportion but also the distribution of root biomass into components differs. Mostly affected is the proportion of small roots (diameter less than $< 2\text{cm}$), which for the first age class trees ranged from 5.4–10.2% but at the final cutting only from 1.0–3.9%.

IPCC (Eggleston et al., 2006) recommends to use the average root to shoot ratio or the default values of biomass conversion and expansion factors depending on the ecological zones. The values provided by the IPCC guidelines for temperate forests range from 0.20 for mature to 0.40 for young coniferous forests and respectively 0.24–0.46 for deciduous forests but for all boreal forests from 0.24–0.39. The values of root to shoot ratio obtained in our study range from 0.20–0.25 for pine, 0.21–0.30 for spruce, 0.23–0.34 for birch and 0.21–0.39 for aspen (Figure 3.5).

The study results suggest that the average values of root to shoot ratio of IPCC which are recommended for the calculation of biomass both in temperate and boreal forests overestimate the belowground biomass of young stands of Latvia. The largest overestimation of biomass takes place in coniferous young stands where aboveground biomass does not exceed $50\text{--}75\text{ t ha}^{-1}$. This is so because the values of root to shoot ratio recommended by IPCC for pine and spruce young stands exceed twice those estimated in our study. Partial explanation for it can be the aspect that the scientists do not hold a unified opinion on the place where the aboveground biomass is split from the belowground biomass of a tree. For the most part in studies this division of biomass components is based on a subjective border thus the mass of the stump aboveground part can be added to both the stem and the root biomass. Determining the root to shoot ratio, the potential aim of its use should be taken into account. From the physiological point of view the root to shoot ratio is interpreted so that it would reflect the differential contribution of photosynthesis between the aboveground and belowground biomass components of a tree (Titlyanova et al., 1999). In such case the ground surface

is an appropriate place for distinguishing between the aboveground and belowground biomass components. However, when calculating the wood mass, which has remained in the forest after logging or when describing the carbon flow between various sinks, it is essential to consider that after cutting of a tree the soil holds not only the remaining tree roots but also the aboveground part of the stump whose length might form about 1% of the tree height.

The average root to shoot ratio obtained for all tree species in the study is 0.25 and it is very close to the previously published values for temperate forests – 0.26 and boreal forests – 0.27 (Cairns et al., 1997). However our results confirm that the application of the average root to shoot ratio at the level of individual stands can result in erroneous biomass estimation because the ratio is influenced by both the age of stand and the average diameter of trees. Therefore, for the estimation of the root biomass of individual stands or trees it is more correctly and accurately to use allometric equations instead of constant ratios.

Excavation of all tree roots above 2 mm in diameter, which was conducted in this study, is an expensive and labour-consuming method and it has been performed to such extent in no other study. In practice most often the biomass of small roots for all sample trees is calculated by using regression equations, whose creation requires excavation of a limited number of sample trees (Repola, 2008, 2009) or excavation of only separate tree roots (Petersson & Stahl, 2006; Smith et al., 2016).

The results of various simulations suggest that, in order to characterize the aboveground biomass, it is recommended to study at least 40 sample trees with a regular form of stem for each tree species provided that the dimensions of trees conform to the whole population (Roxburgh et al., 2015). In our study the selection of sample trees for each tree species was planned so that it would cover a wide range of characteristics of forest stands and trees found in Latvia. In total data were obtained from 372 trees and there were 81–105 sample trees for each tree species. According to the NFI data, dominant trees, codominant trees and subdominant trees form 97% of the total forest growing stock volume in the Latvian forests substantiating the sample tree selection method used in the study. The proportion of other (suppressed and dying) trees in the total forest growing stock volume is relatively small therefore such trees were not selected and presumably it will not significantly affect the applicability of equations on a national scale.

The study results confirmed that the biomass equations of all tree species which included DBH and H as variables showed lower MAPE values indicating a lower average percentage prediction error. However, other statistical indicators (RMSE, AICc and R^2) showed that the inclusion of tree H in equations not always improved their prediction accuracy, especially, in the

estimation of total belowground and small root biomass of trees (Liepiņš et al., 2017).

