

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

LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
LATVIA UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Mg. geogr. **OSKARS KRIŠĀNS**

**PARASTĀS EGLES (*PICEA ABIES* (L.) H. KARST.) VĒJA NOTURĪBAS
IZMAIŅAS SAKŅU TRUPES UN STUMBRA MIZAS BOJĀJUMU
IETEKMĒ**

**THE EFFECT OF ROOT ROT AND BARK-STRIPPING ON WIND
STABILITY OF NORWAY SPRUCE (*PICEA ABIES* (L.) H. KARST.)**

Promocijas darba KOPSAVILKUMS
Zinātniskā doktora grāda **zinātnes doktors (Ph. D.)** Lauksaimniecības un
zivsaimniecības zinātnēs, **mežzinātnē** iegūšanai

SUMMARY
*for the doctoral degree **Doctor of Science (Ph. D.)***
*in Agriculture, **Forestry and Fisheries***

Salaspils 2020

Promocijas darba zinātniskais vadītājs / *Supervisor*:

Dr.silv. Āris Jansons;

Promocijas darba zinātniskais konsultants / *Consultant*:

Mg.silv. Jānis Donis

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Valsts mežzinātnes institūtā "Silava", doktorantūras studiju ietvaros Latvijas Lauksaimniecības universitātes Meža fakultātē laikā no 2012. līdz 2015. gadam. / *The doctoral thesis is designed at the Latvian State Forest Research Institute "Silava" and Latvia University of Life Sciences and Technologies, Forest Faculty in period from 2012 to 2015.*

Oficiālie recenzenti / *Official reviewers*:

- Dr.silv. Tālis GAITNIEKS, LLU "Silava" vadošais pētnieks / *Senior researcher of Latvian State Forest Research Institute "Silava"*
- Dr.oec. Irina PILVERE, Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesore / *Professor of Latvia University of Life Sciences and Technologies*
- PhD. Kalev JOGISTE, Igaunijas Dzīvības zinātņu universitātes profesors / *Professor of Estonian University of Life Sciences*

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Lauksaimniecības universitātes promocijas padomes "Lauksaimniecības un zivsaimniecības zinātnes, mežzinātnes" ar specializāciju "Mežzinātnes" attālinātā atklātā sēdē 2020.gada 29.decembrī plkst. 12:30. Darba aizstāvēšanas gaitu būs iespēja vērot attālināti. Informācija par attālināto sēdes norisi būs pieejama vienu nedēļu pirms aizstāvēšanas LVMI "Silava" mājaslapā. / *The public defense of PhD thesis in open session of the Promotion Council of "Agricultural and fisheries sciences, forestry" with specialization in "Forestry" of Latvia University of Life Sciences and Technologies will be held December 29, 2020 at 12:30 in Salaspils, Rīga Street 111, Latvian State Forest Research Institute "Silava" library. The defense of the thesis will be held remotely. Information about the process will be available one week before the defense on the website of LSFRI "Silava".*

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu var iepazīties LLU fundamentālajā bibliotēkā Jelgavā, Lielā ielā 2 un interneta vietnē: <https://llufb.llu.lv> / *The thesis are available at the Fundamental Library of Latvia University of Life Sciences and Technologies: Lielā Street 2, Jelgava and website <https://llufb.llu.lv>.*

Atsauksmes sūtīt promocijas padomes sekretārei Mg.silv. Sarmītei Bernīkovej - Bondarei uz adresi: Dobeles iela 41, Jelgava, LV-3001, Latvija vai e-pastā koka@llu.lv / *References are welcome to be sent to Mg.silv. Sarmītei Bernīkovej - Bondarei the secretary of the Promotion Council, address: Dobeles iela 41, Jelgava, LV-3001, Latvia or by email koka@llu.lv.*

SATURS / CONTENT

SAĪSINĀJUMI / ABBREVIATIONS	5
1. DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS.....	6
1.1. Tēmas aktualitāte.....	6
1.2. Promocijas darba mērķis, uzdevumi un tēzes.....	6
1.3. Pētījuma novitāte.....	7
1.4. Promocijas darba aprobācija.....	7
1.5. Promocijas darba uzbūve.....	8
2. MATERIĀLS UN METODEDES.....	8
2.1. Egles virszemes daļas svaigas koksnes biomasas sadalījuma un sakņu- augšnes kamola raksturojums.....	8
2.2. Koku statistiskās vilkšanas testi.....	10
2.3. Egļu audžu saglabāšanās.....	12
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA.....	13
3.1. Egles sakņu-augšnes kamola un virszemes biomasas sadalījuma raksturojums.....	13
3.2. Koku statistiskās vilkšanas testi.....	18
3.3. Egļu mežaudžu sastāva saglabāšanās.....	21
SECINĀJUMI.....	25
REKOMENDĀCIJAS.....	26
PATEICĪBAS.....	27
1. GENERAL DESCRIPTION OF THE THESIS.....	28
1.1. Relevance of the topic.....	28
1.2. Research aim, objectives and theses.....	28
1.3. Scientific novelty of the study.....	29
1.4. Approbation of research results.....	29
1.5. Thesis structure.....	30
2. MATERIAL AND METHODS.....	31
2.1. Characteristics of above-ground biomass and root plate dimensions of Norway spruce.....	31

2.2. Static tree pulling tests.....	32
2.3. Survival of spruce stands	33
3. RESULTS AND DISCUSSION	34
3.1. Characteristics of distribution of above-ground biomass and dimensions of root plate of spruce	34
3.2. Static tree pulling tests.....	36
3.3. Survival of spruce stands	38
CONCLUSIONS	40
RECOMENDATIONS	41
ACKNOWLEDGEMENTS	42

SAĪSINĀJUMI / ABBREVIATIONS

BBM	– lieces moments stumbra pamatnē / <i>basal bending moment</i>
BBM _{PF}	– lieces moments stumbra pamatnē pie primārās lūšanas / <i>basal bending moment at primary failure</i>
BBM _{SF}	– lieces moments stumbra pamatnē pie sekundārās lūšanas / <i>basal bending moment at secondary failure</i>
DBH	– stumbra diametrs krūšu augstumā / <i>stem diameter at breast height</i>
Dm	– damaksnis / <i>Hylocomiosa forest type</i>
EEA	– Eiropas Vides aģentūra / <i>European Environmental Agency</i>
ERAF	– Eiropas Reģionālās attīstības fonds / <i>European Regional Development Fund</i>
H	– koka kopējais augstums / <i>tree total height</i>
H/DBH	– koka augstuma un caurmēra krūšu augstumā attiecība / <i>the relation of tree height and diameter at breast height</i>
HDBH ²	– koka augstuma un caurmēra krūšu augstumā kvadrāta reizinājums / <i>tree height was multiplied by diameter at breast height squared</i>
H _{mp}	– koka masas centrs / <i>height of tree mass point</i>
Ks	– šaurlapju kūdrenis / <i>Myrtillosa turf.mel. forest type</i>
Kp	– platlapju kūdrenis / <i>Oxalidoso turf. mel. forest type</i>
LVĢMC	– Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs / <i>Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre</i>
NMM	– Nacionālais meža monitorings / <i>National forest inventory</i>
PF	– primārā lūšana / <i>primary failure</i>
SF	– sekundārā lūšana / <i>secondary failure</i>
UNECE	– Apvienoto Nāciju Organizācijas Eiropas Ekonomikas komisija / <i>United Nations Economic Commission for Europe</i>

1. DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

1.1. Tēmas aktualitāte

Parastās egles (turpmāk – egles) nākotnes mežsaimnieciskā nozīme pēdējo desmitgažu laikā rietumu un centrālajā Eiropā ir pakāpeniski samazinājusies līdz ar klimata pārmaiņu izraisīto augšanas apstākļu pasliktināšanos (Yousefpour et al., 2010; Hanewinkel et al., 2013; Cermák et al., 2019). Prognozēts, ka eglei piemēroti augšanas apstākļi Eiropā saglabāsies tās ziemeļu daļā—boreālo un hemiboreālo mežu zonā (Hickler et al., 2012; Suvanto et al., 2016; Kapeller et al., 2017; Marini et al., 2017). Tomēr arī šajās teritorijās nav izslēgta dabisko traucējumu negatīvā ietekme uz egļu nākotnes audzēm, un jau šobrīd ir vērojama vēja, patogēnu un dendrofāgo kukaiņu izraisītu bojājumu atkārtotā biežuma un bojājumu apjoma palielināšanās (Marini et al., 2017), jo īpaši, vecākās audzēs ar bojātiem vai novājīnātiem kokiem (Jakuš et al., 2011). Ņemot vērā egļu audžu augsto ražību (Pretzsch et al., 2014) un līdz ar to ievērojamo lomu ekonomikā un oglekļa piesaistē (Ķēniņa et al., 2018), egles audzēšana Latvijā saglabās savu līdzšinējo nozīmi, ja mežsaimnieciskā prakse tiks pielāgota dabisko traucējumu negatīvo ietekmju prevencijai un iespējamo sekū mazināšanai.

1.2. Promocijas darba mērķis, uzdevumi un tēzes

Promocijas darba mērķis ir novērtēt sakņu trupes un stumbra mizas bojājumu ietekmi uz vēja bojājumu iespējamību parastās egles mežaudzēs

Promocijas darbā izvirzīti trīs uzdevumi

1. Raksturot parastās egles vēja noturību saistībā ar virszemes biomasas sadalījuma un sakņu-augsnes kamola dimensiju atšķirībām mežaudzēs ar kūdras un minerālaugsnēm.
2. Raksturot koksnes strukturālo noturību ietekmējošu stumbra mizas bojājumu un sakņu trupes ietekmi uz parastās egles vēja noturību.
3. Raksturot parastās egles mežaudžu saglabāšanos aprites cikla ietvaros.

Promocijas darbā izvirzītas trīs tēzes

1. Stumbra mizas bojājumu sekas samazina parastās egles mehānisko stabilitāti, būtiski palielinot vēja bojājumu iespējamību.
2. *Heterobasidion spp.* izraisītās sakņu trupes negatīvā ietekme uz parastās egles sakņu-augsnes sasaisti kūdras un minerālaugsnēs būtiski neatšķiras.
3. Parastās egles mežaudžu būtiska destrukcija sākas, sasniedzot trešajai vecumklasei (41-60 gadi) atbilstošas dimensijas.

1.3. Pētījuma novitāte

Promocijas darbā pirmo reizi Baltijas jūras reģionā analizētā parastās egles statiskās koku vilkšanas testu datu kopa ietver lielu dimensiju (DBH > 45 cm, H > 30 m) kokus. Turklāt pirmo reizi šajā reģionā ir iegūti koku vilkšanas testu dati no egles mežaudzēm ar kūdras augsnēm. Sakņu trupes ietekme uz egles vēja noturību raksturojošajiem parametriem pirmo reizi hemiboreālo mežu zonā ir salīdzināta starp mežaudzēm ar kūdras un minerālaugsnēm. Tāpat pirmo reizi kvantitatīvi raksturota stumbra mizas bojājumu ietekme uz egles vēja noturību.

1.4. Promocijas darba aprobācija

Pētījuma rezultāti apkopoti piecās publikācijās.

- I **Krisans O.**, Saleniece R., Rust S., Elferts D., Kapostins R, Jansons A., Matisons R. (2020) Effect of bark-stripping on mechanical stability of Norway spruce. *Forests*, 11(3), 357; doi:10.3390/f11030357
- II **Krisans O.**, Matisons R., Rust S., Burnevica N., Bruna L., Elferts D., Kalvane L., Jansons A. (2020) Presence of root rot reduces stability of Norway spruce (*Picea abies*): results of static pulling tests in Latvia. *Forests*, 11(4), 416; doi:10.3390/f11040416
- III **Krišāns O.**, Samariks V., Matisons R., Jansons Ā. (2020) Model of above-ground biomass distribution of Norway spruce (*Picea abies* L. (Karst.)). *BioResources*, 15(2), 4314-4322
- IV Bāders E., **Krišāns O.**, Donis J., Elferts D., Jaunslaviete I., Jansons Ā. (2020) Norway Spruce Survival Rate in Two Forested Landscapes, 1975–2016. *Forests*, 11(7), 745; doi.org/10.3390/f11070745
- V **Krišāns O.**, Samariks V., Donis J., Jansons Ā. (2020). Structural Root-Plate Characteristics of Wind-Thrown Norway Spruce in Hemiboreal Forests of Latvia. *Forests*, 11(11), 1143; doi.org/10.3390/f11111143

Pētījuma rezultāti prezentēti sešos ziņojumos četrās zinātniskajās konferencēs.

