



LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
LATVIA UNIVERSITY OF AGRICULTURE

LATVIJAS VALSTS MEŽZINĀTNES INSTITŪTS „SILAVA”
LATVIA STATE FOREST RESEARCH INSTITUTE „SILAVA”

Mg.envir.sc. ENDIJS BĀDERS

**SASALSTOŠA LIETUS UN VĒJA KĀ DABISKO TRAUCĒJUMU
IETEKME SKUJU KOKU AUDZĒS HEMIBOREĀLAJOS
MEŽOS LATVIJĀ**

**IMPACT OF FREEZING RAIN AND WIND AS NATURAL
DISTURBANCES ON CONIFEROUS HEMIBOREAL FORESTS
IN LATVIA**

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS
Dr.silv. zinātniskā grāda iegūšanai

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

JELGAVA 2016

Promocijas darba zinātniskais vadītājs: Āris Jansons
Supervisor: Dr. silv.
Promocijas darba zinātniskais konsultants: Jānis Donis
Scientific consultant: Mg. silv.

Darbs izstrādāts Latvijas Valsts mežzinātnes institūtā „Silava”.
Research has been carried out at Latvian State Forest Research Institute „Silava”.

Oficiālie recenzenti / *Official reviewers:*

Dr. silv. Inga Straupe, Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesore/ *Professor of Latvia University of Agriculture;*

Dr. silv. Tālis Gaitnieks, Latvijas Valsts mežzinātnes institūta „Silava” vadošais pētnieks/
Senior researcher of Latvian State Forest Research Institute “Silava”;

Dr. Gediminas Brazaitis, Aleksandra Stulginska universitātes, profesors/ *Professor of Aleksandras Stulginskis University.*

Pētījums izstrādāts Meža nozares kompetences centra (ERAF) projekta "Metodes un tehnoloģijas meža kapitālvērtības palielināšanai" (L-KC-11-0004) un LVMI Silava realizēta Eiropas Sociālā fonda projekta „Vītālu egļu audžu izaudzēšanas ekoloģiskie un tehnoloģiskie aspekti” Nr. 2013/0022/IDP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/052 ietvaros. / *The study has been developed within the Forest Competence Centre’s (European Regional Development Fund) project „Methods and technologies for increasing forest capital value” (No L-KC-11-0004) and European Social Fund project „Management of vital Norway spruce stands: ecological and technological aspects” (No. 2013/0022/IDP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/052).*



IEGULDĪUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



Dati Slīteres nacionālā parka teritorijā ievākti ar Dabas aizsardzības pārvaldes atļauju. / *Data from the Slitere National Park has been collected with permission of the Nature Conservation Agency.*

Promocijas darba aizstāvēšana notiks LLU Mežzinātņu un Materiālzinātņu nozares promocijas padomes atklātā sēdē **2016. gada 25. augustā plkst. 10:00** Jelgavā, Dobeles ielā 41, Kokapstrādes katedras 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 **August 25th, 2016 at 10:00** in Jelgava, Dobeles iela 41.*

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu var iepazīties LLU Fundamentālajā bibliotēkā / *The thesis is available at the Fundamental Library of LUA: Lielā iela 2, Jelgava vai / or: http://llufb.llu.lv/promoc_darbi.html.*

Atsauksmes sūtīt promocijas padomes sekretārei Mg.silv. Sarmītei Berņikovai- Bondarei / *References are welcome to be sent to Mg.silv. Sarmītei. Berņikovai- Bondarei, the Secretary of the Promotion Council: Dobeles iela 41, Jelgava, LV-3001, Latvija, vai / or: koka@llu.lv.*

SATURS / CONTENTS

1. DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS	4
1.1. Tēmas aktualitāte	4
1.2. Promocijas darba mērķis	4
1.3. Promocijas darba pētnieciskie uzdevumi	4
1.4. Promocijas darba tēzes	5
1.5. Zinātniskā novitāte	5
1.6. Praktiskā nozīme	5
1.7. Promocijas darba struktūra un apjoms	5
1.8. Zinātniskā darba aprobācija	6
2. MATERIĀLS UN METODES	8
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	10
3.1. Sasalstoša lietus izraisīto bojājumu apjomu determinējošo koka un audzes pazīmju novērtējums	10
3.2. Audzes atjaunošanās pēc intensīva dabiskā traucējuma	18
3.3. Ainavas ilgtermiņa dinamika pēc traucējuma	24
SECINĀJUMI	30
1. GENERAL DESCRIPTION	31
1.1. Topicality of the theme	31
1.2. Aim of the thesis	31
1.5. Scientific novelty	32
1.6. Practical significance	32
1.7. Structure and coverage of thesis	32
1.8. Approbation of research results	33
2. MATERIAL AND METHODS	33
3. RESULTS AND DISCUSSION	35
3.1. Assessment of tree and stand parameters that determine the extent of damage caused by freezing rain	35
3.2. Stand regeneration after intense natural disturbance	38
3.3. Long-term dynamic of landscape after disturbance	41
CONCLUSIONS	43

1. DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

1.1. Tēmas aktualitāte

Dabiskie traucējumi ietekmē gan atsevišķas mežaudzes, gan meža ainavas un to turpmāko attīstību. Hemiboreālajos mežos nozīmīgākie dabiskie abiotiskie traucējumi ir vētras (izraisot gan vējgāzes, gan vējlauzes) un ugunsgrēki, kā arī sniegs un sasalstošas lietus (viens no atkalas veidiem). Šo traucējumu nozīme ir gan ekonomiska (piemēram, samazinot koksnes vērtību, ietekmējot kāda reģiona koksnes resursu pieejamību, koksnes cenu, reģiona piemērotību tūrismam), gan ekoloģiska (piemēram, samazinot vecu koku īpatsvaru audzē vai meža ainavā, radot piemērotas dzīvotnes atsevišķām dzīvo organismu sugām, izmainot atsevišķu sugu pārvietošanās iespējas ainavā).

Sasalstoša lietus biežums dažādos Latvijas reģionos nozīmīgi atšķiras, turklāt netiek prognozēts, ka klimata izmaiņu ietekmē tas varētu mazināties vai arī varētu mainīties reģioni ar dažādu tā iespējamību. Tādēļ būtiski novērtēt šīs meteoroloģiskās parādības ietekmi uz kokaudzi un to determinējošos faktorus, rezultātā izstrādājot rekomendācijas bojājumu mazināšanas pasākumiem, kā arī audžu apsekošanas prioritātēm varbūtējo bojājumu savlaicīgai konstatācijai pēc sasalstoša lietus notikuma.

Pēdējās desmitgadēs novērota palielināta ciklonu aktivitāte, kas Eiropas ziemeļu daļā saistīta ar biežākām stiprām vētrām. Tiek prognozēts, ka vētru radītie bojājumi Eiropas mežos nākotnē pieaugs, kas saistīts ne tikai ar vētru biežuma vai stipruma izmaiņām, bet arī ar klimata izmaiņu ietekmi, kuras dēļ vētras mežu biežāk skars veģetācijas periodā, kā arī periodā ar nesasalušu augsni. Informācija par mežaudžu atjaunošanos un augšanu ilgākā laika posmā pēc vētras teritorijā bez saimnieciskās darbības ir būtiska, padziļinot un precizējot izpratni par dabisko sukcesiju hemiboreālajos mežos. Tā izmantojama, izstrādājot meža apsaimniekošanas rekomendācijas specifiskām situācijām un teritorijām, kurās darbības princips ir dabisko traucējumu imitācija, nolūkā paaugstināt meža bioloģisko daudzveidību, kā arī novērtējot specifiskus šim mērķim paredzētus pasākumus. Tāpat iegūtā informācija par kokaudžu sastāvu saimnieciskās darbības neietekmētās audzēs ir būtiska, novērtējot oglekļa piesaisti mežos šādās teritorijās kā daļu no Latvijas mežu kopējās oglekļa piesaistes valsts starptautisko saistību izpildes ietvaros.

1.2. Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir raksturot vētras ilgtermiņa sekas saimnieciskās darbības neietekmētās audzēs un meža ainavā, kā arī novērtēt kokaudzes noturību pret sasalstoša lietus ietekmi determinējošos faktorus saimnieciskajos mežos.

1.3. Promocijas darba pētnieciskie uzdevumi:

1. novērtēt sasalstoša lietus bojājumus determinējošos rādītājus skujkoku audzēs,
2. raksturot pēc liela mēroga vējgāzes atjaunojušos kokaudžu struktūru un to ietekmējošos faktorus,
3. novērtēt liela mēroga vējgāzes ilgtermiņa ietekmi uz meža ainavu.

1.4. Promocijas darba tēzes:

1. sasalstoša lietus bojājumu apjoms kokaudzē ir atkarīgs gan no tās individuālo, gan kolektīvo noturību noteicošajiem parametriem,
2. egles atjaunošanās pēc liela mēroga vētras galvenokārt notiek ar paaugas kokiem, pirmajā stāvā konstatējamas vairāku vecumklatu egles,
3. intensīva liela mēroga traucējuma ietekme uz meža ainavas telpiskajiem indikatoriem saglabājas ilgāk nekā 20 gadus.

1.5. Zinātniskā novitāte

Pirmo reizi Latvijā veikta tik plaša meža atjaunošanās novērtēšana vētras nopostītās platībās bez saimnieciskās darbības ietekmes tik ilgu laiku pēc šī dabiskā traucējuma (45 gadi); līdz šim hemiboreālajos mežos Eiropā bijuši tikai daži pētījumi par šo tēmu, analizējot līdz 20 gadus ilgu periodu pēc vētras.

Pirmo reizi Latvijā veikta vētras ilgtermiņa ietekmes uz meža ainavas fragmentāciju vērtēšana, radot pamatu turpmākiem pētījumiem par iespējamo dabisko traucējumu un to dinamikas izmaiņu ietekmi uz bioloģisko daudzveidību.

Promocijas darbā veiktais novērtējums pirmo reizi tik plaši un detalizēti raksturo sasalstoša lietus bojājumus skuju kokiem hemiboreālajos mežos Eiropā; līdzšinējie pētījumi par tā ietekmi uz kokaudzēm veikti galvenokārt Ziemeļamerikā. Promocijas darba ietvaros pirmo reizi izstrādāti šīs meteoroloģiskās parādības ietekmi uz audzes bojājumiem raksturojoši vienādojumi.