The statistical tests applied in our study indicate that in most cases (except birch BGB) equation 2.3 in comparison to equation 2.1 and 2.2 is the most appropriate one for the estimates of biomass components of the studied tree species. This was observed especially for young trees, for which power equations (2.1 and 2.2) are not sufficiently flexible. Predicting biomass according to equation 2.1 for conifers residual deviation from the mean was the largest exactly for young trees with DBH less than 10 cm. However, the inclusion of H into the power functions (2.2) reduced the magnitude of the local prediction errors. Other authors have also found that non-power allometric equations better fit tree biomass data (Picard et al., 2015). Similar observations to our study on power functions are reported by Muukkonen (2007), estimating biomass for various European tree species and concluding in their studies that power functions are not sufficiently flexible for biomass estimate especially for trees with smaller diameter. A logarithmically transformed power function is not always applicable to all situations either although it usually yields plausible results for general biomass prediction (Claesson et al., 2001).

In the study the between- and within-stand variance has been analysed using a mixed model procedure. It was confirmed that, when calculating biomass according to expression 2.1, equations would be less precise if applied to biomass estimates outside the stand where sample trees had been sampled. The inclusion of tree H in power functions (expression 2.2) reduced the total variance of biomass calculations by 37% on average, considerably improving the accuracy of biomass calculations. The most correctly the variation of biomass in our study was characterized by equation 2.3 whose use in comparison to equation 2.1 reduced the variance by 61% on average in biomass calculations.

It is assumed that the biomass in the components of various tree species (branches, stem, roots) for the trees of the same dimensions varies across different stands and also within one particular stand. Our study confirmed the cognitions previously expressed in the literature (Claesson et al., 2001; Repola, 2008, 2009), saying that the uncertainty of biomass calculations across various stands is considerably smaller than within one particular stand. Therefore, when predicting the biomass according to the recommended equations, less uncertainty will be found in biomass estimates of the whole stand not individual trees.

When developing biomass equations, it is essential that the sum of separate tree biomass components is equal to the total biomass (Bronisz et al., 2016; Kozak, 1970; Repola, 2008, 2009). The sum of stem and branch biomass predicted in our study quite well conforms to the total aboveground biomass predictions therefore no additional procedures for ensuring the additivity of

biomass equations were adhered to. By using the recommended biomass equations, the sum of stem and branch biomass is on average larger for aspen by 0.2%, for birch by 0.5%, for spruce by 0.5% and for pine by 0.8% than the aboveground biomass predictions according to tree species. The obtained deviation in our study is similar to another study in Finland, in which the deviation after additivity correction for spruce was 2.3%, 3.7%, 4.5% but for pine 0.2%, 1.1%, 1.2% depending on the applied equation (Repola, 2009).

The equations of pine, spruce and birch aboveground biomass (AGB) and belowground biomass (BGB) derived within the study have been compared to the biomass equations developed in the Nordic countries whose usage has been accepted through preparation of the national inventory reports on LULUCF sector in the country. The data set of 2571 pine, 2671 spruce, 2379 birch and 2316 aspen trees measured in temporary circular plots in each selected stand was used as test material to compare the derived functions with the reference functions.

Aspen AGB estimated according to Johansson's models (Johansson 2000, 2002) resulted in substantial biomass overestimation for trees with DBH values larger than 35 cm in our data set. By contrast, birch BGB estimated using the function presented by Repola (2008) resulted in biomass underestimation of 46% for large trees (Table 3.3. tabula). In general pine, spruce and birch biomass equations developed in Sweden (Marklund, 1988; Petersson & Stahl, 2006) showed smaller MAPE values in comparison to the Finnish equations (Repola, 2009), indicating more accurate biomass estimation for our data set. The birch biomass functions developed by Smith (Smith et al. 2014, 2016) produced results that were most similar to our functions, which is supported by lower MAPE values.