1. **Krisans O.**, Baders E., Donis J., Bickovskis K., Jaunslaviete I. (2020) Long-term survival of Norway spruce in hemiboreal forests. XXth International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management – SGEM 2020, 16.-25.08.2020, Albena, Bulgaria. (Stenda referāts)
2. **Krisans O.**, Samariks V., Bickovskis K., Jaunslaviete I., Zute D. (2020) Root characteristics of wind-thrown Norway spruce. XXth International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management – SGEM 2020, 16.-25.08.2020, Albena, Bulgaria. (Stenda referāts)

3. **Krisans O.**, Racenis E., Rieksts-Riekstins R., Donis J., Rust S., Jansons A. (2020) Browsing damages reducing wind stability of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in hemiboreal forests, Latvia. The 9th International Wind and Trees IUFRO conference “Planning for an uncertain future: wind risk to forests and trees in a changing climate”, 21.02.-08.03.2020, Rotorua, New Zealand.
4. Jansons A., **Krisans O.**, Donis J., Rieksts-Riekstins R., Bruna L. (2020) Impact of root-rot on wind stability of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in hemiboreal forests, Latvia. The 9th International Wind and Trees IUFRO conference “Planning for an uncertain future: wind risk to forests and trees in a changing climate”, 21.02.-08.03.2020, Rotorua, New Zealand.
5. Baders E. Dubrovskis E., Snepsts G., **Krisans O.**, Kapostins R., Jansons A. (2018) Resilience Norway spruce forests: case study in Latvia. 8th edition of the International symposium forest and sustainable development, 25-27.10.2018., Braşov, Romania. (Stenda referāts)
6. Snepsts G., **Krisans O.**, Dubrovskis E., Kapostins R., Jansons A. (2018) Effect of injuries on stability of Norway spruce. LIFE+ ELMIAS Ash and Elm, and IUFRO WP 7.02.01 Root and Stem Rots Conference (LIFE-IUFRO), 26.08-01.09.2018, Uppsala and Visby, Sweden. (Stenda referāts)

1.5. Promocijas darba uzbūve

Promocijas darbs sastāv no piecām publikācijām. Pirmajās divās publikācijās (I un II publikācija) ir novērtēta stumbru mizas bojājumu un sakņu trupes ietekme uz parastās egles mehānisko noturību. Egles virszemes biomasas sadalījuma atšķirības audzēs uz kūdras un minerālaugsnēm ir analizēts trešajā (III) publikācijā. Ceturtajā (IV) publikācijā ir raksturota egles audžu saglabāšanās to aprites cikla ietvaros, bet piektajā (V) publikācijā ir analizētas egles sakņu-augsnes kamolu dimensijas vējgāzēs uz kūdras un minerālaugsnēm.

2. MATERIĀLS UN METODES

2.1. Egles virszemes daļas svaigas koksnes biomasas sadalījuma un sakņu-augsnes kamola raksturojums

Egļu sakņu-augsnes kamola morfometrisko parametru mērījumi veikti vējgāzēs un koku statiskās vilkšanas testu laikā, audzēs ar kūdras un minerālaugsnēm, Meža pētīšanas stacijas Kalsnavas, Jelgavas un Šķēdes mežu novados un AS “Latvijas valsts meži” apsaimniekotajos mežos Dundagas un Ozolnieku novados (57°14'N 22°42'E, 57°34'N 22°18'E, 56°40'N 23°53'E, 56°41'N 25°50'E, 56°75'N 23°85'E). Virszemes daļas biomasas sadalījumu noteica 87 kokiem, sadalot 2 m garos nogriežņos un pēc tam atsevišķi nosverot

gan stumbra nogriezni, gan attiecīgajā nogrieznī esošos (sausos un zaļos) zarus. Vējā izgāztiem 64 kokiem veica sakņu-augsnes kamola morfometrisko parametru mērījumus—sakņu dziļumu divos rādiusos no koka stumbra līdz sakņu-augsnes kamola malai 0°, 45°, 90°, 135° un 180° sektoros pa sakņu-augsnes kamola virsmu. Katrā no šiem rādiusiem sakņu-augsnes kamola biezumu mērīja 0,2 m intervālos (3.1. att.). Sakņu-augsnes kamola tilpums V (m³) aprēķināts kā eliptiska konusa tilpums:

$$V = \left(\frac{1}{3}\right) * \pi * a * b * h \quad (1)$$

kur:

h – sakņu-augsnes kamola vidējais dziļums (m);

a – sakņu-augsnes kamola vertikālais rādiuss (m);

b – sakņu-augsnes kamola vidējais horizontālais rādiuss (m).

Egles sakņu-augsnes kamola morfometrisko parametru mērījumus no koku statistiskās vilkšanas testiem izmantoja kā kontroles datus. Kūdras augsnēm kontroles dati ir iegūti tajās pašās audzēs, kurās veikti mērījumi vējgāzēs (Kalsnava), bet minerālaugšņu dati ir no 2020. gada koku statistiskās vilkšanas testiem (Jelgava, Ozolnieki). Saskaņā ar Peltola et al. (2000), koku vēja noturības raksturošanai izmantoja parametru $HDBH^2$. Strukturālo sakņu sadalījumu aprēķināja ar vispārinātu aditīvo modeli, kurā kā mainīgos izmantoja relatīvo sakņu dziļumu un relatīvo attālumu no stumbra.

Egles virszemes biomasas aprēķināšanai izmantoja lineāro modeli, kurā kā mainīgos iekļāva DBH, augstumu un svērto nogriežņu smagumu centru augstumus. Pīrsona korelācijas un galveno komponentu analīzēs pārbaudīja koku morfometrisko parametru variēšanu atkarībā no augšnes veida. Katra koka masas centra H_{mp} aprēķinā izmantoja vidējo svērto nogriežņu masas centru augstumu un masas vērtības:

$$H_{mp} = \frac{\sum m \times h}{\sum m} \quad (2)$$

kur:

m – svērto nogriežņu masa (kg);

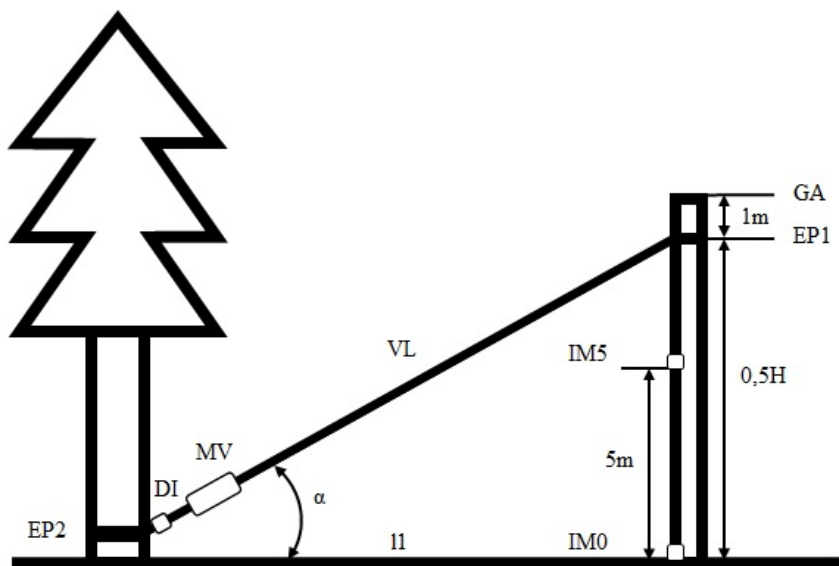
h – svērtā nogriežņa viduspunkta augstums (m).

Koka masas punkta relatīvais augstums ir proporcija no koka kopējā augstuma. Datu statistiskā apstrāde veikta programmā R (versija 4.0.0.) (R Development Core Team, 2019).

2.2. Koku statistiskās vilkšanas testi

Lai raksturotu stumbra bojājumu un sakņu trupes ietekmi uz egles vēja noturību, veikti koku destruktīvas statistiskās vilkšanas testi vairākās egļu audzēs Latvijas centrālajā daļā – Meža pētīšanas stacijas Kalsnavas mežu novadā (4 audzes) un SIA Skogssallskapet īpašumā Cēsu novadā (1 audze). Egļu tīraudzēs ar kūdras (Kp un Ks) un labi drenētām minerālaugsnēm (Dm) (Bušs, 1976) atlasīja gan bojātos, gan kontroles kokus, reprezentējot konkrēto kokaudžu DBH pakāpes (viena pakāpe 4 cm). Sakņu trupes ietekmes novērtēšanai no bojāto paraugkoku grupai paredzētajiem kokiem vispirms ievāca urbumu serdeņus, kuros laboratoriski identificēja patogēnus, un sakņu trupes paraugkopai atlasīja kokus ar *Heterobasidion spp.* klātbūtni. Savukārt kontroles grupai atlasīja kokus, kuru koksnes paraugos neattīstījās ne *Heterobasidion spp.*, ne arī citi sakņu trupī izraisīti patogēni. Mizas bojājumu ietekmes novērtēšanai bojāto koku paraugkopai atlasīja kokus ar 7 līdz 9 gadus veciem stumbra mizas bojājumiem, kas bija izvietoti no 0,8 līdz 1,5 m augstumā, bet kontroles grupai – kokus bez vizuāliem defektiem. Abiem bojājumu veidiem datu analīzē izmantoja bojājuma īpatsvaru, trupes gadījumā to aprēķinot kā attiecību starp trupējušās koksnes laukumu un celma zāģējuma virsmas laukumu, bet mizas bojājumu gadījumā – kā zudušās mizas proporciju no koka stumbra apkārtmēra platākajā bojājuma vietā.

Vilkšanas testa laikā (2.1. att.) ar dinamometru (DI) mērīja koku pretestību statistikai slodzei un leņķi (α) starp vilkšanas līniju (metāla trosē ar poliestera virves pagarinājumu) (VL) un gaisa līniju starp atbalsta koku un paraugkoku (I1). Vilkšanas spēka pielikšanas punkts paraugkokam bija pusē no tā augstuma (EP1), un, lai mazinātu vēja un gravitācijas spēka ietekmi uz mērījumiem, visiem paraugkokiem nozāģēja galotni 1 m virs (GA) vilkšanas spēka pielikšanas punkta. Vilkšanu veica ar manuālu vinču (MV), kura bija stiprināta pie cita koka pamatnes (EP2) attālumā, kas pārsniedz paraugkoka augstumu, bet ne vairāk par 40 m. Testa laikā veica sinhronus mērījumu datu nolasījumus vilkšanas spēkam un vilkšanas līnijas leņķim, kā arī koka stumbra sagāzuma leņķiem, kurus mērīja ar inklinometriem pie stumbra pamatnes (IM0) un 5 m augstumā (IM5).



2.1. att. Shematiskās vilkšanas testa attēlojums /

Fig. 2.1. Scheme of static tree pulling test

EP1 un EP2 – vilkšanas spēka pielikšanas punkts paraugkokam un atbalsta kokam;
 l1 – attālums no atbalsta koka līdz paraugkokam; α – leņķis starp VL un l1; DI –
 dinamometrs (vilkšanas spēka un vilkšanas līnijas leņķa mērītājs); MV –
 manuālā vinča; 0,5H – puse no paraugkoka augstuma; GA – paraugkoka
 nozāģēšanas augstums; IM0 un IM5 – inklinometri pie stumbra pamatnes un 5 m
 augstumā uz stumbra /

*EP1 and EP2 – anchoring of pulling line on the sample tree and anchoring
 tree, respectively; l1 – distance from sample tree to anchoring tree; α –
 angle between VL and l1; DI – dynamometer; MV – manual winch; 0.5H –
 half height of sample tree; GA – topping height; IM0 and IM5 –
 inclinometers on the root plate and on the height of 5 m*

Katram paraugkokam aprēķināts lieces moments stumbra pamatnē BBM (kNm) kā:

$$BBM = F \cdot h_{EP1} \cdot \cos(\text{median}_\alpha), \quad (3)$$

kur:

F – vilkšanas spēks;

h_{EP1} – vilkšanas līnijas piestiprinājuma augstums pie paraugkoka;

median_α – vilkšanas līnijas leņķa mediāna.