1.6. Praktiskā nozīme

Promocijas darbā sagatavotie sasalstoša lietus ietekmi uz audzes bojājumiem raksturojošie vienādojumi izmantojami, novērtējot audžu apsekošanas pēc šīs meteoroloģiskās parādības nepieciešamību un prioritātes, nodrošinot iespējami ātru bojājumu konstatāciju un koksnes savākšanu, gan iespējami maz zaudējot tās vērtību, gan mazinot dendrofāgo kukaiņu savairošanās risku. Izpratne par vētras kā Latvijas teritorijā nozīmīgākā dabiskā traucējuma ilgtermiņa ietekmi ne tikai uz konkrētu mežaudzi, bet uz meža ainavu kopumā, izmantojama bioloģiskās daudzveidības aizsardzības plānu (konceptiju) izstrādāšanai.

1.7. Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darba pirmajā nodaļā apkopotas līdzšinējo pētījumu atziņas par dabisko traucējumu ietekmi uz mežaudzi. Pirmajā apakšnodaļā raksturoti sasalstoša lietus veidošanos izraisīšie klimatiskie un meteoroloģiskie faktori, aprakstīti apledojuuma novērojumi pasaulē, kā arī apkopoti pētījumu rezultāti par sasalstoša lietus un sniega ietekmi uz kokaudzēm. Otrajā apakšnodaļā aprakstītas vētras izraisītais atmosfēras parādības un apkopoti pētījumu rezultāti par mežaudzes un meža ainavas noturību pret vēja bojājumiem saistībā ar bojājumu mērogu un augsnes apstākļiem, kā arī par audžu atjaunošanos un palikušo koku reakciju pēc vētras. Otrajā nodaļā aprakstīts pētījuma materiāls un metodika. Trešajā nodaļā analizēti pētījuma rezultāti. Pirmajā apakšnodaļā novērtētas sasalstoša lietus izraisīto bojājumu apjomu determinējošās koka individuālās un

mežaudzi raksturojošās pazīmes. Otrajā apakšnodaļā analizēta audzes atjaunošanās pēc intensīva dabiskā traucējuma – vētras, bet trešajā apakšnodaļā raksturotas meža ainavas telpiskās struktūras indikatoru izmaiņas pēc šī traucējuma.

Promocijas darbam ir 132 lappuses, informācija apkopota 19 tabulās un 87 attēlos, izmantoti 229 literatūras avoti.

1.8. Zinātniskā darba aprobācija

Pētījuma rezultāti apkopoti četrās publikācijās:

1. Bādērs, E., Puriņa, L., Lībiete, Z., Nartišs, M., un Jansons, Ā., 2014. Fragmentācijas ilgtermiņa dinamika meža ainavā bez cilvēka saimnieciskās darbības ietekmes. *Mežzinātne* 28, 91-107. (AGRIS; CAB ABSTRACTS)
2. Baders E., Jansons A., Jogiste K., Polyachenko O., Kiviste A. Stand structure 40 years after the major storm in two different site types of spruce hemi-boreal forests in Slitere Natural Park, Latvia. Iesniegts žurnālā *Forest Ecology and Management*.
3. Baders E., Senhofa S., Libiete Z., Purina L., Jansons A. Natural succession of Norway spruce stands in hemiboreal forests: case study in Slitere national park, Latvia. Akceptēts publicēšanai žurnālā *Baltic Forestry*.
4. Bādērs E., Adamovičs A., Puriņš M., Džeriņa B., Tree damages by icing in Scots pine stands and factors affecting them. Akceptēts publicēšanai konferences „Research for Rural Development 2016” zinātnisko rakstu krājumā.

Pētījuma rezultāti prezentēti 12 zinātniskajās konferencēs:

1. 11-12.11.2013. Zviedrijas Lauksaimniecības universitāte, Upsala, Zviedrija, Referāts:
Jansons A., Baders E., Rieksts-Riekstins J., Neimane U. (2013). Ice Damages of Coniferous Trees in Hemiboreal Forests in Context of Climatic Changes: a Case Study in Latvia. In: *International scientific conference: Climate change and forestry in northern Europe*. Book of abstracts of international scientific conference, 11 to 12 November, Uppsala, Sweden. SLU, p. 27.
2. 16.–19.06.2014. Šveices Federālais pētniecības institūts WSL, Birmensdorfa, Šveice, Stenda referāts:
Jansons A., Baders E., Jōgiste K., Donis J., Dzerina B. (2014). Towards mimicking natural disturbances in hemiboreal forest management: case study in Slitere National Park, Latvia. In: *The 9th IUFRO International Conference on Uneven-Aged Silviculture: Future Concepts in Uneven-Aged Silviculture for a Changing World*. International Conference Book of Abstracts, 16 to 19 June 2014, Birmensdorf, Swiss. Federal Research Institute WSL, p. 53.
3. 11.-14.08.2014, Igaunijas Dzīvības zinātņu universitāte, Tartu, Igaunija. Referāts:
Baders E., Jōgiste K., Taukacs K., Donis J., Jansons A. (2014). Long-term impact of wind storm on stand composition in hemiboreal forests: case study in Slitere National Park, Latvia. In: *Forest landscape mosaics: disturbance, restoration and management at times of global change*. International Conference Book of Abstracts, 11 to 14 August 2014, Tartu, Estonia. Transactions of the Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences, p. 19.

4. 11.-14.08.2014, Igaunijas Dzīvības zinātņu universitāte, Tartu, Igaunija. Referāts:
Jansons A, Baders E., Rieksts-Riekstins J., Jansons J. (2014). Ice damages of coniferous trees in hemiboreal forests: case study in Latvia. In: *Forest landscape mosaics: disturbance, restoration and management at times of global change*. International Conference Book of Abstracts, 11 to 14 August 2014, Tartu, Estonia. Transactions of the Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences, p. 40.
5. 15.10.2014., Daugavpils universitāte, Daugavpils, Latvija. Referāts:
Baders E., Libiete Z., Jansons A, Nartiss M. (2014). Long-term natural fragmentation dynamics in semi-natural forest massif. In: *Special session of 9th Baltic Theriological Conference: Forest ecosystem and its management: towards understanding the complexity*. International Conference Book of Abstracts, 15. October 2014, Ilgas, Daugavpils, Latvia. University of Daugavpils, p. 21.
6. 23-24.04.2015, Rīga, Latvija, Stenda referāts.
Aris Jansons, Endijs Baders, Mara Zadina (2015). Building-up understanding of long term natural dynamics in forest landscape: cases studies from Slitere National park, Latvia. In: *Adaptation and mitigation: strategies for management of forest ecosystems*. International Conference Book of Abstract, 23 to 24 April 2015, Salaspils, Latvia. LSFRI Silava, p. 39.
7. 16-18.06.2015. Latvijas Universitāte Riga, Latvia. Referāts:
Baders E., Taukacs K., Dzerina B., Jansons A. (2015). Characteristics of un-managed Norway spruce stands in windthrow area in Slitere national park, Latvia. In: *25th NJF congress: Nordic view to sustainable rural development*. Proceedings of the 25th NJF Congress, 16 to 18 June 2015, Riga, Latvia. Latvian National Association of NJF, p.402.
8. 22.-28.08.2015, Igaunijas Dzīvības zinātņu universitāte, Tartu, Igaunija. Referāts:
Baders E., Jansons A., Taukacs K., Pobiarsens A., Katrevics J. (2015). The structure of semi-natural un-even aged Norway spruce stands in hemiboreal zone: A case study in windthrow area in Slitere National Park, Latvia. In: *IUFRO Landscape Ecology Conference: Sustaining ecosystem services in forest landscapes*. International Conference Book of Abstracts, 22 to 28 August 2015, Tartu, Estonia. Estonian University of Life Sciences, p. 33.
9. 3.-5.11.2015, Kopenhāgenas universitāte, Kopenhāgena, Dānija. Stenda referāts:
Baders, E., Purina, L., Libiete, Z., Lazdina, D., Jansons, A. (2015). Wind and Freezing Rain Damages in Forest – Impact on Fragmentation Dynamics: Case Studies in Latvia. In: *Centre of Advanced Research on Environmental Services from Nordic Forest Ecosystems Conference: Managing Forests to Promote Environmental Services: Climate change adaptation and mitigation, water protection, biodiversity conservation, and soil quality maintenance*. International Conference Book of Abstracts, 3 to 5 November 2015, Copenhagen. University of Copenhagen, p. 53.
10. 4-6.11.2015. a/s Latvijas valsts meži, Rīga, Latvija, Referāts:
Baders E., Donis J., Krisans O., Adamovics A., Jansons A. (2015). Impact on Freezing Rain on Forest Stands: a Case Study in Eastern Part of Latvia. In:

Scientific Conference of the Forest Sector: Knowledge based forest sector. International Conference Book of Abstracts, 4 to 6 November 2015, Riga, Latvia. LSFRI Silava, p. 70.

11. 4-6.11.2015. a/s Latvijas valsts meži, Rīga, Latvija, Stenda referāts: Baders E., Jogiste K., Adamovics A., Jansons A., (2015). Posts-storm Regeneration and Stand Structure of Norway Spruce (*Picea Abies* (L.) Karst.) in Oxalidos Forest Type. In: *Scientific Conference of the Forest Sector: Knowledge based forest sector.* International Conference Book of Abstracts, 4 to 6 November 2015, Riga, Latvia. LSFRI Silava, p. 91.
12. 4-6.11.2015. a/s Latvijas valsts meži, Rīga, Latvija, Stenda referāts: Baders E., Purina L., Libiete Z., Jansons A. (2015). Impact of Wind and Freezing Rain Damages on Fragmentation Dynamics of Forest Landscape: Case Studies in Latvia. In: *Scientific Conference of the Forest Sector: Knowledge based forest sector.* International Conference Book of Abstracts, 4 to 6 November 2015, Riga, Latvia. LSFRI Silava, p. 96.

2. MATERIĀLS UN METODES

Dabiskie traucējumi ir jebkāda veida ārēji procesi vai apstākļi, kas izraisa pēkšņu augu biomasas bojāeju ievērojami īsākā laika posmā nekā jaunas biomasas veidošanās. Šajā pētījumā katrs dabiskais traucējums vērtēts tajā Latvijas reģionā, kur, kā liecina pēdējo 50 gadu meteoroloģisko novērojumu dati (LVĢMC), tas sastopams visbiežāk.