Pine, spruce and birch AGB and BGB equations derived in the study are compared to the select equations of other countries, which have an identical definition of stump height to our study. An exception is aspen biomass equations in which the stump height is defined 10 cm from the ground surface (Johansson, 2002). A different definition of stump height might account for the fact that aspen AGB biomass according to Johansson (2000, 2002) equations for larger trees is heavily overestimated in comparison to our derived equation. Analysing birch BGB equation prediction accuracy depending on the applied equation, only Repola (2008) equation is characteristic of considerable deviation as the average tree DBH increases. It could be partly explained by the methodological differences of studies since in Repola's study roots were excavated with diameter of up to 10 mm but in other studies tree roots were excavated more carefully – the diameter of up to 2 mm.

Under the conditions of Latvia prediction accuracy of AGB and BGB equations of other countries, which are analysed within the dissertation, depends not only on the applied equation but also on the average tree diameter

(Table 3.3. tabula). In particular DBH groups the equations can predict the biomass more or less precisely. The equations of other countries reflect the biomass variations most correctly in diameter groups from 15–35 cm. For trees of small and large dimensions biomass calculations on average differ for more than 10% in comparison to the equations developed in our study, which can be partly explained with a lesser number of sample trees of particular dimensions in the studies abroad.

In relation to the well-known difficulties to predict the biomass of dry branches correctly due to the large variations of this biomass component (Zianis et al., 2005), we combined the biomass of living and dry branches within the study. The proportion of dry branches in the whole biomass of branches in our study for pine, spruce, birch and aspen was on average respectively 13.2%, 6.7%, 4.3% and 17.1%. No significant correlation of the proportion of birch dry branches with tree parameters DBH or H was observed in the study thus it can be concluded that, as tree dimensions alter, the proportion of dry branch biomass component for birch practically does not change. For other tree species, although the correlation ranges from weak to moderately strong, it is statistically significant ($p < 0.05$). The proportion of spruce dry branch biomass has the closest positive correlation with tree parameters DBH and H. In our study for individual spruces the proportion of dry branches in the biomass of all branches reached even 20%. Except for birch, for other tree species the least proportion of dry branches is in trees with DBH less than 10 cm. Since birch is explicitly light-demanding tree species, the lower branches begin dying earlier than for other tree species. Moreover, contrary to other tree species, for birch the correlation was negative, delineating the tendency for the proportion of dry branches to diminish along with the increase of tree DBH and H.

Residual analysis confirmed that the best equations were valid over the entire diameter range and, on the basis of the diversity of collected empirical materials, also to various conditions of tree growth. However, there are conditions under which the accuracy of the equations derived in the study is uncertain and unverified. The suitability of developed equations has not been verified for the calculations of the biomass of suppressed and dying trees yet since they were not included as sample trees in the study. As a result of mutual competition the suppressed and dying trees have developed a smaller green crown than the rest of the stand and it is predictable that the recommended biomass equations will overestimate the aboveground biomass of trees, especially, the biomass of branches. Likewise the sample trees were not selected in locations with a high water table in wet peat soils since on such sites qualitative data collection would be hampered. The restrictions should be kept in mind when calculating BGB biomass in peat soils since the biomass of tree roots, which have grown in such soils, usually is larger than in mineral soils

(Hakkila, 1972). Managed forest biomass prediction equations usually yield erroneous predictions in unmanaged and overgrown young stands (Repola & Ulvcróna, 2014). Therefore further research is required in order to evaluate the suitability of the equations developed within the study under such conditions.

Regardless of the empirical material usage restrictions, the comparison of biomass equations developed in our study with similar equations from the Baltic Sea region confirmed that the recommended equations also plausibly predicted the biomass for trees of larger dimensions than the surveyed sample trees. Within the scope of the study the largest DBH of a sampled tree for pine, spruce and birch ranged within 36.3–45.2 cm, but the maximum DBH of trees used in the validation of AGB and BGB equations was 57.3 cm.