Stumbra izliekumu N_{Δ} izteica kā starpību no stumbra sagāzuma leņķu mērījumiem pie stumbra pamatnes (N_0) un 5 m augstumā (N_{5m}):

$$N_{\Delta} = N_{5m} - N_0 \quad (4)$$

N_{Δ} un BBM vērtību proporcionālā pieauguma beigu moments tika definēts kā BBM_{PF} . Savukārt pilnīga nolūšana vai izgāšanās ar saknēm pie maksimālā liekšanas spēka ir BBM_{SF} . Sakņu-augsnes kamola tilpumu V (m^3) aprēķināja kā pusi no eliptiska paraboloīda tilpuma:

$$V = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot h, \quad (5)$$

kur:

a un b – lielākais un mazākais izgāztās sakņu-augsnes kamola virsmas rādiuss (m),

h – maksimālais sakņu-augsnes kamola dziļums (m).

Datu statistiskā apstrāde veikta programmā R (versija 3.5.3) (R Core Team, 2018), izmantojot pakotnes "readr", "tidyverse", "DBI", "zoo", "RSQLite", "ggplot2" un "ez".

2.3. Egļu audžu saglabāšanās

Egļu audžu saglabāšanās divu Latvijas reģionu meža ainavās— Rietumlatvijā Vānē un Austrumlatvijā Dvietē raksturota, izmantojot meža inventarizācijas datus no 1975. līdz 2016. gadam. Vēsturisko meža inventarizāciju plāni no 1975., 1985. un 1999. gada tika ieskenēti un ģeoreferencēti, pielāgojot LKS-92 koordinātu sistēmai, programmas ArcGIS 10.2 vidē. Savukārt digitāli telpiskie meža inventarizācijas dati par 2011. un 2016. gadu saņemti no Valsts meža dienesta. Pamatojoties uz šīm piecu meža inventarizāciju datu kopām, izveidotas mežaudžu izmaiņu kartes 40 gadus ilgam periodam.

Egļu audžu dinamika analizēta, attiecīgajā inventarizācijas gadā nosakot valdošās sugas koeficientu un sadalot mežaudzes pa vecumklasēm. Analīzē tika iekļautas mežaudzes līdz ceturtajai vecumklasei, bet mežaudzes, kuras gāja bojā vai sasniedza piekto vecumklasi, vai arī tajās nomainījās valdošā suga, tika izslēgtas no turpmākās analīzes. Veicot statistisko analīzi ar lineāru jauktu efektu modeli programmas R vidē (versija 3.5.3) (R Core Team 2018), novērtēta valdošās sugas un vecumklašu sastopamības (īpatsvara) dinamika. Ja mežaudze kā egļu audze bija saglabājusies arī nākamajā inventarizācijā, modelī mežaudzes identifikatoru izmantoja kā nejaušo efektu. Savukārt telpisko autokovarianti izmantoja, lai noskaidrotu telpiskās sakarības starp neatkarīgajiem mainīgajiem, piemēram, reģionu, vecumklasi un inventarizācijas gadu. Ar Hī-kvadrāta (χ^2)

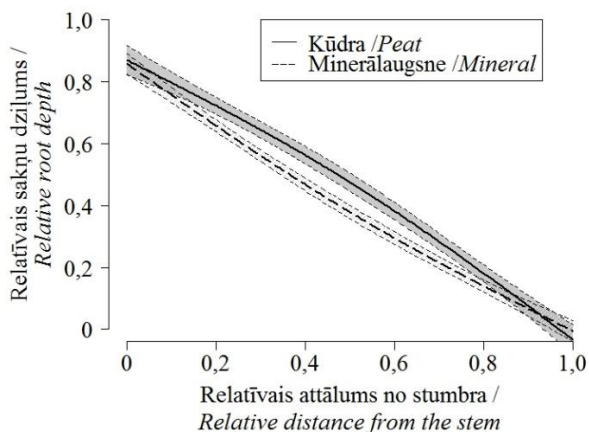
testu noskaidroja egļu audžu attiecīgajā vecumklasē īpatsvaru atšķirības starp reģioniem un inventarizācijas gadiem.

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Egles sakņu-augsnes kamola un virszemes biomasas sadalījuma raksturojums

Egles stabilitāti vājā nozīmīgi ietekmē tās sasaiste ar augsni un masas centrs, ko raksturo sakņu-augsnes kamola tilpums (un masa) un virszemes daļas masas sadalījums (smaguma centra augstums) (Cucchi et al., 2005; Nicoll et al., 2006).

Sakņu vertikālā izplatība, kas ir viens no nozīmīgākajiem koku vēja noturību noteicošajiem faktoriem (Coutts, 1986; Dumroese et al., 2019), ir noteikta kā sakņu plātnes dziļuma standartizēts biežuma mērījumu sadalījums pa sakņu-augsnes kamola virsmas rādiusu no stumbra. Rādiusam palielinoties, samazinās kamola biezums, un iegūtā korelācija ir cieša un negatīva gan nosusinātās kūdras augsnēs, gan minerālaugsnēs ($r = -0,99$; $p < 0,001$) (3.1. att.). Vidējais sakņu dziļums pie sakņu kakla (kamola centrā) eglēm nosusinātā kūdras augsnē (Kp un Ks) bija $49,2 \pm 6,6$ cm (šeit un turpmāk kā izkliedes rādītājs norādīts 95% ticamības intervāls), savukārt minerālaugsnē $28,3 \pm 2,3$ cm.



3.1. att. Egles sakņu-augsnes kamola dziļums atkarībā no attāluma no sakņu kakla mežaudzēs ar kūdras un minerālaugsnēm

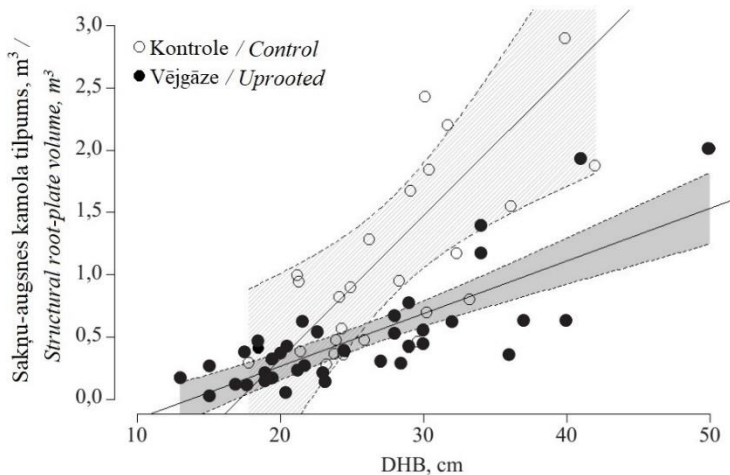
Iekrāsotie laukumi atbilst 95 % ticamības intervālam /

Fig. 3.1. *Relative structural root-plate depth distribution at measurement points of relative distance from the stem in peat and mineral soils*

Grey area denotes 95% confidence interval

Nosusinātā kūdras augsnē augošiem kokiem lielāks sakņu dziļums saglabājās līdz 1 m attālumam no sakņu kakla, taču plātnes perifērijā tas samazinās straujāk nekā minerālaugsnēs (3.1. att.). Šādas sakņu dziļuma atšķirības norāda uz dažādu sakņu-augsnes sasaisti (Nicoll et al., 2006): gadījumos, kad tā nav tik cieša, koka stabilitātes nodrošināšanai saknes aug dziļāk (ja to pieļauj gruntsūdens līmenis) un plašāk (Ray & Nicoll, 1998; Štofko, 2010). Likumsakarīgi, ka eglēm nosusinātā kūdras augsnē sakņu-augsnes kamola tilpums bija būtiski ($p < 0,001$) lielāks nekā minerālaugsnē (3.2. un 3.3. att.); tas saskan ar pētījumu rezultātiem citās valstīs (Nicoll et al., 2006).

Sakņu kamola izmēra nozīmi apliecina arī fakts, ka uzņēmētajām vēja izgāztajām eglēm tas bija būtiski mazāks nekā koku laušanas testos izgāztajām, turklāt izteiktāka šī atšķirība bija tieši nestabilākajās, nosusinātajās kūdras augsnēs (3.2. un 3.3. att.).

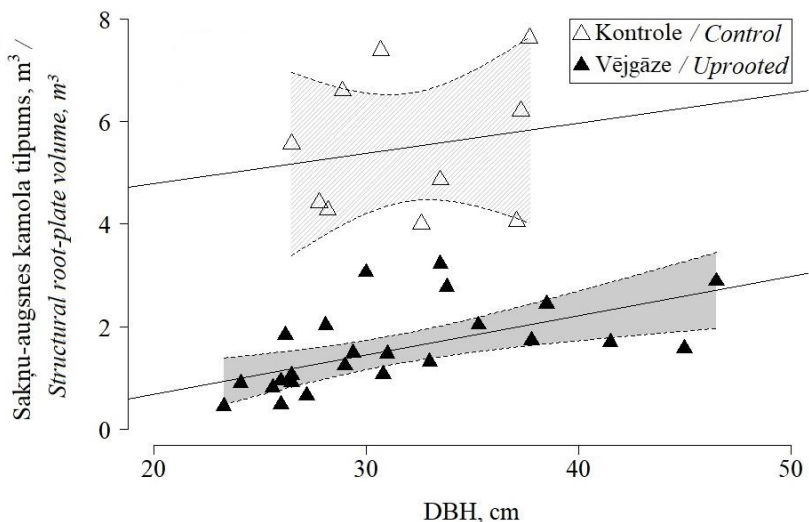


3.2. att. Vējā izgāzto un kontroles koku sakņu-augsnes kamola tilpums minerālaugsnē

Iekrāsotie laukumi atbilst 95 % ticamības intervālam /

Fig. 3.2. Root-plate volume against diameter at breast height of windthrown and control trees in mineral soil

Grey area denotes 95% confidence interval



3.3. att. Vēja izgāzto un kontroles koku sakņu-augsnes kamola tilpums kūdras augsnē

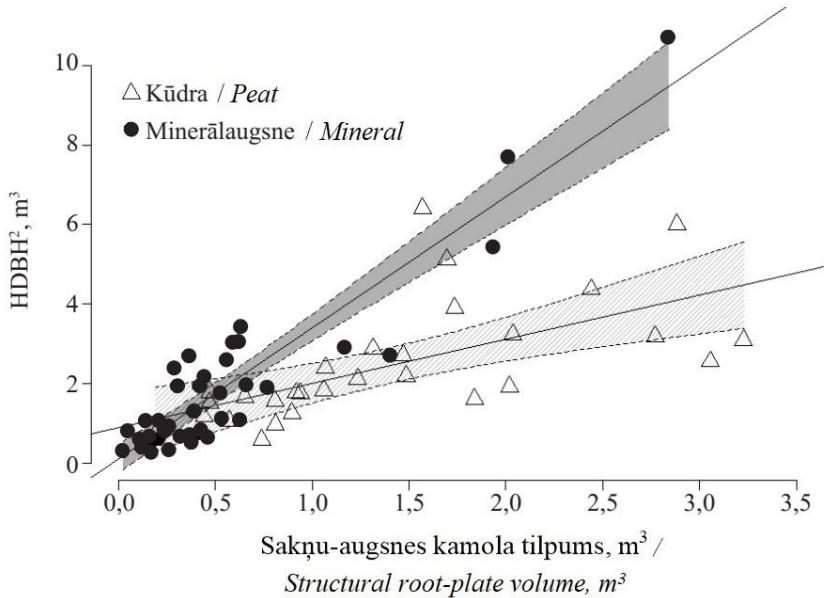
Iekrāsotie laukumi atbilst 95 % ticamības intervālam /

Fig. 3.3. Root-plate volume against diameter at breast height of windthrown and control trees in peat soil

Grey area denotes 95% confidence interval

Papildus sakņu-augsnes kamola tilpumam vēja noturību nosaka arī tā masa, pazeminot kopējo koka smaguma centru un darbojoties kā atsvars. Tā atkarīga ne tikai no kamola tilpuma, bet arī augsnes mitruma un granulometriskā sastāva (Nicoll & Ray, 1996; Niccol et al., 2006). Tāpat sakņu spēju nodrošināt koka stabilitāti nosaka koka adaptācija lokālajiem apstākļiem, audzes attīstības gaita (t.sk., veiktā saimnieciskā darbība), augsnes sasalums un biotisko traucējumu ietekme (Schelhaas et al., 2003). Koka stabilitāti vētrā var nozīmīgi samazināt arī pirms tam notikusi vēja iedarbība, kas izraisījusi sakņu bojājumus. Pieaugot koka vecumam, sakņu sistēmas atjaunošanās spēja pēc šādiem bojājumiem mazinās (Puhe, 2003), un atjaunošanās laiks palielinās.

