

LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
MEŽA FAKULTĀTE
LATVIA UNIVERSITY OF AGRICULTURE
FOREST FACULTY

LATVIJAS VALSTS MEŽZINĀTNES INSTITŪTS “SILAVA”
LATVIAN STATE FOREST RESEARCH INSTITUTE “SILAVA”

Mg. silv. ANDIS BĀRDULIS

SAKŅU BIOMASAS IZPĒTE SAUSIĒŅU PRIEŽU
(*PINUS SYLVESTRIS L.*) JAUNAUDZĒS

BELOWGROUND BIOMASS OF YOUNG SCOTS PINES
(*PINUS SYLVESTRIS L.*) IN FOREST TYPES ON DRY MINERAL SOILS

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Dr. silv. zinātniskā grāda iegūšanai

SUMMARY OF ACADEMIC DISSERTATION
for acquiring the Doctor`s degree of Forest sciences



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Eiropas Sociālā fonda projekts
Nr. 2009/0180/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/017

Promocijas darba zinātniskais vadītājs:
Supervisor:

Imants Liepa
prof. Dr. habil. biol.

Pētnieciskais darbs izpildīts Latvijas Valsts Mežzinātnes institūtā „Silava” un Latvijas Lauksaimniecības universitātes, Meža fakultātē laika posmā no 2009. – 2013. gadam. Doktora studiju laiks Latvijas Lauksaimniecības Universitātes Meža fakultātē no 2010. – 2013. gadam. / *The research work was carried out at Latvian State Forest Research Institute „Silava” and Latvia University of Agriculture, Forest Faculty in the period of time from 2009 till 2013. The period of doctoral studies at the Forest faculty of the Latvia University of Agriculture from 2010 till 2013.*

Oficiālie recenzenti: / *Official reviewers:*

- *Dr. chem. Andris Morozovs* – Latvijas Lauksaimniecības universitātes asociētais profesors, LZP eksperts / *Asoc. professor of Latvia University of Agriculture, Expert of the Latvian Council of Science;*
- *Dr. sc.ing. Māris Daugavietis* – Latvijas Valsts mežzinātnes institūta „Silava” vadošais pētnieks, LZP eksperts / *Senior Researcher of Latvian State Forest Research Institute „Silava”, Expert of the Latvian Council of Science;*
- *Dr. Ivika Ostonen* – Tartu universitāte, Zinātnes un Tehnoloģiju fakultāte, Ekoloģijas un Zemes zinātņu institūta vadošā pētniece augu ekoloģijā un ekofizioloģijā / *University of Tartu, Faculty of Science and Technology, Senior Researcher of Institute of Ecology and Earth Sciences in plant ecology and ecophysiology.*

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda projekta Nr. 2009/0180/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/017 atbalstu. / *The Doctoral thesis has been worked out by the support of ESF project No. 2009/0180/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/017*

Promocijas darba aizstāvēšana notiks LLU Mežzinātņu un Materiālzinātņu nozares promocijas padomes atklātā sēdē **2013. gada 27. decembrī plkst. 11.00** Jelgavā, Dobeles ielā 41, sēžu zālē. / *To be presented for public criticism in an open session of the Promotion Council of Forest Sciences and Material Sciences of Latvia University of Agriculture held on **December 27, 2013 at 11.00 a.m.** in LUA Department of Wood Processing, Jelgava, Dobeles street 41.*

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu var iepazīties LLU Fundamentālajā bibliotēkā Lielā iela 2, Jelgava, LV-3001 vai http://llufb.llu.lv/promoc_darbi.html. Atsauksmes sūtīt LLU Mežzinātņu un Materiālzinātņu nozares promocijas padomes sekretāram LLU Meža fakultātes profesoram *Dr. sc. ing. A. Drēskam*, Akadēmijas iela 11, Jelgava, LV-3001, Latvija vai mfdek@llu.lv. / *The Doctoral thesis and its summary can be found at the Fundamental library of LUA, 2 Lielā street, Jelgava, LV-3001 or at http://llufb.llu.lv/promoc_darbi.html. Please, send your feedback to LUA Forest Sciences and Material science Promotion Council secretary professor of Forest faculty *Dr. sc. ing. A. Drēska* at 11 Akadēmijas street, Jelgava, LV-3001, Latvia or at mfdek@llu.lv.*

Saturs

1. Darba vispārīgs raksturojums	5
1.1. Tēmas aktualitāte	5
1.2. Pētījuma mērķis.....	6
1.3. Pētnieciskie uzdevumi.....	6
1.4. Pētījumā izvirzītā hipotēze	6
1.5. Zinātniskā novitāte	6
1.6. Praktiskā novitāte	7
1.7. Promocijas darba struktūra un apjoms	7
1.8. Zinātniskā darba aprobācija.....	8
2. Materiāls un metodes	11
3. Rezultāti un diskusija	16
3.1. Uzsūcošo sakņu morfometriskais novērtējums parastās priedes jaunaudzēs	16
3.2. Parastās priedes sīko sakņu un balstsakņu morfometriskais novērtējums meža zemēs	17
3.3. Parastās priedes sīko sakņu un balstsakņu morfometriskais novērtējums lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos	18
3.4. Parastās priedes uzsūcošo sakņu biomasas izvērtējums dažādos vides apstākļos	19
3.5. Sīko sakņu biomasas salīdzinājums dažādos vides apstākļos parastās priedes jaunaudzēs	21
3.6. Balstsakņu biomasas salīdzinājums dažādos vides apstākļos parastās priedes jaunaudzēs	23
3.7. Celma biomasas salīdzinājums dažādos vides apstākļos parastās priedes jaunaudzēs	24
3.8. Mitruma izmaiņas parastās priedes sakņu frakcijās dažādu vides apstākļu ietekmē ...	26
3.9. Parastās priedes sakņu blīvuma salīdzinājums dažādos vides apstākļos.....	27
3.10. Parastās priedes dažādu sakņu frakciju biomasas pārrēķina koeficientu noteikšana	27
3.11. Oglekļa saturs parastās priedes sakņu biomasā.....	29
3.12. Sakņu biomasas aprēķina vienādojuma analīze parastās priedes sakņu biomasas frakcijām.....	30
4. Secinājumi	32

Table of content

1. General description of the paper.....	34
1.1. Topicality.....	34
1.2. Aim of the research.....	35
1.3. Research tasks.....	35
1.4. Proposed hypothesis.....	35
1.5. Scientific novelty.....	35
1.6. Practical novelty.....	36
1.7. Structure and volume of doctoral thesis.....	36
2. Material and methods.....	37
3. Results and discussion.....	41
3.1. Morphometric evaluation of Scots pine fine roots.....	41
3.2. Morphometric evaluation of Scots pine small roots and coarse roots in forest land ...	42
3.3. Morphometric evaluation of Scots pine small roots and coarse roots in afforested abandoned agricultural land.....	42
3.4. Scots pine fine root biomass evaluation in different environmental conditions.....	43
3.5. Comparison of small root biomass in Scots pine different environmental conditions.....	44
3.6. Comparison of Scots pine coarse root biomass in different environmental conditions.....	44
3.7. Comparison of Scots pine stump biomass in different environmental conditions.....	45
3.8. Changes in humidity in Scots pine root fractions under the influence of different environmental conditions.....	46
3.9. Comparison of Scots pine root density in different environmental conditions.....	46
3.10. Calculation of different Scots pine root fraction biomass transition ratios.....	47
3.11. Carbon content in Scots pine root biomass.....	47
3.12. The analysis of root biomass calculation equation for Scots pine root biomass fractions.....	49
4. Conclusions.....	49

1. Darba vispārīgs raksturojums

1.1. Tēmas aktualitāte

Ekosistēmas kā noteiktas augu, dzīvnieku un mikroorganismu kompleksa ilgtspējība galvenokārt atkarīga no dabiskās vides (klimata, augsnes) un cilvēku darbības ietekmes. Viens no būtiskākajiem cilvēka saimnieciskās darbības ietekmējošiem faktoriem uz vidi ir gaisa piesārņojuma palielināšanās, kas ievieš korekcijas augu attīstības režīmā. Pašlaik zinātnieku uzmanības lokā ir vairākas problēmas, no kurām aktuālākā iezīmējas oglekļa dioksīda (CO₂) daudzuma palielināšanās atmosfērā, kas izraisa globālo sasilšanu.

Palielināts CO₂ atmosfērā (siltumnīcas efekts) izraisa izmaiņas augu augšanā, līdz ar to palielinās arī atmirušo augu un meža nobiru daudzums. Ir veikti daudzi pētījumi klimata pārmaiņu kontekstā, tajā skaitā par oglekļa (C) uzkrāšanos koku biomasā. Jāatzīmē, ka pētnieki nav vienprātīgi par siltumnīcas efekta izraisītajiem cēloņiem. Tomēr, jo vairāk siltumnīcas efektu izraisošu gāzu nokļūst atmosfērā, jo siltāks būs Zemes klimats.

Lai daļēji mazinātu cilvēka darbības negatīvās sekas, pasaules valstu valdības, ieklausoties zinātnieku atziņās, ir izstrādājušas virkni lēmumu, kuru izpilde samazinās klimata izmaiņu nelabvēlīgo ietekmi uz vidi, tai skaitā meža ekosistēmu darbību. Klimata pārmaiņu jomā ir pieņemti daudzi Eiropas Savienības (ES) tiesību akti, kuru saistības ir jāpilda arī Latvijai. Viens no tiem ir Eiropas Parlamenta un Padomes 2003. gada 13. oktobra Direktīva 2003/87/EK, ar kuru nosaka siltumnīcefekta gāzu emisijas (SEG) kvotu tirdzniecības sistēmas izveidi Kopienā. Direktīva izveidota, lai palīdzētu ES dalībvalstīm pildīt savas starptautiskās emisiju samazinājuma saistības ekonomiski visizdevīgākajā veidā, kā arī nodrošinātu Eiropas Savienības kopējo saistību izpildi.

Atbilstoši Meža statistiskās inventarizācijas datiem Latvijas meži aizņem 3290288 ha jeb 50,9% no valsts teritorijas kopplatības, tajā skaitā audzes, kur valdošā suga ir *Pinus sylvestris* L. (parastā priede) – 1009170 ha jeb 35% no mežaudžu kopplatības. Attiecīgi parastās priedes jaunaudzes no valsts kopējās mežu platības aizņem 15% un ir būtiska C krātuve. Latvijā pēc neatkarības atjaunošanas un izmaiņām agrārajā politikā lielas lauksaimniecības zemju platības ir neapsaimniekotas, un šobrīd vairāk nekā 310 tūkst. ha šo zemju ir stādot apmežotas vai arī dabiski apmežojušās. Šobrīd jau vairums jaunaudžu ir sasniegušas 10 – 15 gadu vecumu, un ir sākusies nozīmīga C piesaiste saražotajā koksne.

Latvijā dažādu apstākļu rezultātā lauksaimniecības zemes apmežojas vai tiek apmežotas, veidojot dažādu koku sugu mežaudzes. Meža zemēs, kā arī lauksaimniecības zemēs parastā priede iesējās gan dabiski, gan tiek atjaunota stādot, tāpēc svarīgi ir atbildēt uz jautājumu, cik daudz ogleklis tiek saistīts parastās priedes sakņu biomasā, it īpaši pēdējo gadu periodā, kad ievērojami pieaugušas aktivitātes meža atjaunošanā un ieaudzēšanā.

Oglekļa dioksīda piesaiste mežā norisinās fotosintēzes procesā. Noskaidrojot koksnes vidējo mitrumu, virszemes un pazemes biomasas attiecību vērtības, var aprēķināt, cik liels C daudzums tiek piesaistīts mežaudzēs. Latvijā šobrīd iztrūkst dati par C apriti un uzkrāšanos, sevišķi sakņu biomasā mežaudzēs un dabiski apmežojušās vai stādītās mežaudzēs lauksaimniecībā neizmantotās zemēs (LNZ). Tāpēc pētījumi šajā virzienā ļauj iegūt plašāku priekšstatu par C apriti dabā, vienlaicīgi iegūstot datus par oglekļa uzkrāšanos dažāda vecuma audzēs.

Gadsimtiem ilgi ir bijis pieprasījums pēc stumbra frakcijas vērtējuma tilpuma vienībās. Tāpēc meža taksācijā ir izstrādātas daudzas viegli lietojamas un precīzas atsevišķu koku stumbru tilpumu un koku kopu krājas noteikšanas metodes. Zinot koksnes blīvuma vērtības, ir iespējams tilpuma vērtējumu pārrēķināt masas vienībās. Problemātiska ir nestumbru frakciju biomasas noteikšana, kur esošās metodes nav piemērotas šo frakciju tilpuma aprēķināšanai.

1.2. Pētījuma mērķis

Sakņu biomasas un oglekļa uzkrāšanās izpēte parastās priedes (*Pinus sylvestris* L.) jaunaudzēs.

1.3. Pētnieciskie uzdevumi

1. Sakņu biomasas un morfometrisko parametru izpēte parastās priedes jaunaudzēs meža zemju un lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos;
2. Oglekļa uzkrāšanās salīdzinājums sakņu biomasā parastās priedes jaunaudzēs atšķirīgu vides faktoru ietekmē;
3. Vienādojumu un pārrēķinu koeficientu izstrāde parastās priedes jaunaudzēs dažādu sakņu biomasas frakciju aprēķināšanai.

1.4. Pētījumā izvirzītā hipotēze

Promocijas darbā ir izvirzīta sekojoša hipotēze: koku biomasas sastāvdaļu attiecības ir bioloģiski noteiktas, un to biomasu var aprēķināt kā funkciju no viegli izmērāmiem koka parametriem.

1.5. Zinātniskā novitāte

Meža zemēs, kā arī lauksaimniecības zemēs priede iesējas gan dabiski, gan tiek atjaunota stādot, tāpēc, lai atbildētu uz jautājumu, cik ogleklis tiek saistīts priedes sakņu biomasā, nozīmīgi ir veikt parastās priedes sakņu biomasas un oglekļa uzkrāšanās izpēti dažādos vides apstākļos.

Latvijā šobrīd iztrūkst dati par oglekļa apriti un uzkrāšanos, sevišķi sakņu biomasā mežaudzēs un dabiski apmežojušās vai stādītās mežaudzēs lauksaimniecībā neizmantotajās zemēs. Tāpēc pētījumi šajā virzienā ļauj iegūt plašāku priekšstatu par oglekļa aprites ciklu, vienlaicīgi iegūstot datus par oglekļa uzkrāšanos dažāda vecuma audzēs. Gadsimtiem ilgi ir bijis pieprasījums pēc stumbra frakcijas vērtējuma tilpuma vienībās. Tāpēc meža taksācijā ir izstrādātas daudzas viegli lietojamas un precīzas atsevišķu koku stumbru tilpumu un koku kopu krājas noteikšanas metodes. Zinot koksnes blīvuma vērtības, ir iespējams tilpuma vērtējumu pārrēķināt masas vienībās. Problemātiska ir sakņu frakcijas biomasas noteikšana, kur šī metodika nav piemērojama. Tāpēc ir nepieciešami pētījumi, lai izstrādātu pilnvērtīgus aprēķina modeļus sakņu frakcionālās biomasas aprēķināšanai. Šobrīd Latvijā trūkst dati par sakņu biomasu dažādās sakņu frakcijās meža zemju un lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos.

1.6. Praktiskā novitāte

Atbilstoši starptautiskajām saistībām (Latvijas Republikas Saimā ratificēts 2002. gadā), Latvijai FAO (*The Food and Agriculture Organization of the United Nations*) jāiesniedz pārskats par Kioto protokola īstenošanas gaitu. Pārskata dati ir pamats SEG kvotu starpvalstu sadalei. Katra valsts ir finansiāli ieinteresēta SEG apjoma samazināšanā, kas sasniedzama, palielinot valsts teritorijas C piesaistes apjomus, galvenokārt, apmežojot lauksaimniecībā neizmantotās zemes un veicinot meža produktivitātes paaugstināšanu. Kā vienā, tā otrā gadījumā ievērojamu oglekļa piesaistes daļu veido kokaugu sakņu biomasas. Izstrādājot iespējas tās noteikšanai, tiks piedāvāta atbilstoša metodika precizētai Nacionālā ziņojuma sastādīšanai.

1.7. Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darba **pirmajā** nodaļā apkopotas līdzšinējo pētījumu atziņas par parastās priedes sakņu biomasu, sakņu attīstību ietekmējošajiem faktoriem, kā arī oglekļa piesaisti sakņu biomasā. Nodaļā detalizēti analizēta literatūra par kokaugu biomasas frakcionālo iedalījumu, sakņu biomasas attīstību un ietekmējošajiem faktoriem, biomasu dažādos vides apstākļos, oglekļa aprites ciklu mežaudzēs un oglekļa uzkrāšanos sakņu biomasā dažādos vides apstākļos, sakņu biomasas pārrēķinu koeficientu noteikšanu, kā arī apkopota informācija par līdz šim izstrādātajiem sakņu biomasas aprēķinu vienādojumiem.

Otrajā nodaļā aprakstīts pētījuma materiāls un metodika.

Trešajā nodaļā atspoguļoti pētījuma rezultāti un to analīze, kā arī veikta rezultātu interpretācija. Rezultātu atspoguļošanai nodaļā ir iekļautas apakšnodaļas un paragrāfi. 3.1. apakšnodaļā ir veikts morfometrisko parametru novērtējums dažādām sakņu frakcijām atšķirīgos meža vides apstākļos. Savukārt paragrāfos 3.1.1. analizēti uzsūcošo sakņu, bet 3.1.2. sīko sakņu un balstsakņu morfometriskie parametri meža zemēs.

Parastās priedes sakņu biomasas izvērtējums dažādos meža vides apstākļos atspoguļots 3.2. apakšnodaļā. Apakšnodaļā iekļauti četri paragrāfi, kuros ir veikta sakņu biomasas izpēte dažādām frakcijām meža zemēs. Attiecīgi 3.2.1. paragrāfā analizēta uzsūcošo sakņu biomasas, 3.2.2. sīko sakņu biomasas, 3.2.3. balstsakņu biomasas, 3.2.4. celma biomasas un 3.2.5. paragrāfā analizēta kopējā sakņu biomasas meža zemēs.

Apakšnodaļā 3.3. novērtēti parastās priedes dažādu sakņu frakciju morfometriskie rādītāji lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos. Paragrāfā 3.3.1. veikts uzsūcošo sakņu morfometrisko parametru novērtējums, bet paragrāfā 3.3.2. sīko sakņu un balstsakņu morfometriskais novērtējums lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos.

3.4. apakšnodaļā veikts parastās priedes sakņu biomasas izvērtējums dažādos meža vides apstākļos lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos. Paragrāfā 3.4.1. uzsūcošo sakņu biomasas izvērtējums lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos, 3.4.2. sīko sakņu biomasas izvērtējums, 3.4.3. balstsakņu biomasas izvērtējums, 3.4.4. celma biomasas izvērtējums un 3.4.5. kopējais sakņu biomasas salīdzinājums.

Apakšnodaļā 3.5. novērtētas mitruma izmaiņas parastās priedes sakņu frakcijās dažādu vides apstākļu ietekmē, savukārt 3.6. apakšnodaļā parastās priedes sakņu blīvums

dažādos vides apstākļos. Apakšnodaļā 3.7. noteikti un izvērtēti parastās priedes dažādu sakņu frakciju biomasas pārrēķina koeficienti meža zemēs un lauksaimniecībā neizmantojamās zemēs. Savukārt 3.8. apakšnodaļā analizēts oglekļa saturs parastās priedes dažādās sakņu frakcijās, kā arī salīdzināts oglekļa saturs starp dažādām sakņu biomasas frakcijām skujkokiem un lapu kokiem. Attiecīgi apakšnodaļā 3.9. veikta sakņu biomasas aprēķinu vienādojuma analīze dažādām parastās priedes sakņu biomasas frakcijām.

Promocijas darba apjoms ir 130 lapaspuses, informācija apkopota 24 tabulās un 85 attēlos, 3 pielikumos un izmantoti 145 literatūras avoti.

1.8. Zinātniskā darba aprobācija

Pētījuma rezultāti apkopoti 13 publikācijās, kuras ir ievietotas starptautiskos un vietējos zinātniskajos rakstu krājumos, kā arī konferenču tēžu krājumos. Pētījuma rezultāti prezentēti 17 starptautiskās zinātniskajās un vietējas nozīmes konferencēs.