Atkala ir meteoroloģiska parādība, kad ledus un sniegs uzkrājas uz atmosfērā eksponēta objekta virsmas (ISO-12494). Atkalas veidošanās parasti ir saistīta ar salīdzinoši specifiskiem atmosfēras apstākļiem, un tā veidošanās norit ne tikai miglai nosēžoties, bet arī lietus laikā gaisa temperatūrai strauji pazeminoties zem 0°C (Zirnītis, 1968; Ahrens, 2007). Sasalstošs lietus veidojas krasi atšķirīgas temperatūras gaisa masu saskares joslā: no augstāk esošā siltā slāņa izkritušie lietus nokrišņi, krītot cauri noteikta biezuma aukstajam slānim, formē sīkas ledus lodītes, kuru centrā ir nesalis ūdens. Tām atsītoties pret cietu virsmu un sašķīstot, veidojas apledojums (Fikke et al., 2005). Tā kā darbā tiks analizēti tikai sasalstoša lietus parādības izraisītie mežaudžu bojājumi, bet citi nokrišņu veidi, kas ietver pēc ģenēzes atšķirīgas meteoroloģiskās parādības, darbā netiks skatīti, termins „atkala” netiks lietots.

Sasalstoša lietus ietekmi determinējošo faktoru vērtēšanai dati ievākti skuju koku mežaudzēs, kuras šis dabiskais traucējums skāris 2012. gada decembrī: a/s „Latvijas valsts meži” Ziemeļlatgales mežsaimniecības meža masīvos Rēzeknes, Baltinavas, Balvu un Kārsavas novadā.

Izložēto skuju koku audžu (taksācijas aprakstā sastāva formulā sugas koeficients 7 līdz 10) vecums priedei bija no 12 līdz 123 gadiem, eglei – no 20 līdz 123 gadiem. Nogabali atradās 12 meža tipos: silā, mētrājā, lānā, damaksnī, vērī, slapjajā mētrājā, slapjajā damaksnī, slapjajā vērī, niedrājā, šaurlapju ārenī, šaurlapju kūdrenī, platlapju kūdrenī. Kopumā 163 nogabalos (platība ≥ 0.8 ha) – 98 priedes audzēs, 51 egles audzē un 14 skuju koku mistraudzēs (kopsavilkumā nav analizētas) – sistemātiski izvietoti vidēji

astoņi apļveida parauglaukumi (200 m²; R=7.96 m). Kokiem (d_{1.3m}>2 cm) uzmērīja stumbra caurmēru, vainaga sākuma un kopējo augstumu, noteica bojājuma veidu: lauzts vai saliekts. Lauztajiem kokiem uzmērīja lūzuma augstumu un, kur iespējams, nolūzušās daļas garumu koka kopējā augstuma rekonstrukcijai. Kokiem, kuriem nebija iespējams tiešā veidā nomērīt lauztās daļas garumu, aprēķināta augstumlikne pēc Petersena vai Gafreja vispārējās augstumliknes (Donis, 2009). Kā saliekti tika atzīmēti koki, kuriem konstatēta stumbra novirze no vertikālās ass vismaz par 15°, t.sk., gan koki ar noliekušos galotnes daļu, gan slīpi („pusizgāzti”), gan izgāzti koki.

Katram nogabalam pa mežaudzes elementiem aprēķināti taksācijas rādītāji (stumbra caurmērs (D), koka augstums (H), audzes šķērslaukums (G), tilpums (V)). Audzes pēc bojājuma pakāpes (nebojāto un maz bojāto koku I stāva šķērslaukuma) iedalītas 3 grupās: 1) nebojātas – G>0.5 no Treťakova normālo šķērslaukumu tabulās norādītā; 2) 0.5≥G>0.3; 3) G≤0.3.

Lai noteiktu pazīmes, kas ietekmē audžu bojājuma varbūtību, veikta binārā loģistiskā regresijas analīze, izmantojot SPSS 14 rīku „pielāgotā regresija” (*Advanced Regression*). Izmantots „solģpiemeklēšanas” (*Backward Stepwise LR*) algoritms. Pirms regresijas analīzes faktoru savstarpējā korelācija novērtēta, izmantojot rīku „kolinearitātes diagnostika” (*Multicollinearity Diagnostics*), un par neatkarīgajiem mainīgajiem izvēlēti tādi, kuru savstarpējā korelācija mazāka par 0.8.

Liela mēroga vējgāzes ilgtermiņa ietekmes vērtēšanai pētījums veikts Slīteres Nacionālā parka teritorijas daļā, kurā kopš 1923. gada, kad tika izveidots „Slīteres vecais pieminekļis” nav veikta nekāda veida cilvēka saimnieciskā darbība. Pētījuma teritorijā visvairāk pārstāvēti slapjaini (41% platības) – slapjais mētrājs, slapjais damaksnis, slapjais vēris, slapjā gārša; mazāk sausieņi (18%) – damaksnis, vēris, gārša, un purvaini (8%) – purvājs, niedrājs un liekņa. Slīteres rezervātu 1969. gada 2. novembrī skāra spēcīga vētra, ietekmējot lielāko daļu audžu. Atbilstoši pēc vētras veiktās meža taksācijas datiem, kā arī satelītattēlu analīzei (vairāk nekā 90% vainagu klāja samazinājums), lielākais izgāzto audžu īpatsvars (55%) konstatēts 70 līdz 130 gadus vecās egļu audzēs. Tieši šajās platībās sistemātiski ierīkoti 266 (t.sk., sausieņos 179, slapjainos 63) apļveida parauglaukumi ar platību 100 m² (R=5.64 m), no kuriem daļa (17 parauglaukumi plašāk pārstāvētajos meža tipos – vēri un slapjajā damaksnī) paplašināti līdz 500 m² (R=12.62 m). Katrā parauglaukumā tika noteikts visu koku (d_{1.3m}>2 cm) skaits, suga un piederība stāvam; katram audzes elementam (stāvam un sugai atsevišķi) noteikts vidējais koku augstums un stumbra caurmērs. Piezīmēs tika norādīts, ja koks identificēts kā iepriekšējās ģenerācijas koks, t.i., izdzīvojis pēc 1969. gada vētras. Papildus tam, paplašinātajos parauglaukumos katram audzes elementam iegūtas pieauguma urbumu skaidas vismaz 15 dažāda stumbra caurmēra kokiem un visiem vizuāli nosakāmajiem iepriekšējās ģenerācijas kokiem, urbjot līdz koka serdie pie sakņu kakla.

Koku sadalījums pa caurmēra pakāpēm tika modelēts, izmantojot trīs parametru Veibula (*Weibull*) sadalījumu (2.1) (Bailey, Dell, 1973):

$$f(d) = \frac{c}{b} \left(\frac{d-a}{b} \right)^{c-1} \exp \left(- \left(\frac{d-a}{b} \right)^c \right) \quad (2.1.)$$

kur

- c – formas parametrs;
- b – mēroga parametrs;
- a – novietojuma parametrs.

Veibula sadalījuma koeficientu vērtības katram parauglaukumam aprēķinātas pēc „maksimālās ticamības metodes” (*The Method of Maximum Likelihood*) un aproksimētas, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzi. Regresijas modelī Veibula sadalījuma trīs parametri katrs atsevišķi tika izmantoti kā atkarīgās pazīmes, bet kā neatkarīgas pazīmes izmantoti tie audzes rādītāji, starp kuriem nav izteikta kolinearitāte ($r < 0.50$). Pakāpeniski izslēdzot no modeļa nebūtiskos ($p > 0.05$) regresorus, labākais vienādojums izvēlēts, izmantojot *Akaike*s informācijas kritēriju (Akaike, 1974).

Meža masīvam, kas ietver Slīteres rezervātu, veikta meža ainavas pārklājuma izmaiņu telpiskā analīze. Izmantoti pieci *Corona* un *Landsat* satelītattēli, kuri uzņemti laika posmā no 1966. gada līdz 2010. gadam. *Corona* KH-4B misijas 1966. un 1972. gada dati iegūti kā skenēti panhromatiskie attēli bez koordinātēm, tādēļ, izmantojot zināmu zemes virsmas kontrolpunktu koordinātes no ortofoto attēliem, tie tika piesaistīti ģeogrāfiskajām koordinātēm LKS-92 sistēmā. Lai turpmāk iegūtos rezultātus varētu savstarpēji salīdzināt, izmantojot „tuvākā kaimiņa interpolācijas” (*k-nearest neighbours*) metodi, 1966. gada un 1972. gada satelītattēliem tika samazināta viena pikseļa telpiskā izšķirtspēja no 1.8×1.8 m un 2.75×2.75 m līdz 30×30 m (McGarigal et al., 1995; Buyantuyev, Wu, 2007).

Satelītattēlu pārraudzītā klasifikācija veikta *Grass GIS 6.4.3.* vidē (Vitti, 2008). Izmantojot LVMI „Silava” arhīvā pieejamos 1973. gada mežaudžu plānus un Meža valsts reģistra telpisko datu bāzē pieejamo informāciju par meža masīvā esošajiem nogabaliem, definētas 3 zemes virsmas seguma klases: 1) platības ar zemu kokaudzes biomasu (purvi, virsāji, pārplūstoši klajumi, iznīkušās audzes un jaunaudzes); 2) nemeža zemes (lauksaimniecības zemes, autoceļi, ūdeņi, apbūve); 3) mežaudzes. Meža ainavas kompozīcija, struktūra un fragmentācija raksturota, izmantojot bezmaksas telpiskās analīzes programmu *Fragstats 4.2* (McGarigal et al., 1995). Telpiskai vizualizācijai izmantota GIS programmatūra *ArcGIS Desktop 10.2.2.*

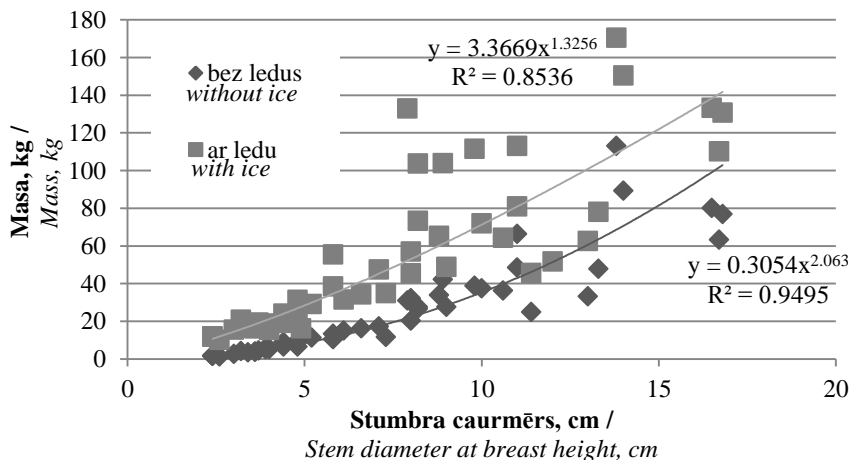
Pētītās pazīmes ietekmējošo faktoru būtiskums novērtēts ar vienfaktora dispersijas analīzi. Pētīto pazīmju sadalījums dažādās mainīgo kategoriju grupās salīdzināts, izmantojot χ^2 testu. Sakarības starp pazīmēm novērtētas ar lineārās regresijas analīzi. Statistiskie testi galvenokārt izpildīti programmā *R 2.13.0* (R Development Core Team 2011).