Koku vēja noturības raksturošanai var izmantot stumbra dimensijas raksturojošu parametru $HDBH^2$ (Peltola et al., 2000). Tas būtiski ($p < 0,001$) atšķirās nosusinātās kūdras augsnēs un minerālaugsnēs augošām eglēm (3.4. att.). Kopumā $HDBH^2$ parametra vērtības attiecība pret sakņu-augsnes kamola tilpumu minerālaugsnēs bija būtiski ($p < 0,001$) augstāka nekā kūdras augsnēs, t.i., minerālaugsnēs mazāks sakņu kamols uzturēja lielāku dimensiju stumbru. Palielinoties koku izmēram, atšķirības šajā attiecībā starp dažādās augsnēs augošām eglēm arī palielinājās (3.4. att.).



3.4. att. **Sakarība starp egles stumbra dimensijām ($HDBH^2$) un sakņu-augsnes kamola tilpumu kūdras un minerālaugsnēs**

Iekrāsotie laukumi atbilst 95 % ticamības intervālam /

Fig. 3.4. Relationship between stem dimensions ($HDBH^2$) and root-plate volume in peat and mineral soils

Grey area denotes 95% confidence interval

Koka virszemes daļas masas sadalījums dabiski mitrā stāvoklī nosaka tā smaguma centra (relatīvā masas punkta) augstumu un līdz ar to –gravitācijas spēku, kas iedarbosies uz koku pēc tam, kad vējš būs sācis to gāzt (stumbrs būs novirzījies no vertikālā stāvokļa). Zemāks relatīvais masas punkts paaugstina koka stabilitāti vējā, un otrādi (Cucchi et al., 2005; Nicoll et al., 2006). Pētījumā ietvertu egļu virszemes daļas vidējā 2 m nogriežņa biomasa bija $66 \pm 3,0$ kg, vidējā kopējā masa 1730 ± 576 kg. Līdzīgi kā Marklund (1988) un Repola (2009) biomasu modeļos, iegūtais virszemes biomasas sadalījuma modelis (3.1. tabula) ir balstīts uz koka DBH un H, un prognozētajām svaigas stumbra koksnes masas vērtībām ir cieša korelācija ar svēršanas rezultātiem ($r = 0,98$) (3.2. tabula):

$$m_{ij} = \beta_2 h_{ij} + \beta_3 DBH_i^2 + \beta_4 h_{ij} DBH_i^2 + \beta_1, \quad (6)$$

kur:

m_{ij} – 2 m nogriežņa masa (kg);

h_{ij} – nogriežņa centra augstums (m);

DBH_i – koka caurmērs (cm).

**Virszemes biomasas sadalījuma modeļa parametru vērtības un
standartklūdas /
Values of above-ground biomass distribution model**

Parametrs / Parameter	Vērtība / Values	Standartklūda / Standart error
β_1	0,44	0,194
β_2	- 0,163	0,201
β_3	0,083	0,001
β_4	- 0,087	0,001

Modeļa prognozēs lielākoties variēja koku pirmo—zemāko fragmentu biomasas, kas ir skaidrojams ar lielāku raukumu un masu stumbram tā bazālajā daļā nekā citviet.

**Pīrsona korelācijas koeficienti un to būtiskumu p-vērtības starp parastās
egles parametriem /
Pairwise Pearson`s correlation coefficients and p-values among variables of
Norway spruce**

Parametrs / Parameter	DBH	H	Svaigas stumbra koksnes masa (kg) / Stem fresh weight (kg)	Aprēķinātā biomasas (kg) / Estimated biomass (kg)
DBH	1	< 0,001	< 0,001	< 0,001
H	0,79	1	< 0,001	< 0,001
Svaigas stumbra koksnes masa (kg) / Stem fresh weight (kg)	0,36	0,29	1	< 0,001
Aprēķinātā biomasas (kg) / Estimated biomass (kg)	0,39	0,32	0,98	1

Pīrsona korelācijas koeficienti parādīti zem diagonāles, bet to p-vērtības – virs diagonāles

Virszemes daļas biomasas sadalījuma datu novērtēšanā izmantotās galveno komponentu analīzes rezultāti uzrādīja 83% izskaidrojamu variāciju pirmajai (53%) un otrajai (30%) komponentei. Pirmajai komponentei izskaidrojamā variācija bija atkarīga no koka kopējā augstuma un caurmēra, stumbra un vainaga biomasas un relatīvā masas punkta augstuma. Pētījumā tika konstatēta pozitīva korelācija relatīvajam masas punkta augstumam ar koka kopējo augstumu ($r = 0,64$), stumbra masu ($r = 0,61$), DBH ($r = 0,55$) un zemākā dzīvā zara augstumu ($r = 0,57$). Tomēr augstāka korelācija relatīvajam masas punkta augstumam bija ar dzīvo zaru biomasu ($r = 0,77$). Šis rezultāts norāda, ka stumbra un vainaga dimensijām, no kurām ir atkarīgs relatīvais masas punkta augstums, ir nozīmīga

ietekme uz egles vēja noturību. Savukārt otrajai komponentei izskaidrojamā variācija bija atkarīga no augsnes veida ($p < 0,008$), un tai bija pozitīva korelācija ar relatīvo masas punkta augstumu, zemākā dzīvā zara augstumu, bet negatīva – ar vainaga relatīvo augstumu, kurš variēja starp 34% un 44% no koka kopējā augstuma.

Rezultāti liecina, ka egles virszemes biomasa un sakņu-augsnes kamola morfometriskie parametri mežaudzēs ar kūdras augsnēm būtiski atšķiras no mežaudzēm ar minerālaugsnēm. Mežaudzēs ar kūdras augsnēm egļu vainagiem ir relatīvi mazāks garuma īpatsvars (no koka kopējā augstuma) nekā minerālaugsnēs, tādējādi kūdras augsnēs eglēm ir lielāks relatīvais masas punkta augstums. Savukārt, eglēm minerālaugsnēs konstatēta būtiski straujākā HDBH² vērtību palielināšanās attiecībā pret sakņu-augsnes kamola tilpumu saistīta ar augstāku vēja noturību.

3.2. Koku statistiskās vilkšanas testi

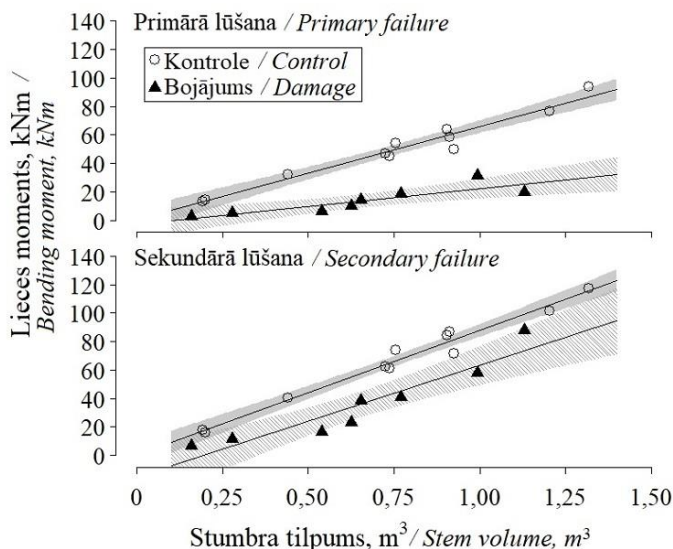
Stumbra mizas bojājumi, visbiežāk briežu dzimtas pārnadžu radīti, un sakņu trupe ir uzskatāmi par nozīmīgākajiem biotiskajiem traucējumiem egles mežaudzēs, kas spēj izraisīt būtiskus koksnes strukturālos bojājumus (Wagener, 1963; Shibata & Torazawa, 2008; Honkaniemi et al., 2017; Cukor et al., 2019). Tāpēc ir nepieciešama informācija par šo biotisko faktoru ietekmi uz egles vēja noturību, kā arī tās integrācija vēja bojājumu prognozēšanas algoritmos. Koku noturības pārbaudi veica, pielietojot statistiskās vilkšanas testu (Peltola, 2006).

Kokiem ar abu biotisko aģentu izraisītiem bojājumiem bija būtiski zemākas gan PF, gan SF vērtības nekā kontroles (nebojātiem) kokiem visās mežaudzēs gan kūdras, gan minerālaugsnēs (3.5. un 3.6. att.), un veselo koku lieces momentu vērtības ir salīdzināmas ar parastās egles vilkšanas testu pētījumos iegūtajām vērtībām citviet Eiropā (Lundström et al., 2007; Peltola et al., 2010; Jillich et al., 2013). Mizas bojājumiem nozīmīga ietekme bija uz augsnes-sakņu sasaisti, nevis stumbra koksnes mehānisko izturību, pretēji sākotnēji gaidītajam. Pēc SF sasniegšanas testētie koki visbiežāk izgāzās ar saknēm, nevis lūza—tas arī ir izplatītākais parastās egles mežaudžu vēja bojājuma veids (Gardiner et al., 2013).

Vidējā mizas bojājuma proporcija no stumbra apkārtmēra bija $28,1 \pm 7,3\%$, bet trupējušās koksnes proporcija no celma virsmas laukuma— $50,3 \pm 26,5\%$. Lai arī testēto koku noturība primāri bija atkarīga no stumbra tilpuma, tomēr bojājumu ietekmē, neatkarīgi no to apjoma, abas testētās BBM robežvērtības (BBM_{PF} un BBM_{SF}) bija būtiski zemākas.

Noturība pret PF palielinājās proporcionāli stumbra tilpumam, un veselie kokiem šī palielināšanās bija daudz straujāka (t.i., sakarību starp BBM_{PF} un stumbra tilpumu aprakstošās taisnes slīpums lielāks) nekā bojātiem (3.5. att.). Tomēr relatīvais BBM_{PF} samazinājums koka stumbra mizas bojājuma ietekmē dažādu dimensiju kokiem bija nemainīgs: 61%. Savukārt bojāto koku BBM_{SF} bija vidēji par $16 \text{ kNm} \cdot \text{m}^{-3}$ zemāks nekā kontroles kokiem. Šādas atšķirības starp

BBM_{PF} un BBM_{SF} norāda, ka nozīmīgāka praktiskā stumbra mizas bojājuma ietekme ir uz primāro lūšanu, ko mežaudzē vizuāli nevar konstatēt. Lai arī koka dimensiju palielināšanās paaugstina koku noturību, tomēr mežaudzēs ar tādiem lielu dimensiju kokiem, kuriem ir stumbra mizas bojājumi, arī relatīvi mazās vēja slodzēs var veidoties bojājumi, kas būtiski samazina koku mehānisko stabilitāti un pretestības spējas citiem ārējās vides faktoriem.