Publikācijas par darba tēmu vispārārtzītajos recenzējamajos zinātniskajos izdevumos

1. Bārdulis A., Jansons Ā., Liepa I. (2011) Fine root biomass and morphology in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) young stands. **In:** *Proceedings of the annual 17th International Scientific Conference „Research for Rural Development 2011”*. Jelgava, 18-28 May 2011. Latvia: Latvia University of Agriculture. Vol.2, p.17-22. (AGRIS; SCOPUS; EBSCO; CAB Abstracts)
2. Bārdulis A., Jansons Ā., Liepa I. (2012) Below-ground biomass production in young stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on abandoned agricultural land. **In:** *Proceedings of the Annual 18th International Scientific Conference „Research for Rural Development 2012”*. Jelgava, 16-18 May 2012. Latvia: Latvia University of Agriculture. Vol.2, p.49-54. (AGRIS; SCOPUS; EBSCO)
3. Bārdule A., Lazdiņš A., Bārdulis A., Lazdiņa D., Jeļena S. (2012) Meža nobiru frakcijas un to ķīmiskais sastāvs priežu (*Pinus sylvestris* L.) audzē 2. līmeņa meža monitoringa parauglaukumā. *Latvijas Lauksaimniecības Universitātes Raksti*, Nr.27 (322), 16.-21.lpp. (AGRIS; EBSCO; CAB Abstracts)
4. Bārdulis A., Daugaviete M., Lazdiņš A., Bārdule A., Liepa I. (2011) Biomasas struktūra un oglekļa uzkrāšanās virszemes un sakņu biomasā baltalkšņa (*Alnus incana* (L.) Moench.) jaunaudzēs lauksaimniecības zemēs. *Mežzinātne*, Nr.23 (56), 71.-88.lpp. (AGRIS; EBSCO; CAB Abstracts)

Pārējās publikācijas par promocijas darbu

1. Bārdulis A., Daugaviete M., Komorovska A., Liepiņš K., Teliševa G. (2009) Studies on the development of root systems in young forest stands of deciduous trees in naturally-afforested agricultural lands. **In:** *International Symposium „Root Research and Applications”*. Abstract book. Vienna, Austria, 2-4 September 2009. Institute of Hydraulics and Rural Water Management, Department of Water, Atmosphere and Environment, BOKU, p. 41.
2. Bārdulis A., Daugaviete M., Bārdule A., Lazdiņš A. (2010) The biomass production in above and under – ground grey alder (*Alnus incana* L. Moench) young stands. **In:** *Proceedings of the 3rd International Scientific Conference of Vidzeme University of*

- Applied Sciences and Nature Conservation Agency North Vidzeme Biosphere Reserve „Solutions on Harmonizing Sustainability and Nature Protection with Socio-Economic Stability”*. Valmiera, 19-20 August 2010. Latvia: Vidzeme University of Applied Sciences, p.17-18.
3. Bārdulis A., Liepa I. (2011) Fine-root biomass and morphology of sapling Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. **In:** *6th International Scientific Conference „Students on their Way to Science”*. Abstract book. Jelgava, 27 May 2011. Latvia University of Agriculture, Faculty of Social Sciences, Faculty of Engineering, Forest faculty, p.34. (AGRIS; Elektron. Katalogs)
 4. Bārdulis A., Daugaviete M., Bārdule A. (2011) Root biomass and carbon accumulation of sapling grey alder (*Alnus incana*) stands in naturally-afforested agricultural lands. **In:** *Cost Action (FP803) Carbon Balance after Disturbances and Drought Conference „Carbon Balance after Disturbances and Drought”*. Abstract book. Barcelona, Spain, 27-30 June 2011. COST, CREAM, p.25.
 5. Bārdulis A., Jansons Ā., Liepa I. (2011) Fine root distribution of sapling Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. **In:** *Proceedings of the 7th International Symposium „Structure and Functions of Roots”*. Novy Smokovec, High-Tatras, Slovakia, 5-9 September 2011. Department of Plant Physiology, Faculty of Natural Sciences, Institute of Botany, Slovak Academy of Sciences, p.26. (Elektron. Katalogs)
 6. Bārdulis A., Jansons Ā., Liepa I. (2012) Carbon accumulation in root biomass in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) young stands of forested areas. **In:** *17th International Scientific Conference „EcoBalt 2012”*. Riga, 18-19 October 2012. Latvia: University of Latvia, p.14. (Elektron. Katalogs)
 7. Bārdulis A., Jansons Ā., Liepa I. (2012) Fine root biomass and carbon accumulation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand. **In:** *Cost Action (FP803) Carbon Balance after Disturbances and Drought Conference Cost Action FP803 „Belowground Carbon Turnover in European Forests”*, Adana, Turkey 28 October-1 November 2012. COST, University of Cukurova, Faculty of Agriculture, p.71.
 8. Bārdulis A., Jansons Ā., Liepa I., Bārdule A., Daugaviete M. (2013) Effects of soil preparation and regeneration on *Pinus sylvestris* root development. **In:** *Cost Action (FP803) „Belowground Carbon Turnover in European Forests” – Final Conference*, Bordeaux, France, 13-15 May 2013, p.23.
 9. Bārdulis A., Jansons Ā., Liepa I., Bārdule A. (2013). Carbon accumulation in root biomass and root morphology aspects of young scots pine stands in flat land of Zemgale in Latvia. **In:** *International Baltic Sea Region Scientific Conference „Interdisciplinary Research for Higher Socioeconomic Value of Forests”*, Riga, 10-12 June 2013. SNS, EFI Associated event, LVMI „Silava”, Latvijas valsts meži, p.58-59.

Piedalīšanās starptautiskajās konferencēs

1. International Scientific Conference of the Vidzeme University of Applied Science and Nature Conservation Agency North Vidzeme Biosphere Reserve „Solutions on Harmonising Sustainability and Nature Protection with Socio-Economic Stability”, 19-20 August 2010, Valmiera, Latvia. Stenda referāts: Bārdulis A., Daugaviete M., Bārdule A., Lazdiņš A.. The biomass production in above and under - ground grey alder (*Alnus incana* L. Moench) young stands.

2. 6th International Scientific Conference „Students on their way to science”, 27 May 2011, Jelgava, Latvia. Referāts: Bārdulis A., Liepa I. Fine-root biomass and morphology of sapling scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands.
3. Annual 17th International Scientific Conference „Reserch for Rual Development 2011”, 18-28 May 2011, Jelgava, Latvia. Referāts: Bārdulis A. Fine-root biomass and morphology in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) young stands.
4. Cost action FP803 Conference „Carbon balance after disturbances and drought”, 27-30 June 2011, Barcelona, Spain. Stenda referāts: Bārdulis A., Daugaviete M., Bārdule A. Root biomass and carbon accumulation of saipling grey alder (*Alnus incana*) stands in naturally-afforested agricultural lands.
5. 7th International Symposium „Structure and Function of Roots”, 5-9 September 2011, Novy Smokovec, High -Tatras, Slovakia. Stenda referāts: Bārdulis A., Jansons Ā, Liepa I. Fine root distribution of sapling Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands.
6. International Conference “Genetic variation of adaptive traits”, 30 November-1 December, 2011, Salaspils, Latvia. Referāts: Bārdulis A., Jansons Ā. Below-ground biomass of hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx).
7. Annual 18th International Scientific Conference „Research for rural development 2012”, 16-18 May 2012, Jelgava, Latvia. Referāts: Bārdulis A., Jansons Ā., Liepa I. Below-ground biomass production in young stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L) on abandoned agricultural land.
8. 17th International Scientific Conference „EcoBalt 2012”, 18-19 October 2012, Riga, Latvia. Referāts: Bārdulis A. Jansons Ā., Liepa I. Carbon accumulation in root biomass in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) young stands of forested areas.
9. Cost action FP803 Conference „Belowground carbon turnover in european forests”, 28 October-1 November 2012, Adana, Turkey. Stenda referāts: Bārdulis A., Jansons Ā., Liepa I. Fine root biomass and carbon accumulation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand.
10. Cost action FP803 Conference „Belowground carbon turnover in european forests”, 13-15 May 2013, Bordeaux, France. Stenda referāts: Bārdulis A., Jansons Ā., Liepa I., Bārdule A., Daugaviete M. Effects of soil preparation and regeneration on *Pinus sylvestris* root development.
11. International Baltic Sea Region Scientific Conference „Interdisciplinary Research for Higher Socioeconomic Value of Forests”, 10-12 June 2013, Riga, Latvia. Referāts: Bārdulis A., Jansons Ā., Liepa I., Bārdule A. Carbon accumulation in root biomass and root morphology aspects of young Scots pine stands in flat land of Zemgale in Latvia.

Piedalīšanās vietējas nozīmes konferencēs

1. LU 68. Zinātniskā konference, Zemes un vides zinātņu sekcija, apakšsekcija "Biotas un augsnes ģeogrāfija", 2010. gada 4. februārī, Rīga, Latvija. Referāts: Bārdulis A., Daugaviete M., Bārdule A., Lazdiņš A. Oglekļa akumulācija virszemes un sakņu biomasā baltalkšņa jaunaudzēs.
2. Zinātniski praktiskā konference „Zinātne un prakse nozares attīstībai”, 2010. gada 22. līdz 25. martam, Jelgava, Latvija. Referāts: Bārdulis A. Oglekļa akumulācija virszemes un sakņu masā baltalkšņa jaunaudzēs.

3. LU 69. Zinātniskā konference, Zemes un vides zinātņu sekcija, apakšsekcija "Biotas un augsnes ģeogrāfija", 2011. gada 31. janvārī, Rīga, Latvija. Referāts: Bārdulis A. Parastās priedes (*Pinus sylvestris* L.) sakņu biomasa bijušo lauksaimniecības zemju apmežojumos.
4. Zinātniski praktiskā konference „Zinātne un prakse nozares attīstībai”, 2011. gada 14. līdz 17. martam, Jelgava, Latvija. Referāts: Bārdulis A, Jansons Ā. Parastās priedes (*Pinus sylvestris* L.) sakņu biomasa bijušo lauksaimniecības zemju apmežojumos.
5. Latvijas Universitāte 70. Zinātniskā konference, Dendroekoloģijas sekcija, 2012. gada 2. februārī, Rīga, Latvija. Referāts: Bārdulis A., Zeps M., Jansons Ā. Sakņu biomasas izplatība hibrīdās apses (*Populus tremula* L. x *Populus tremuloides* Michx) stādījumos uz lauksaimniecības zemēm.
6. Zinātniski praktiskā konference „Mežzinātne un prakse nozares attīstībai” 2012. gada 12. līdz 16. martam, Jelgava, Latvija. Referāts: Bārdulis A., Jansons Ā. Sakņu biomasas izplatība skujkoku jaunaudzēs.

2. Materiāls un metodes

Saskaņā ar darba mērķi un izvirzītajiem darba uzdevumiem pētījuma ietvaros izvēlētas parastās priedes dažādas biežības, vecuma, apsaimniekošanas un zemes izcelsmes veida (meža zemes un lauksaimniecībā neizmantotās zemes) jaunaudzēs. Pētījuma ietvaros atlasītas parastās priedes jaunaudzēs, kuras ir vecumā līdz 40 gadiem. Izvērtējot dažādu audžu, kuras ierīkotas uz meža un lauksaimniecībā neizmantotajām zemēm, parametrus (vitalitāte, vides apstākļi u.c.), pētījuma ietvaros atlasītas audzes empīriskā materiāla ievākšanai. Empīriskais materiāls pētījuma veikšanai ievākts veģetācijas perioda laikā (no jūnija līdz augustam) no 2009. līdz 2013. gadam.

Empīriskā materiāla dati pētījuma mērķa īstenošanai ievākti parastās priedes jaunaudzēs, kuras ierīkotas uz meža zemēm (dabiski apmežojušās un stādītas platības) un lauksaimniecībā neizmantotajām zemēm (stādītas platības). Datu salīdzināšanai un situācijas raksturošanai papildus atlasītas parastās priedes audzes, kuras ir ārpus jaunaudžu vecuma (45 gadi), kā arī citu sugu dažāda vecuma audzes. Lai raksturotu sakņu biomasas attīstību un piesaistītā oglekļa apjomu, pētījuma ietvaros audzes izraudzītas tā, lai tās atspoguļotu pēc iespējas plašākas meža ierīkošanas un apsaimniekošanas iespējas. Atlasītās audzēs bija atšķirīgs augsnes sagatavošanas veids un stādāmais materiāls. Audzes ir ierīkotas dažādos laika posmos, līdz ar to praksē ir izmantoti dažādi meža atjaunošanas veidi (2.1. tabula.).

Meža atjaunošanas veids atlasītajās audzēs
Type of forest renewal in the selected stands

Augsnes sagatavošana / Preparation of soil	Stādāmais materiāls / Planting material	Suga / Species	Zemes izmantošanas veids / Land use
Arkls / <i>Plough</i>	ietvarstādi /kailsakņi <i>balled trees / bare root trees</i>	P, Pc, Ps	meža zeme / <i>forest land</i>
Diskveida arkls / <i>Discoïd plough</i>	ietvarstādi / <i>balled trees</i>	P	meža zeme / <i>forest land</i>
Buldozers / <i>Bulldozer</i>	kailsakņi / <i>bare root trees</i>	P	meža zeme / <i>forest land</i>
Netika veikta / <i>Was not performed</i>	dabiski apmežojies / <i>naturally afforested</i>	P, Ba	meža zeme, LNZ / <i>forest land, LNZ</i>
Netika veikta / <i>Was not performed</i>	ietvarstādi / <i>balled trees</i>	P, B, AH	LNZ / LNZ
LNZ – lauksaimniecībā neizmantojama zeme / <i>abandoned agricultural land</i> P – <i>Pinus sylvestris</i> L. Pc – <i>Pinus contorta</i> Dougl. var. <i>latifolia</i> Engelm. Ps – <i>Pinus strobus</i> L. Ba – <i>Alnus incana</i> (L.) Moench B – <i>Betula pendula</i> Roth AH – <i>Populus tremuloides</i> Michx. x <i>Populus tremula</i> L.			

Saskaņā ar pētījuma darba mērķi un izvirzītajiem uzdevumiem sakņu biomasas noteikšanai un uzkrātā C daudzuma izzināšanai izvēlēti un ierīkoti 22 parauglaukumi, katrā audzē ierīkojot vienu parauglaukumu, kura centrs izvēlēts audzes visraksturīgākajā vietā (izslēdzot reljefa paaugstinājumus, mikroieplakas un malas efekta ietekmi). Katrā parauglaukumā veikts augsnes apraksts atbilstoši Latvijas augšņu klasifikācijai.

Sakņu biomasas noteikšanai un analīzei paraugkoku atlase veikta pēc koku stumbra caurmēra 1,3 m augstumā ($D_{1,3}$) un augstuma, iespēju robežās iekļaujot audzes vidējos parametrus. Paraugkoku atlasē izmantota attiecība 1:3:1 (viens koks minimālajā, trīs – vidējā un viens – maksimālajā caurmēra pakāpē) vai 1:1:1 (viens koks minimālajā, viens – vidējā un viens – maksimālajā caurmēra pakāpē).

Empīriskā materiāla datu paraugkopu veidoja 116 atlasīti paraugkoki: *Pinus contorta* Dougl. var. *latifolia* Engelm., *Betula pendula* Roth, *Pinus strobus* L., *Populus tremuloides* Michx. x *Populus tremula* L., *Alnus incana* (L.) Moench un 63 *Pinus sylvestris* L. paraugkoki.

Pētījuma ietvaros atlasīto paraugkoku sakņu biomasas uzskaitē un analīzei sakņu sistēma iedalīta četrās frakcijās: balstsaknes – $\varnothing > 20$ mm; sīkās saknes – $\varnothing 2 - 20$ mm; uzsūcošās saknes – $\varnothing < 2$ mm (Fujii and Kasuya, 2008; Finer et al., 2011); celms (Liepa un Blija, 2008).

Paraugkoku celma, balstsakņu un sīko sakņu biomasa noteikta 116 paraugkokiem, atrotot sakņu sistēmu (2.1. att.), atdalot no saknēm augsnes daļiņas, mazgājot zem ūdens spiediena strūklu un nosverot ar precizitāti $\pm 0,02$ kg.



2.1. att. Atrakta sakņu sistēma (foto: A. Bārdulis).
Fig. 2.1. Unearthed root system (photo by A. Bārdulis).

Koku uzsūcošo sakņu biomasu aprēķināta pēc sakņu masas noteikšanas iepriekš ierīkotajos parauglaukumos. Sakņu paraugi ņemti ar speciālu *Ejkelkamp* firmas augsnes urbi (100 cm³ cilindru). Uzsūcošo sakņu biomasas noteikšanai katrā parauglaukumā pēc randomizācijas principa 20 atkārtojumos ņemti augsnes paraugi 0 – 10, 10 – 20, 20 – 30, 30 – 40, 40 – 50 un 50 – 60 cm dziļumā. Laboratorijas apstākļos uzsūcošo sakņu paraugi skaloti, atdalot augsnes daļiņas no uzsūcošajām saknēm. Uzsūcošās saknes rūpīgi atdalītas no sīkajām saknēm ($\varnothing > 2$ mm) un citu augu un koku saknēm, nosvērtas izmantojot analītiskos svarus ar precizitāti 0,0001 g.

Uzsūcošo sakņu morfometrisko parametru analīzei paraugi skenēti, izmantojot datorprogrammu *Win RHIZO 2002 C* (Regent instrument^R) un kalibrētu skeneri *STD-1600*. Rezultātā iegūti dati par sakņu garumu, sakņu virsmas laukumu un uzsūcošo sakņu caurmēru.

Sausās biomasas īpatsvara noteikšanai sakņu frakciju paraugi ar mizu ņemti analīzēm un izžāvēti 105 °C temperatūrā līdz pastāvīgai nemainīgai masai (SM). Absolūtais koksnes mitrums aprēķināts, izmantojot vienādojumu (2.1).

$$M = \frac{A - B}{B} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

kur:

- M – absolūtais koksnes mitrums, %;
 A – svaigi cirstas koksnes masa, g;
 B – absolūti sausas koksnes masa, g;

Uzkrātā oglekļa daudzums noteikts trijām sakņu biomasas frakcijām: balstsaknēm; sīkajām saknēm; celmam. Paraugi C satura noteikšanai ņemti pēc randomizācijas principa, iekļaujot pēc iespējas plašāku celma, balstsakņu un sīko sakņu caurmēra intervālu. Oglekļa saturs sakņu koksnes frakcijās noteikts paraugiem ar mizu. Kopējā C satura noteikšanai izmantots oglekļa elementanalizators *LECO CR-12*, kura uzbūves pamatā ir dedzināšanas kameras (mērīšanas un references kameras). Metode balstās uz CO₂ detektēšanu ar infrasarkanā starojumu.

Dendrometrisko rādītāju aprēķināšanai ir izmantoti uzmērītie parauglaukumu dati.

Koku skaits ha⁻¹:

$$N = \frac{N_p}{s} \quad (2.2)$$

kur:

- N_p – koku skaits parauglaukumā ar platību 100 m² vai 500 m²;
 s – parauglaukuma platība, ha.

Audzes vidējā koka šķērslaukums, m²:

$$g_v = \frac{\sum g_j}{N} \quad (2.3)$$

kur:

- g_j – j - tā koka šķērslaukums, m²;
 N – koku skaits.

Audzes vidējā koka caurmērs, cm:

$$d_v = \sqrt{4 \cdot \frac{g_v}{\pi}} \quad (2.4)$$

kur:

- g_v – audzes vidēja koka šķērslaukums, m².

Audzes šķērslaukums, m²:

$$G = g_v \cdot N \quad (2.5)$$

kur:

- g_v – audzes vidēja koka šķērslaukums, m²;
 N – koku skaits, ha⁻¹.

Koka stumbra tilpums ar mizu, m³:

$$V = \psi \cdot L^\alpha \cdot D^\beta L^{\gamma} + \varphi \quad (2.6)$$

kur:

- L – stumbra garums, m;
 D – stumbra caurmērs ar mizu, cm;
 $\psi, \alpha, \beta, \varphi$ – empīriski noteikti koeficienti (2.2. tabula).

2.2. tabula / Table 2.2.