3.3. Carbon stock in the forest stands of Latvia pursuant to the NFI data

In order to characterize the carbon stock in the forest stands of Latvia, NFI results 2012–2016 are used including the tree measurement data of the last two years of cycle II and the data of the first three years of cycle III. The selected period of calculations characterizes the carbon stock in stands of Latvia in 2016 and an identical period of calculations is also reflected in the report on GHG emissions and carbon stocks in the country, prepared by Latvia in 2018. The biomass equations of individual trees recommended in the study are used for biomass estimation applying them to each surveyed tree in NFI sample plots according to the species. In the report on carbon stocks in the country, prepared by Latvia in 2018, the carbon stock in forests is calculated from NFI stock volume, wood basic density and various biomass expansion factors (UNFCCC, 2018). In the calculations of carbon stocks in forest stands only NFI data on land classes (according to NFI classification code 10–14, 62, 64) are used pursuant to the forest land definition by UNFCCC and the Kyoto Protocol. All trees with diameter from 2.1 cm are measured in NFI arranged permanent sampling plots. Since biomass equations in the study have only been developed for four tree species most common in Latvia, the equations are applied to other species according to more similar values of stem basic density.

It has been estimated in the study that for the characterization of the carbon stock in forest stands across Latvia the weighted average carbon contents in tree biomass is $49.9\% \pm 0.006\%$, which has been calculated according to the recommended coniferous and deciduous carbon content values for temperate and boreal forests (Thomas & Martin, 2012) and the proportion of coniferous and deciduous biomass in the Latvian forests. The carbon content, used in the study, for conifers is 50.8% but for deciduous trees 48.8%. The carbon content for various tree components (stem, branches, roots) slightly

differ, however, due to the lack of detailed studies, identical carbon contents value is applied to all tree components according to the species.

The carbon stock in the biomass of the forest stands in Latvia in 2016 was 238.1 ± 3.5 mill.t (Figure 3.6). The largest proportion (79% or 187.8 mill.t) of it is accumulated in the aboveground part of trees but in stumps and roots about 50.3 mill.t. In the report on carbon stock in the state in compliance with UNFCCC guidelines, elaborated by Latvia, the carbon stored in forest stands in an identical period of calculation constitutes 237.0 mill.t, which, regardless of the differences in the doctoral thesis and the currently methodology, is very close to our estimates. The largest differences between both calculation methods can be explained by the different assumptions on the carbon contents in the living biomass. In our study the applied weighted average carbon contents in living biomass are 49.9%, while in the current methodology it amounts to 52.1%, thus increasing the total carbon stocks in the country. Through the application of carbon contents of living biomass which is used by current calculation methodology to our estimates, the carbon amount accumulated in the stands of Latvia would be larger by 10.5 mill.t or 4.2% and would amount to 248.1 mill.t. It indicates that the current calculation methodology underestimates the biomass of forest stands in Latvia.

Through the comparison of the results of studies conducted in Latvia the carbon contents in pine, spruce, birch and grey alder biomass components (stem, branches and roots) it has ranged within 47.2–51.7%. The usage of weighted average carbon contents 52.1% slightly exceeds the formerly stated values in Latvia, however, it should be noted that the studies in Latvia have mainly been conducted in young stands of these tree species and tree plantations in abandoned agricultural land. Since at the moment we lack information about the variation of carbon contents if distributed among tree species and biomass components across the entire hemiboreal forest region, the values of carbon contents (50.7–53.0% depending on tree species), which are used in the national GHG report of Latvia, should be verified and described in anonymously reviewed scientific publications before usage, which has not been done so far. Therefore, on the basis of other European countries' carbon contents assumptions, their calculation methodology and latest cognitions on carbon contents in temperate and boreal forests (Thomas & Martin, 2012), it would be advisable to reduce the carbon contents, used in the current Latvian calculation methodology, in living biomass to 48.8% for deciduous trees and 50.8% for conifers.