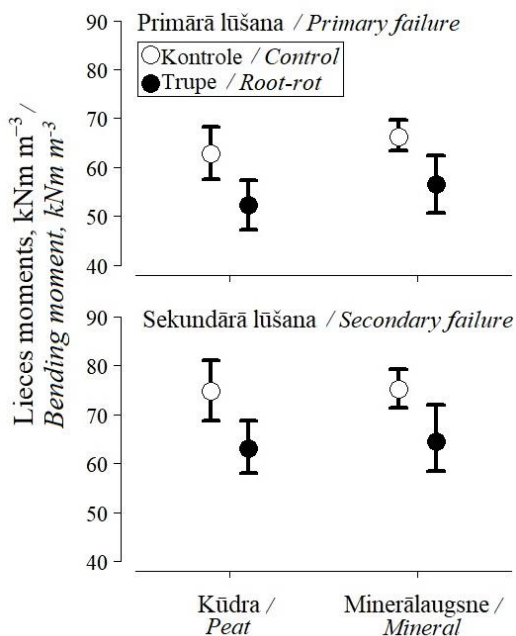
3.5. att. Parastās egles stumbra pamatnes lieces momenti pie primārās un sekundārās lūšanas atkarībā no stumbra tilpuma un mizas bojājumiem
Iekrāsotie laukumi atbilst 95 % ticamības intervālam /

Fig. 3.5. Basal bending moment of the Norway spruce stem at the primary and secondary failure according to stem wood volume and presence of bark-stripping wound

Grey area denotes 95% confidence interval

Mizas bojājumi, kavējot koka sulas vadītspēju, izraisa nozīmīgus fizioloģisko procesu traucējumus (Cukor et al., 2019), kuru mazināšanai koks izmanto resursus, kas citkārt būtu nodrošinājuši tā augšanu (Vasiliauskas, 2001). Tādējādi vielu transporta sistēmas apgrūtinājuma apstākļos augšanas enerģija tiek ieguldīta augstuma pieauguma veidošanā, lai nodrošinātu koka konkurētspēju, turpretī sakņu attīstība, pastāvot pietiekamai mežaudzes kopējai stabilitātei, tiek kavēta (Szoradova et al., 2013; Honkaniemi et al., 2017). Koka fizioloģiskos procesus un arī sakņu attīstību kavē patogēnu invāzija mizas bojājumu brūcēs (Szoradova et al., 2013; Burneviča et al., 2016; Honkaniemi et al., 2017; Cukor et al., 2019). Stumbru šķērsgriezumos mizas bojājumu vietās trupējusi koksne netika konstatēta, tomēr dažādu patogēnu sugu izplatības

īpatnību dēļ (Deflorio et al., 2008; Burneviča et al., 2016) kokiem ar mizas bojājumiem pastāv iespēja, ka augsnes-sakņu sasaiste var samazināties patogēnu darbības ietekmē (Vasiliauskas, 1998; Honkaniemi et al., 2017).



3.6. att. Parastās egles stumbra pamatnes lieces momenti pie primārās un sekundārās lūšanas atkarībā no augsnes veida un sakņu trapes klātbūtnes /

Fig. 3.6. Basal bending moment of the Norway spruce at the primary and secondary failure according to stem wood volume and root rot in peat and mineral soils

Otra analizētā biotiskā faktora – sakņu trupi izraisīto patogēnu – klātbūtne būtiski samazināja gan BBM_{PF} , gan BBM_{SF} neatkarīgi no augsnes veida un mitruma, kā arī sakņu-augsnes kamola tilpuma, norādot, ka egles noturība ir atkarīga no laterālo sakņu mehāniskajām īpašībām (3.6. att.). Kokiem ar sakņu trupi BBM_{PF} un BBM_{SF} samazinājums bija attiecīgi 25,4% un 24,1%. Jāatzīmē, ka sakņu trapes ietekmes uz koku noturību novērtēšanai izvēlētajiem paraugkokiem, kuriem pirms vilkšanas testiem tika apstiprināta *Heterobasidion spp.* klātbūtne, konstatēti arī citi patogēni, visbiežāk *Armillaria spp.* un *Resinicium bicolor*.

Abu biotisko faktoru—stumbra mizas bojājumu ($p < 0,001$) un sakņu trapes ($p < 0,05$) klātbūtnē būtiski samazinājās egļu vēja noturība, ko apliecina zemākas BBM_{PF} un BBM_{SF} vērtības. Pazemināts BBM_{PF} nozīmē paaugstinātu

koksnes audu deformācijas risku spiedē (Detter et al., 2015), bet BBM_{SF} —maksimālās noturības samazinājumu. Koksnes audu deformācijā var izveidoties strukturāli traucējumi vielu transporta sistēmā, izraisot augšanas samazināšanos vai fizioloģiskā sausuma izveidošanos vēja bojājuma rezultātā (Seidl & Blennow, 2012). Šādi koksnes bojājumi saknēs ne tikai samazina to ūdens uzņemšanas un transportēšanas spējas, bet arī paaugstina koka invadēšanās risku ar sakņu trupi izraisošajiem patogēniem. Tā kā vēja bojātajiem kokiem palielinās biotisko aģentu izraisīto bojājumu risks, un vēja radīto mehānisko bojājumu iespējamība ir augstāka kokiem ar jau esošiem biotisko aģentu izraisītiem bojājumiem (Gardiner et al., 2013; Seidl et al., 2017), saskaņā ar Honkaniemi et al. (2017) egļu mežaudzes nākotnē var tikt pakļautas cikliskai šo procesu negatīvajai ietekmei.

Nemot vērā stipra vēja (pēc Boforta skalas 13,9 – 17,1 m s⁻¹ (Barua, 2005)) un vētru atkārtošānās biežuma palielināšanās prognozes (Mölter et al., 2016), egles stumbra mizas bojājumi un sakņu trupe ir uzskatāmi par nozīmīgiem egļu audžu vēja bojājumu risku paaugstinošiem faktoriem. To negatīvo ietekmi uz egles audžu vēja noturību ir iespējams mazināt, īstenojot atbilstošus meža apsaimniekošanas pasākumus (Gardiner et al., 2013). Piemēram, stādījumu ierīkošana ar sākotnēji zemu biežumu vai savlaicīga augstas intensitātes audzes sastāva kopšana bez mehanizētas krājas kopšanas ciršu veikšanas mazinātu gan koku sakņu sākotnējos kontaktus, gan mehānisku sakņu bojājumu iespējamību, paaugstinot egļu audžu noturību pret sakņu trupi izraisīto patogēnu izplatību (Stenlid & Redfern, 1998). Arī stumbra mizas bojājumu iespējamība mazinātos, gan izvairoties no mehanizētas kopšanas ciršu veikšanas, gan samazinoties lielo pārnodžu izraisītiem stumbra mizas apgrauzumiem, kas zemāka biežuma stādījumos tiek novēroti retāk (Baders et al., 2017; Katrevičs et al., 2018).

Savlaicīga bojāto koku identificēšana un izvākšana no jaunaudzēm un vidēja vecuma audzēm var nodrošināt izveidotā atvēruma malas kokiem pietiekamu laiku, lai pielāgotos sagaidāmajai vēja ietekmei (Šēnhofa et al., 2020). Turklāt laiks, kad egļu mežaudzes ir pakļautas nozīmīgam vēja bojājumu riskam, var tikt samazināts, saīsinot to aprites ciklu (Donis et al., 2020; Samariks et al., 2020), t.i., veicot mērķtiecīgu meža apsaimniekošanu, kas orientēta uz galveno cirti pēc mērķa caurmēra. Savukārt, pēc vēja iedarbības savlaicīgi identificēta nepieciešamība veikt mežaudzes nomaiņu var novērst papildus zaudējumus koku turpmāka kvalitātes zuduma un paaugstinātas sekundāro bojājumu varbūtības dēļ.

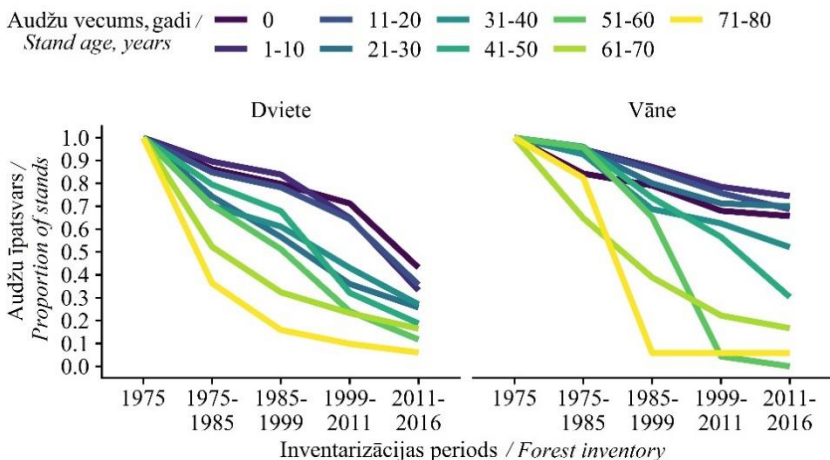
3.3. Egļu mežaudžu sastāva saglabāšanās

Egles audžu attīstībai un klimatam (t.sk., vēja klimatam) novērojamas reģionālas atšķirības pat salīdzinoši nelielā teritorijā, kāda ir Latvija (Zeltiņš et al., 2019). Tādēļ egles audžu ilgtermiņa saglabāšanās raksturošanai izvēlēti meža masīvi Latvijas austrumu un rietumu daļā, attiecīgi Dviete un Vāne.

Reģionam bija būtiska ietekme uz egles audžu saglabāšanos: Dvietē to audžu īpatsvars, kas pārgāja nākamajā vecumklasē, salīdzinot 1975. gada uz 1985. gada inventarizācijas datus, bija 76,5%, kamēr Vānē tas bija 93,1%. Nav zināms precīzs iemesls, kāpēc egļu audžu platības samazinājās, neļaujot izdarīt precīzus secinājumus. Dvietē vecāko vecumklašu mežaudžu nesaglabāšanās līdz nākamajai inventarizācijai periodā no 1975. līdz 1985. gadam ir saistāma ar vēja izraisītiem bojājumiem periodā līdz 1983. gadam (stipra vēja gadījumi Latvijā, 1.1. att.), jo īpaši 1967. gadā, kad nozīmīgākie postījumi izveidojās Latvijas dienvidu daļā (Bengtsson & Nilsson, 2007; Hanewinkel et al., 2008, 2011; LVĢMC, 2017). Nereti stiprā vējā saglabājušās mežaudzes turpmākajos gados degradējas sekundāro biotisko faktoru izraisītu bojājumu ietekmē (Deschênes et al., 2019), visbiežāk mizgraužu savairošanās rezultātā (Nikolov et al., 2014). Tāpat vētrā izdzīvojušajiem, bet tās ietekmētajiem kokiem var būt nozīmīgi sakņu bojājumi, kuru dēļ tie nākamajos gados neiztur arī mazāk stipru vēju iedarbību. Savukārt, 2016. gada inventarizācijā fiksētā trešās vecumklases mežaudžu zemā saglabāšanās varētu zināmā mērā būt skaidrojama ar kaitēkļu—brūņuts (*Physokermes piceae* Schrank.) savairošanos 2010. gadā (VMD dati) (Bādērs et al., 2018) (3.7. att.). Visā 40 gadu novērojumu periodā egļu audžu sastāva saglabāšanās starp inventarizācijām augstāka bija Vānē nekā Dvietē ($p < 0,001$).

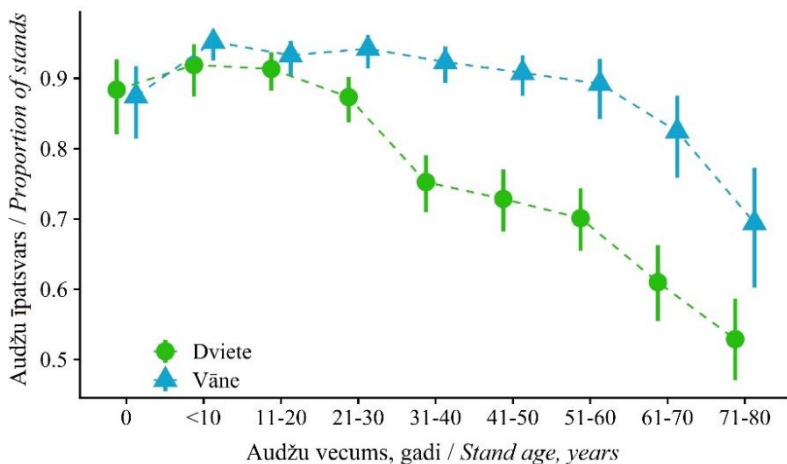
Konstatēts, ka egles audžu saglabāšanos būtiski ($p < 0,01$) ietekmē to vecums: abos reģionos augstākā saglabāšanās bija pirmās vecumklases (0 līdz 20 gadi) audzēm (3.7. att.). Straujš mežaudžu saglabāšanās kritums abos reģionos (3.8. att.) novērots, sākot ar trešo vecumklasi (41 līdz 60 gadi), lai gan Dvietē nozīmīgs samazinājums sākās jau otrajā vecumklasē.