Koka stumbra tilpuma aprēķināšanas formulas (2.6) empīrisko koeficientu vērtības (Liepa, 1996)
Values of empirical ratios of formula (2.6.) for the calculation of tree stem volume (Liepa, 1996)

Sugas latīniskais nosaukums / <i>Species denomination in Latin</i>	ψ	α	β	φ
<i>Alnus incana</i> (L.) Moench	$0.7450 \cdot 10^{-4}$	0.81295	0.06935	1.8546
<i>Pinus sylvestris</i> L.	$1.6541 \cdot 10^{-4}$	0.56582	0.25924	1.59689
<i>Betula pendula</i> Roth	$0.9090 \cdot 10^{-4}$	0.71677	0.16692	1.75701

Koku sugas krāja, m³ ha⁻¹:

$$V_s = V \cdot N, \quad (2.7)$$

kur:

- V – vidējais koka stumbra tilpums ar mizu, m³;
 N – koku skaits ha⁻¹.

Blīvuma noteikšanai sakņu frakcijām izmanto metodi, kura nosaka sakņu koksnes ar mizu masas īpatsvaru un tilpumu. Tilpumu nosaka, attiecīgo sakņu frakciju ievietojot tilpuma noteikšanas tvertnē, kura piepildīta ar ūdeni. Sakņu tilpums ir ekvivalents izspiestā ūdens tilpumam. Sakņu blīvumu (kg m⁻³) aprēķina, izmantojot izspiestā ūdens tilpumu un dabiski mitras sakņu frakcijas biomasas savstarpējo attiecību:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.8)$$

kur:

- V – dabiski mitra parauga tilpums, m⁻³;
 m – dabiski mitra parauga masa, kg.

Tradicionāli koka frakciju biomasu aprēķina, izmantojot paraugkoku pētījumos noskaidrotus biomasas pārrēķina koeficientus c_i :

$$c_i = \frac{m_i}{m}, \quad (2.9)$$

kur:

m_i – attiecīgās koka daļas biomasa, t;

m – koka stumbra tilpums, t m³ (Liepa, 2005).

Biomases pārrēķina koeficientu pareizinot ar stumbra tilpumu vai kokaudzes krāju, tiek iegūta attiecīgās koka daļas vai audzes frakcijas svaigi cirsta biomasa (tonna):

$$m_f = M \cdot c_i, \quad (2.10)$$

kur:

M – koka stumbra tilpums vai kokaudzes krāja, m³;

c_i – attiecīgās biomasas frakcijas pārrēķina koeficients.

Empīriskajām datu kopām veikta statistisko radītāju aprēķināšana, izmantotas aprakstošās statistikas metodes. Tā kā vairākās pētījuma grupās empīriskā materiāla vērtības atšķīrās no normālā sadalījuma, to salīdzināšanai lietotas Manna-Vitneja U testa un Kruskala-Valisa testa neparametriskās metodes, kas ir alternatīvas metodes t-testam un vienfaktora dispersijas analīzei un var tikt pielietotas neatkarīgi no datu sadalījuma veida. Paraugkopu aritmētiskajām vidējām vērtībām aprēķināta robežklūda, kurā iekļauta Stjūdenta sadalījuma normētā novirze, kuras vērtība ir atkarīga no brīvības pakāpju skaita un pieņemtā būtiskuma līmeņa. Datu apstrādei lietota vienfaktora dispersijas analīze, atsevišķos gadījumos arī divu faktoru dispersijas analīze. Izmantojot dispersijas analīzi, analizēta vecuma, sugas, atjaunošanas veida, kā arī zemes izmantošanas veida faktoriālā ietekme uz rezultatīvo pazīmi. Regresijas analīze pielietota, lai noteiktu, pēc kādas likumsakarības mainās rezultatīvā pazīme, ja mainās faktoriālās pazīmes vērtības. Galvenokārt regresijas analīze izmantota, lai atrastu sakarību starp dendrometriskajiem rādītājiem un sakņu biomasu dažādās frakcijās un dažādu biomasas frakciju mijiedarbību. Korelācijas analīze izmantota, lai noskaidrotu dažādu pazīmju, pielietoto metožu rakstura sakarības, atbilstību un ciešumu.

3. Rezultāti un diskusija

3.1. Uzsūcošo sakņu morfometriskais novērtējums parastās priedes jaunaudzēs

Pētījuma ietvaros analizējot dažāda vecuma parastās priedes audzes, redzams, ka 0 – 10 cm dziļumā uzsūcošo sakņu garums lielāks ir jaunāka vecuma audzēs. Uzsūcošo sakņu garums dažādos augsnes dziļumos ir atšķirīgs. Statistiski būtiskas uzsūcošo sakņu garuma atšķirības ir vērojamas arī starp dažāda vecuma audzēm (dispersijas analīze, $p < 0,05$).

LNZ apmežojumos jaunāka vecuma audzēs vērojamas būtiski garākas uzsūcošās saknes (dispersijas analīze, $p < 0,05$), kas izskaidrojams ar barības vielu nepieciešamību kokam agrīnā attīstības stadijā. Meža zemēs nav konstatēta tik izteikta sakarība kā LNZ apmežojumos. Tas nozīmē, ka auglīgās lauksaimniecības augsnēs kokiem veidojas izteiktākas uzsūcošās saknes un attiecīgi lielāks uzsūcošās virsmas laukums.

Uzsūcošo sakņu caurmērs ir viens no morfometriskajiem parametriem, kas raksturo koka vitalitāti. Meža zemēs uzsūcošo sakņu caurmērs ir statistiski būtiski atšķirīgs starp augsnes dziļumiem dažāda vecuma parastās priedes audzēs (dispersijas analīze, $p < 0,05$). Lielāks uzsūcošo sakņu caurmērs ir vērojams jaunāka vecuma audzēs 0 – 10 cm dziļumā, un šajā dziļumā ir būtiskas atšķirības salīdzinājumā ar vecākām audzēm (dispersijas analīze, $p < 0,05$). Rezultātu analīzē redzams, ka parastās priedes uzsūcošo sakņu caurmēra noteicošie faktori nav audzes vecums, kā arī novietojums vertikālā virzienā.

LNZ lielāka caurmēra saknes izvietojušās virsējos augsnes slāņos, 0 – 10 cm dziļumā vidējais caurmērs ir $0,9 \pm 0,1$ mm, 10 – 20 cm dziļumā $0,8 \pm 0,1$ mm. Savukārt būtiski šo sakņu biomasa samazinās, pieaugot dziļumam un 40 – 50 cm dziļumā vidējais caurmērs ir $0,4 \pm 0,1$ mm, bet 50 – 60 cm dziļumā $0,3 \pm 0,1$ mm. LNZ apmežojumos vidējais uzsūcošo sakņu caurmērs 0 – 60 cm augsnes dziļumā ir lielāks nekā tas ir vērojams meža zemēs. Minerālajām barības vielām bagātās augsnēs ir tendence veidoties lielāka caurmēra saknēm.

Analizējot sakņu virsmas laukumu, dažāda vecuma parastās priedes audzēs meža zemēs un LNZ ir vērojams, ka lielākā daļa sakņu aktīvās virsmas atrodas augsnes virsējos slāņos, tādējādi nodrošinot koka pilnvērtīgu augšanas dinamiku, uzņemot nokrišņu ūdeni un barības vielas, kuras izskalojušās no virsējiem augsnes slāņiem. Jaunāka vecuma audzēm lielāka horizontālā uzsūcošā sakņu izplatība ir vērojama augsnes slānī 0 – 20 cm dziļumā. Vecākās audzēs sakņu novietojums diferencējas visā augsnes slānī 0 – 60 cm dziļumā. Vecākās audzēs sakņu virsmas laukuma diferencēšanās dažādos dziļumos ir izskaidrojama ar barības vielu un ūdens trūkumu augšējos slāņos.

Rezultāti parāda, ka virsmas laukums lielāks ir LNZ apmežojumos nekā meža zemju stādījumos.

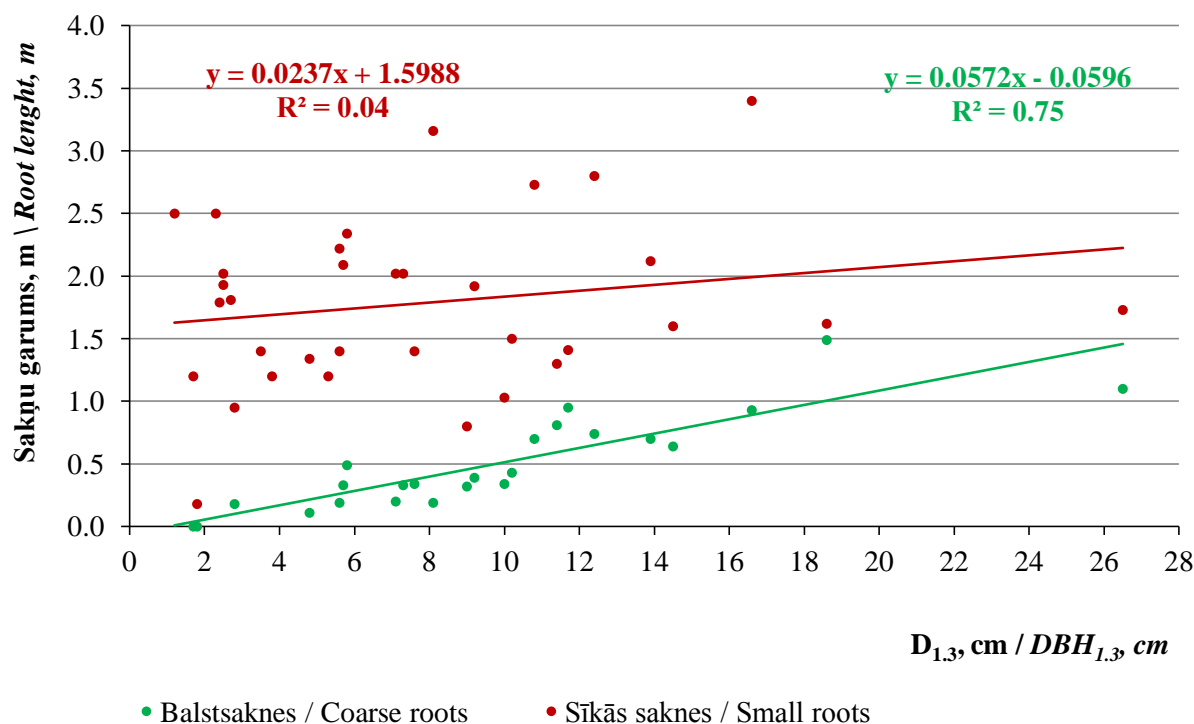
3.2. Parastās priedes sīko sakņu un balstsakņu morfometriskais novērtējums meža zemēs

Meža zemēs sakņu izplatība sniedzas ārpus vainaga projekcijas laukuma. Šāda tendence izteikti iezīmējas dabiski apmežojušās audzēs (DAA), kā arī stādītās audzēs (SA). Salīdzinot vienāda vecuma audzes DAA un SA, redzams, ka SA ir statistiski būtiski garākas sakņu dimensijas nekā DAA (Kruskala-Valisa tests, $p < 0,05$). Vidēji SA sīko sakņu garums sniedzas 2 reizes tālāk nekā DAA.

Vidējais sakņu projekcijas garums statistiski būtiski atšķiras starp dažāda vecuma audzēm (Kruskala-Valisa tests, $p > 0,05$), un vērojamas lielas dimensionālas (garuma) izmaiņas. Palielinoties audzes vecumam, saknes kļūst garākas. Analizējot vidējās sakņu projekcijas parastās priedes audzēs, kopējais balstsakņu un sīko sakņu garums statistiski būtiski neatšķiras starp dažādu debespušu novietojuma virzieniem (Kruskala-Valisa tests, $p > 0,05$). Iezīmējas tendence, ka vidēji saknes vistālāk kokiem stiepjas Z virzienā, attiecīgi $2,7 \pm 0,8$ m, savukārt vistuvāk ZR virzienā $1,8 \pm 0,6$ m. Iespējams, ka šāda sakņu garuma attīstība ir saistīta ar valdošo vēju ietekmi audzē.

Attēlā 3.1. iegūto punktu izkliede ap sakarības taisni raksturo korelācijas ciešumu. Sīko sakņu garuma punktu izkliede SA, kā arī DAA ap sakarības taisni atrodas lielā amplitūdā, korelācijas koeficienta vērtības ir vājas, attiecīgi SA $r = 0,17$ ($t = 1,345 < t_{\alpha,v} = 2,306$; $\alpha = 0,05$) un DAA $r = 0,43$ ($t = 7,656 > t_{\alpha,v} = 2,034$; $\alpha = 0,05$). Sīko sakņu

garums ir viens no koka vitalitātes rādītājiem, un redzams, ka, palielinoties $D_{1,3}$ vai koka augstums (H), sīko sakņu garums nepalielinās. Sīko sakņu garuma attīstība ir nevienmērīga un, ņemot vērā datu analīzi, vāji prognozējama.



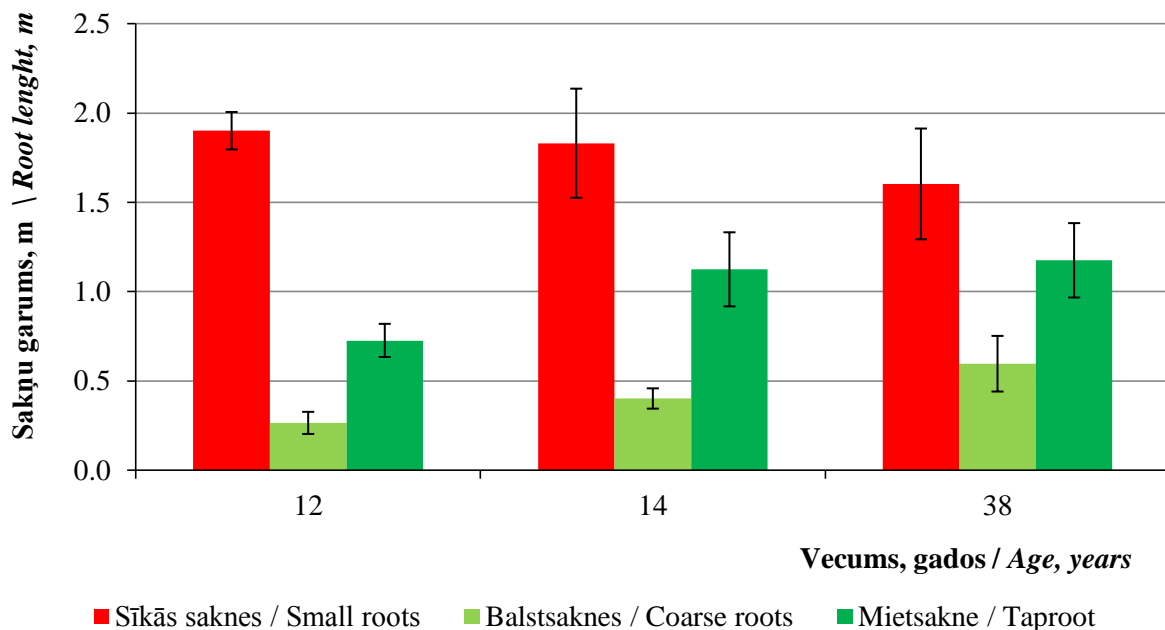
3.1. att. Sakarība starp koka caurmēru 1,3 m augstumā *Pinus sylvestris* SA un sakņu garumu.

Fig. 3.1. Relationship between the tree $DBH_{1,3}$ of *Pinus sylvestris* in planted stands and the length of roots.

Vecums, suga un vides apstākļi ietekmē mietsaknes attīstību. Pētījuma ietvaros ar 95% ticamību parastās priedes mietsaknes garuma atšķirības ir statistiski būtiskas starp dažāda vecuma audzēm (Kruskala-Valisa tests, $p < 0,05$). Parastās priedes jaunāka vecuma audzēs mietsakne ir vāji attīstījusies, bet, pieaugot audzes vecumam un tai briestot, pakāpeniski sāk veidoties arī spēcīga mietsakne. Briestaudžu vecuma parastās priedes audzēs kokiem ir izveidojusies spēcīga mietsakne, attiecīgi 45 gadus vecā audzē vidējais mietsaknes garums ir 1,12 m.

3.3. Parastās priedes sīko sakņu un balstsakņu morfometriskais novērtējums lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos

Balstsakņu un sīko sakņu morfometriskie parametri LNZ ir atkarīgi no audzes vecuma. Redzams, ka balstsakņu garums palielinās, pieaugot audzes vecumam (3.2. att.).



3.2. att. Sakņu frakciju garuma (\pm standartklūda) attīstība *Pinus sylvestris* audzēs lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos.

Fig. 3.2. Development of root fraction length (\pm standard error) in *Pinus sylvestris* stands in afforested agricultural lands.

LNZ sīkās saknes ir ievērojami garākas nekā balstsaknes un veido vidēji 80% no kopējā sīko un balstsakņu garuma. Savukārt balstsaknes veido 20% no kopējā balstsakņu un sīko sakņu garuma. Vidēji sīko sakņu garums parastās priedes audzēs ir $4,1 \pm 0,8 \text{ km ha}^{-1}$, bet balstsakņu garums $1,6 \pm 0,2 \text{ km ha}^{-1}$.

Līdzīgi kā tas bija vērojams paraugkokiem meža zemēs, arī lauksaimniecībā neizmantotajās zemēs sakņu projekcijas sniedzas vairākas reizes ārpus koka vainaga projekcijas laukuma. Līdz ar to pētījuma ietvaros gūta atziņa, ka saknes lauksaimniecības zemju apmežojumos neizplatās tikai vainaga projekcijas laukuma ietvaros, bet sniedzas ārpus tā.

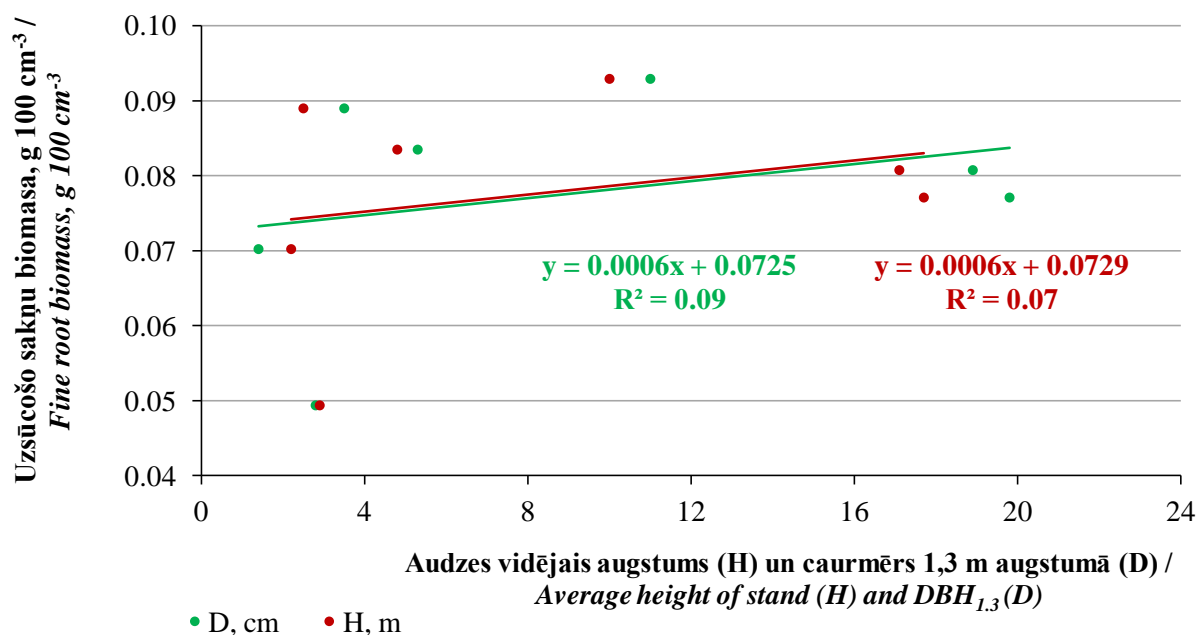
3.4. Parastās priedes uzsūcošo sakņu biomasas izvērtējums dažādos vides apstākļos

Meža zemēs uzsūcošo sakņu biomasas vertikālā sastopamība ir lielāka augsnes augšējos slāņos (0 – 30 cm dziļumā) un samazinās, palielinoties augsnes dziļumam. Uzsūcošo sakņu biomasu ietekmē augsnes dziļums, un ir vērojamas būtiskas atšķirības starp dažādiem augsnes slāņiem (t tests, $p < 0,05$). Pastāv pat lineāra cieša negatīva sakarība starp uzsūcošo sakņu biomasu un augsnes dziļumu.