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Sasalstoša lietus izraisīto bojājumu apjomu determinējošo koka un audzes pazīmju novērtējums

Lai raksturotu ledus apjomu, kas sasalstoša lietus rezultātā bija izveidojies uz kokiem, izraisot to bojājumus, 12 dažāda vecuma priežu audzēs tika izvēlēti 57 valdaudzes koki (caurmērs 3–18 cm) un veikta to virszemes biomasas svēršana ar apledojumu un pēc ledus nokušanas. Ledus masa uz lautzajiem kokiem bija vidēji 1.5 ± 0.27 reizes lielāka par

paša koka biomasu dabiski mitrā stāvoklī. Korelācija starp koka biomasu un ledus masu uz tā bija cieša un statistiski būtiska ($r=0.92$, $p<0.01$). Koka biomasa ar ledu, līdzīgi kā bez ledus, atkarīga no stumbra caurmēra, šo sakarību vislabāk apraksta pakāpes funkcija (3.1. att.). Tomēr iegūtie rezultāti liecina, ka kritiskā ledus masa kokiem ar līdzīgu caurmēru var nozīmīgi atšķirties, kas, iespējams, saistīts ar koku vainagu asimetriju vai vēja ietekmi, kā rezultātā arī mazāka ledus masa var izraisīt koka lūšanu. Zinātniskajā literatūrā atrodams ļoti maz informācijas par kritiskā ledus slāņa biezumu uz koku virsmas, kas izraisa to lūšanu un/vai izgāšanu; atsevišķos avotos minēti 1-2 cm (Greene et al., 2007).



3.1. att. Lauztu priežu virszemes masa ar ledu un bez tā.

Fig. 3.1. The above-ground biomass of pines with ice and without ice.

Bojāto koku īpatsvars priedes un egles audzēs būtiski neatšķirās ($p>0.05$) un bija attiecīgi 28% un 27%. Lauzto koku bija vairāk nekā saliekto: priedes audzēs attiecīgi 18% un 9%, egles audzēs – 16% un 11%. Bojāto koku īpatsvars (gan kopējais, gan atsevišķi lauztajiem kokiem) parādīts 3.1. tabulā, kur dati audzēs ar priedi kā valdošo sugu un egli kā valdošo sugu apkopoti pa atsevišķām koku sugām (priede, egle, bērzs) dažādās stumbra caurmēra pakāpēs (pēc audzes valdošās sugas pirmā stāva koku vidējā stumbra caurmēra). Priežu audzēs par bojātiem (lauztiem vai izgāztiem) atzīti 26% koku (26% no uzņēmītajām priedēm, 20% no eglēm un 32% no bērziem); nedaudz lielāks bojāto koku (īpaši eglu) īpatsvars konstatēts eglu audzēs – par bojātiem atzīti 27% koku (28% no uzņēmītajām priedēm, 27% no eglēm un 32% no bērziem).

Koku augstuma ietekmes uz bojāto koku īpatsvaru analizē iekļauti tikai I stāva koki. Egles audzēs vislielākais saliekto koku īpatsvars (25%) konstatēts 8 m augstiem kokiem. Palielinoties augstumam, saliekto koku īpatsvars bija robežās no 1% līdz 7%. Egles audzēs lūzumi konstatēti, sākot ar 9.1 m augstumu, un līdz 13 m augstumam lauzto koku īpatsvars bija neliels (no 2% līdz 7%). Lauzto koku īpatsvars strauji pieauga no 13 m līdz 15 m augstumam, attiecīgi no 2% līdz 33%, 16-17 m augstiem kokiem novērots lauzto

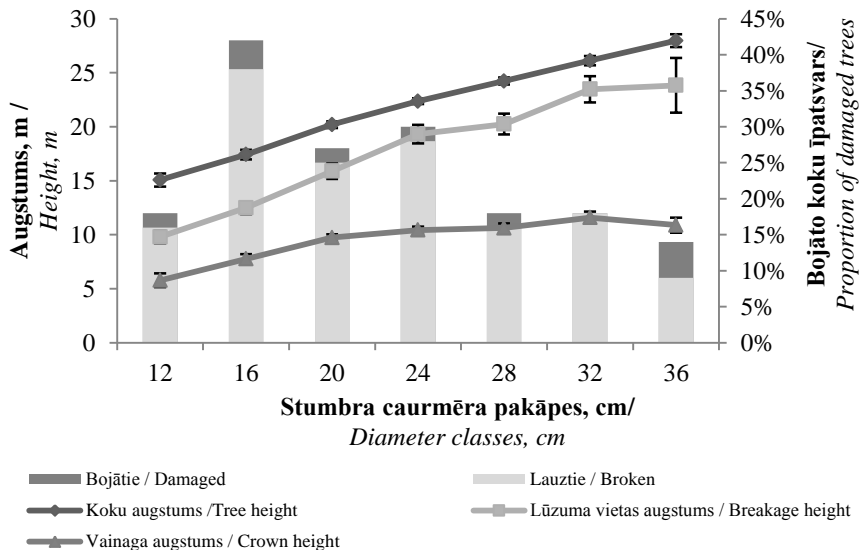
koku īpatsvara kritums līdz aptuveni 20%. Vislielākais kopējais bojāto koku īpatsvars (41%) egles audzēs konstatēts 18 m augstiem kokiem, bet augstākiem kokiem bojāto koku īpatsvars samazinājās. Bojājuma ietekmes uz sortimentu iznākumu noteikšanai nozīmīgi novērtēt stumbra lūzuma augstumu. Egles audzēs valdaudzēs kokiem zaļais vainags veidoja vidēji 57% no stumbra kopgaruma, bet konstatētais vidējais relatīvais lūzuma augstums bija 76% no stumbra kopgaruma (skatīt no stumbra pamatnes) (3.2. att.). Analizējot stumbra lūzuma vietu (lauzts vainagā vai zem pirmā zaļā zara), konstatēts, ka egles audzēs koki ar lūzumiem zem vainaga veidoja 31% no visiem lauztajiem kokiem; lūzumi zem vainaga egles audzēs raksturīgi tievākiem kokiem – lielākais šādu koku īpatsvars konstatēts kokiem ar stumbra caurmēru 8.1-10 cm (9%).

3.1. tabula / Table 3.1.

Bojāto koku un laužo koku īpatsvars atkarībā no audzes valdošās koku sugas un tās vidējā stumbra caurmēra
The proportion of damaged and broken trees according to the stands dominant species and stands mean diameter at breast height

	Nogabalu grupas / Stand groups	Suga / Species	I stāva koku stumbra caurmēra pakāpes (cm) / Diameter classes (cm) for overstorey trees							Vidējī / Average		
			4	8	12	16	20	24	28		32	36
Bojāto koku īpatsvars, % / Proportion of damaged trees, %	Priedes audzes / Pine stands	Visas sugas kopā / All species	33	25	28	22	32	27	22	22	18	26
		Priede / Scots Pine	33	22	28	21	33	28	24	24	18	26
		Egle / Norway spruce			29	29		25	12	9		20
		Bērzs / Birch		60				14	19			32
	Egles audzes / Norway spruce stands	Visas sugas kopā / All species	22		28	43	28	29	18	17	18	27
		Priede / Scots Pine					30	33	20	16		28
		Egle / Norway spruce	15		18	42	27	30	18	18	14	27
		Bērzs / Birch			69		28	20	18	16		32
Lauzto koku īpatsvars, % / Proportion of broken trees, %	Priedes audzes / Pine stands	Visas sugas kopā / All species	6	5	19	19	29	24	20	20	13	19
		Priede / Scots Pine	6	6	18	19	30	25	22	22	14	19
		Egle / Norway spruce			25	27		24	10	7		17
		Bērzs / Birch		1				7	4			5
	Egles audzes / Norway spruce stands	Visas sugas kopā / All species	6		14	35	24	26	15	15	12	22
		Priede / Scots Pine					24	27	15	12		20
		Egle / Norway spruce	7		16	38	25	28	16	18	9	24
		Bērzs / Birch			4		3	4	6	5		5

Koku īpatsvars ar lūzumiem zem koka vainaga samazinājās kokiem ar stumbra caurmēru no 10.1 cm līdz 36 cm. Lūzumi zaļajā vainagā, palielinoties stumbra caurmēram, pakāpeniski pieauga, sasniedzot 21% kokiem ar stumbra caurmēru no 22.1 cm līdz 24 cm, un pēc tam samazinājās.



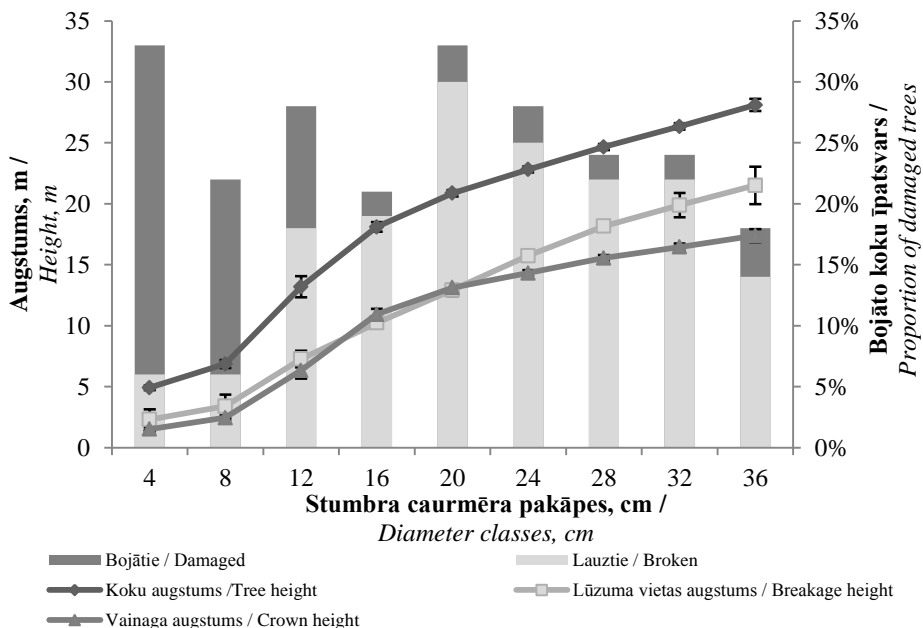
3.2. att. Egļu vidējais koka augstums, vainaga un lūzuma vietas augstums atkarībā no stumbra caurmēra

Fig. 3.2. The mean height, crown-base height and breakage height of Norway spruce according to stem diameter at breast height.