Līdzīga audžu saglabāšanās izmaiņu tendence ir novērota arī citos pētījumos, īpaši, dažādu bojājumu—gan vēja (Peltola et al., 1999; Zeng et al., 2007), gan biotisko faktoru (Piri, 1996; Arhipova et al., 2011; Bādērs et al., 2018;) ietekmē. Egļu mežaudžu vēja noturības samazināšanās ir sagaidāma, sasniedzot tādas dimensijas, kādas parasti augstāko bonitāšu egles audzēs ir, sākot ar pāreju no otrās uz trešo vecumklasi. Noturības samazināšanos veicina šajā vecumā sagaidāmā stumbra mizas bojājumu un/vai sakņu trupes sastopamības palielināšanās un ar to saistītā stumbra un sakņu koksnes destrūkcija. Turklāt augstas biežības audzēs, kurās veikta novēlota un/vai pārlietu intensīva retināšana, vēja noturība samazinās vēl straujāk.



3.7. att. Nākamajā vecuma desmitgadē pārgājušo egles mežaudžu īpatsvars pēc sākotnējā vecuma 1975. gadā /

Fig. 3.7. The proportion of successfully transitioned Norway spruce stands in both landscapes by the initial age in 1975



3.8. att. Vidējais saglabājušos egles mežaudžu īpatsvars pa vecuma desmitgadēm abos reģionos /

Fig. 3.8. Mean proportion of survival of Norway spruce stands by age groups in both regions

Kopumā konstatētās faktiskās egles audžu saglabāšanās izmaiņu tendences saskaņā ar modeļu prognozētajām, norādot, ka audžu monetārās un citu

ekosistēmas pakalpojumu vērtības saglabāšanai nozīmīga mērķtiecīga to apsaimniekošana, orientējoties uz mērķa caurmēra sasniegšanu ātrāk nekā 80 gados (Katrevičs et al., 2018), jo īpaši – meža tipos ar auglīgām nosusinātām kūdras augsnēm, kur ir paaugstināts vēja bojājumu risks (Samariks et al., 2020).

SECINĀJUMI

1. Parastās egles mehānisko stabilitāti būtiski pazemina stumbra mizas bojājumi, kuri analizētajām eglēm bija vidēji $28 \pm 7,3\%$ no stumbra apkārtmēra (no 16% līdz 40,8%). Slodze, pie kuras notiek primārā lūšana, palielinās proporcionāli stumbra tilpumam (paraugkopa no 0,16 līdz 1,32 m³), un veselīem kokiem šī palielināšanās ir straujāka. Koku ar stumbra bojājumiem lieces momenta pie primārās lūšanas relatīvais samazinājums dažādu dimensiju kokiem, salīdzinot ar nebojātiem, bija nemainīgs: 61%. Bojāto koku lieces moments pie sekundārās lūšanas bija būtiski mazāks nekā nebojāto, neatkarīgi no to dimensijām starpībai sasniedzot 16 kNm·m⁻³.
2. Sakņu trupe (paraugkopā trupējušās koksnes proporcija no celma virsmas laukuma bija no 4% līdz 94,8%, vidēji $50 \pm 26,5\%$), izraisa statistiski būtisku un nozīmīgu parastās egles stabilitātes samazinājumu neatkarīgi no augsnes veida un mitruma, un sakņu-augsnes kamola tilpuma. Tas liecina, ka parastās egles noturība ir atkarīga no laterālo sakņu mehāniskajām īpašībām. Sakņu trapes bojāto koku lieces momenta pie primārās un sekundārās lūšanas relatīvais samazinājums, salīdzinot ar nebojātu koku vērtību, ir attiecīgi vidēji 25,4% un 24,1%.
3. Sakņu-augsnes kamola tilpumam ir būtiska loma koku vēja noturības nodrošināšanā: vienu un to pašu dimensiju vēja izgāztajām eglēm tas bija būtiski mazāks, nekā koku laušanas testos izgāztajām, turklāt izteiktāka šī atšķirība bija tieši nestabilākajās, nosusinātajās kūdras augsnēs. Adaptējoties vēja slodzei, audzēs ar nosusinātām kūdras augsnēm egles sakņu kamola tilpums ir lielāks nekā tādu pašu dimensiju kokiem meža tipos ar minerālaugsnēm, un šīs atšķirības galvenokārt nosaka laterālo sakņu garums.
4. Parastās egles zemāku noturību mežos ar nosusinātām kūdras augsnēm, salīdzinājumā ar minerālaugsnēm, būtiski ietekmē paaugstināts masas centrs.
5. Parastās egles mežaudžu saglabāšanās būtiski samazinās, sasniedzot trešo vecumklasi (41-60 gadi). Mežkopības pasākumu kompleksu egles audzēs nepieciešams adaptēt klimata pārmaiņām, paaugstinot to saglabāšanos līdz galvenās cirtes parametru sasniegšanas brīdim.

REKOMENDĀCIJAS

1. Rekomendējams izmantot zemāku stādīšanas biežumu un/vai augstas intensitātes jaunaudzū kopšanu, saīsinot parastās egles vienvecuma mežaudžu aprites ciklu un laiku, kad audze pakļauta nozīmīgam vēja bojājumu riskam, tādējādi mazinot šī abiotiskā faktora izraisīto bojājumu varbūtību. Īpaši nozīmīga šāda pieeja ir meža tipos ar nosusinātu kūdras augsni. Rekomendētie pasākumi mazinās arī sakņu trapes risku un koksnes destrukciju tādu patogēnu ietekmē, kas var iekļūt stumbrā pa mizas bojājumu vietām, tādējādi papildus veicinot audžu noturību. Tāpat bojājumu risku mazinās koku ar stumbra mizas bojājumiem savlaicīga izvākšana no audzes, nodrošinot izveidotā atvēruma malas kociem laiku pielāgoties vēja ietekmei. Rekomendējams realizēt meža aizsardzības pasākumus, kas vērsti uz sakņu trapes un briežu dzimtas dzīvnieku nodarīto postījumu ierobežošanu, jo tas vienlaikus mazinās arī vēja bojājumu risku.
2. Turpmākie pētījumi kompleksas vēja ietekmes uz mežaudzēm modelēšanas sistēmas izstrādei veicami ar mērķi kvantificēt sekundāro bojājumu risku vēja skartās audzēs.

PATEICĪBAS

Paldies par atbalstu un palīdzību promocijas darba izstrādē darba zinātniskajam vadītājam Ārim Jansonam un konsultantam Jānim Donim. Īpaši pateicos kolēģiem Robertam Mationam, Endijam Bāderam, Valteram Samarikam, Didzim Elfertam, Steffen Rust par līdzdalību un palīdzību zinātnisko rakstu sagatavošanā, Unai Neimanei un Renātei Salenieci par valodas lietojuma koriģēšanu un Tomam Bricim par konsultācijām meteoroloģijā. Izsaku pateicību pārējiem LVMI “Silava” kolēģiem par palīdzību lauka darbu metodikas izstrādē un aprobācijā. Paldies ģimenei un, jo īpaši, manai līgavai.

1. GENERAL DESCRIPTION OF THE THESIS

1.1. Relevance of the topic

During the last decades, future silvicultural importance of Norway spruce (further in text – spruce) has gradually decreased along with the decline of its habitats as a result of climate change (Yousefpour et al., 2010; Hanewinkel et al., 2013; Cermák et al., 2019). Suitable growing conditions for spruce in Europe are projected to remain in northern part – in both boreal and hemiboreal forest zones (Hickler et al., 2012; Suvanto et al., 2016; Kapeller et al., 2017; Marini et al., 2017). However, in these regions as well, forest damages increase in both frequency and severity under natural disturbances caused by both abiotic and biotic agents, especially in old-growth stands (Jakuš et al., 2011; Marini et al., 2017). Yet, considering the notable both economic and ecological (carbon sequestration) (Kēniņa et al., 2018) importance of spruce due to its high growth productivity (Pretzsch et al., 2014), spruce will remain to be of high silvicultural importance in Latvia if silvicultural practices will be adapted in terms of prevention and mitigation of negative effects of natural disturbances.

1.2. Research aim, objectives and theses

The aim of the thesis was to assess the effect of root rot and bark-stripping on possibility of wind induced damages in Norway spruce stands.

Three research objectives have been advanced:

1. To characterize the possibility of wind induced damages in Norway spruce stands on peat and mineral soils in accordance with distribution of above-ground biomass and root plate dimensions.
2. To characterize the effect of structural strength of wood affecting factors, such as root rot and bark-stripping on the possibility of wind induced damages in Norway spruce stands.
3. To characterize the survival of Norway spruce stands within the rotation period.

Thesis

1. The effect of bark-stripping reduces the mechanical stability on Norway spruce, thus notably increasing wind damage susceptibility.
2. The effect of root rot caused by *Heterobasidion* spp. on the root-soil anchorage do not differ significantly among peat and mineral soils.
3. Significant destruction of Norway spruce stands starts by reaching dimensions corresponding to third age class (41-60 years).

1.3. Scientific novelty of the study

For the first time in the Baltic Sea region the static tree pulling test has been applied to assess the mechanical stability of large dimension (DBH > 45 cm, H >30 m) Norway spruce individuals. Also, for the first time in the region and whole hemiboreal and boreal forest zones such data have been obtained from Norway spruce stands on peat soils, where effect of root rot on Norway spruce stability has been assessed. Furthermore, for the first time the effect of bark-stripping on the root-soil anchorage of Norway spruce has been tested by application of static tree pilling tests, thus the obtained quantitative information facilitates modelling of the effect of biotic factors on the possibility of wind induced damages in Norway spruce stands.

1.4. Approbation of research results

The research results have been published in five scientific articles:

- I **Krisans O.**, Saleniece R., Rust S., Elferts D., Kapostins R, Jansons A., Matisons R. (2020) Effect of bark-stripping on mechanical stability of Norway spruce. *Forests*, 11(3), 357; doi:10.3390/f11030357
- II **Krisans O.**, Matisons R., Rust S., Burnevica N., Bruna L., Elferts D., Kalvane L., Jansons A. (2020) Presence of root rot reduces stability of Norway spruce (*Picea abies*): results of static pulling tests in Latvia. *Forests*, 11(4), 416; doi:10.3390/f11040416
- III **Krišāns O.**, Samariks V., Matisons R., Jansons Ā. (2020) Model of above-ground biomass distribution of Norway spruce (*Picea abies* L. (Karst.)). *BioResources*, 15(2), 4314-4322
- IV Bādērs E., **Krišāns O.**, Donis J., Elferts D., Jaunslaviete I., Jansons Ā. (2020) Norway Spruce Survival Rate in Two Forested Landscapes, 1975–2016. *Forests*, 11(7), 745; doi.org/10.3390/f11070745
- V **Krišāns O.**, Samariks V., Donis J., Jansons Ā. (2020). Structural Root-Plate Characteristics of Wind-Thrown Norway Spruce in Hemiboreal Forests of Latvia. *Forests*, 11(11), 1143; doi.org/10.3390/f11111143

The research results have been reported in six presentations within four scientific conferences.