Analizējot uzsūcošo sakņu izplatību atkarībā no augsnes sagatavošanas veida, nav vērojamas būtiskas atšķirības (t tests, $p = 0,97$) starp sagatavotu un nesagatavotu augsni. Audzes vecums nav uzsūcošo sakņu biomasas noteicošais faktors, jo atšķirības starp vidējo uzsūcošo sakņu biomasu un audzes vecumu katrā augsnes slāņa dziļumā nav statistiski būtiskas. Salīdzinot vidējo absolūti sausu uzsūcošo sakņu biomasu starp jaunaudzēm 0 – 60 cm dziļumā, kuras ir DAA un SA, statistiski būtiskas atšķirības nav

vērojamas (t – tests, $p = 0,92$). SA augsnes slānī 0 – 60 cm vidēji atrodas $5,2 \pm 2,4$ t SM ha⁻¹, bet DAA $5,4 \pm 2,5$ t SM ha⁻¹ uzsūcošo sakņu. Salīdzinot uzsūcošo sakņu biomasu dažādos augsnes dziļumos, statistiski būtiskas atšķirības ir starp apsaimniekošanas veidiem 0 – 10 cm dziļumā (t – tests, $p = 0,001$), kur biomasu ir lielāka SA nekā DAA, attiecīgi $3,0 \pm 1,4$ t SM ha⁻¹ un $2,5 \pm 1,1$ t SM ha⁻¹.

Meža zemēs starp dendrometriskajiem rādītājiem (koka caurmērs 1,3 m augstumā un augstums) un uzsūcošo sakņu biomasu pastāv savstarpēja neatkarība (3.3. att.). Līdzīga tendence ir vērojama arī LNZ.



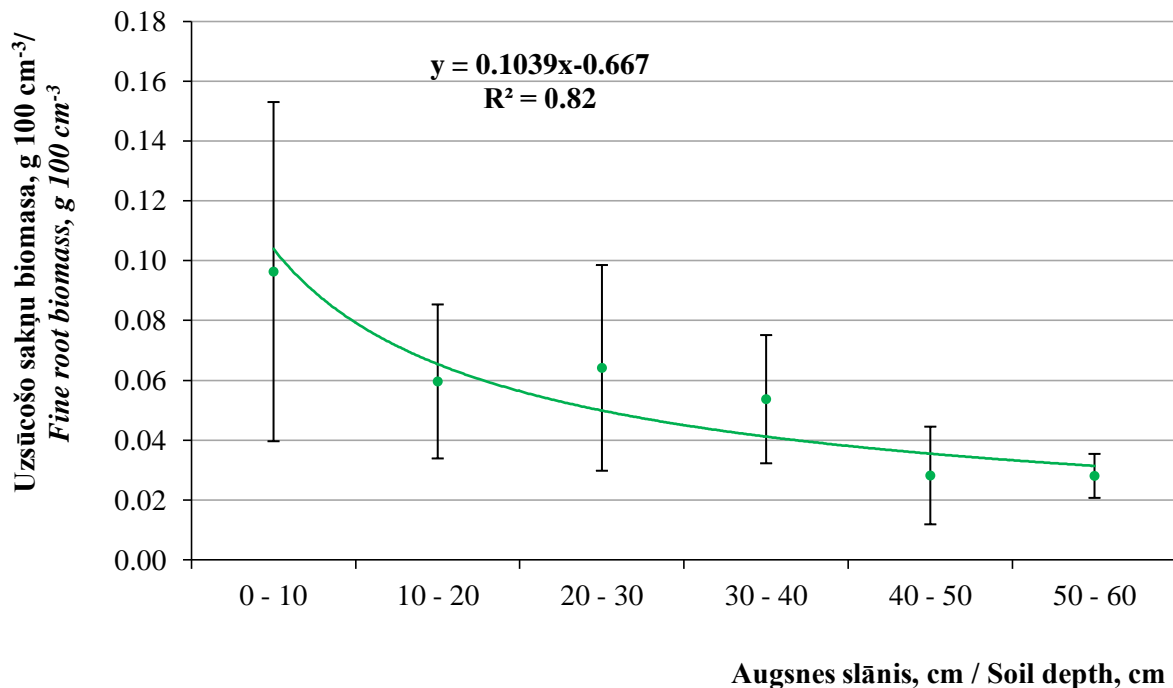
3.3. att. Sakarība starp audzes vidējiem dendrometriskajiem rādītājiem un uzsūcošo sakņu biomasu.

Fig. 3.3. Relationship between the average dendrometric parameters and fine root biomass of the stand.

Pētījuma rezultātu analīze parāda, ka meža zemēs, kā arī LNZ koku skaits uz ha nav uzsūcošo sakņu biomasu noteicošais faktors. Sakarība starp parametriem ir ļoti vāja, un koku skaits uz platības vienību, neuzrāda saistošu ietekmi uzsūcošos sakņu biomasas veidošanā.

Tāpat kā meža zemēs, arī lauksaimniecībā neizmantotajās zemēs (3.4. att.) uzsūcošo sakņu biomasu samazinās, palielinoties augsnes dziļumam. Izvērtējot visu audžu empīriskos materiālu vienkopus, vidēji lielākā uzsūcošo sakņu biomasu koncentrējas 0 – 10 cm dziļumā, un statistiski būtiskas biomasas izmaiņas ir vērojamas tikai starp 0 – 10 cm un 50 – 60 cm augsnes slāņa dziļumiem. Salīdzinot uzsūcošo sakņu biomasu lauksaimniecībā neizmantotajās zemēs un meža zemēs, lauksaimniecības zemēs vērojama mazāka uzsūcošo sakņu biomasu.

Lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos redzams, ka kopējā uzsūcošo sakņu biomasu 0 – 60 cm augsnes slāņa dziļumā lielāka ir jaunāka vecuma audzēs un samazinās, pieaugot audzes vecumam. Šāda sakarība ir izskaidrojama ar augsnes pārveidošanos, kura ir pielīdzināma meža augsnēm.



3.4. att. Uzsūcošo sakņu biomasas izvietojums lauksaimniecībā neizmatotās zemēs.
 Robežklūda $\pm 95\%$ norādīts kļūdu stabiņā.

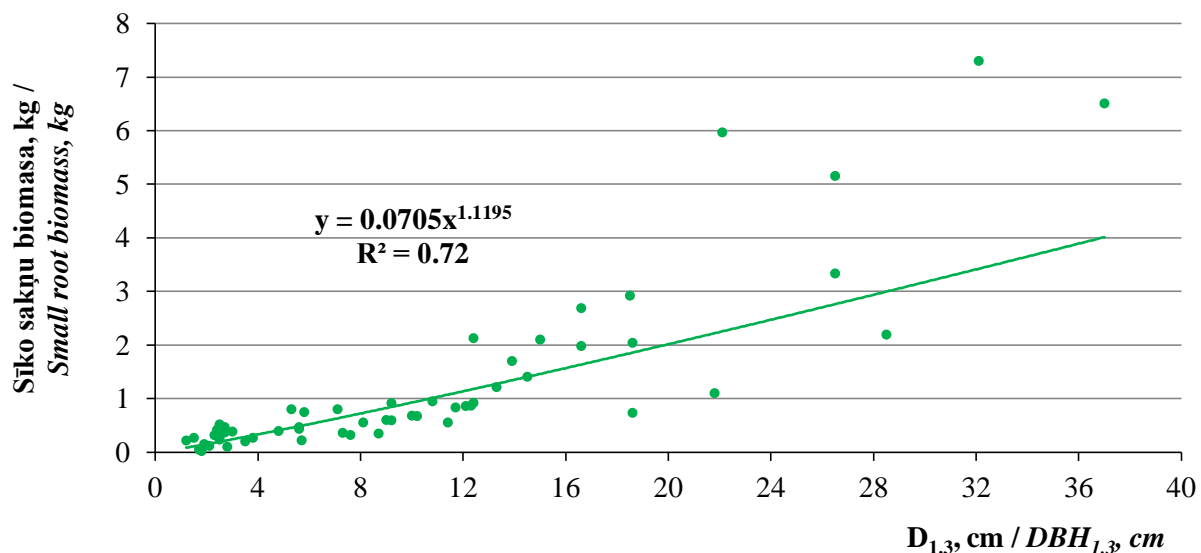
Fig. 3.4. Fine root biomass distribution in abandoned agricultural land.
 Confidence interval $\pm 95\%$ indicated in the error column.

Vecākās audzēs notiek uzsūcošo sakņu diferencēšanās ar tendenci samazināties dziļākos augsnes slāņos.

3.5. Sīko sakņu biomasas salīdzinājums dažādos vides apstākļos parastās priedes jaunaudzēs

Meža zemēs koka vecums nosaka kopējo koka biomasu, tāpat arī biomasas sadalījumu dažādās frakcijās. Koku vecums sīko sakņu biomasu ietekmē statistiski būtiski (Kruskala-Valisa tests, $p < 0,05$). Atlasītajiem parastās priedes paraugkokiem mazāka sakņu biomasu vērojama jaunāka vecuma audzēs un palielinās, pieaugot audzes vecumam.

Pētījuma ietvaros lielāku sīko sakņu biomasu veido koki, kuriem ir sastopams lielāks caurmērs 1,3 m augstumā (3.5. att.) un augstums, un šāda tendence ir katrā vecuma klasē.

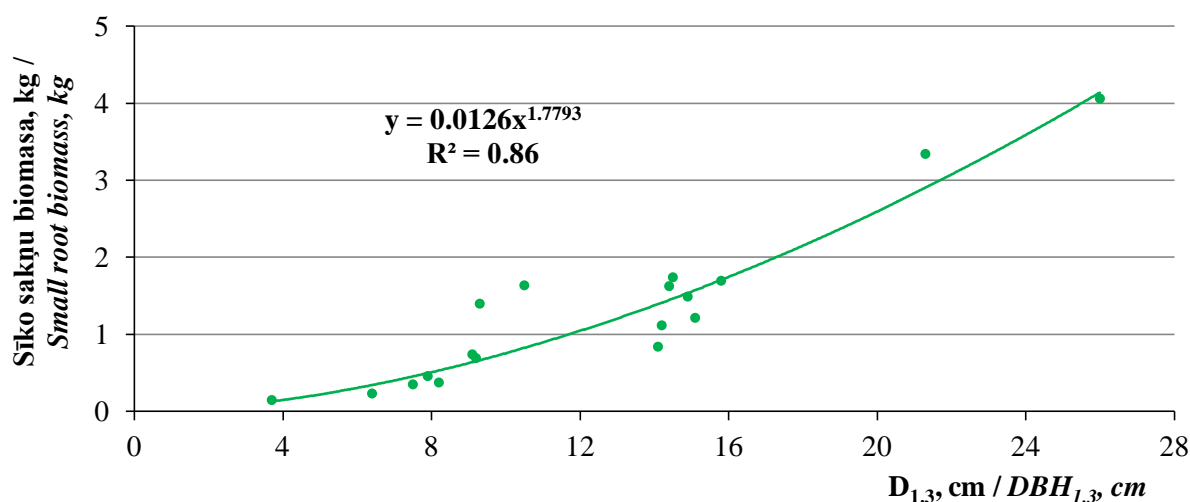


3.5. att. Sakarība starp koku caurmēru 1,3 m augstumā un sīko sakņu biomasu *Pinus sylvestris* (SM) meža zemēs.

Fig. 3.5. Relationship between the tree $DBH_{1.3}$ and small root biomass volume (DM) in forest land.

Pētījuma ietvaros iezīmējas tendence, ka lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos un meža zemēs sīko sakņu biomasu ir atkarīga no koku sugas un vecuma. Salīdzinot parastās priedes paraugkoku sīko sakņu biomasu lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos un meža zemēs vienāda vecuma audzēs, nav vērojamas statistiski būtiskas atšķirības (Kruskala-Valisa tests, $p > 0,05$), bet uz platības vienību šo sakņu biomasu ir vidēji 1,9 reizes lielāka lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos nekā meža zemēs, attiecīgi $2,5 \pm 0,5$ t SM ha^{-1} .

Tāpat kā meža zemēs arī LNZ paraugkoku caurmērs 1,3 m augstumā ir pielietojams sīko sakņu biomasas noteikšanai (3.6. att.) un prognozēšanai ($R^2 = 0,86$).



3.6. att. *Pinus sylvestris* caurmēra 1,3 m augstumā un sīko sakņu biomasas attiecība lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos.

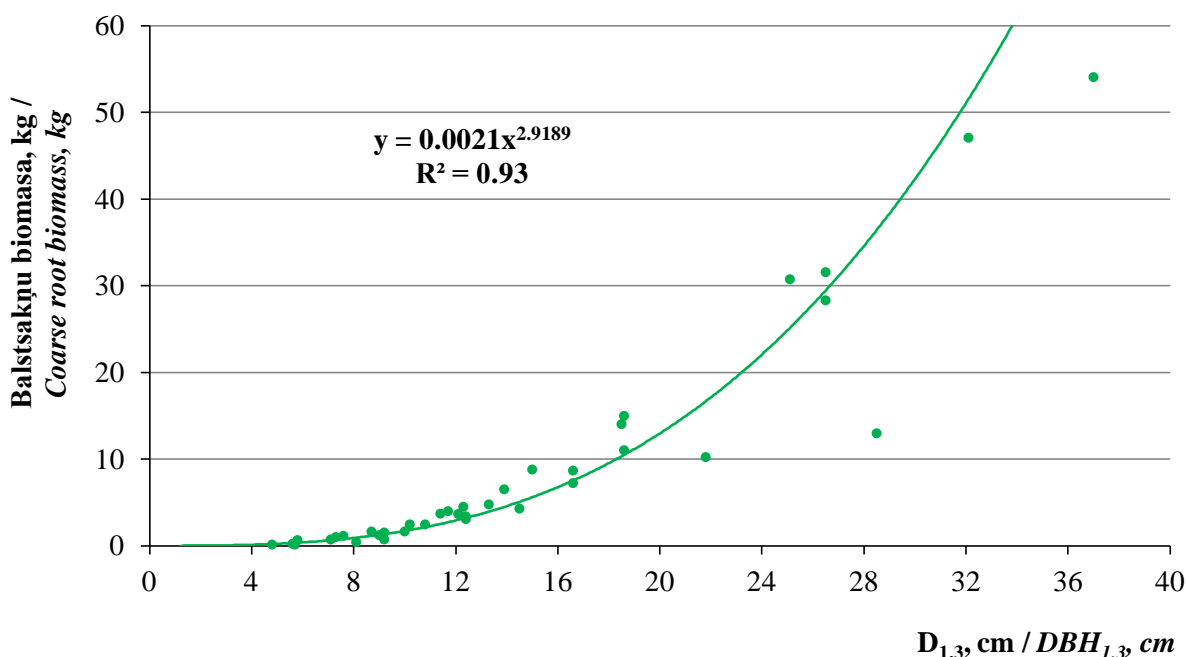
Fig. 3.6. Ratio of *Pinus sylvestris* $DBH_{1.3}$ and small root biomass in afforested agricultural land.

Paraugkoku taksācijas rādītāji un sīko sakņu biomasa veido ciešāku sakarību lauksaimniecībā neizmantojamo zemju apmežojumos nekā meža zemēs.

Pētījumā iegūtie rezultāti parāda, ka vidēji sīko sakņu biomasa *Pinus sylvestris* jaunaudzēs ir $3,7 \pm 1,6$ t SM ha⁻¹. Sīko sakņu biomasa aizņem nozīmīgu daļu no kopējās koka sakņu biomasas, un vidēji tie ir $30 \pm 5\%$ *Pinus sylvestris* audzēs meža zemēs un lauksaimniecībā neizmantotās zemēs.

3.6. Balstsakņu biomasas salīdzinājums dažādos vides apstākļos parastās priedes jaunaudzēs

Promocijas darba rezultāti parāda, ka balstsakņu biomasa svārstās lielā amplitūdā atkarībā no koku vecuma. Kā redzams attēlā 3.7. koku caurmērs 1,3 m augstumā nelineāri (pakāpes funkcija) raksturo balstsakņu biomasu meža zemēs. Regresijas vienādojuma determinācijas koeficients $R^2 = 0,93$.



3.7. att. Sakarība starp koku caurmēru 1,3 m augstumā un *Pinus sylvestris* balstsakņu absolūti sausu biomasu meža zemēs.

Fig. 3.7. Relationship between the tree DBH_{1,3} and absolutely dry *Pinus sylvestris* coarse root biomass in forest land.

Meža zemēs audzes vecums būtiski ietekmē balstsakņu biomasu (Kruskala-Valisa tests, $p < 0,05$). Salīdzinot paraugkoku balstsakņu biomasu starp apsaimniekošanas veidiem, 45 gadus vecās audzēs nav vērojamas statistiski būtiskas atšķirības (Kruskala-Valisa tests, $p > 0,05$). Paraugkoku vidējā balstsakņu biomasa 45 gadus vecā SA ir $15,4 \pm 7,0$ kg SM, bet savukārt 45 gadus vecā DAA vidēji $14,8 \pm 7,2$ kg SM.

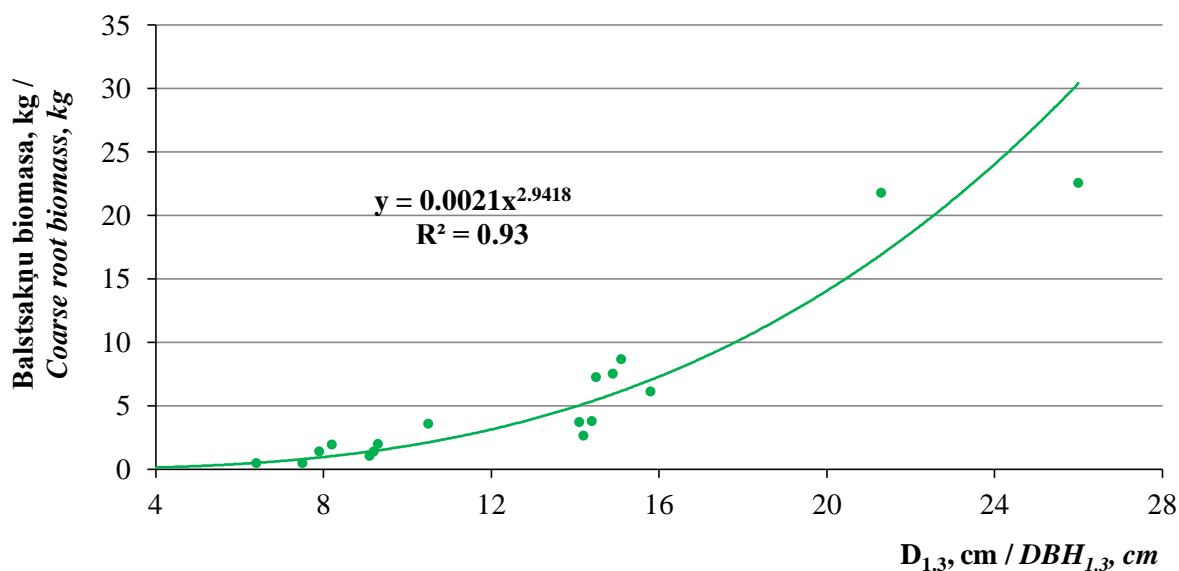
Pētījums iezīmē, ka vidējā balstsakņu biomasa *Pinus sylvestris* jaunaudžu vecumā meža zemēs ir $14,6 \pm 5,3$ t SM ha⁻¹.

Parastās priedes balstsakņu biomasa lauksaimniecībā neizmantojamo zemju apmežojumos atlasītajās audzēs ir robežās no $1,4 \pm 0,6$ t SM ha⁻¹ (12 gadi) līdz $8,3 \pm 2,7$ t SM ha⁻¹ (38 gadi). Izvērtējot atlasīto audžu paraugkoku vidējo balstsakņu biomasu,

vērojamas statistiski būtiskas atšķirības (Manna-Vitneja U tests, $p < 0,05$) starp dažāda vecuma audzēm.

Salīdzinot parastās priedes paraugkoku vidējo balstsakņu biomasu lauksaimniecībā neizmantotajās zemēs un meža zemēs, nepastāv statistiski būtiskas atšķirības starp abām paraugkopām (Manna-Vitneja U tests, $p > 0,05$).

Balstsakņu biomasu parastās priedes audzēs LNŽ ir viegli prognozējama, izmantojot koku caurmēru 1,3 m augstumā (3.8. att.). Nelineāras regresijas vienādojumu balstsakņu biomasas prognozēšanai izskaidro determinācijas koeficients $R^2 = 0,93$.