More biased carbon calculations for stands in Latvia have been obtained by applying the biomass conversion and expansion factors (BCEF) and root to shoot ratios for temperate and boreal forests, suggested in IPCC guidelines (Eggleston et al., 2006) (Figure 3.6). In order to assess the impact of the BCEF and root to shoot ratios suggested by IPCC guidelines on the carbon

calculations for stands, an identical assumption on the carbon contents in biomass has been applied to all methods. Through the use of BCEF and root to shoot ratio of temperate forest the carbon stocks of stands in Latvia are overestimated by 36.9% or 87.8 mill.t. In comparison to the biomass equations developed in the study, these BCEF and root to shoot ratio suitable for Southern Europe significantly overestimate the carbon, which is accumulated in the aboveground part of stands (by 42.9%), but underestimates carbon stock of belowground part of stands (by 14.4%). BCEF and root to shoot ratio of boreal forest suggested in the guidelines are just the opposite and their usage reduces by 5.2% or 12.3 mill.t the calculations of the carbon stored in stands in comparison to the calculation methodology used in this study. Through the use of BCEF and root to shoot ratio suitable for Northern Europe, a larger error occurs in the estimation of the belowground part of stands (- 8.5%) while the carbon stored in the aboveground biomass of stands is estimated a little more precisely (error - 4.3%).

The BCEF and root to shoot ratios of temperate forests are offered to Latvia in IPCC guidelines (Eggleston et al., 2006) according to the territorial location but the estimates of our study show that the usage of these values under the conditions of Latvia are not permissible. Already in 2013 in the course of the development of the doctoral thesis on the basis of partially collected empirical materials the BCEF and root to shoot ratios, suggested in IPCC guidelines, were corrected for Latvia because the tree biomass measurements evidenced significant discrepancies of BCEF and root to shoot ratios. Having added new empirical materials and upon the completion of the study “Impact of Forestry Activities upon Greenhouse Gas Emissions and Attraction of CO₂” in 2015, biomass calculation methodology was corrected once again. So far biomass conversion correction at various stages of calculation has allowed for gradual improvement of the carbon calculation methodology for stands in Latvia avoiding a significant overestimation risk of stored carbon. Due to the said reason the slight differences in the calculations of carbon stocks in Latvian forests between the methodology developed in the study and the current one are easy to be clarified since both the derived biomass equations and the BCEF values corrected by IPCC guidelines are based on the same empirical materials. It is proved that by using individual tree biomass equations along with NFI database it is possible to obtain more precise biomass predictions than by calculating the biomass from the total growing stock volume with BCEF (Neumann et al., 2016). Similarly to our calculations, the Swedish experience also shows that AGB of stands that is calculated by individual tree biomass equations is by 5% larger on average than that calculated from the data on forest growing stock volume (Jalkanen et al., 2005).

Latvian forest stands accumulate $67.4 \pm 0.6 \text{ t ha}^{-1}$ of carbon on average. The carbon stored in Latvian forest stands is more in comparison to the average

indicator in the European boreal forests (54.6 t ha^{-1}), but less in comparison to the average indicator (76 t ha^{-1}) in the European temperate coniferous forests (Thurner et al., 2014). Comparing the carbon stock of forest stands per hectare by the dominant tree species, it is concluded that most carbon is stored in pine stands, on average 89.2 t ha^{-1} . The carbon amounts stored in spruce, birch and aspen stands are a little less than for pine, respectively 79.3 t ha^{-1} , 62.9 t ha^{-1} and 69.1 t ha^{-1} . To a certain extent it is logical since the average age of pine stands in Latvia is 73 years, which is much more than for spruce, birch and aspen stands whose average age is respectively 46, 39 and 31 years.

According to NFI data, the conclusion is made that the carbon accumulated in Latvian forest stands has increased over last ten years. If year 2008 is assumed as a point of reference, the carbon stock accumulated in the forest stands of the country has increased by approximately 8 mill.t, from 233.1–241.2 mill.t (Figure 3.7).

If the results of the NFI first and second full cycle are compared, it is concluded that the increase in the country's carbon stock is not explained only by the increase of forest areas in the country since the accumulated carbon amount per hectare has increased. According to the sampling plots surveyed within the framework of the NFI first cycle, it has been estimated that in stands on average $65.8 \pm 0.6 \text{ t ha}^{-1}$ of carbon has been accumulated but in 5 years upon recurrent survey of the same sampling areas it is calculated that the average carbon stock has increased to $67.1 \pm 0.6 \text{ t ha}^{-1}$. Partially the increase in carbon stock might be related to the increase of the average age, which in an identical period of calculation has slightly increased - from 43.9 ± 0.3 to 44.2 ± 0.3 years. However, the evaluation of the tendencies of average age variations according to the five-year moving mean values shows that the average age tends to decrease but the accumulated carbon per hectare has constantly grown.