Priedes audzēs vislielākais saliekto koku īpatsvars (33%) konstatēts kokiem ar augstumu no 3.5 m līdz 4 m. Palielinoties koku augstumam, saliekto koku īpatsvars samazinājās: 8 m augstiem kokiem tas bija 4%, bet augstākiem kokiem bija robežās no 0% līdz 7%. Priedes audzēs laužto koku īpatsvars samazinājās no 10% līdz 2% intervālā no 3.5 m līdz 8 m augstumam, tad pieauga līdz 16% (11 m augstumā), pēc tam samazinājās, bet intervālā no 14 m līdz 21 m augstumam – strauji pieauga no 3% līdz 38%. Līdzīgi kā egles audzēs, vēl palielinoties koku augstumam, laužto koku īpatsvars strauji samazinājās. Vislielākais kopējais bojāto koku īpatsvars (33%) priedes audzēs konstatēts kokiem, kuru augstuma bija 4.9 m, pieaugot koku augstumam bojāto koku īpatsvars bija robežās no 18% līdz 30% (3.3. att.).

Vidējais zaļā vainaga kopgarums priedes audzēs veidoja 52%, bet vidējais relatīvais lūzuma augstums bija 64% no stumbra kopgaruma, skaitot no stumbra pamatnes (3.3. att.). Stumbra caurmēra intervālā no 2.1 cm līdz 18 cm strauji pieauga koku ar lūzumiem zem vainaga īpatsvars (no 1% līdz 22%), kamēr koku īpatsvars ar lūzumu vainagā šajā caurmēra intervālā pieauga pakāpeniski līdz 10%. Koku īpatsvars ar lūzumiem zem

vainaga caurmēra intervālā no 16.1 cm līdz 24 cm bija robežās no 20% līdz 22%, savukārt, stumbra caurmēram palielinoties, šādu bojājumu īpatsvars strauji saruka un kokiem ar stumbra caurmēru virs 42 cm, koku ar lūzumiem zem vainaga nebija. Lūzumi zaļajā vainagā no caurmēra intervālā no 18.1 cm līdz 28 cm palielinājās no 9% līdz 16%, bet, caurmēram vēl palielinoties, vainagā laužto koku īpatsvars saruka. Laužto koku īpatsvara pieauguma tendence lūzumiem vainagā un zem tā izmainījās caurmēra intervālā no 18.1 cm līdz 20 cm – sākot ar caurmēra pakāpi 24 cm, lūzumi vainagā, nevis zem tā veidoja lielāku daļu no visiem lūzumiem. Salīdzinot lūzumus dažādās priedes stumbra daļās, konstatēts, ka lūzumi zem vainaga vairāk raksturīgi salīdzinoši tievākiem kokiem, kamēr lūzumi vainagā biežāk konstatēti resnākiem kokiem.



3.3. att. Priežu vidējais koka augstums, vainaga un lūzuma vietas augstums atkarībā no stumbra caurmēra.

Fig. 3.3. The mean height, crown-base height and breakage height of Scots pines according to stem diameter at breast height.

Analizējot retināšanas iespējamo ietekmi uz bojājumu apjomu, audžu kopa sadalīta divās grupās – nesen (pēdējo trīs gadu laikā pirms sasalstošā lietus bojājumiem) retinātas un pārējās audzes; izmantoti valdaudzēs koku dati. Pēdējo trīs gadu laikā retinātas priežu audzēs bojāto koku (lauztie un izgāztie kopā) īpatsvars bija 25%, bet pārējās audzēs – 26%; egļu audzēs – 31% bojātu koku retinātas un 23% pārējās audzēs (3.2. tab.).

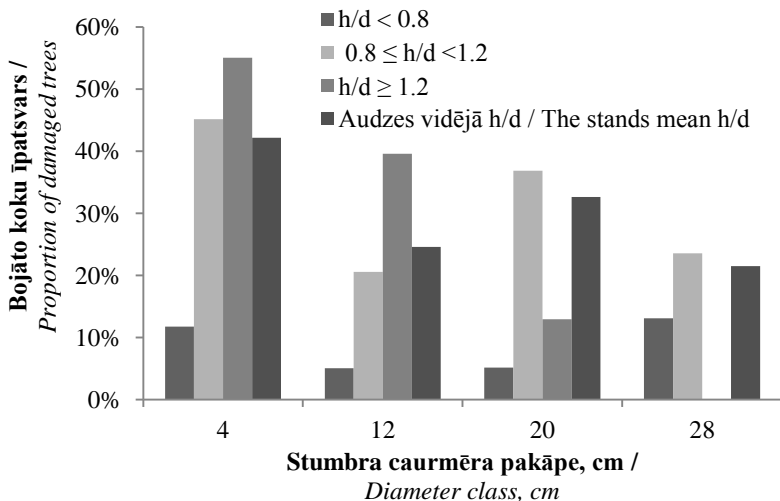
Bojāto koku īpatsvars pēdējo 3 gadu laikā retinātās un pārējās audzēs
The proportion of the damaged trees in the recently thinned stands (i.e. thinned during the last 3 years) and in the other (i.e. thinned earlier or not thinned)

	Nogabalu grupa/ Stand groups	Variants / Type	Stumbra caurmēra pakāpes (cm) / Diameter class (cm)									Vidēji/ Average
			4	8	12	16	20	24	28	32	36	
Bojāto koku īpatsvars, % / Proportion of damaged trees, %	Priedes audzes/ Scots Pine stands	Vidēji / Average	33	22	28	21	33	28	24	24	18	26
		Neretināts / Un-thinned				2	26	30	25	27	23	26
		Retināts / Thinned	33	22	28	24	35	24	15	20	12	25
	Egles audzes / Norway spruce stands	Vidēji / Average	15		18	42	27	30	18	18	14	27
		Neretināts / Un-thinned	15			32	34	24	16	10	14	23
		Retināts / Thinned			18	55	24	41	22	49		31
Vidēji/ Average			29	25	28	30	30	28	21	21	18	26

Konstatēts, ka sasalstoša lietus bojāto koku īpatsvars gan priedes, gan egles audzēs būtiski augstāks bija otrajā stāvā salīdzinājumā ar audzes pirmo stāvu. Priedes audzēs gan pirmajā, gan otrajā stāvā statistiski būtiski ($p < 0.05$) vairāk lauztu koku bija nogabalos, kur nebija nesēn veikta retināšana. Egles audzēs statistiski būtiski ($p < 0.05$) vairāk lauztu koku bija otrajā stāvā nesēn retinātajās audzēs (daļa no tiem varētu būt pēc retināšanas saglabātie otrā stāva koki); pirmajā stāvā atšķirības starp nesēn retinātajām un pārējām audzēm nebija statistiski būtiskas ($p > 0.05$).

Kopumā rezultāti nerada pamatu apgalvot, ka nesēn veiktas retināšanas rezultātā audzē būtiski palielinātos sasalstoša lietus ietekmē bojāto valdaudzēs koku īpatsvars, netieši liecinot par citu faktoru nozīmīgāku lomu audzes bojājumu intensitātes noteikšanā.

Koku augstuma un caurmēra attiecība bojātiem kokiem bija lielāka nekā nebojātiem visos gadījumos – nesēn retinātās priežu audzēs tā bija attiecīgi 1.07 un 0.93, egļu audzēs – 1.03 un 0.95, pārējās priežu audzēs – 1.01 un 0.94, pārējās egļu audzēs – 1.03 un 0.97. Bojāto priežu un egļu īpatsvars koku grupās ar atšķirīgu augstuma un caurmēra attiecību (< 0.8 ; $0.8-1.2$; > 1.2) parādīts attiecīgi 3.4. un 3.5. attēlā. Vērtējot katras caurmēra pakāpes (no 4 cm līdz 28 cm) kokus atsevišķi, gan priedei, gan eglei konstatēta tendence, ka lielāks bojāto koku īpatsvars bija grupās ar lielāku koka augstuma un caurmēra attiecību.



3.4. att. **Bojāto priežu īpatsvars atkarībā no augstuma/caurmēra attiecības.**

Fig. 3.4. Proportion of damaged Scots pines according to the diameter at breast height (DBH) class and slenderness coefficients .

Veicot bināro loģistisko regresiju, konstatēts: lai prognozētu, kuras audzes atbilst klasei „bojāta vai iznīkusi”, priežu audzēm statistiski būtiski bija mainīgais $G_{\text{minimālais}} * G_{\text{faktiskais}}^{-1}$ un konstante (3.1.), savukārt egļu audzēm – H , D , $H^2 D^{-1}$, $G_{\text{minimālais}} * G_{\text{faktiskais}}^{-1}$ un konstante (3.2.), kur H – audzes vidējais augstums, D – audzes vidējais stumbra caurmērs:

$$P(y)_{\text{priedei}} = \frac{1}{1 + e^{-\left(31.243 \times \frac{G_{\text{min}}}{G_{\text{fakt}}} - 24.489\right)}} \quad (3.1.)$$

$$P(y)_{\text{eglei}} = \frac{1}{1 + e^{-\left(-8.951 \times H + 3.665 \times D + 5.267 \times H^2 D^{-1} + 25.827 \times \left(\frac{G_{\text{min}}}{G_{\text{fakt}}} - 18.928\right)\right)}} \quad (3.2.)$$

kur

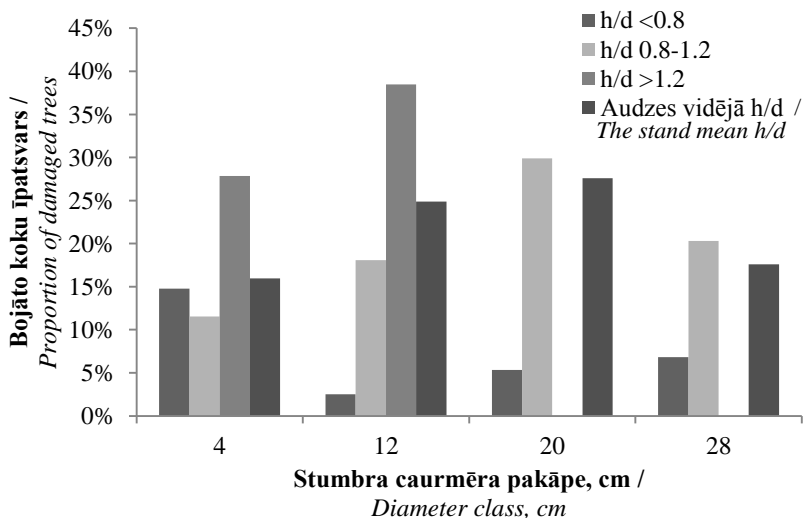
$P(y)$ - aprēķinātā varbūtība vai konkrētā audze būs bojāta/iznīkusi,

H - audzes vidējais augstums m,

D - audzes vidējais stumbra caurmērs, cm,

G_{min} - audzes minimālais šķērslaukums, $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$,

G_{fakt} - audzes faktiskais šķērslaukums, $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$.