3.8. att. Sakarība starp *Pinus sylvestris* paraugkoku caurmēru 1,3 m augstumā un balstsakņu biomasu lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos.

Fig. 3.8. Relationship between *Pinus sylvestris* sample tree DBH_{1.3} and coarse root biomass in afforested abandoned agricultural land.

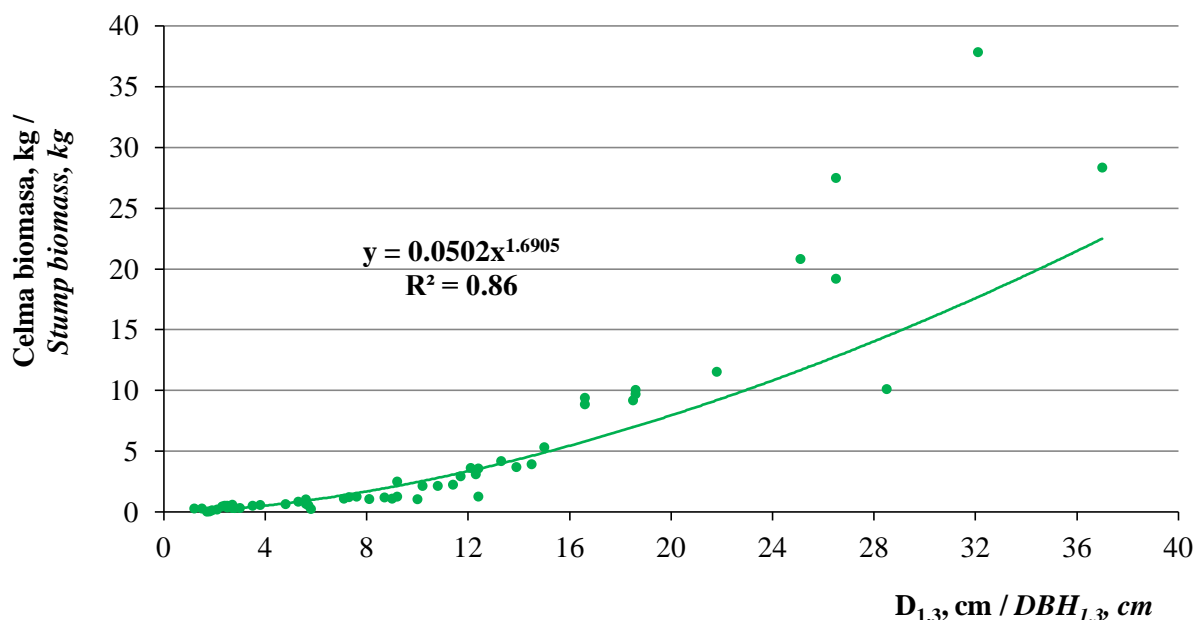
Sakarības ciešumu starp balstsakņu biomasu un koku caurmēru 1,3 m augstumā raksturo korelācijas koeficients $r = 0,91$ ($t = 8,842 > t_{\alpha;v} = 2,109$; $\alpha = 0,05$).

3.7. Celma biomasas salīdzinājums dažādos vides apstākļos parastās priedes jaunaudzēs

Jaunaudzēs paraugkokiem celms veidojas vāji. Meža zemēs paraugkoka vidējā celma biomasu 8 gadus vecā parastās priedes SA ir $0,4 \pm 0,1$ kg SM, 12 gadus vecā audzē $0,6 \pm 0,3$ kg SM un 13 gadus vecā audzē $0,7 \pm 0,2$ kg SM. Lielāka celma biomasu ir vērojama 14 gadus vecā parastās priedes SA un būtiski palielinās (Kruskala-Valisa tests, $p < 0,05$), pieaugot audzes vecumam, tāpēc celma frakcija ir tieši atkarīga no koka vecuma. Statistiski būtiskas atšķirības nav vērojamas (Kruskala-Valisa tests, $p > 0,05$), salīdzinot celma biomasu vienāda vecuma audzēs, pielietojot dažādus apsaimniekošanas veidus. DAA celms attīstās ātrāk nekā SA un ir izteiktāks jau 8 gadu vecumā, tāpat arī 45 gadu vecumā DAA vidējā paraugkoka celma biomasu ir lielāka nekā SA, attiecīgi $11,2 \pm 5,1$ kg SM un $10,3 \pm 4,9$ kg SM. Šādas tendences ir izskaidrojamas ar apsaimniekošanas veida ietekmi, jo sagatavotās augsnes un kvalitatīva stādāmā materiāla

ietekmē kokiem veidojas vairāk virspusēja sakņu sistēma (balstsaknes un sīkās saknes) un nav tik izteikta celma daļa, savukārt dabiski apmežojušās audzēs sakņu sistēma ir dziļāka ar lielākām celma frakcijas dimensijām (papildina balsta funkciju).

Sakarība starp paraugkoku caurmēru 1,3 m augstumā un celma biomasu meža zemēs ir cieša (3.9. att.). Pazīmju ciešumu raksturo Pīrsona korelācijas koeficients, $r = 0,89$ ($t = 14,319 > t_{\alpha,v} = 2,004$; $\alpha = 0,05$) un nelineāra pakāpes regresija ($R^2 = 0,86$).

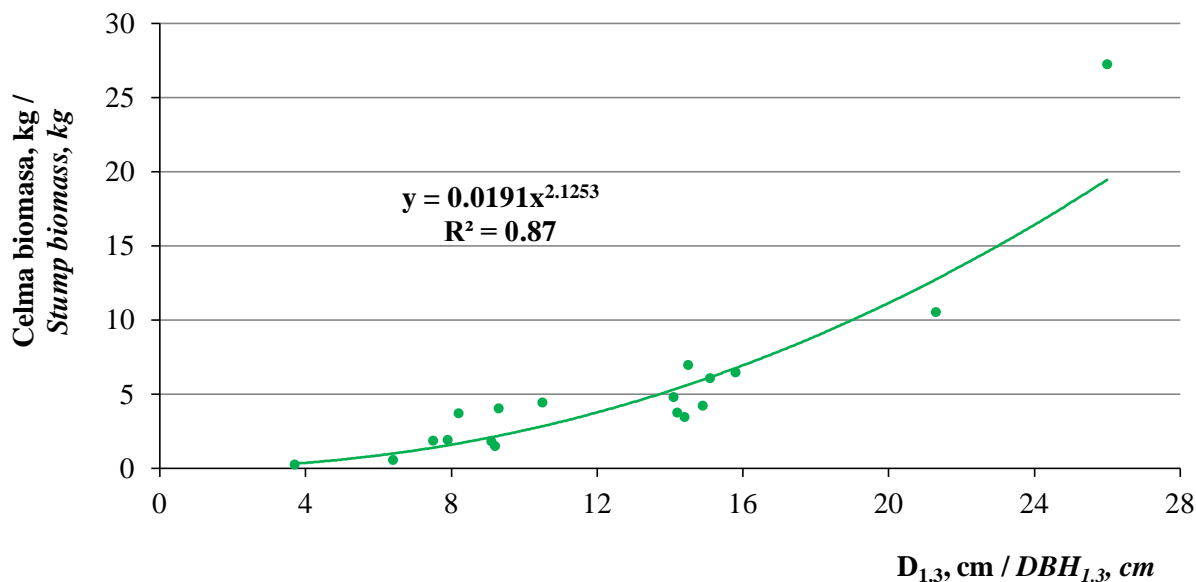


3.9. att. Sakarība starp *Pinus sylvestris* paraugkoku caurmēru 1,3 m augstumā un celma SM biomasu meža zemēs.

Fig. 3.9. Relationship between *Pinus sylvestris* sample tree DBH_{1.3} and stump dry biomass in forest land.

Celma biomasu parastās priedes audzēs lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos ir robežās no $1,6 \pm 0,7$ t SM ha⁻¹ līdz $7,8 \pm 2,6$ t SM ha⁻¹.

Parastās priedes celma biomasu un paraugkoku caurmērs 1,3 m augstumā LNZ veido ciešu sakarību, ko raksturo korelācijas koeficients $r = 0,86$ ($t = 6,692 > t_{\alpha,v} = 2,109$; $\alpha = 0,05$). Nelineārs regresijas vienādojums redzams attēlā 3.10., ko izskaidro determinācijas koeficients $R^2 = 0,87$. Redzams, ka empīriskie punkti blīvi grupējas ap izlīdzinošo līkni, kas liecina, ka dati ievākti korekti un ir izmantojami precīzai celma biomasas aprakstīšanai.



3.10. att. *Pinus sylvestris* caurmēra 1,3 m augstumā un celma biomasas attiecība lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos.

Fig. 3.10. Ratio between *Pinus sylvestris* DBH_{1.3} and stump biomass in afforested agricultural land.

Salīdzinot ar meža zemēm, lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos veidojas par 7,5% lielāka celma biomasas frakcija vienāda vecuma audzēs.

3.8. Mitruma izmaiņas parastās priedes sakņu frakcijās dažādu vides apstākļu ietekmē

Sakņu koksnes vidējais absolūtais mitruma saturs ir $202 \pm 10\%$ DAA un $179 \pm 6\%$ SA, savukārt relatīvais mitrums ir $65 \pm 2\%$ DAA un $63 \pm 1\%$ SA. Pētījumā analizējot sakņu mitruma saturu dažādas izcelsmes audzēs, kuras ir atjaunotas stādot vai dabiski atjaunojušās, nav vērojamas statistiski būtiskas absolūtā un relatīvā mitruma atšķirības (t tests, $p > 0,05$), tomēr iezīmējas tendence, ka DAA ir lielāks sakņu mitruma saturs nekā SA.

Audzēs vecums, kā arī sakņu frakcija ir mitruma satura ietekmējošie faktori. Analizējot absolūto mitruma saturu, statistiski būtiskas izmaiņas ir vērojamas starp dažādām sakņu frakcijām, kā arī dažāda vecuma audzēs (dispersijas analīze, $p < 0,05$).

Pētījumā iezīmējas statistiski būtiska tendence, ka vidējais absolūtais sakņu mitrums samazinās, pieaugot audzes vecumam. Salīdzinot vienāda vecuma audzēs apsaimniekošanas veidus, redzams, ka balstsaknēs, tāpat kā sīkās saknēs absolūtais mitrums ir lielāks DAA nekā SA platībās, atšķirības ir statistiski būtiskas (t tests, $p < 0,05$). Celma koksne vērojams zemākais absolūtais mitruma saturs. Absolūtais mitruma saturs ir statistiski būtiski atšķirīgs vienāda vecuma DAA un SA (t tests, $p < 0,05$).

Salīdzinot sakņu absolūto mitruma saturu LNŽ, vērojama līdzīga tendence kā meža zemēs (pieaugot audzes vecumam, mitruma saturs samazinās). LNŽ absolūtais mitruma saturs statistiski būtiski atšķiras starp dažādām frakcijām un audzes vecumu (dispersijas analīze, $p < 0,05$), un vidēji atrodas intervālā no $146 \pm 7\%$ līdz $222 \pm 6\%$. Lielākais absolūtā

mitruma saturs ir vērojams sīkajās saknēs. Celma frakcijā absolūtā mitruma saturs ir viszemākais un ir robežās no $113 \pm 11\%$ līdz $186 \pm 8\%$.

Vidēji sakņu frakcijās LNZ absolūtā mitruma saturs ir nedaudz lielāks nekā meža zemēs, taču atšķirības nav statistiski būtiskas (t tests, $p < 0,05$). Relatīvais mitrums ir statistiski būtiski atšķirīgs dažāda vecuma audzēs (vienfaktora dispersijas analīze, $p < 0,05$) un ir intervālā no $58 \pm 2\%$ līdz $61 \pm 1\%$. Tāpat statistiski būtiskas atšķirības LNZ ir starp relatīvo mitrumu dažādās sakņu frakcijās (vienfaktora dispersijas analīze, $p < 0,05$). Vidējais relatīvā mitruma saturs vislielākais ir sīkajās saknēs $72 \pm 1\%$, balstsaknēs $63 \pm 1\%$, savukārt celma frakcijā $58 \pm 2\%$.

3.9. Parastās priedes sakņu blīvuma salīdzinājums dažādos vides apstākļos

Meža zemēs absolūti sauss sakņu blīvums starp dažāda vecuma audzēm un frakcijām ar 95% ticamību statistiski būtiski atšķiras (dispersijas analīze, $p < 0,05$). Vidējais sakņu frakciju blīvums SA svārstās robežās no $163 \pm 64 \text{ kg m}^{-3}$ 8 gadus vecā audzē līdz $339 \pm 8 \text{ kg m}^{-3}$ 24 gadus vecā audzē. Savukārt DAA vidējais sakņu blīvums ir robežās no $143 \pm 18 \text{ kg m}^{-3}$ 8 gadus vecā audzē līdz $400 \pm 11 \text{ kg m}^{-3}$ 24 gadus vecā audzē. Analizējot vidējās blīvuma vērtības jaunaudžu vecumā, redzams, ka ir statistiski būtiskas atšķirības starp dažādām frakcijām un augsnes sagatavošanas veidiem (dispersija analīze, $p < 0,05$). Mazāks blīvums ir vērojams celma frakcijai, attiecīgi $245 \pm 17 \text{ kg m}^{-3}$ DAA un $281 \pm 15 \text{ kg m}^{-3}$ SA. SA sīko sakņu blīvums ir $367 \pm 20 \text{ kg m}^{-3}$ un balstsakņu blīvums $401 \pm 5 \text{ kg m}^{-3}$, bet DAA sīko sakņu blīvums ir $301 \pm 22 \text{ kg m}^{-3}$ un balstsakņu blīvums – $394 \pm 6 \text{ kg m}^{-3}$.

LNZ sakņu blīvuma atšķirības starp dažāda vecuma audzēm ir līdzīgas kā meža zemēs. Vidējais sakņu blīvums starp dažāda vecuma audzēm vienas frakcijas ietvaros statistiski būtiski neatšķiras (vienfaktora dispersijas analīze, $p > 0,05$), bet starp dažādām frakcijām un dažādos vecumos ar 95% ticamību atšķiras statistiski būtiski (dispersijas analīze, $p < 0,05$). Vidējais sakņu blīvums LNZ ir robežās no $392 \pm 97 \text{ kg m}^{-3}$ 38 gadus vecā audzē līdz $425 \pm 14 \text{ kg m}^{-3}$ 12 gadus vecā audzē. Vidēji LNZ celma frakcijai ir visblīvākā koksne, attiecīgi $450 \pm 61 \text{ kg m}^{-3}$. Vidējais balstsakņu koksnes blīvums ir $358 \pm 54 \text{ kg m}^{-3}$, bet sīko sakņu blīvums $331 \pm 50 \text{ kg m}^{-3}$.

Salīdzinot sakņu blīvumu starp meža zemēm un LNZ, nav vērojama statistiski būtiskas atšķirības, bet LNZ sakņu koksne ir blīvāka, vidēji $379 \pm 55 \text{ kg m}^{-3}$, bet meža zemēs $332 \pm 14 \text{ kg m}^{-3}$.

3.10. Parastās priedes dažādu sakņu frakciju biomasas pārrēķina koeficientu noteikšana

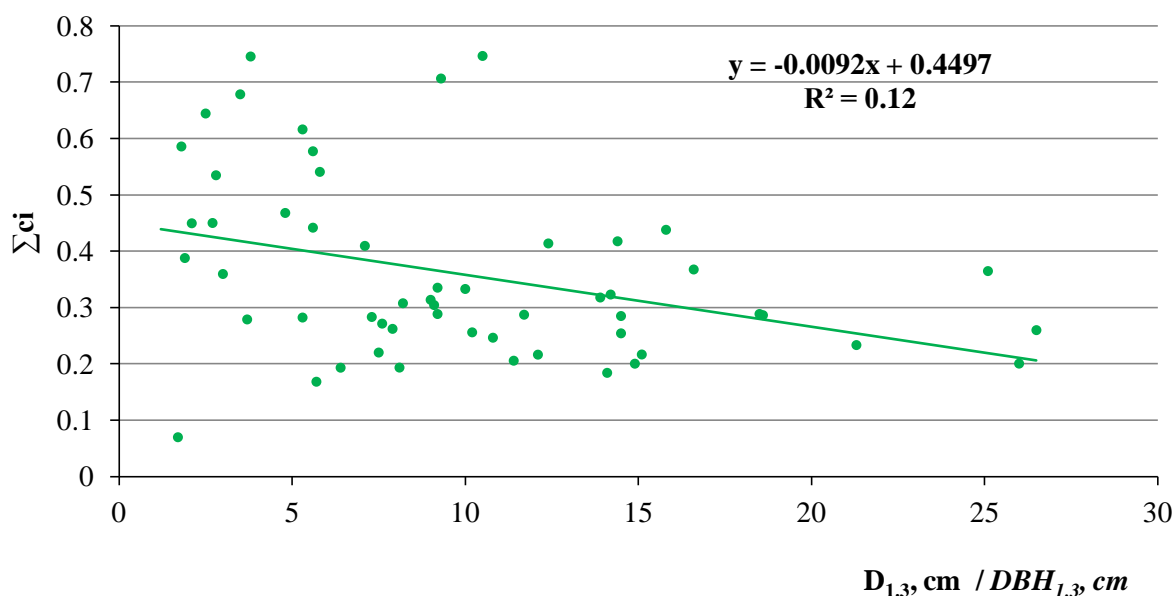
Biomasas pārrēķina koeficienti ir attiecīgās paraugkoka frakcijas biomasas un stumbra tilpuma attiecības. Promocijas darba ietvaros biomasas pārrēķina koeficienti noteikti celmam, balstsaknēm un sīkām saknēm (c_c , c_b , c_s), kā arī $\sum c_i$ (3.1. tabula).

Vidējie biomasas pārrēķina koeficienti *Pinus sylvestris* audzēs
Average biomass transition ratios in *Pinus sylvestris* stands

Zemes izmantošanas veids / Land use	Koeficienti / Ratios			
	c_c	c_b	c_s	$\sum c_i$
Meža zeme/ Forest land	0.31386	0.12316	0.28231	0.68209
LNZ	0.141658	0.120529	0.05829	0.32048

Biomasas frakciju pārrēķinu koeficientu summa $\sum c_i$ un paraugkoku caurmērs 1,3 m augstumā parastās priedes audzēs ir savstarpēji neatkarīgas pazīmes (tas attiecas arī uz atsevišķiem koeficientiem), ko raksturo determinācijas koeficients $R^2 = 0,12$. Tas nozīmē, ka audžu un to kopu nestumbra biomasas aprēķināšanai var lietot pārrēķinu koeficientu aritmētiskās vidējās vērtības, kas būtiski vienkāršo biomasas vērtēšanu, jo kopējās biomasas vai tās atsevišķu frakciju noteikšanai jāzina tikai audzes vai kopu krāja.

Kā redzams 3.11. attēlā empīrisko punktu izkliede ir relatīvi plaša.



3.11. att. Sakarība starp parastās priedes biomasas pārrēķinu koeficientu summu $\sum c_i$ un paraugkoku caurmēru 1,3 m augstumā.

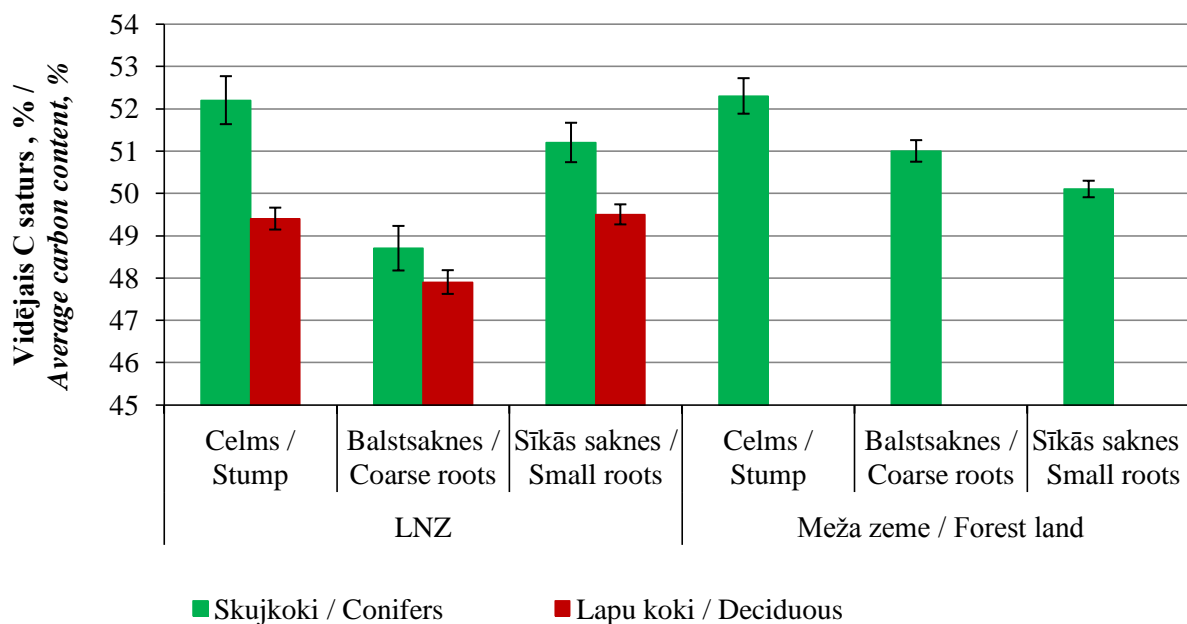
Fig. 3.11. The connection of Scots pine biomass ratio sum $\sum c_i$ and the sample tree $DBH_{1.3}$.