With regard to the background of carbon stocks of forest stands in Latvia, the assumption in the calculations of this study goes that the tree stems are without decay. In fact, there are decayed and hollow trees in forest stands, which reduces the actual carbon stock. In the studies in Latvia it has been established that in spruce stems depending on the stand age the proportion of decayed wood from the total growing stock volume ranges within 6% at the age of 40 to 16% at the age of 100 (Arhipova et al., 2011). In 2008 within the framework of the state research programme "Substantiation of Growing and Rational Usage of Deciduous Trees, New Products and Technologies" upon analysis of 45–70-year old aspen stands under L. Līpiņš' guidance the occurrence of butt rot in 78% trees has been stated and clarification has been found that the volume of rot from the total stem volume can even exceed 50%. Similar conclusions are also made in the study on the incidence of American aspen (*Populus tremuloides*) decay, in which the decay has been observed in

80% of trees in 20–50 year old stands and the volume overtaken by decay can amount to 40% of the entire stem volume (Worrall & Fairweather, 2009).

If the carbon stored in the forest stands of Latvia is calculated by selecting NFI sampling areas in compliance with the requirements of UNFCCC and the Kyoto Protocol, the carbon stock is by 3.1 mill.t less than in case if all NFI sampling areas with growing trees are used in calculations. The difference occurs if the carbon stored in forest stand biomass on such land units as roadsides, ditches, river banks, glades, etc. is included in other land category (construction, wetland, meadow, etc.) not forest land in compliance with the requirements of UNFCCC and the Kyoto Protocol. Although the difference of calculations is only 1.3%, it is necessary to update the calculation method when describing the forest stands as carbon stock.

CONCLUSIONS

1. Pine and birch are observed to have pronounced reduction of stem wood basic density in the direction towards the treetop. For spruce and aspen the wood density diminishes up to the relative tree height of 30–40% and gradually increases further on towards the treetop. In stem cross-section for tree species the density increases in the direction from pith to bark.
2. The mean bark density of the stem for the tree species significantly differs from the average wood density. The usage of average wood density in the calculations of whole stem biomass accounts for 1.5–4.5% of errors on average depending on the tree species. The weighted average stem basic density for pine is 380.5 kg m^{-3} , for spruce 368.9 kg m^{-3} and for birch 481.7 kg m^{-3} and aspen 399.4 kg m^{-3} .
3. The root to shoot ratio varies depending on the tree DBH therefore the usage of constant ratios may account for a systematic error in the calculations of carbon stock. The average proportion of stump, coarse roots and small roots in the total biomass of all tree species is 20%. For birch and aspen a larger belowground proportion is found in young trees but for pine and spruce – in mature trees.
4. The usage of biomass equations derived in Fennoscandia under the conditions of Latvia accounts for 4.7–61.7% of errors depending on the tree species and the aboveground and belowground biomass component. Therefore, for the characterization of carbon stocks in forest stands, within the framework of the dissertation biomass equations suitable for the territory of Latvia have been developed and they are to be used within a wider range of tree dimensions.
5. The temperate forest biomass conversion and expansion factors (BCEF) and root to shoot ratios, suggested in GHG inventory guidelines 2006 of the

Intergovernmental Panel on Climate Change, increase the carbon stocks of the stands in Latvia by 36.9% or by 87.8 mill.t, but the usage of boreal forest biomass BCEF and root to shoot ratios decreases the calculations of carbon stock by 5.2% or 12.3 mill.t in comparison to the equations derived in our study.

6. According to the forest land definition used in GHG emission reports, the carbon stock in the biomass of the forest stands in Latvia in 2016 was 238.1 ± 3.5 mill.t.