3.5. att. Bojāto egļu īpatsvars atkarībā no augstuma/caurmēra attiecības.

Fig. 3.5. Proportion of damaged Norway spruces according to the diameter at breast height (DBH) class and slenderness coefficients.

Iegūto rezultātu interpretācija: ja audzei aprēķinātā varbūtība $P(y) < 0.5$, tad audze nav iznīkususi, ja $P(y) \geq 0.5$ – audze ir bojāta/iznīkususi. Izmantojot iegūtās sakarības, pēc sasalstoša lietus iespējams saskaņā ar meža inventarizācijas informāciju prognozēt, kurās audzēs potenciāli būs nozīmīgākie bojājumi, attiecīgi plānojot apsekošanas un seku likvidācijas pasākumus. Šīs prognozes iespējams ņemt vērā stratēģiskajā plānošanā, izstrādājot kopšanas ciršu modeli teritorijās, kur sasalstoša lietus bojājumu varbūtība ir visaugstākā.

Pirmā stāva bojātās daļas šķērslaukums priežu audzēs ir atkarīgs no retināšanas (ir vai nav retināts pēdējos 3 gados), $H10$ un H^2D^{-1} (3.3.), bet egļu audzēs – no $H10$, H^2D^{-1} un pirmā stāva šķērslaukuma (3.4.), kur $H10$ – pirmā stāva valdošās sugas vidējais augstums:

$$G_{\text{bojātais(Priede)}} = 6.106 - 1.442 \times R - 0.403 \times H + (0.420 \times \frac{H^2}{D}) \quad (3.3.)$$

$$G_{\text{bojātais(Egļe)}} = 6.033 - 0.137 \times G - 0.837 \times H + (0.706 \times \frac{H^2}{D}) \quad (3.4.)$$

kur

R - ja veikta retināšana pēdējo 3 gadu laikā pirms sasalstošā lietus, tad $R = 1$,

$H10$ - pirmā stāva valdošās sugas vidējais augstums, m,

H^2D^{-1} - koka augstums (m) kvadrātā attiecībā pret stumbra caurmēru (cm),

G- pirmā stāva šķērslaukums, $m^2 ha^{-1}$.

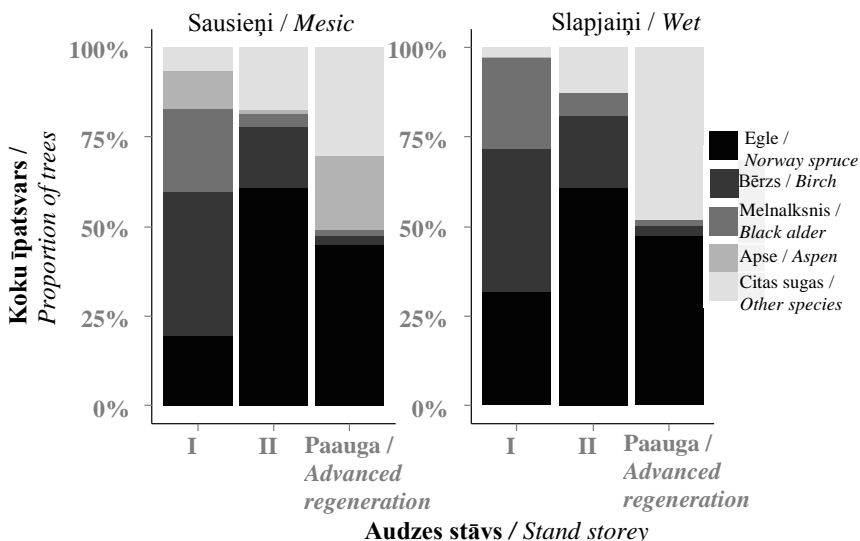
Šīs sakarības izmantojamas, nosakot audzes, kur iespējams lielākais pirmā stāva bojāto koku šķērslaukums, kā arī plānojot audžu kopšanas modeli teritorijās ar augstāko

sasalstoša lietus bojājumu varbūtību tādā veidā, lai iespējami veicinātu pirmā stāva koku noturību pret šo bojājumu.

3.2. Audzes atjaunošanās pēc intensīva dabiskā traucējuma

Teritorijā, kur pirms vētras atradās 70 gadus vecas un vecākas egļu audzes, uzskaites laikā 44-45 gadus pēc tās konstatētas 11 koku sugas. Biežāk pārstāvētā koku suga bija egle (44% no kopējā koku skaita), kārpainais un pūkainais bērzs (kopā 22%), melnalksnis (11%) un apse (6%); citas koku sugas kopā veidoja 17% no koku skaita. Analizējot sugu sadalījumu pa audzes stāviem, konstatēts, ka no pirmā stāva koku skaita vislielākais īpatsvars bija pioniersugai bērzam (40%), tomēr relatīvi augsts bija arī egles īpatsvars – 26%.

No visām eglēm 19% bija pirmajā stāvā (vidēji 192 ± 37.0 koki ha^{-1}), 55% otrajā stāvā (575 ± 72.5 koki ha^{-1}) un 26% paaugā (273 ± 65.6 koki ha^{-1}) (3.6. att.).



3.6. att. Koku skaita sadalījums pa stāviem dažādām sugām sausieņos un slapjainos.

Fig. 3.6. *The proportion of trees according to the species, site type and stand storey.*

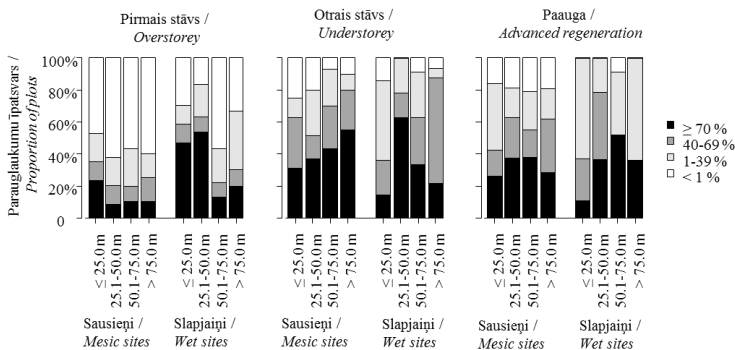
Konstatētas statistiski būtiskas atšķirības ($p < 0.01$) starp egļu skaitu pirmajā un otrajā stāvā. Būtiski atšķiras arī egļu skaits (bet ne īpatsvars) pa stāviem starp sausieņiem un slapjainiem ($p < 0.001$).

Augstāks egļu īpatsvars otrajā stāvā un paaugā nekā pirmajā stāvā varētu būt skaidrojams ar šīs koku sugas atjaunošanās īpatnībām: vairākos pētījumos konstatēts, ka egle ievērojami sekmīgāk atjaunojas uz sadalījušos izgāzto vai nolauzto koku atliekām nekā neietekmētā zemsedzē vai vētras izgāzto koku sakņu atsegtā augsnē (Hytteborn, Packham, 1987; Ilisson et al., 2007; Zielonka, 2006). Ņemot vērā, ka analizētajā platībā

mežaudzes nopostītas pilnībā, koku atliekas bija sakritušas kaudzēs, kas varēja kavēt to sadalīšanos un pārveidošanos par egļu sējeņiem piemērotu substrātu (Harrington, Bluhm, 2001; Storaunet, Rolstad, 2002).

Egle pirmajā stāvā bija pārstāvēta 48% parauglaukumu, un bija valdošā koku suga 23% sausieņu un 43% slapjainu platību. Egles īpatsvars vismaz 70% no koku skaita parauglaukumā bija 18% no visiem apsekotajiem parauglaukumiem, turklāt platību ar šādu egles īpatsvaru I stāvā ievērojami un statistiski būtiski ($p < 0.001$) mazāk bija sausieņos (11%) nekā slapjainos (33%). Audzes otrajā stāvā egle bija sastopama ievērojami biežāk – 83% no visiem parauglaukumiem. Šajā audzes stāvā augsts egles īpatsvars ($\geq 70\%$) konstatēts 40% parauglaukumu.

Konstatēts, ka distancei līdz vētras neskartai vai maz bojātai audzei (kas noteikta ar programmas ArcGIS rīku *Analyst tools* (ESRI, Inc. Redlands, CA)) ir būtiska ietekme ($p < 0.01$) uz egļu īpatsvaru I stāvā slapjainos (nozīmīgi augstāks tas ir līdz 50 m attālumam no vismaz 40 gadus vecas egļu audzes), taču ne sausieņos (3.7. att.). Citu autoru pētījumos norādīts, ka egļu telpisko izplatību teritorijā turpmākajos gados pēc traucējuma nosaka distance līdz sēklu avotam (Coates, 2002). Sēklu avota nozīmes detalizētu analīzi šī pētījuma ietvaros apgrūtinā tas, ka nav informācijas par vēja virzienu un stiprumu egļu sēklu izbiršanas laikā, kā arī par pašu egļu sēklu ražu. Zināms tikai, ka egļu ziedēšana Latvijas rietumu daļā 1969. un 1970. gadā bija vidēja, no koka iegūstamais sēklu apjoms salīdzinoši mazs, bet to kvalitāte augsta (Zviedre, 1971). Taču šajos aspektos var pastāvēt nozīmīgas atšķirības starp audzēm, īpaši, ja tās aug meža tipos ar dažādu augsnes mitrumu (Rone, 1965).



3.7. att. Distances līdz 1969. gada vētrā nebojāta vai maz bojāta nogabala malai saikne ar egļu dominanci sausieņos un slapjainos.