Plašā empīrisko punktu izkliede izskaidrojama ar paraugkoku paraugkopai piemītošo dendrometrisko, fitocenotisko un edafisko daudzveidību, kas izraudzīta apzināti, lai pēc iespējas pilnvērtīgāk būtu pārstāvētas parastās priedes audzes.

3.11. Oglekļa saturs parastās priedes sakņu biomasā

Pētījuma ietvaros starp skujkokiem un mīkstajiem lapu kokiem vidējais C saturs sakņu biomasā atšķiras ~ 3% robežās. Skujkokiem vidējais C saturs sakņu biomasā meža zemēs ir $52,1 \pm 0,1\%$, bet skujkokiem lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos $50,3 \pm 0,1\%$, lapu kokiem $49,3 \pm 0,1\%$. Vidējais oglekļa saturs sakņu biomasā statistiski būtiski atšķiras starp skujkokiem un lapu kokiem, kā arī starp meža zemēm un LNZ, dažādām sakņu frakcijām (3.12. att.), audžu vecumiem, un koku sugām (daudzfaktoru dispersijas analīze, $p < 0,05$). Skujkokos vērojams būtiski lielāks C saturs sakņu koksnes frakcijās nekā lapu kokiem. Tāpat redzams, ka meža zemēs vidējais C saturs skujkoku sakņu koksnē ir lielāks nekā paraugkokiem lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos.

Lapu koku sakņu frakciju koksnē ir mazāks C saturs kā skujkoku koksnē lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos (daudzfaktoru dispersijas analīze, $p < 0,05$). Savukārt, salīdzinot C saturu skujkoku sakņu frakcijās starp meža zemēm un lauksaimniecības zemēm, redzams, ka meža zemēs tas ir būtiski lielāks (vienfaktora dispersijas analīze, $p < 0,05$). Meža zemēs atlasītajiem paraugkokiem, samazinoties sakņu frakciju caurmēram, samazinās arī C saturs, attiecīgi balstsaknēs $51,1 \pm 0,3\%$ un sīkajās saknēs $50,1 \pm 1,2\%$. Pretēja situācija ir vērojama lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos, kur redzams, ka sīkajās saknēs ir lielākais C saturs gan lapu kokiem (vidēji $49,5 \pm 0,4\%$), gan skujkokiem (vidēji $51,2 \pm 0,5$).



3.12. att. Oglekļa satura salīdzinājums skujkoku un lapu koku dažādās sakņu frakcijās lauksaimniecībā neizmantoto zemju un meža zemju apmežojumos.

Robežklūda $\pm 95\%$ norādīta kļūdu stabiņā.

Fig. 3.12. Comparison of carbon content in different root fractions of conifers and deciduous trees in afforested agriculture land and forest land.

Confidence interval $\pm 95\%$ indicated in the error column.

Oglekļa saturs sakņu frakcijās veido pozitīvu vidēji ciešu korelāciju ar audzes vecumu, ko raksturo Pīrsona korelācijas koeficients $r = 0,62$ ($t = 5,831 > t_{\alpha,v} = 1,999$; $\alpha = 0,05$). Attiecīgi vecākās audzēs ir vērojams lielāks C saturs sakņu koksne. Oglekļa saturs atrodas lielā amplitūdā viena vecuma audzēs, tam nav saistība ar paraugkoka dimensijām, jo starp paraugkoka caurmēru un vidējo oglekļa saturu sakņu koksne konstatēta vāja korelācija, $r = 0,38$ ($t = 3,256 > t_{\alpha,v} = 1,999$). Tāpēc C saturam sakņu koksne ir vērojama dabiskā variācija.

Pētījuma ietvaros atlasītajās parastās priedes jaunaudzēs vidēji sakņu biomasā ir $27,1 \pm 2,3$ t SM ha⁻¹, kas ir liela potenciāla mežu resursu saimnieciskās izmantošanas rezerve un uzkrātā oglekļa krātuve. Rezultāti parāda, ka vidēji parastās priedes sakņu biomasā pētījuma ietvaros atlasītajās kokaudzēs piesaistītais CO₂ ir $48,7 \pm 4,3$ t ha⁻¹ meža zemju apmežojumos (8, 12, 13, 14, 24 un 45 gadi) un $35,6 \pm 11,5$ t ha⁻¹ lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos (12, 14 un 38 gadi). Salīdzinot CO₂ piesaisti parastās priedes sakņu biomasā 12 gadus vecās audzēs LNZ un meža zemēs, redzams, ka LNZ piesaistās vairāk CO₂, attiecīgi $17,9 \pm 9,6$ t ha⁻¹ un $15,0 \pm 3,5$ t ha⁻¹ meža zemēs. Savukārt 14 gadus vecā parastās priedes audzē LNZ CO₂ ir $36,3 \pm 8,1$ t ha⁻¹ un meža zemēs $13,3 \pm 0,7$ t ha⁻¹.

Latvijā CO₂ aprēķini SEG inventarizācijas kontekstā veikti, izmantojot formulu, kurā ir iekļauta krāja vai krājas pieaugums un aprēķinu koeficienti, kuri ir ņemti no SEG inventarizācijas pārskatu sagatavošanas vadlīnijām (Penman, 2003). Viens no aprēķinu koeficientiem formulā ir pārrēķinam no virszemes uz pazemes biomasu, un skujkoku audzēs, kurās virszemes biomasā ir no 50 – 150 t ha⁻¹, tas ir 0,32. Promocijas darba ietvaros ir aprēķināts koeficients pārrēķinam no virszemes uz sakņu biomasu parastās priedes jaunaudzēs, kurās virszemes biomasā ir no 50 – 150 t ha⁻¹, un tā vērtība ir 0,28. Tāpēc pētījuma rezultātu ietvaros ir iegūta atziņa, ka pazemes biomasā tiek pārvērtēta, kas rada neprecizitātes CO₂ aprēķināšanā SEG inventarizācijas kontekstā.

3.12. Sakņu biomasas aprēķina vienādojuma analīze parastās priedes sakņu biomasas frakcijām

Pētījuma ietvaros, izstrādājot kopējo sakņu biomasas vienādojumu, pārbaudīti vairāki modeļi, un visprecīzākais bija lineāras regresijas modelis (3.1), kurā ir iekļauta viena faktoriālā pazīmē (D^2H).

$$m = a + b \cdot (D^2H), \quad (3.1)$$

kur:

m – kopējā sakņu biomasā, kg;

D^2H – koka caurmēra 1,3 m augstumā kvadrāta (m) un augstuma reizinājums (m);

a, b – empīriskie koeficienti.

Regresijas analīzes rezultātā iegūst informāciju, ar kuru izskaidro un apraksta jaunizveidoto modeli. Veicot dažādu mainīgo analīzi, regresijas modelī tika iekļauta mainīgā pazīme D^2H un rezultatīvā pazīme kopējā sakņu biomasā. Korelācijas koeficients ir 0,98 meža zemēs un 0,94 LNZ (Pīrsona korelācija), kas norāda uz ciešu lineāru sakarību starp rezultatīvo un faktoriālo pazīmi. Determinācijas koeficienti abos gadījumos ir augsti,

attiecīgi $R^2 = 0,96$ un $0,89$. Tādējādi ar 96% un 89% no kopējās sakņu biomasas variācijas var izskaidrot ar izveidoto lineārās regresijas modeli.

Sakņu biomasas aprēķina regresijas vienādojumi ir sekojoši:

- kopējā paraugkoku sakņu biomasā meža zemēs (koka caurmēra intervāls 1,3 m augstumā robežās no 1,5 līdz 26,5 cm)

$$m = 1,270 + 107,920 \cdot D^2H, \quad (3.2)$$

- kopējā paraugkoku sakņu biomasā LNZ apmežojumos (koka caurmēra intervāls 1,3 m augstumā robežās no 3,7 līdz 19,8 cm)

$$m = 8,325 + 70,689 \cdot D^2H, \quad (3.3)$$

kur:

m – dabiski mitra masa, kg;

D^2H – koka caurmēra 1,3 m augstumā kvadrāta (m) un augstuma (m) reizinājums m^3 .

Dažādu sakņu frakciju biomasas regresijas vienādojuma koeficientu vērtības norādītas tabulā 3.2.

3.2. tabula/ Table 3.2.

Dažādu sakņu frakciju biomasas regresijas vienādojuma koeficientu vērtības
Values of different root fraction biomass regression equation ratios

Zemes izmantošanas veids / Land use	Frakcijas nosaukums / Name of fraction	Koeficienta apzīmējums / Symbol for ratio	Aprēķinātais koeficients / Calculated ratio	Koeficienta standartklūda / Standard error of ratio	p – vērtība / p – value
Meža zeme / Forest land	sīkās saknes / small roots	<i>a</i>	0.969	0.399	0.020
		<i>b</i>	14.724	1.226	0.000
	balstsaknes / coarse roots	<i>a</i>	0.227	0.120	0.079
		<i>b</i>	56.895	1.641	0.000
	celms / stump	<i>a</i>	0.978	0.383	0.014
		<i>b</i>	36.062	1.176	0.000
LNZ	sīkās saknes / small roots	<i>a</i>	2.018	0.559	0.002
		<i>b</i>	6.652	1.284	0.000
	balstsaknes / coarse roots	<i>a</i>	2.021	1.366	0.157
		<i>b</i>	40.328	3.138	0.000
	celms / stump	<i>a</i>	4.488	1.128	0.001
		<i>b</i>	23.039	2.591	0.000

Regresijas brīvais loceklis (konstante a) ir statistiski būtisks ($p < 0,05$), bet meža zemēs balstsaknēm un LNZ balstsaknēm nevar noraidīt nulles hipotēzi, ka koeficients ir vienāds ar nulli ($p = 0,079$ un $p = 0,157$). Tāpat kā kopējā sakņu biomasas aprēķina modelī koeficientu brīvo locekli a nav vēlams izslēgt no modeļa, jo tas var ietekmēt taisnes virziena koeficienta b vērtību.

4. Secinājumi

1. Promocijas darbā izstrādāts parastās priedes sakņu biomasas aprēķina vienādojums dažādām sakņu frakcijām (baltsaknes, sīkās saknes un celms) dažāda vecuma kokiem meža zemēs un lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos. Sakņu frakciju biomasu izskaidro lineāras regresijas modelis ar vienu saliktu faktoriālo pazīmi (D^2H), kas netieši izsaka arī audzes vecuma ietekmi. Modeļa piemērotību katrai frakcijai maina tā koeficientu skaitliskās vērtības. Modeļa determinācijas koeficients meža zemēs ir $R^2 = 0,96$, bet lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos – $R^2 = 0,89$. Modelis ir statistiski būtisks pie 95% ticamības līmeņa visos iepriekšminētos variantos.
2. Darbā aprēķināti sakņu biomasas pārrēķina koeficienti, kuru pamatā ir attiecīgās sakņu frakcijas biomasas un koka stumbra tilpuma attiecība. Noskaidrots, ka parastās priedes sakņu biomasas frakciju pārrēķina koeficientu vērtības un to summas nav atkarīgas no koku caurmēra 1,3 m augstumā, un tas pieļauj koku sakņu frakciju biomasas aprēķināšanai lietot vienādas pārrēķina koeficientu aritmētiskās vidējās vērtības visai kokaudzei.
3. Konstatēts, ka meža zemēs nepastāv statistiski būtiskas atšķirības starp koku kopējo sakņu biomasu vienāda vecuma dabiski apmežojušās platībās un stādītās platībās, taču stādītās platībās ir tendence veidoties lielākai sakņu biomasai. Savukārt lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos vienāda vecuma kokiem veidojas būtiski lielāka sakņu biomasas nekā kokiem meža zemēs.
4. Meža zemēs un lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos parastās priedes jaunaudzēs lielāko sakņu frakciju veido baltsaknes (51% no kopējās sakņu biomasas), tai seko celma frakcija (30%), sīkās saknes (13%) un uzsūcošās saknes (6%). Atsevišķu frakciju biomasu izsaka pakāpes regresija ar koku caurmēru 1,3 m augstumā kā argumentu. Promocijas pētījumā iegūtās sausās biomasas vērtības parastās priedes jaunaudzēs lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos svārstās no $9,9 \pm 5,3$ t SM ha⁻¹ (12 gadus veca audze) līdz $20,1 \pm 4,5$ t SM ha⁻¹ (14 gadus veca audze), savukārt meža zemēs no $10,8 \pm 0,4$ t SM ha⁻¹ (8 gadus veca audze) līdz $60,5 \pm 1,7$ t SM ha⁻¹ (24 gadus veca audze).
5. Meža zemēs uzsūcošo sakņu morfometriskie parametri (caurmērs, virsmas laukums un garums) ir lielāki stādītās platībās nekā dabiski atjaunojušās platībās. Lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos morfometriskie parametri ir lielāki nekā meža zemēs.
6. Meža zemēs kopējā uzsūcošo sakņu biomasas ir lielāka dabiski atjaunojušajās platībās nekā stādītās platībās. Savukārt lauksaimniecībā neizmantotās zemēs uzsūcošo sakņu biomasas ir mazāka nekā meža zemēs.
7. Meža zemēs baltsakņu un sīko sakņu garums ir lielāks nekā lauksaimniecībā neizmantotajās zemēs. Meža zemēs baltsakņu un sīko sakņu garums ir lielāks dabiski atjaunojušajās audzēs nekā stādītās audzēs.
8. Vidējais oglekļa saturs sakņu biomasā statistiski būtiski atšķiras starp skujkokiem un lapu kokiem, kā arī starp meža zemēm un lauksaimniecībā neizmantotajām zemēm,

dažādām sakņu frakcijām, audžu vecumiem un koku sugām. Parastās priedes vidējais C saturs sakņu biomasā meža zemēs ir $52,1 \pm 0,1\%$, bet lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos $50,3 \pm 0,1\%$. Pētījuma ietvaros vidēji parastās priedes sakņu biomasā meža zemju apmežojumos 8 gadus vecā kokaudzē piesaistītais CO_2 ir $19,8 \pm 0,7 \text{ t ha}^{-1}$, 12 gadus vecā $32,5 \pm 1,7 \text{ t ha}^{-1}$, 13 gadus vecā $31,9 \pm 7,0 \text{ t ha}^{-1}$, 14 gadus vecā $28,8 \pm 1,9 \text{ t ha}^{-1}$, 24 gadus vecā $111,5 \pm 3,1 \text{ t ha}^{-1}$ un 45 gadus vecā $70,8 \pm 12,2 \text{ t ha}^{-1}$. Savukārt parastās priedes sakņu biomasā lauksaimniecībā neizmantoto zemju apmežojumos 12 gadus vecā audzē piesaistītais CO_2 ir $18,1 \pm 9,6 \text{ t ha}^{-1}$ un 14 gadus vecā audzē $53,6 \pm 16,5 \text{ t ha}^{-1}$. Aprēķināts koeficients pārrēķinam no virszemes uz sakņu biomasu, un tā vērtība ir 0,28, iegūta atziņa, ka pazemes biomasu tiek pārvērtēta CO_2 aprēķināšanā SEG inventarizācijas kontekstā.

9. Apstiprinās hipotēze, ka sakņu frakcijas biomasu ar augstu ticamību var aprēķināt kā funkciju no viegli uzmērāmiem koku parametriem – koka caurmērs 1,3 m augstumā un augstums.

1. General description of the paper

1.1. Topicality

The sustainability of an ecosystem as a complex of specific plants, animals and microorganisms mainly depends on the impact of the environment (climate, soil) and human activities. One of the main effects human commercial activities have on the environment is the increase of air pollution that introduces corrections to the development conditions of plants. At the moment the scientists are focusing on several problems the most important of which is the raise in the amount of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere that causes global warming.

An increased amount of carbon dioxide in the atmosphere (greenhouse effect) causes alterations in the plant growth therefore the amount of dead plants and forest litter increases. There has been a lot of research regarding the climate changes, including the research on carbon (C) accumulation in tree biomass. It has to be pointed out that scientists do not agree on the issue of causes of the greenhouse effects. However, the greater the amount of greenhouse effect causing gas gets in the atmosphere, the warmer the climate is going to get on the Earth.

In order to partially decrease the negative effects of human activities, the governments all over the world, by considering the conclusions made by scientists, have developed chain of resolutions that will help to decrease the negative effect on climate change, environment, including forest ecosystems. Several European Union laws have been passed regarding climate changes, and Latvia is engaged in observing them as well. One of these is European Parliament and Council of Europe Directive 2003/87/EK of 13 October 2003, regulating the development of greenhouse gas emission (GHG) quota trade system in the European Community. The directive was developed in order to help the EU member states to meet their international engagements regarding the decrease of emissions in the most economically beneficial manner, as well as to ensure that the common European Union engagements are met.

In accordance with the Forest statistical inventory data forests in Latvia make up 3290288 ha or 50.9% of the total territory of the country including the stands with dominating species being pine 1009170.5 ha or 35% of the total forest stand area. Accordingly the Scots pine young stands make up 15% of the total forest area of Latvia and they are a significant storage of carbon. After Latvia regained its independence and experienced changes in agrarian policy large areas of agricultural land are abandoned and as of this day more than 310 000 ha of these lands have been artificially or naturally afforested. At this moment most of the young stands have reached the age of 10 – 15 years and a significant carbon accumulation in the produced wood has commenced.

In the forest the accumulation of carbon dioxide occurs during the process of photosynthesis. By measuring the average moisture of the wood, above-ground and below-ground biomass value ratios, it is possible to calculate the amount of carbon being accumulated in the forest stands. At the moment there is little data in Latvia about the turnover and accumulation of carbon, especially in the forest stand root biomass and naturally afforested or artificially created forest stands on abandoned agricultural land. That is why the research in this field allows acquiring wider knowledge on carbon change

turnover cycle, at the same time acquiring data on carbon accumulation in the stands of different age.

For centuries there has been a demand for stem fraction valuation in volumetric units. That is why in forest inventory several simple and accurate methods for establishing individual tree stem volume and tree group growing stock. By knowing the wood density values it is possible to recalculate the volume estimation in the units of mass. However there is a problem with establishing non-stem fraction biomass, where this methodical indication is not suited for calculation of volume of these fractions, due to different difficulties and reasons.

In Latvia as a result of different circumstances agricultural lands afforest naturally or they are afforested, creating forest stands with different tree species. In the forest land and agricultural land pine, both, sowed its seeds naturally and is renewed by planting, and it is important to answer the question – how much carbon is accumulated in pine root biomass, especially during the recent years, when there was a significant growth in forest renewal and afforested activities.

1.2. Aim of the research

The scientific aim of this research is the study of root biomass and carbon accumulation in the young stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.).

1.3. Research tasks

The research tasks of the doctoral thesis are:

1. The study of root biomass and morphometric parameters of Scots pine young stands in forest land and in afforested former agricultural land;
2. The comparison of carbon accumulation in Scots pine young stand root biomass under the influence of different environmental factors;
3. The development of equations and recalculation ratios for the calculation of different root biomass fractions in Scots pine young stands.

1.4. Proposed hypothesis

The following hypothesis has been proposed in the present doctoral thesis: the correlation between the components of tree biomass is biologically determined, and the biomass can be calculated as a function using the tree parameters that are easily measured.