1. **Krisans O.**, Baders E., Donis J., Bickovskis K., Jaunslaviete I. (2020) Long-term survival of Norway spruce in hemiboreal forests. XXth International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management – SGEM 2020, 16.-25.08.2020, Albena, Bulgaria. (Poster)
2. **Krisans O.**, Samariks V., Bickovskis K., Jaunslaviete I., Zute D. (2020) Root characteristics of wind-thrown Norway spruce. XXth International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management – SGEM 2020, 16.-25.08.2020, Albena, Bulgaria. (Poster)
3. **Krisans O.**, Racenis E., Rieksts-Riekstins R., Donis J., Rust S., Jansons A. (2020) Browsing damages reducing wind stability of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in hemiboreal forests, Latvia. The 9th International Wind and Trees IUFRO conference “Planning for an uncertain future: wind risk to forests and trees in a changing climate”, 21.02.-08.03.2020, Rotorua, New Zealand.
4. Jansons A., **Krisans O.**, Donis J., Rieksts-Riekstins R., Bruna L. (2020) Impact of root-rot on wind stability of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in hemiboreal forests, Latvia. The 9th International Wind and Trees IUFRO conference “Planning for an uncertain future: wind risk to forests and trees in a changing climate”, 21.02.-08.03.2020, Rotorua, New Zealand.
5. Baders E. Dubrovskis E., Snepsts G., **Krisans O.**, Kapostins R., Jansons A. (2018) Resilience Norway spruce forests: case study in Latvia. 8th edition of the International symposium forest and sustainable development, 25-27.10.2018., Braşov, Romania. (Poster)
6. Snepsts G., **Krisans O.**, Dubrovskis E., Kapostins R., Jansons A. (2018) Effect of injuries on stability of Norway spruce. LIFE+ ELMIAS Ash and Elm, and IUFRO WP 7.02.01 Root and Stem Rots Conference (LIFE-IUFRO), 26.08-01.09.2018, Uppsala and Visby, Sweden. (Poster)

1.5. Thesis structure

The doctoral thesis consists of five research articles. The effect of bark-stripping and root-rot on the mechanical stability of spruce has been estimated in first two publications (I and II). Distribution of above-ground biomass in accordance with soil type has been estimated in third research article (III). In fourth (IV) publication, description of Norway spruce survival in two forested landscapes has been given, and root-plate dimensions of windthrown Norway

spruce situated on both peat and mineral soils has been characterized in fifth (V) publication.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Characteristics of above-ground biomass and root plate dimensions of Norway spruce

Measurements are carried out in stands with both peat and mineral soils located in North-West, central and eastern parts on Latvia (57°14'N 22°42'E, 57°34'N 22°18'E, 56°40'N 23°53'E, 56°41'N 25°50'E, 56°75'N 23°85'E). Above-ground biomass was determined for 87 trees by weighing stem after cutting into 2 m long sections separated from branches. Dimensions, such as rooting depth along radii (in 0°, 45°, 90°, 135° and 180° sectors) from the stem to the edge of root plate of 64 windthrown trees were measured. In each of these radii, root plate thickness was measured at every 0.2 m (Fig. 3.1.). The volume V (m³) of root plate was calculated using elliptic cone volume equation:

$$V = \left(\frac{1}{3}\right) * \pi * a * b * h, \quad (1)$$

where:

- h – mean height of root-plate centre (depth);
- a – vertical radius of the root-plate;
- b – mean horizontal radius of the root-plate.

As control, data from static pulling tests were selected from investigations conducted in commercial Norway spruce stands with similar characteristics as the wind-thrown stands. Control data from trees situated on drained peat soils were obtained from studying the effect of root-rot on mechanical stability (56°41'N 25°50'E). For mineral soils, root-plate dimension data from pulling tests carried out in summer 2020 in central part of Latvia (56°40'N 23°53'E) are used. The approach of tree height multiplied by DBH squared ($HDBH^2$) was used to estimate the susceptibility of trees towards the tipping as shown by Peltola et al., (2000). In the generalized additive model, the structural root depth distribution was calculated using relative root depth and relative distance from the stem were as predictors.

Calculation of above-ground biomass was done by using linear model where DBH, H and mass point of weighed 2 m sections. Pearson correlation and Principal Component Analysis was used to test the variation of tree morphometric parameters in accordance to soil type. The height of mass point (H_{mp}) of each tree was calculated using height and weight values of mass centres of weighed 2 m sections.

$$H_{mp} = \frac{\sum m \cdot h}{\sum m}, \quad (2)$$

where:

m – a mass (kg) of weighed 2 m sections;

h – the middle point of the H of tree (m).

Height of the relative mass point is a proportion of total H. Statistical analysis was done using program R (version 4.0.0.) (R Development Core Team, 2019).

2.2. Static tree pulling tests

Static tree pulling tests were applied in order to characterize the effect of both root rot and bark-stripping on the mechanical stability of spruce. Study was carried out in stands located in central part of Latvia – 4 in The Forest Research Station and 1 in Skogssallskapet Ltd. owned forests. All were spruce monocultures situated on peat (*Oxalidosaf. Mel* and *Myrtillosaf. mel*) and drained mineral (*Hylocomiosaf.*) soils. In those stands, both damaged and control trees were selected representing DBH classes (each class is 4 cm step) of each stand. The presence of fungal pathogens was tested in the laboratory from increment cores extracted below the root collar from the opposite sides of stem. Trees with the presence of fungal pathogens were selected as sample trees. The presence of *Heterobasidion spp.* in the samples was confirmed by observing its characteristic asexual sporulation (conidiophores). Based on these results, in each stand tree pulling tests were performed within the same season. To characterize the effect of bark-stripping on spruce mechanical stability, trees with 7-9 years old wounds (located on stems at the height of 0.8 to 1.5 m from ground) were selected. Trees with no visual damages were selected for control. The scale of the damage was quantified by measuring the proportion of damaged wood on the circumference of the stem. For root rot, the proportion of decayed wood was measured from the cross-section of stump and was used to quantify the scale of the effect of fungal pathogen.

During the pulling test, dynamometer (DI Fig. 2.1.) was used to measure both tree resistance against static loading and the angle (α) between pulling line (VL) and horizontal sight line between anchoring and sample tree (11). To minimize the effect of both gravity and own mass, all tested trees were de-topped prior the test at the height of 1 m above the half of the total height (GA). On the sample tree, the pulling line was anchored 1 m bellow the topping (EP1) to prevent the slip-over of the anchoring sling. Pulling was done using manual winch (MV) with steel cable prolonged with polyester rope. Winch was anchored at the base of tree located opposite in the distance ~40 m (EP2). During the pulling, measurements of pulling force were recorded simultaneously with stem deflection on the root plate (IM0) and at the height of 5 m (IM5).

For each tree, BBM (kNm) was calculated as

$$BBM = F \cdot h_{AP1} \cdot \cos(\text{median}_\alpha), \quad (3)$$

where:

F – a pulling force;

h_{AP1} – the anchoring height of the pulling line on the sample tree;

median_α – median of the angle between the pulling line and ground.

Stem deflection (N_Δ) was expressed as the difference between readings of inclinometers done on the root plate (N_0) and on the stem at the height of 5 m (N_{5m}):

$$N_\Delta = N_{5m} - N_0 \quad (4)$$

The BBM and the end of proportional increase of N_Δ and BBM was defined as BBM_{PF} , while tree failure at the highest value of BBM was defined as BBM_{SF} . The volume of root plate V (m^3) was calculated as the volume of an elliptical paraboloid as follows:

$$V = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot h, \quad (5)$$

where:

a and b – largest and smallest radii (m) of root plate, respectively;

h – maximum depth of root ball (m).

The data were analysed using "readr", "tidyverse", "DBI", "zoo", "RSQLite", "ggplot2" and "ez" packages in program R (version 3.5.3) (R Core Team, 2018).

2.3. Survival of spruce stands

Survival of spruce stands is characterized in two forest landscapes in Latvia – West (Vāne) and East (Dviete) part, using data obtained from forest inventories carried out between 1975 and 2016. Maps of historical inventories were scanned and adjusted to coordinate system of LKS-92 by georeferencing using program ArcGIS 10.2. Furthermore, digitalised spatial data forest inventories from 2011 and 2016 were obtained from the State Forest Service. Maps revealing changes of forest stand composition throughout last 40 years were prepared based on information from those five forest inventories in Vāne and Dviete, respectively.

Dynamics of spruce stands were analysed by determining both the age class (20-year step) and coefficient of dominant species in according year of inventory, respectively. Stands above 4th age class were excluded from the analysis as the

age of spruce rotation period was 80 years, thus harvesting might be the limiting factor of survival of such stands. In program R (version 3.5.3.) (R Core Team, 2018), linear mixed-effect model was used to test the effect of variables, such as coefficient of dominant species and age on the dynamics of proportion of dominant species and age classes. The identifiers of stands that has transitioned into next age class were used as random effects in the model. However, spatial autocovariant was used to assess spatial interactions among independent variables, such as region, age class and the year of inventory. Chi-square (χ^2) test was applied to test proportional differences of age classes between regions and inventories.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Characteristics of distribution of above-ground biomass and dimensions of root plate of spruce

Spruce stability is largely affected by soil-root anchorage and the height of mass centre and these parameters can be characterized by root plate volume and the distribution of above-ground biomass (Cucchi et al., 2005; Nicoll et al., 2006).

Vertical rooting is considered as one of the most important factors affecting tree mechanical stability (Coutts, 1986; Dumroese et al., 2019). In this study, vertical rooting is detected as standardized measurements of root plate thickness along radius from stem to the edge of root plate. Thickness of root plate decreased along with the increase of distance from stem by the radius having strong and significant negative correlations ($r = -0.99$, $p < 0.001$) in both peat and mineral soils (Fig. 3.1.).

Mean thickness of root plate right below the stem (centre) was 49.2 ± 6.6 cm (95% confidence interval) in peat and 28.3 ± 2.3 cm in mineral soils, respectively. Within first meter, root plates were thicker in peat soils, and towards the edge a decrease of thickens appears more pronounced in comparison with mineral soils (Fig. 3.1.). Thus, showing differences in root-soil anchorage (Nicoll et al., 2006) as spruce stability depends on horizontally developed lateral roots due to insufficient vertical rooting. For example, in the case of high depth of groundwater table (Ray & Nicoll, 1998; Štofko, 2010).

In accordance with Nicoll et al. (2006), root-plate volume was lower for trees growing on mineral soil (0.50 ± 0.14 m³), while trees on drained peat soils tend to have larger values (1.5 ± 0.3 m³), and this difference was statistically significant ($p < 0.001$). Also, mean root-plate volume of control trees was significantly higher compared with uprooted trees (Fig. 3.2., Fig. 3.3.)— 1.3 ± 0.5 m³ and 5.5 ± 1.0 m³ in mineral and drained peat soils, respectively.

Additionally to root-plate volume, wind resistance is increases by higher root-plate mass as the height of mass point of tree reduces by heavier root-plate, which is affected by the soil moisture and soil mechanical properties (Nicoll & Ray, 1996; Niccol et al., 2006). Also, tree adaptation to local growing conditions determines the ability of roots to maintain the wind resistance in accordance with silvicultural management history of the stand and natural disturbances (Schelhaas et al., 2003). By the tree growth, the capacity of recovery of root system reduces, thus increasing risk of failure (Puhe, 2003).

Differences in spruce wind resistance between soil types might be shown as differences in root plate volume, which was lower in mineral soils (Nicoll et al., 2006). However, as the importance of DBH in determining root-plate volume was indicated, a $HDBH^2$ was calculated. This parameter, which is known to describe tree wind resistance to uprooting in mineral soils (Peltola et al., 2000), showed significant differences ($p < 0.001$) between soil types. Although, mean values of $HDBH^2$ for mineral soil were lower in comparison to drained peat soils, by the increase of root-plate volume, the estimated values of $HDBH^2$ increased more rapidly in mineral soils (Fig. 3.4.), indicating better anchoring of smaller root-plates for larger trees in mineral soil, or, to state otherwise – need for proportionally larger soil-root plate to sustain larger trees in drained peat soil.

The distribution of above-ground biomass of fresh wood determines the height of mass point, which is affects tree stability as lower this point is, larger load is required for failure (Cucchi et al., 2005; Nicoll et al., 2006). The mean total weighted above-ground biomass was 1730 ± 576 kg and mean value for weighted 2-m section was 66.36 ± 2.97 kg. Values obtained by model of fresh above-ground biomass distribution (table 3.1.) has tight and significant correlation with results of weighing ($r = 0.98$, $p < 0.001$) (table 3.2.). However, predicted values varied for stem base due to lower slenderness compared with other part of stem. In accordance with Marklund (1988) and Repola (2009), obtained model is based on DBH and H:

$$m_{ij} = \beta_2 h_{ij} + \beta_3 DBH_i^2 + \beta_4 h_{ij} DBH_i^2 + \beta_1, \quad (6)$$

where:

m_{ij} – mass of stem fragment (kg);

h_{ij} – height of stem fragment (m);

DBH_i – stem diameter at breast height (cm).