Fig. 3.7. The distance from undisturbed stands edge according to the proportion of Norway spruce in mesic and wet plots.

Pirmā stāvā egļu vienmērīgo biežumu dažādā attālumā no saglabājušos egļu audžu sienas sausieņos varētu izskaidrot ar iesēšanos no vētrā nogāzto egļu čiekuriem, kuros sēklas vētras brīdī jau bija nogatavojušās. Tāpat vētras radītajos atvērumos konstatētas atsevišķas izdzīvojušas egles (vidēji 33 koki ha⁻¹), kas arī varēja kalpot kā sēklu avots.

Distancei no meža sienas nebija būtiskas ietekmes uz I stāva egļu augstumu nedz sausieņos, nedz slapjainos. Jāņem vērā, ka šī brīža audzes sastāvu ietekmējusi ne tikai sēkļu pieejamība, bet arī dīģšana, ko, savukārt, nosaka klimatisko un mikroklimatisko apstākļu dažādība (Clinton, Bake, 2000).

Būtiski lielāks parauglukumā īpatsvars ar augstu otrā stāva egļu īpatsvaru konstatēts vairāk nekā 25 m attālumā no vētras nenopostītās egļu audzes. To, visticamāk, noteikusi sēkļu pieejamības un vienlaikus ne pārāk augstas konkurences (no vecās audzes), kā arī augsta egļu īpatsvara pirmajā stāvā kombinācija.

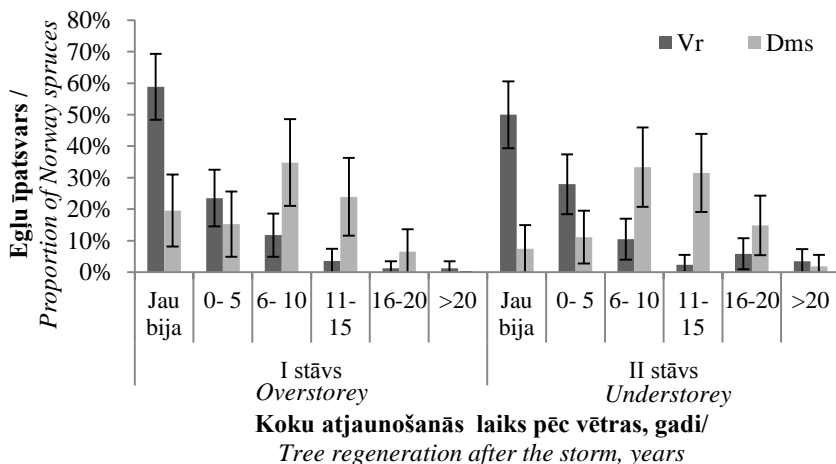
Egļu dominanci jaunajās audzēs vētras skartajā teritorijā ietekmēja arī paaugas klātbūtne. Paauga 1963. gada (pirms vētras) taksācijas aprakstā bija atzīmēta tikai 3 no 32 nogabaliem, kuros ierīkoti šī pētījuma parauglaukumi. Parauglaukumos, kur vizuāli konstatēta pirms vētras paaugas egļu klātbūtne, tās 95% gadījumu bija I stāvā, turklāt kopumā šajos parauglaukumos konstatēti 49% no visām I stāva eglēm. Parauglaukumos, kur tika identificēta paaugas egles klātbūtne, nav konstatēts statistiski būtiski mazāks audzes biežums nekā parauglaukumos ar egli, bet bez iepriekšējās ģenerācijas paaugas kokiem, taču ir konstatēts statistiski būtiski ($p < 0.01$) mazāks I stāva egļu skaits – attiecīgi 177 ± 96 egles ha^{-1} un 256 ± 53 egles ha^{-1} , netieši liecinot, ka atjaunošanās ar sēklām nav bijusi tik sekmīga platībās, kur augstāks paaugas koku biežums.

Lai precizētu vizuāli novērtēto iepriekšējās ģenerācijas koku klātbūtni, ierīkoti parauglaukumi divos meža tipos (Vr un Dms) egļu audzēs (egle 70-90% no šķerslaukuma) paplašināti līdz $500 m^2$ un tajos ievākti pieaugumu urbumi. To datu analīze liecina, ka pirms vētras paauga slapjajā damaksnī un vērī nodrošinājusi attiecīgi 19% un 59% no kopējā 45 gadus pēc šīs meteoroloģiskās parādības konstatētā pirmā stāva egļu skaita. Sekmīgākā egļu ieviešanās pēc vētras notikusi pirmajos desmit gados, kad iesējusies lielākā daļa jauno I stāva egļu: Dms – 85%, Vr – 62% (3.8. att.).

Paaugas koku ietekme uz egļu klātbūtni jaunajās audzēs pēc vētras bija ievērojami lielāka, nekā to būtu iespējams prognozēt no pirms vētras taksācijas apraksta, liecinot, ka arī relatīvi nelielām paaugas grupām ar zemu biežumu (kas netiek atzīmētas) bijusi būtiska loma. Nav konstatēts, ka sākotnēji paaugā augušo koku dimensijas sausieņos vai slapjainos būtiski atšķirtos no pēc vētras iesējušos koku dimensijām. Tas saistīts ar nepieciešamību šiem kokiem vispirms, nonākot krasi atšķirīgā apgaismojumā (un, atsevišķos gadījumos, – arī augsnes mitrumā), nomainīt skuju (fotosintezējošo aparātu) un jaunajiem apstākļiem pielāgot sakņu sistēmu (Kneeshaw et al., 2002), un tikai pēc tam tiem var veidoties ievērojami augstuma un radiālie pieaugumi (Panayotov et al., 2011). Šai laikā pēc vētras iesējusies koki, strauji augot, var sasniegt līdzīgas dimensijas.

Analizējot visu pēc vētras atjaunojušos koku dimensijas, konstatēts, ka pirmā stāva egļu vidējais augstums (20.7 ± 0.66 m) bija statistiski būtiski ($p < 0.01$) mazāks nekā apšu (27.3 ± 1.53 m) augstums, līdzīgs bērzu (21.7 ± 0.50 m), melnalkšņu (21.5 ± 0.68 m) un pārējo uzņēmīto koku sugu (19.2 ± 1.03 m) augstumam. Pirmā stāva egļu augstums parauglukumā grupām ar dažādu egļu īpatsvaru būtiski neatšķīrās. Arī bērza un melnalkšņa augstums neatšķīrās parauglaukumos ar atšķirīgu egles īpatsvaru. Sausieņos egles augstums bija statistiski būtiski ($p < 0.001$) lielāks nekā slapjainos, attiecīgi 22.5 ± 0.54 m un 17.7 ± 1.01 m. Otrā stāvā koku vidējais augstums starp sugām atšķīrās statistiski būtiski ($p < 0.001$).

Vismazākais tas bija eglēm (10.6 ± 0.46 m), pārējo koku sugu vidējais augstums bija robežās no 12.4 ± 0.63 m (pārējām koku sugām) līdz 16.7 ± 1.18 m (apsei).



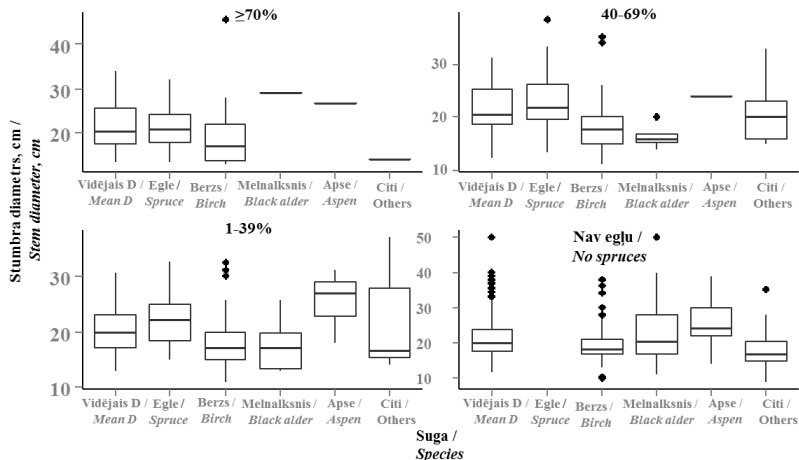
3.8. att. Eglu atjaunošanās dinamika pēc vējgāzes slapjajā damaksnī un vērī.

Fig. 3.8. *The regeneration dynamics of Norway spruce in two forest types (Dms-Myrtilloso-sphagnosa; Vr- Oxalidosa) after windthrow.*

Pirmā stāva eglu vidējais stumbra caurmērs (22.3 ± 0.94 cm) bija statistiski būtiski ($p < 0.01$) mazāks nekā apšu (25.7 ± 2.06 cm), taču lielāks nekā bērzu (19.3 ± 0.80 cm), melnalkšņu (21.6 ± 1.47 cm) un pārējo uzmērīto koku sugu (19.4 ± 1.72 cm) stumbra caurmērs (3.9. att.).

Līdzīgi kā augstums, arī eglu stumbra caurmērs starp parauglaukumu grupām ar dažādu to īpatsvaru būtiski neatšķīrās. Parauglaukumos, kuros egle nebija sastopama, pirmajā stāvā augošo bērzu, melnalkšņu, apšu un citām koku sugām konstatētais vidējais stumbra caurmērs bija, attiecīgi, 19.5 ± 0.91 cm, 22.7 ± 1.93 cm, 25.7 ± 2.97 cm un 18.2 ± 2.22 cm, un tas, līdzīgi kā augstums, būtiski neatšķīrās no parauglaukumiem, kuros egles klātbūtne konstatēta (izņemot melnalkšņa stumbra caurmēru, kas bija būtiski lielāks parauglaukumos ar egli nekā bez tās: attiecīgi 22.7 ± 1.93 cm un 17.8 ± 1.75 cm). Iegūtie rezultāti nenorāda, ka pioniersugām būtu bijusi nozīmīga ietekme uz egles augšanu, un netieši apliecina, ka nozīmīgākais pēc vētras veidojušos audžu sastāvu noteicošais faktors ir koku ieviešanās (paaugas koku klātbūtne un saglabāšanās, sēkļu un piemērotu iesēšanās vietu pietiekamība, meteoroloģiskie apstākļi pirmajos sējeņu augšanas gados u.tml.).