1.5. Scientific novelty

In both the forest land and in agricultural land the pine sowed naturally and it is also renewed by planting, that is why, in order to answer the question how much carbon is accumulated in pine root biomass, it is important to analyse the root biomass and carbon accumulation of Scots pine in different environmental conditions.

At the moment there is little data in Latvia regarding the turnover and accumulation of carbon, especially in the forest stand root biomass and naturally afforested or artificially created forest stands on abandoned agricultural land. That is why the research in this field allows acquiring wider knowledge on carbon change turnover cycle, at the same time

acquiring data on carbon accumulation in stands of different age. For centuries there has been a demand for stem fraction valuation in volumetric units. That is why in forest inventory several simple and accurate methods for establishing individual tree stem volume and tree group growing stock have been developed. By knowing the wood density values it is possible to recalculate the volume estimation in units of mass. However, there is a problem with establishing non-stem fraction biomass, where this methodical indication is not suited for calculation of biomass of these fractions. In Latvia at the moment a lack of data regarding root biomass in different fractions in forest land and agricultural land forests.

1.6. Practical novelty

In compliance with international obligations (ratified by the Saeima of the Republic of Latvia in 2002), Latvia has to submit FAO (The Food and Agriculture Organization of the United Nations) a report on the implementation of Kyoto Protocol. The report data are the basis for the allocation of GHG quotas among the states. Each state is financially interested in reducing the amount of GHG that can be achieved by increasing the volume of C attracted by the country area, mainly by afforesting the abandoned agricultural land and by stimulating the productivity of forest. In one or the other case most of carbon accumulation is performed by the biomass of the tree plant roots. By developing the options for its determination, the respective methods will be offered for drawing up a precise National report.

1.7. Structure and volume of doctoral thesis

In the **first** chapter of this doctoral thesis the conclusions of the previous research on Scots pine root biomass, factors affecting root development, as well as carbon accumulation in root biomass have been summarized. A detailed analysis of literature on tree-plant biomass functional classification, root biomass development and the factors affecting it, biomass in different environmental conditions, carbon turnover cycle in forest stands and carbon accumulation in root biomass in different environmental conditions, establishment of root biomass transition ratio has been performed, and information regarding the present root biomass calculation equations has been summarized.

In the **second** chapter the research material and methods have been described.

In the **third** chapter the results of the research and their analysis have been described, and the results have been interpreted. For better presentation of results there are subsections and paragraphs in the section. In subsection 3.1 the evaluation of morphometric parameters for different root fractions in stands with different environmental conditions is given. Whereas, in paragraphs 3.1.1. analysis of fine roots morphometric parameters has been performed, but in 3.1.2 for small roots and coarse roots in forest lands. In subsection 3.2. an evaluation of Scots pine root biomass in different forest environmental conditions has been performed. The subsection consists of four paragraphs including the analysis of root biomass for different fractions in forest lands. Accordingly, in paragraph 3.2.1 fine root biomass, in 3.2.2 small root biomass, in 3.2.3 coarse root biomass, 3.2.4. stump biomass and in paragraph 3.2.5. total root biomass in forest lands have been analysed. In subsection 3.3 morphometric parameters of different

root fractions of Scots pine in afforested abandoned agricultural land have been analysed. Paragraph 3.3.1 includes evaluation of morphometric parameters of fine roots, but in paragraph 3.3.2 morphometric parameter evaluation of small roots and coarse roots in afforested abandoned agricultural land. Subsection 3.4. includes evaluation of Scots pine root biomass in different forest environmental conditions on afforested abandoned agricultural land. In paragraph 3.4.1 the evaluation of fine root biomass on afforested abandoned agricultural land, in 3.4.2 of small root biomass, in 3.4.3 of coarse root biomass, in 3.4.4. evaluation of stump biomass and in paragraph 3.4.5. evaluation of total root biomass have been performed. Subsection 3.5 describes the evaluation of the changes in humidity of Scots pine root fractions under the influence of different growing conditions, whereas subsection 3.6. - evaluation of changes of Scots pine root density in different growing conditions. In subsection the transition ratios of different Scots pine root biomass fractions on forest land and abandoned agricultural land have been established and evaluated. Whereas in subsection 3.8. carbon content in different Scots pine fractions has been analysed, as well as the carbon content between different root biomass fractions of conifers and deciduous trees has been compared. Accordingly in subsection 3.9 the analyses of root biomass calculation equation for different fractions of Scots pine root biomass has been performed.

The volume of this doctoral thesis makes 130 pages, the information is summarized in 24 tables, 85 figures and 3 appendices, and 145 sources of literature have been used.

2. Material and methods

In accordance with the aim and the tasks of this work within the framework of this research Scots pine young stands of different density, age and type of management and soil category (forest lands and abandoned agricultural lands) were chosen. For the comparison of data and description of the situation in Scots pine stands, which are beyond the age of young stands, as well as stands of other species with different ages were selected. In study elected Scots pine stands on forest land which afforested naturally (DAA) and planted afforested (SA) and planted afforested former agricultural land (LNZ).

In order to describe the development of root biomass and the amount of accumulated carbon, within the framework of this research the stands were chosen in such a way that they would reflect the widest forest plantation and management possibilities. The stands were planted in different periods of time, therefore different forest renewal types were used in practise (Table 2.1.).

In accordance with the aim and the tasks of this research in order to establish the amount of root biomass and accumulated carbon, 22 sample fields were set up - one sample field in each stand, the centre of which is located in the spot most characteristic of this stand (excluding terrain elevations, micro-gullies and the edge-effect).

In order to establish the amount of root biomass and to carry out the analysis the selection of sample trees was carried out by considering the tree stem diameter, at the height of 1.3 m (DBH_{1.3}), and the average height (H), including the average parameters of the stand where possible. In the selection of sample trees a ratio of 1:3:1 was used (one tree in the minimal, three – in the average and one – in the maximal degree of diameter) or 1:1:1 (one tree in the minimal, one – in the average and one – in the maximal degree of

diameter). For data comparison in each stand soil description according to classification of Latvia have been done.

The sampled population in the empirical material consisted of 116 selected sample trees: *Pinus contorta* Douglas ex Loudon var. *latifolia* Engelm., *Betula pendula* Roth, *Pinus strobus* L., *Populus tremuloides* Michx. x *Populus tremula* L., *Alnus incana* (L.) Moench, including 63 *Pinus sylvestris* L. sample trees.

Within the framework of this research the root system of the selected sample trees for the calculation and analysis of root biomass was divided in 4 fractions: coarse roots – $\varnothing > 20$ mm; small roots – $\varnothing 2 - 20$ mm; fine roots – $\varnothing < 2$ mm (Finer et al., 2011); stump (Liepa un Blija, 2008).

The root biomass of stump, coarse roots and small roots of the sample trees was established for 116 sample trees, by excavating the root system (Fig. 2.1.), separating soil particles from the roots, washing with a pressurized water jet and weighting with an accuracy of ± 0.02 kg.

The fine root biomass of the trees was calculated after establishing the root biomass in the previously constructed sample-fields. Root samples were collected with a specific *Ejkelkamp* soil drill (100 cm³ cylinder). For establishment of fine root biomass in each sample-field, using a randomization principle, soil samples were collected in 20 repetitions – in depths of 0 – 10, 10 – 20, 20 – 30, 30 – 40, 40 – 50 and 50 – 60 cm. The collected fine roots samples were rinsed in strainers in laboratory separating soil particles from the fine roots. The fine roots were carefully separated from the small roots ($\varnothing > 2$ mm) and the roots of other plants and trees, and weighted on analytical scales with accuracy of 0.0001 g.

The fine root samples for the analysis of morphometric parameters were scanned using computer software *Win RHIZO 2002 C* (Regent instrument^R) and calibrated scanner *STD-1600*. As a result of that data about root length, root surface area and diameter of fine roots were obtained.

In order to establish the specific weight of dry biomass the root fraction samples with an appropriate bark section were selected for analysis and dried in a temperature of 105°C until a constant mass was obtained (DM). The absolute humidity of the wood was calculated using the equation (2.1).

$$M = \frac{A - B}{B} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

where:

M – absolute humidity of wood, %;

A – fresh wood, g;

B – absolutely dry wood, g;

The amount of the accumulated C was established for three root biomass fractions: coarse roots; small roots; stump. The samples for establishing the content of C were collected with a randomization principle, including the widest possible stump, coarse root and small root diameter interval. The carbon content in the root wood-pulp fractions was established for the samples with a bark. To establish the total C content a carbon element-analyser LECO CR-12 was used, which is constructed on the basis of burning cameras

(measuring and reference cameras). The method is based on carbon dioxide detection with infrared radiation.

For the calculation of dendro-metric parameters the measured sample-field data have been used.

Number of trees ha^{-1} :

$$N = \frac{N_p}{s}, \quad (2.2)$$

where:

N_p – number of trees in a sample-field having area of 100 m^2 or 500 m^2 ;

s – area of sample fields, ha.

The basal area of stand average tree, m^2 :

$$g_v = \frac{\sum g_j}{N}, \quad (2.3)$$

where:

g_j – j – the basal area of respective tree, m^2 ;

N – number of trees.

Diameter of stand average tree, cm:

$$d_v = \sqrt{4 \cdot \frac{g_v}{\pi}}, \quad (2.4)$$

where:

g_v – the basal area of stand average tree, m^2 .

The basal area of stand, m^2 :

$$G = g_v \cdot N, \quad (2.5)$$

where:

g_v – the basal area of stand average tree, m^2 ;

N – number of trees, pcs. ha^{-1} .

Volume of tree stem, together with bark m^3 :

$$V = \psi \cdot L^\alpha \cdot D^\beta L^{\gamma} L^{\varphi}, \quad (2.6)$$

where:

L – stem length, m;

D – stem diameter, together with bark, cm;

$\psi, \alpha, \beta, \varphi$ – empirically established ratios (Table 2.2.).

Growing stock of the tree species, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$:

$$V_S = V \cdot N, \quad (2.7)$$

where:

V – average tree stem volume, together with bark, m^3 ;

N – number of trees ha^{-1} .

In order to determine the density in root dimensions the method determining the specific weight and volume of root wood pulp and bark was used. The volume is determined by placing the specific root fraction in a volume-determination container filled with water. The root volume is equivalent to the amount of the extracted water. The root density is calculated by using the mutual ratio of the volume of the extracted water and that of naturally humid root fraction biomass.

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.8)$$

where:

ρ – density, kg m^{-3} ;

V – volume of naturally humid sample, m^{-3} ;

m – mass of naturally humid sample, kg.

Normally the root fraction biomass is calculated using the biomass transition ratios determined in the research with sample trees c_i :

$$c_i = \frac{m_i}{m}, \quad (2.9)$$

where:

c_i – biomass recalculation ratio;

m_i – biomass of the respective part of tree, t;

m – volume of the tree stem, t m^3 (Liepa, 2005).

When the biomass recalculation ratio is multiplied by stem volume or the growing stock of forest stand, the freshly cut biomass of the respective tree part is obtained.

$$m_f = M \cdot c_i, \quad (2.10)$$

where:

m_f – biomass of the respective tree or part of stand fractions, t;

M – volume of tree stem or stands growing stock, m^3 ;

c_i – recalculation ratio of respective biomass fraction.

For the empirical data groups statistical indicator calculation was carried out, descriptive statistics methods were used. As in several groups under research the empirical material values differed from the regular division, for their comparison Mann-Witney U test and Kruskal-Wallis test un-parametric methods were used, which is an alternative to the t-test and for a single-factor dispersion analysis and can be used regardless of the data division type. The marginal error of the mean value of the sample groups was calculated,

in which the Student division standardized deviation was included, the value of which depends on the number of freedom degrees and the accepted materiality level. For the data processing a single-factor dispersion analysis was used, but in separate cases also a double-factor dispersion analysis. Using the dispersion analysis the factorial effect of age, species, renewal type as well soil utilization on resulting feature was analysed. The regression analysis was applied in order to state the regularity of changing the resulting feature if the values of factorial feature change. The regression analysis was applied mainly in order to find coherence between dendro-metric parameters and the volume of root biomass in different fractions and the correlation between different biomass fractions. Correlation analysis was applied in order to find out the connections, conformity and tightness of different features and applied methods.

3. Results and discussion

3.1. Morphometric evaluation of Scots pine fine roots

Within the framework of the research the analysis of Scots pine young stands of different age shows that in the depth of 0 – 10 cm fine roots are longer in young stands. The length of fine roots in different depths of soil is different. Statistically significant differences of fine root length can be observed in stands of different age (dispersion analysis, $p < 0.05$).

In younger stands of LNZ the fine roots are significantly longer (dispersion analysis, $p < 0.05$) and it can be explained by the fact that the tree requires nutrients in its early development stage. In forest land the connection is not as significant as it is in afforested agricultural land. It means that in fertile agricultural stands the trees have longer fine roots and thus they have bigger fine surface area.

The diameter of fine roots is one of the morphometric parameters describing the tree vitality. In forest lands the fine root diameter is statistically significantly different in different depths for Scots pine stands of different age (dispersion analysis, $p < 0.05$). The diameter of fine roots is larger in younger stands in the depth of 0 – 10 cm, and in this depth there are significant differences compared to older stands (dispersion analysis, $p < 0.05$). The analysis of results shows that for Scots pine fine root diameter the determinative factors do not include the age of the stand, nor the vertical placement.

In LNZ the roots with larger diameter are located in the top layers of soil, in the depth of 0 – 10 cm the average diameter is 0.9 ± 0.1 mm, in 10 – 20 cm depth 0.8 ± 0.1 mm. Whereas the diameter of these roots significantly decreases as the depth increases and in the depth of 40 – 50 cm the average diameter is 0.4 ± 0.1 mm, but in 50 – 60 cm depth it is 0.4 ± 0.1 mm. In afforested abandoned agricultural land the average diameter of fine roots in the depth of 0 – 60 cm is larger than it is in the forest land. In the soils rich in mineral nutrients the roots tend to have a larger diameter.

By analysing the root surface area of Scots pine stands of different age in forest land and LNZ land it can be observed that the greatest part of active area of roots is located in the top layers of soil, thus ensuring a complete growth dynamics for the tree, by fine the rain water and the nutrients washed through the top layers of soil. Younger stands have a larger horizontal spread of fine roots in soil layer at the depth of 0 – 20 cm. In older stands

the root placement is different in the whole soil layer in 0 – 60 cm depth. The differentiation of root surface area in different depth for older stands can be attested to the lack of water and nutrients in the top layers.

The results mark out that the surface area is larger in afforested abandoned agricultural land compared to the forest land plantations.

3.2. Morphometric evaluation of Scots pine small roots and coarse roots in forest land

The distribution of roots goes outside the projection area of the crown. This tendency is really typical in DAA (naturally afforested stand), as well is in SA (planted afforested stand). After comparing DAA and SA it is seen that SA have significantly longer root dimensions than DAA (Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$). On average in SA the small roots are twice as long as they are in DAA.

The average root projection length statistically significantly differs in stands of different age (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$), and large dimensional (length) changes can be observed. As the stand gets older the roots get longer. According to the analysis of the average root projections in Scots pine stands, the total coarse root and small root length do not statistically significantly differ between the placements in different cardinal points (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$). On average tree roots tend to reach the furthest towards North, accordingly 2.7 ± 0.8 m, and they are the shortest towards North-East 1.8 ± 0.6 m.

In figure 3.1. the dispersion of the acquired points around the coherency line describes the correlation tightness. The dispersion of the length points of small roots in SA as well as in DAA around the coherency line are located in a large amplitude and the correlation ratio values are weak, accordingly in SA $r = 0.17$ ($t = 1.345 < t_{\alpha,v} = 2.306$; $\alpha = 0.05$) and in DAA $r = 0.43$ ($t = 7.656 > t_{\alpha,v} = 2.034$; $\alpha = 0.05$). As the $DBH_{1.3}$ (diameter of breast height) or H (height of the tree) increases the length of small roots does not increase. The development of the small roots length is uneven, and by considering the data analysis, is hard to predict.

Taproot develops in different age, growing conditions and for different species. Within the framework of this research with 95% credibility the difference of taproot length is statistically significant between the stands of different age (Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$). In younger Scots pine stands the taproot is poorly developed, but as the stand gets older and mature, the taproot gradually becomes stronger. In middle-aged Scots pine stands the trees have a strong taproot, correspondingly in a 45 year old stand the average length of taproot is 1.12 m.

3.3. Morphometric evaluation of Scots pine small roots and coarse roots in afforested abandoned agricultural land

Morphometric parameters of coarse roots and small roots in LNZ depend on the age of stand. It is seen that coarse roots grow longer as the stand gets older (Fig. 3.2.).

In LNZ small roots are significantly longer than coarse roots and on average make up 80% of the total length of medium and coarse roots. At the same time the coarse roots make up 20% of the total length of coarse roots and small roots. The length of medium

small roots in Scots pine stands make up $4.1 \pm 0.8 \text{ km ha}^{-1}$, but the length of coarse roots is $1.6 \pm 0.2 \text{ km ha}^{-1}$.

Similar as it was for sample trees in forest land, in abandoned agricultural land the root projections reach outside the tree crown projection area many times. Therefore the conclusion obtained within the framework of this research states that the roots in afforested agricultural land spread out not only within the crown projection area, but outside it as well.

3.4. Scots pine fine root biomass evaluation in different environmental conditions

In forest land the vertical occurrence of fine root biomass is greater in the top layers of soil (0 – 30 cm depth) and decreases in the depth. The volume of fine root biomass depends on the depth of soil, and there are significant differences between different layers of soil (t test, $p < 0.05$). There is even a close linear negative connection between fine root biomass and the depth of soil.

When analysing the distribution of fine roots in relation to the soil preparation type, there are no significant differences (t test, $p = 0.97$) between prepared and unprepared soil. The age of the stand is not the determinant of fine roots biomass volume, as the differences between the average biomass volume and the age of the stand in each layer of soil are not significant. When comparing the average volume of absolutely dry fine roots between young stands in 0 – 60 cm depth, that have naturally renewed and have been artificially renewed, no significant differences can be observed (t – test, $p = 0.92$). In SA stand layer at 0 – 60 cm there is on average $5.2 \pm 2.4 \text{ t absolutely dry ha}^{-1}$ but in DAA it is $5.4 \pm 2.5 \text{ t absolutely dry ha}^{-1}$ fine roots. Comparing fine root biomass in different depth of soil there are significant differences between both types of management in 0 – 10 cm depth (t – test, $p = 0.001$), where the volume of biomass is greater in SA than DAA, accordingly $3.0 \pm 1.4 \text{ t absolutely dry ha}^{-1}$ un $2.5 \pm 1.1 \text{ t absolutely dry ha}^{-1}$.

In forest land there is a mutual independence between dendro-metric parameters ($\text{DBH}_{1,3}$) and fine root biomass (Fig. 3.3.). There is a similar tendency in LNZ.

The analysis of the research results shows that in forest land as well as in LNZ the number of trees per ha is not a determinant of fine root biomass. The connection between the parameters is very weak and the number of trees per unit of area does not show a binding effect on the development of fine root biomass.

The same as it is in forest land, in the abandoned agricultural land (Fig. 3.4.) the fine root biomass decreases as the depth increases. By evaluating the empirical material of all the stands together, on average the greatest volume of fine root biomass is concentrated at the depth of 0 – 10 cm, and significant biomass differences were observed only between depths of 0 – 10 cm and 50 – 60 cm of soil layers. By comparing the fine root biomass in abandoned agricultural land and in forest land, it can be observed that in agricultural land the volume of biomass is smaller.

In the afforested abandoned agricultural land the total volume of fine root biomass at 0 – 60 cm soil depth is greater in younger stands, and it decreases as the stand gets older. In older stands there is a differentiation of fine roots with the tendency of decreasing in deeper soil layers.

3.5. Comparison of small root biomass in Scots pine different environmental conditions

In forest land the age of a tree determines the total volume of the tree biomass, as well as the distribution of biomass for different fractions. The age of the tree statistically significantly affects the small root biomass (Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$). The selected pine sample trees have a smaller volume of root biomass in younger stands, and it increases as the stand gets older.

The trees that have a bigger diameter at 1.3 m height (Fig. 3.5.) and are taller make up a greater small root biomass, and there is such a tendency for each age group.

Within the framework of this research there was a tendency observed that in afforested abandoned agricultural land and in forest land the volume of small root biomass depends on the species and the age of the trees. When comparing the small root biomass of Scots pine sample trees in afforested agricultural lands and forest land at stands of same age there are no significant statistical differences (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$), but biomass of these roots on average is 1.9 greater in afforested agricultural land than it is in forest land, per unit of area, respectively $2.5 \pm 0.5 \text{ t DM ha}^{-1}$.