Evaluation of distribution of above-ground biomass was done by Principal Component Analysis, which showed 83% of explained variations for both first (53%) and second (30%) component. Explained variation of first component was dependent on H and DBH, biomass of both stem and canopy, and relative height of mass point. The relative height of mass point was identified as wind resistance determining factor having positive correlations with H ($r = 0.64$, $p < 0.001$), mass

of stem ($r = 0.61$, $p < 0.001$), DBH ($r = 0.55$, $p < 0.001$) and height of lowest living branch ($r = 0.57$, $p < 0.001$). However, relative height of mass point had higher correlations with biomass of canopy ($r = 0.77$, $p < 0.001$). Thus, relative height of mass point, which is stem and canopy dimension dependent has significant effect on wind resistance of spruce. Reduction of this height increases wind resistance significantly (Cucchi et al. 2005; Nicoll et al. 2006). However, explained variation of second component was soil type dependent ($p < 0.008$) having positive correlation with relative height of mass point and the height of lowest living branch, while negative correlation was observed with relative height of canopy, which varied between 34% and 44% from H.

Results suggest that morphometric parameters of stem and root plate of spruce varies significantly between soil types, such as peat and mineral. In stands with peat soils, canopies have smaller both mass and height proportion from H, thus spruce in such growing conditions tend to have higher located mass point. Therefore, reduction of root plate thickness, which determines lower root-soil anchorage in combination with difference in dimensions of above-ground parts, explains differences in wind resistance of spruce stands on peat and mineral soils.

3.2. Static tree pulling tests

Root rot and bark-stripping are considered the most common biotic disturbances in spruce stands causing significant structural damages of wood (Wagener 1963; Shibata & Torazawa, 2008; Honkaniemi et al., 2017; Cukor et al., 2019). Therefore, assessment of such effect can provide significant information that could be used in improvement of wind damage predicting algorithms. Damaged spruce individuals were tested applying static tree pulling test (Peltola, 2006).

The presence of either type of biotic damage reduced both BBM_{PF} and BBM_{SF} significantly regardless the proportion of damage – proportion of removed bark from stem circumference (mean $28.1 \pm 7.3\%$) and the proportion of decayed wood from the area of stump cross-section (mean $50.3 \pm 26.5\%$). Primarily, main factor determining tree stability was stem volume; however, both biotic agents significantly reduced both PF and SF in comparison with control trees in the same stands and soil types (Fig. 3.5. and 3.6.). Obtained values are comparable with results from similar studies elsewhere in Europe (Lundström et al., 2007; Peltola et al., 2010; Jillich et al., 2013). Contrary to expectations, bark-stripping reduced root-soil anchorage, not the mechanical strength of stem wood. After reaching SF, tested trees uprooted rather than fractured in stem. However, the influencing factors affecting failure type was not possible to be analysed as limited number of the trees fractured. Uprooting is the most common tree failure type in spruce stands (Gardiner et al., 2013).

By the presence of bark-stripping BBM_{PF} was reduced proportionally (value differences between undamaged and damaged trees as proportion from value of undamaged trees) regardless to tree size as 61 % less load was required to reach

PF. However, mean reduction of BBM_{SF} was $16 \text{ kNm}\cdot\text{m}^{-3}$ (Fig. 3.5.). Bark-stripping disrupts conductive tissues altering sap flow pattern, thus causing risk of physiological drought (Cukor et al., 2019) and loss of energy of growing (Vasiliauskas, 2001). Under disturbed tree hydraulic conductance, energy from growing purposes is allocated for healing. Therefore, it could be speculated that damaged trees do not locate enough carbon into root system, thus they become more susceptible to uprooting (Szoradova et al., 2013; Honkaniemi et al., 2017). Physiological processes of trees can be altered by pathogen invasion through stem wounds as well (Szoradova et al., 2013; Burneviča et al., 2016; Honkaniemi et al., 2017; Cukor et al., 2019). In stem cross-sections taken at the widest parts of wounds, decayed wood was not found; however, trees with such bark damage are under the risk of invasion of root pathogens (Deflorio et al., 2008; Burneviča et al., 2016), thus root-soil anchorage could be reduced under the presence pathogens in roots (Vasiliauskas, 1998; Honkaniemi et al., 2017).

The presence of root rot causing pathogens reduced both BBM_{PF} and BBM_{SF} significantly regardless to soil type and moisture, as well as root plate volume, suggesting spruce mechanical stability to be dependent on mechanical properties of lateral roots (Fig. 3.6.). Mean reduction of both BBM_{PF} and BBM_{SF} was 25.4% and 24.1%, respectively. It should be noted that the selection of sample trees to test the effect of root rot on spruce stability was done for trees with confirmed presence of *Heterobasidion spp.*; however, often other root rot pathogens, such as *Armillaria spp.* and *Resinicium bicolor* were also detected in the same trees.

The presence of both biotic factors significantly reduced resistance against static loading of spruce, which is shown by lower values of both BBM_{PF} and BBM_{SF} . Reduction against BBM_{PF} leads to increased risk of wood fiber kinking under compression loading, while decrease of resistance against BBM_{SF} means lowered threshold of maximum resistance (Detter et al., 2015). Wood fiber kinking disrupts water conductive system of the tree leading to reduction in vitality and growth. Also, after such damage in roots, not only a physiological drought can follow but invasion risk of root rot pathogens increases (Seidl & Blennow, 2012). As Honkaniemi et al., (2017) showed, trees that are affected by biotic disturbances have increased risk to suffer wind induced damages and initially healthy trees that have survived strong wind event have an increased risk of damages caused by secondary biotic agents (Seidl et al., 2017). Under expected circumstances with increased frequency and severity of strong wind events in the future (Mölter et al., 2016), bark-stripping and root rot caused wood structural damages are considered to be significant factors affecting survival of spruce stands.

Expected negative effects could be prevented or mitigated by implementation of appropriate silvicultural practices, such as establishment of plantations with low initial spacing or timely high intensity thinning without mechanized approaches. Thus, minimizing of both root contacts and damages are expected to decrease the risk of pathogen invasion (Stenlid & Redfern, 1998). Intensified game management, lower stand densities and avoidance of

mechanized commercial thinnings would reduce distribution of stem bark damages in spruce stands (Baders et al., 2017; Katrevičs et al., 2018).

Identification and removal of damaged trees from young and middle-aged stands can provide sufficient adaptation time to develop mechanical stability of remaining trees at the edges of newly formed openings. Moreover, shortened rotation period could reduce the period of time when spruce stands are subjected to notable risk of wind induced damage (Donis et al., 2020; Samariks et al., 2020). However, in case of necessity a replacement of stands right after significant disturbances might reduce the risk of further degradation of affected stand.

3.3. Survival of spruce stands

Regional differences are pronounced in survival of spruce stands also in the relatively small territory such is Latvia (Zeltiņš et al., 2019). Thus, both analysed regions (Dviete in the East and Vāne in the West) were selected to characterize these differences.

In Dviete, the proportion of stands successfully transitioned between inventories from 1975 to 1985 was 76.5% while in Vāne it reached 93.1%. However, the cause of reduction of spruce stands is unknown. In Dviete, failed transitioning of older stands between inventories from 1975 to 1985 could be explained by wind induced damages in the period until 1983 (Fig. 1.1.), especially in 1967 when the most severe wind storm damages were observed in southern part on Latvia (Bengtsson & Nilsson, 2007; Hanewinkel et al., 2008, 2011; LVGMC, 2017). Occasionally, storm-survived stands decline during the following years after the damage under the damage of secondary biotic agents, such as dendrophagous pests (Nikolov et al., 2014; Deschênes et al., 2019). According to data obtained from State Forest Service, observed decline on stands of third age class in the inventory of 2016 might be intensified by outbreak of spruce bud scale (*Physokermes piceae* Schrank.) in 2010 (Baders et al., 2018) (Fig. 3.7.). During whole observation period, higher spruce stand survival between inventories was observed in Vāne ($p < 0,001$). In both regions, higher survival was observed for first age class (0-20 years) (Fig. 3.7.). However, the start of rapid decrease of survival (Fig. 3.8.) was observed for stands in the third age class (41-60 years), and in Dviete such trend started in second age class (21-40 years).

Increase of susceptibility to damages in spruce stands is expected when transitioning into third age class, especially with the presence of bark-stripping and root rot in spruce stands. In our study, stand age was the most important factor that affected transition of stands into next age class ($p < 0.001$) as proportion of survived stands decreased by the increase of age. Similar trend has been observed in other studies where intensity of both biotic (Piri, 1996; Arhipova et al., 2011; Baders et al., 2018) and wind (Peltola et al., 1999; Zeng et al., 2007) damage increased by stand age. The reduction of wind resistance of

spruce stands is expected to decrease by reaching dimensions corresponding to most productive bonity (Ia, I, II)—typically in third age class. Also, risk of bark-stripping or invasion of root-rot increases in such age class, especially in dense stands with delayed or high intensity thinning.

Observed tendencies in survival of spruce stands corresponds to model predictions, suggesting the importance of appropriate management in increasing spruce stand wind resistance. Results of economic evaluation of wind damage on spruce stands indicate to stand age as notable factor that increases risk of wind damage, thus shortened rotation period (50-60 years) is considered as appropriate solution in avoidance of notable decline of spruce stands (Katrevičs et al., 2018), especially with fertile soils, such as peat (Donis et al., 2020; Samariks et al., 2020). Therefore, forest owners should be allowed to implement most suitable management solutions, such as felling accordingly to target DBH, thus both potential economic and ecological losses could be reduced.

CONCLUSIONS

1. Mechanical stability of Norway spruce is significantly reduced by the consequences of bark-stripping wounds (from 16 to 40.8 % from stem circumference). Loading resistance was tightly linked to stem volume (from 0.16 to 1.32 m³): basal bending moment at primary failure increased gradually with tree size for damaged trees and sharply for undamaged. Relative reduction (in comparison to undamaged trees) of basal bending moment at primary failure remained constant regardless of tree size: 61%. The mean reduction of loading necessary for secondary failure was 16 kNm·m⁻³ regardless to tree size.
2. The presence of root rot (from 4 to 94.8 % of stump surface) reduced mechanical stability of Norway spruce regardless of soil type and moisture, and root-soil plate volume. Thus indicating the dependence of spruce stability from mechanical properties of lateral roots. Mean relative reduction of basal bending moment at primary and secondary failure due to presence of root-rot in comparison to values of healthy trees, was 25.4% and 24.1%, respectively.
3. Root-plate volume has a crucial role in ensuring tree mechanical stability: it was significantly smaller for wind-thrown trees than for the ones uprooted in the static pulling tests; this difference was more pronounced in less stable, drained peat soil. In this soil adaptation to wind loading requires development of larger root-soil plate, primarily linked to longer lateral roots, than in freely drained mineral soil.
4. Norway spruce growing on drained peat soils have higher mass point, causing lower mechanical stability, than on mineral soil.
5. The survival of Norway spruce stands significantly decreases from the third age class (41-60 years). The silvicultural practices in Norway spruce stands needs to be adapted to climate change, increasing the survival of trees till they reach the target dimension for final harvest.

RECOMENDATIONS

1. To reduce probability of wind damages, lower initial density of planted stands and/or higher intensity of pre-commercial thinning is recommended, with increases the radial growth and shortens the period, when trees reach the target diameter for final harvest. Especially important this approach is in stands on drained peat soil. In this way also the time when stands are subjected to significant wind damage risk is reduced, thus minimizing the probability of such disturbance. Recommended approach will also minimizes the risk of root rot and decay of wood caused by pathogens entering the tree via bark-stripping wounds, thus further improving wind resistance of the stands. Timely removal of tree with bark-stripping wounds from the stands is recommended to provide sufficient adaptation period to develop mechanical stability of remaining trees. Implementation of protection measures against bark striping and root rot will also minimize the wind damage risk in Norway spruce stands.
2. Further research is required for development of models considering whole spectrum of wind effects on Norway spruce stands, including quantification of changes in probability of secondary abiotic and biotic damages.

ACKNOWLEDGEMENTS

I thank my supervisor Āris Jansons and consultant Jānis Donis for support and assistance in the conceptualization and development of the dissertation. Special thanks to my colleagues Roberts Matisons, Endijs Bāders, Valters Samariks, Didzis Elferts, and Steffen Rust for their involvement in preparing scientific articles. I thank Una Neimane and Renāte Saleniece for correcting the use of language, and Toms Bricis for consultancy about meteorology. Additionally, I would like to thank many other colleagues of LVMI “Silava” for their help in developing and approbating the fieldwork methodology. My family, especially my bride, deserves most of gratitude.