In LNZ as well as in forest land the diameter of sample trees at $\text{DBH}_{1.3}$ can be used to determine (Fig. 3.6.) and project the root biomass ($R^2 = 0.86$). The inventory indicators of the sample trees and root biomass have a closer connection in afforested agricultural land than in forest land.

According to the data used in the research, on average the volume of small root biomass in Scots pine a young stand is $3.7 \pm 1.6 \text{ t DM ha}^{-1}$. The results obtained in this research indicate that the small root biomass takes up a significant part of the total tree root biomass, and on average it is $30 \pm 5\%$ in Scots pine stands.

3.6. Comparison of Scots pine coarse root biomass in different environmental conditions

The results of this doctoral thesis indicate that the coarse root biomass ranges in large amplitude depending on the age of the tree. As shown in figure 3.7. the diameter at $\text{DBH}_{1.3}$ describes non-linearly (degree function) the coarse root biomass in forest land. Regression equation determination ratio is $R^2 = 0.93$.

In the forest land the age of the stand significantly affects the amount of coarse root biomass (Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$). When comparing the amount of sample tree coarse root biomass between different types of cultivation, in 45 year old stands there are no statistically significant differences (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$). The average coarse root biomass for sample trees in a 45 year old SA is $15.4 \pm 7.0 \text{ kg DM}$, whereas in a 45 year old DAA on average it is $14.8 \pm 7.2 \text{ kg DM}$.

The research marks out that the average coarse root volume in Scots pine young stage forest land is $14.6 \pm 5.3 \text{ t DM ha}^{-1}$.

Scots pine coarse root biomass in afforested abandoned agricultural land in selected stands ranges between $1.4 \pm 0.6 \text{ t DM ha}^{-1}$ (12 years) and $8.3 \pm 2.7 \text{ t DM ha}^{-1}$ (38 years). The evaluation of the average amount of coarse root biomass of the sample trees in the selected

stands shows that there are statistically significant differences (Mann-Whitney U test, $p < 0.05$) between the stands of different age.

As the comparison of the average coarse root biomass of Scots pine sample trees in abandoned agricultural land and forest land shows, there are no statistically significant differences between both sample groups (Mann-Whitney U test, $p < 0.05$).

The coarse root biomass of Scots pine stands in LNZ is easily predictable by using the tree diameter at $DBH_{1.3}$ (Fig. 3.8.). Non-linear regression equation for coarse root biomass projection is explained by determination ratio $R^2 = 0.93$. The closeness of connection between the coarse root biomass and $DBH_{1.3}$ is described by correlation ratio $r = 0.91$ ($t = 8,842 > t_{\alpha,v} = 2,109$; $\alpha = 0.05$).

3.7. Comparison of Scots pine stump biomass in different environmental conditions

In young stands the stump for the sample trees develops weakly. In forest land for a sample tree the average stump biomass of 8 year old Scots pine at SA is 0.4 ± 0.1 kg DM, in the 12 year old stand 0.6 ± 0.3 kg DM and in the 13 year old stand 0.7 ± 0.2 kg DM. The 14 year old Scots pine SA has a greater biomass of stump and it significantly increases (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$) as the stand gets older, therefore the stump fraction directly depends on the age of tree. There are no statistically significant differences (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$) between stump biomass in stands of the same age, but cultivated differently. In DAA the stump develops faster than in SA, and it is more pronounced already at the age of 8 years, as well as at the age of 45 the average sample tree stump biomass is greater in DAA than in SA, respectively 11.2 ± 5.1 kg DM and 10.3 ± 4.9 kg DM. Such tendencies can be explained by the effect of cultivation type, as in prepared soils and under the influence of high quality planting material the trees have larger top root system (coarse roots and small roots) and have a less pronounced stump part, whereas in naturally afforested stands the root system is deeper with larger stump fraction dimensions (adds to the support function).

The connection between the sample tree $DBH_{1.3}$ and stump biomass in forest land is close (Fig. 3.9.). The closeness of the features is described by Pearson's correlation ratio $r = 0.89$ ($t = 14.319 > t_{\alpha,v} = 2,004$; $\alpha = 0,05$) and non-linear power regression ($R^2 = 0.86$).

Stump biomass in Scots pine stands in afforested abandoned agricultural land ranges from 1.6 ± 0.7 t DM ha⁻¹ to 7.8 ± 2.6 t DM ha⁻¹.

Scots pine stump biomass and sample tree $DBH_{1.3}$ in LNZ create a strong correlation which is described by correlation ratio $r = 0.86$ ($t = 6.692 > t_{\alpha,v} = 2.109$; $\alpha = 0.05$). A non-linear regression equation can be seen in figure 3.10., which is explained by determination ratio $R^2 = 0.87$. The empirical points densely group around the adjusted curve indicating that the data has been collected correctly and can be used for an accurate stump biomass description.

In comparison with forest land, stump biomass fraction in stands of same age is greater by 7.5% in the afforested agriculture lands.

3.8. Changes in humidity in Scots pine root fractions under the influence of different environmental conditions

The average absolute water content of root wood-pulp is $202 \pm 10\%$ in DAA and $179 \pm 6\%$ in SA, whereas the relative humidity is $65 \pm 2\%$ in DAA and $63 \pm 1\%$ in SA. When analysing the root water content in stands of different origin, that have an artificially renewed or naturally renewed forest, no statistically significant differences in the absolute and relative humidity were observed (t test, $p > 0.05$), although DAA had a tendency to have a greater root humidity content than in SA.

The age of the stand and the root fraction are factors affecting the content of humidity. When analysing the absolute humidity it was observed that there were statistically significant differences between different root fractions, as well as in stands of different age (dispersion analysis, $p < 0.05$).

During the research it was found that there is a tendency for the average absolute root humidity to decrease as the stand gets older. By comparing the types of cultivation in stands of the same age, it was observed that in coarse roots, as well as in small roots, the absolute humidity is greater in DAA and the differences are statistically significant (t test, $p < 0.05$). It was observed that stump wood pulp has the lowest absolute humidity. The absolute humidity is statistically significantly different in DAA and SA of the same age (t test, $p < 0.05$).

Comparing the absolute humidity of LNZ, a tendency similar to the one in the forest land was observed (as the stand gets older, the humidity content decreases). In LNZ the absolute humidity content statistically significantly differs in different fractions and for different ages (dispersion analysis, $p < 0.05$), but on average it ranges between $146 \pm 7\%$ and $222 \pm 6\%$. The highest absolute humidity content was found in small roots. In stump fraction the absolute humidity content is the lowest – ranging between $113 \pm 11\%$ and $186 \pm 8\%$.

On average in roots fractions in LNZ the absolute humidity content is slightly higher than it is in forest land, but the difference is not statistically significant (t test, $p < 0.05$). The relative humidity is statistically significantly different in stands of different age (single-factor dispersion analysis, $p < 0.05$) and it ranges between $58 \pm 2\%$ and $61 \pm 1\%$. Also there are statistically significant differences between the relative humidity in different root fractions (single-factor dispersion analysis, $p < 0.05$). The average relative humidity content is the highest in small roots $72 \pm 1\%$, in coarse roots it is $63 \pm 1\%$, but in stump fraction – $58 \pm 2\%$.

3.9. Comparison of Scots pine root density in different environmental conditions

Absolutely dry root density between the stands of different age and fractions, with 95% credibility, statistically significantly differs (dispersion analysis, $p < 0.05$). In SA the average root fraction density ranges between $163 \pm 64 \text{ kg m}^{-3}$ in 8 year old stand and $339 \pm 8 \text{ kg m}^{-3}$ in 24 year old stand. Whereas in DAA the average root density ranges between $143 \pm 18 \text{ kg m}^{-3}$ in 8 year old stand and $400 \pm 11 \text{ kg m}^{-3}$ in 24 year old stand. When analysing the average density values in young stands, it was observed that there are statistically significant differences between different fractions and soil preparation types

(dispersion analysis, $p < 0.05$). The stump fraction was less dense, respectively $245 \pm 17 \text{ kg m}^{-3}$ in DAA, and $281 \pm 15 \text{ kg m}^{-3}$ in SA. In SA the density of small roots is $367 \pm 20 \text{ kg m}^{-3}$ and the density of coarse roots is $401 \pm 5 \text{ kg m}^{-3}$, but in DAA the density of small roots is $301 \pm 22 \text{ kg m}^{-3}$, and the density of coarse roots is $394 \pm 6 \text{ kg m}^{-3}$.

The differences between root density in LNZ stands of different age are similar to the differences in forest land. The average root density of the stands of different age within one fraction does not significantly differ (single-factor dispersion analysis, $p > 0.05$), but between different fractions and different ages, with 95% credibility, it differs statistically significantly (dispersion analysis, $p < 0.05$). The average density of the root system in LNZ ranges between $392 \pm 97 \text{ kg m}^{-3}$ in 38 year old stand and $425 \pm 14 \text{ kg m}^{-3}$ in 12 year old stand. On average in LNZ the stump fraction has the densest wood-pulp, respectively $450 \pm 61 \text{ kg m}^{-3}$. The average density of coarse root wood-pulp is $358 \pm 54 \text{ kg m}^{-3}$, but the density of small roots is $331 \pm 50 \text{ kg m}^{-3}$.

After comparing the root density in forest land and LNZ, no statistically significant differences were observed. In LNZ the root wood-pulp is denser, on average – $379 \pm 55 \text{ kg m}^{-3}$, but in forest land it is $332 \pm 14 \text{ kg m}^{-3}$.

3.10. Calculation of different Scots pine root fraction biomass transition ratios

Biomass transition ratios are the relation of the respective sample tree fraction biomass and stump volume. Within the framework of this doctoral thesis the biomass transition ratios were established for stump, coarse roots and small roots (c_c , c_b , c_s), as well as $\sum c_i$ (Table 3.1.).

The sum of biomass transition ratios $\sum c_i$ and the sample tree $\text{DBH}_{1.3}$ in Scots pine stands are mutually independent features (the same refers to separate ratios), that are described by the determination ratio $R^2 = 0.12$. It means that for the calculation of non-stump biomass in stands and their groups, average arithmetical values of transition ratios can be used, which significantly simplifies biomass evaluation, as for establishment of the total biomass or its separate fractions only the growing stock of stand or group has to be known.

As it is seen in figure 3.11. the spread of empirical points is relatively wide. The wide spread of empirical points can be attested to the dendro-metric, phytocenotic and edaphic diversity of the sample tree sample group that was selected on purpose in order to represent Scots pine stands as fully as possible.

3.11. Carbon content in Scots pine root biomass

Within the framework of this research the average carbon content differs between conifers and deciduous trees within the range of $\sim 3\%$. The average C content of conifers in forest land is $52.1 \pm 0.1\%$, but for conifers in afforested agricultural lands it is $50.3 \pm 0.1\%$, for deciduous trees – $49.3 \pm 0.1\%$. There is statistically significant difference in the average carbon content in root biomass (Fig. 3.12.) between conifers and deciduous trees, as well as between forest land and LNZ, different roots fractions, stands with different ages and tree species (multi-factor dispersion analysis, $p < 0.05$). It was observed that the C content is higher in conifer root wood-pulp fractions then it is for deciduous trees. The average C

content in conifer root wood-pulp in forest land is higher than in the sample trees in afforested agriculture land.

Deciduous tree root fraction wood-pulp has a lower content of C compared to conifer wood-pulp in afforested agriculture lands (multifactor dispersion analysis, $p < 0.05$). Whereas comparing C content in conifer root fractions in forest land and agriculture land, it was observed that in forest land it is significantly higher (single-factor dispersion analysis, $p < 0.05$). As the root fraction diameter decreases for the selected sample trees in forest lands, the C content decreases as well, respectively in coarse roots $51.1 \pm 0.3\%$ and in small roots $50.1 \pm 1.2\%$. It was observed that in afforested agricultural land the situation was the opposite – the small roots had the highest C content for both deciduous trees (on average $49.5 \pm 0.4\%$) and conifers (on average $51.2 \pm 0.5\%$).

The carbon content in root fractions makes a positive, medium-close correlation with the age of the stand, which is described by the Pearson's correlation ratio $r = 0.62$ ($t = 5.831 > t_{\alpha, v} = 1.999$; $\alpha = 0.05$). Respectively older stands have higher carbon content in root wood-pulp. The carbon content has large amplitude in the stands of the same age, it is not connected with sample tree dimensions, as it was established that there is a weak correlation between the sample tree diameter and the average carbon content in the root wood-pulp, $r = 0.38$ ($t = 3.256 > t_{\alpha, v} = 1.999$). Therefore the carbon content in root wood-pulp varies naturally.

In the Scots pine young stands selected for this research the root biomass has on average $27.1 \pm 2.3 \text{ t DM ha}^{-1}$, that is a great potential reserve for economic usage of forest resources and the storage of accumulated carbon. The results show that on average in the root biomass of Scots pine young stands selected for this research the accumulated CO_2 is $48.7 \pm 4.3 \text{ t ha}^{-1}$ in the afforested forest land (8, 12, 13, 14, 24 and 45 year old) and $35.6 \pm 11.5 \text{ t ha}^{-1}$ in the afforested abandoned agricultural land (12, 14 and 38 year old). The comparison of accumulation of CO_2 in the root biomass of Scots pine in 12 year old stands in abandoned agricultural land and in forest land shows that in the abandoned agricultural land more CO_2 is attracted – $17.9 \pm 9.6 \text{ t ha}^{-1}$, and $15.0 \pm 3.5 \text{ t ha}^{-1}$ in the forest land accordingly. Whereas in the 14 year old Scots pine stand in the afforested abandoned agricultural land the amount of CO_2 is $36.3 \pm 8.1 \text{ t ha}^{-1}$ and in the forest land it is $13.3 \pm 0.7 \text{ t ha}^{-1}$.

In Latvia the calculations of CO_2 for GHG inventory have been performed by using the formula that includes the growing stock or the growth of growing stock and calculation ratios taken from the GHG inventory (Penman, 2003). One of the calculation ratios used in the formula is for the recalculation from above-ground to underground biomass, and in coniferous stands having above-ground biomass $50 - 150 \text{ t ha}^{-1}$, it is 0.32. Within the framework of the present doctoral thesis the ratio has been calculated for the recalculation from above-ground to root biomass in Scots pine young stands having above-ground biomass $50 - 150 \text{ t ha}^{-1}$, and its value is 0.28. As a result of the research the conclusion has been drawn that the underground biomass has been overrated causing inaccuracy in the calculation of CO_2 for GHG inventory.

3.12. The analysis of root biomass calculation equation for Scots pine root biomass fractions

Within the framework of this research, by developing the total root biomass equation, several models were tested, and the most precise was the linear regression model (3.1) which includes one factorial indication (D^2H).

$$m = a + b \cdot (D^2H), \quad (3.1)$$

where:

- m – total root biomass, kg;
- D^2H – multiplication of squared tree $DBH_{1,3}$ (m) and the tree height (m);
- a, b – calculated ratios.

The information obtained as a result of regression analysis explains and describes the newly developed model. After analysing different variables, the variable indication D^2H and resulting indication were included in the regression model total root biomass. The correlation ratio in forest land is 0.98 and 0.94 in LNZ (Pearson's correlation), which indicates close linear connection between the resulting and factorial feature. The determination ratios are high in both cases, respectively $R^2 = 0.96$ and 0.89. Thus 96% and 89% of the total biomass variation can be explained by the developed linear regression model. Root biomass calculation regression equations:

- sample tree root biomass in forest land ($DBH_{1,3}$ between 1.5 and 26.5 cm)

$$m = 1.270 + 107.920 \cdot D^2H, \quad (3.2)$$

- sample tree root biomass in afforested LNZ ($DBH_{1,3}$ between 3.7 and 19.8 cm)

$$m = 8.325 + 70.689 \cdot D^2H, \quad (3.3)$$

where:

- m – naturally humid mass, kg;
- D^2H – multiplication of squared tree $DBH_{1,3}$ (m) and the tree height (m);

Values of different root fraction biomass regression equation ratios are shown in table 3.2.

The spare link of regression (constant a) is statistically significant ($p < 0.05$), but for coarse roots in forest land and coarse roots in LNZ zero hypothesis cannot be declined, that ratio is equal to zero ($p = 0.079$ and $p = 0.157$). Likewise, in the total root biomass calculation model the ratio spare link a should not be excluded from the model, as it can affect the value of the straight line direction ratio b .

4. Conclusions

1. Within the framework of this doctoral thesis and equation for calculation of Scots pine root biomass has been developed. The equation is the same for different root fractions (coarse roots, small roots and stump), trees of different age in forest land, as well as in afforested agricultural land. The amount of root biomass of the above mentioned fractions is explained by linear regression model with one combined factorial indication

(D²H), which implicitly states the effect of the stand age. The suitability of the model for each fraction is modified by the numerical values of its ratio. The determination ratio of the model respectively: in forest land $R^2 = 0.96$, in afforested agricultural land - $R^2 = 0.89$. The model is statistically significant at 95% credibility level for all above mentioned variants.

2. Transition ratios of Scots pine root biomass fractions and values of their sums have been determined. These values do not depend on the tree DBH_{1.3}, and this allows using the average arithmetic means of transition ratios to calculate the biomass of tree root fractions, which are the same for the whole stand.
3. There were no statistically significant differences found between the total tree root biomass in naturally afforested stands and artificially afforested stands, although in artificially afforested stands the root biomass tends to be larger. Whereas in afforested abandoned agricultural land, the trees of same age develop a significantly larger amount of root biomass than the trees in forest land.
4. In both forest land and afforested agriculture land in Scots pine stands the major part of root fraction is made up by coarse roots (51% of the total root biomass), followed by stump fraction (30%), small roots (13%) and fine roots (6%). The biomass of each of these root fractions is established by the power regression with tree DBH_{1.3} as an argument. The specific values of dry biomass obtained in this doctoral research in Scots pine stands in abandoned agricultural lands range between $9.9 \pm 5.3 \text{ t DM ha}^{-1}$ (12 year old stand) and $20.1 \pm 4.5 \text{ t DM ha}^{-1}$ (14 year old stand), whereas in forest land it is between $10.8 \pm 0.4 \text{ t DM ha}^{-1}$ (8 year old stand) and $60.5 \pm 1.7 \text{ t DM ha}^{-1}$ (24 year old stand).
5. In the forest land the morphometric parameters of fine roots (diameter, surface area and length) are bigger in the planted areas than in naturally renewed areas. While in the afforested abandoned agricultural land the morphometric parameters are bigger than in the forest land.
6. In the forest land total fine root biomass is bigger in the naturally renewed areas than in the planted areas. Whereas in the abandoned agricultural land fine root biomass is smaller than in the forest land.
7. In the forest land the length of coarse roots and small roots is bigger than in the abandoned agricultural land. In the forest land the length of coarse roots and small roots is bigger in the naturally renewed stands than in the planted stands.
8. The average content of carbon in the root biomass statistically significantly differs between coniferous trees and deciduous trees, as well as between the forest land and the abandoned agricultural land, among different fractions of roots, age of stands and species. The average C content in the root biomass of Scots pine is $52.1 \pm 0.1\%$ in the forest land, but in the afforested agricultural land it is $50.3 \pm 0.1\%$. Within the framework of the research in the root biomass of Scots pine 8 year old stand in the afforested forest land the accumulated CO₂ is on average $19.8 \pm 0.7 \text{ t ha}^{-1}$, 12 year old $32.5 \pm 1.7 \text{ t ha}^{-1}$, 13 year old $31.9 \pm 7.0 \text{ t ha}^{-1}$, 14 year old $28.8 \pm 1.9 \text{ t ha}^{-1}$, 24 year old

111.5 ±3.1 t ha⁻¹ and 45 year old 70.8 ±12.2 t ha⁻¹. Whereas in the root biomass of Scots pine 12 year old stand in the afforested abandoned agricultural land the amount of accumulated CO₂ is 18.1 ±9.6 t ha⁻¹ and accordingly in 14 year old stand it is 53.6 ± ±16.5 t ha⁻¹. The ratio for recalculation from the above-ground to the root biomass has been calculated and its value is 0.28. The conclusion has been drawn that the underground biomass has been overrated in the calculation of CO₂ for GHG inventory.

9. The hypothesis is confirmed that the root fraction biomass can be calculated with high credibility as a function of tree parameters that can be easily measured – tree DBH_{1.3} and the height of the tree.