Tāpat kā pirmā stāva eglu augstums, arī to vidējais stumbra caurmērs bija statistiski būtiski ($p < 0.01$) mazāks slapjajņos (19.4 ± 1.48 cm) nekā sausieņos (23.8 ± 1.04 cm). Otrā stāva eglu dimensijas būtiski neatšķīrās starp parauglaukumiem ar dažādu eglu īpatsvaru vai starp sausieņiem un slapjajņiem.



3.9. att. Dažādu sugu I stāva koku stumbra caurmērs parauglaukumos ar atšķirīgu egles īpatsvaru.

Fig. 3.9. The mean diameter at breast height (DBH) of the overstorey tree species according to the proportion of the Norway spruce in the plot.

Vērī (Vr) vairākumā analizēto audžu koka caurmēra sadalījumu bija iespējams raksturot ar Veibula sadalījumu (Kolmogorova-Smirnova testa $p > 0.05$), kamēr slapjajā damaksnī (Dms)- tikai dažās audzēs (20%). Šī sadalījuma koeficientu vidējās vērtības statistiski būtiski ($p < 0.05$) atšķirās starp meža tiptiem: formas un mēroga koeficientu vērtības Dms (attiecīgi 0.79 un 5.59) bija mazākas nekā Vr (attiecīgi 1.90 un 15.90); savukārt novietojuma koeficients Dms bija lielāks nekā Vr (attiecīgi 7.93 un 5.10) (3.10. att.). Kā norādījuši Bailey un Dell (1973), ja teorētiskā sadalījuma formas koeficienta vērtība ir < 1 (kā Dms), tad caurmēra sadalījumu raksturojošā līkne būs negatīvi eksponenciāla. Šāds caurmēra sadalījums visbiežāk raksturīgs dažāda vecuma audzēm (Burkhardt, Tomé, 2012). Stumbra caurmēru sadalījumu vērī var raksturot ar pozitīvu unimodālu līkni.

Veicot lineāru daudzfaktoru regresijas analīzi, vērī konstatēta statistiski būtiska ($p < 0.05$) sakarība trīs parametru Veibula sadalījuma formas ($R^2 = 0.79$), mēroga ($R^2 = 0.80$) un novietojuma ($R^2 = 0.53$) koeficientiem gan ar vidējo stumbra caurmēru, gan ar caurmēra intervālu (3.5, 3.6, 3.7):

$$y (\text{formas}) = 0.54368 * D(1.3\text{m}) - 0.09174 D_{\text{intervāls}} - 4.85681 \quad (3.5.)$$

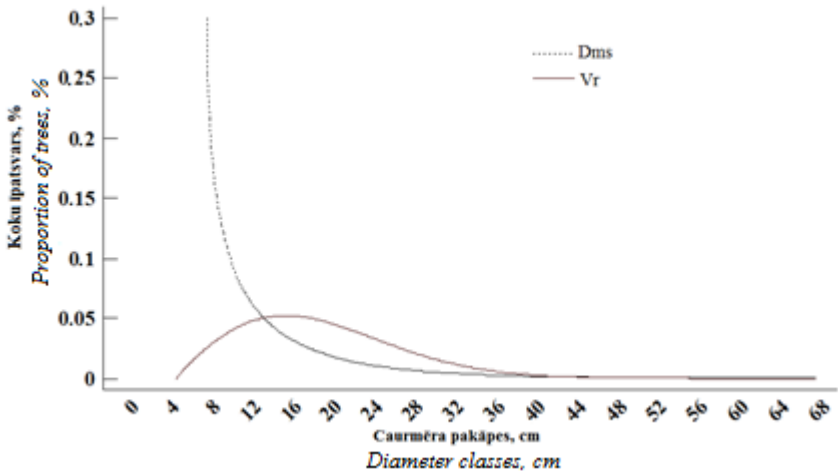
$$y (\text{mēroga}) = 3.3651 * D(1.3\text{m}) - 0.3884 D_{\text{intervāls}} - 33.9265 \quad (3.6.)$$

$$y (\text{novietojuma}) = -1.4240 * D(1.3\text{m}) + 0.5217 D_{\text{intervāls}} + 14.2451 \quad (3.7.)$$

kur

D (1.3m) - vidējais stumbra caurmērs 1.3 m augstumā no sakņu kakla, cm;

D intervāls - starpība starp lielāko stumbra caurmēra vērtību un mazāko stumbra caurmēra vērtību parauglaukumā.



3.10. att. Trīs parametru Veibula caurmēra sadalījums un tā koeficientu vidējās vērtības slapjajā damaksnī un vērī.

Fig. 3.10. Theoretical three-parameter Weibull distribution fitted to diameter density distributions, with mean shape, scale and location values for sample plots by forest types (Dms- *Myrtilloso-sphagnosa*; Vr- *Oxalidosa*).

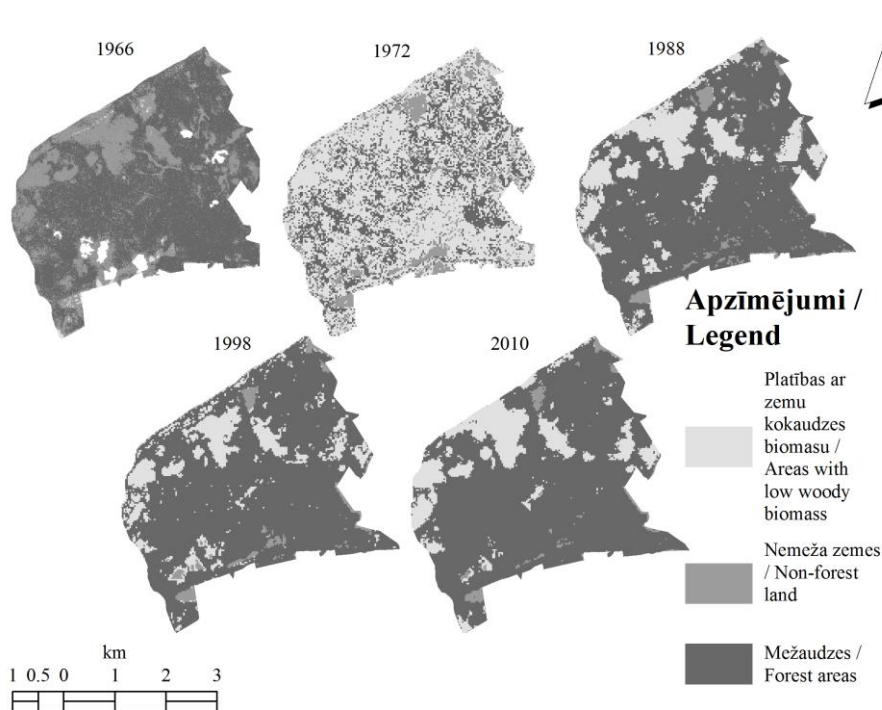
Šajā pētījumā nav konstatēta Veibula sadalījuma parametru saikne ar audzes šķērslaukumu un biežumu, kas fiksēta citu autoru pētījumos (Kilkki et al., 1989).

Stumbra caurmēra sadalījuma asimetriju var veicināt liels skaits nomāktu, bet nenokaltušu koku, kas raksturīgs ēncietīgajām koku sugām augstas biežības audzēs (Lorimer, Krug, 1983). Šajā pētījumā konstatēts, ka audzes biežība vērī bija augstāka nekā slapjajā damaksnī, attiecīgi 0.8 un 0.45; šķērslaukuma atšķirības starp meža tipiēm bija ievērojamas (gandrīz divas reizes) un statistiski būtiskas ($p < 0.001$): Vr vidēji $36.8 \pm 6.39 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, Dms vidēji $18.3 \pm 2.37 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. Vidējais audzes biežums abos meža tipos nebija statistiski būtiski atšķirīgs ($p > 0.05$): vērī 1295 ± 181 un slapjajā damaksnī 1222 ± 213 koki ha^{-1} . Tomēr par nozīmīgāku koku diferenciāciju (pašizretināšanos) iepriekšējā audzes attīstības posmā vērī liecina šajā meža tipā konstatētais augstais nokaltušo koku īpatsvars: 16% līdz 36% no visiem kokiem platībā (Dms $\leq 5\%$). Analizējot atjaunošanos platībā bez saimnieciskās darbības pēc cita traucējuma (ugunsgrēka), arī Rouvinen un Kuuluvainen (2005) konstatējuši, ka pēc intensīvas pašizretināšanās (50–60 gadu vecumā) stumbra caurmēra sadalījums egļu audzēs mainās no negatīva eksponenciāla uz bimodālu.

Pētījumā iegūtas sakarības izmantojamas neapsaimniekotu egļu audžu raksturošanai tajā analizētajos meža tipos.

3.3. Ainavas ilgtermiņa dinamika pēc traucējuma

Pētījuma teritorijā Slīteres nacionālajā parkā pēc 1969. gada vējgāzes ainavā konstatētas pēdējo 50 gadu laikā lielākās izmaiņas. Mežs tika ietekmēts lielās platībās, gan pilnībā iznīcinot kokaudzi, gan bojājot atsevišķus kokus vai koku grupas, tādējādi pēc vējgāzes izveidojot ainavā dažāda izmēra un struktūras homogēnas platības jeb plankumus. Šajā pētījumā terminu „plankums” saprot kā relatīvi homogēnu nelineāru teritoriju, kas atšķiras no apkārtnes pēc raksturojuma un izskata (Forman, 1995). Ainavas fragmentācijas analizē iekļautā meža masīva platība bija 1646 ha (izņemot 1966. gada satelītattēlu, kurā analizētā platība bija 1610 ha mākoņu nosegtās teritorijas dēļ). Meža masīva kartes ar dažādām zemes virsmas seguma klasēm un to ilgtermiņa dinamika redzama 3.11. attēlā.



3.11. att. Meža masīva kartes ar dažādām zemes virsmas seguma klasēm 1966.-2010. gadā.

Fig. 3.11. Maps of forest massif with different land cover classes from 1966 to 2010.

Kopējais plankumu skaits bija līdzīgs gan trīs gadus pirms vētras (1966. gadā), gan trīs gadus pēc tās (1972. gadā), attiecīgi 956 un 997, bet 2010. gadā ainavu veidoja ievērojami mazāks skaits (207) plankumu (3.3. tab.). Vidējā plankuma platība laikā no 1966. līdz 2010. gadam pieauga no 1.68 ha līdz 7.95 ha. Ainavās, kur izteikti dominē viens

vai vairāki plankumi un ir daudz maza izmēra plankumu, iesaka lietot vidējo svērto plankuma platību (Tērauds, 2011).

3.3. tabula/ *Table 3.3.*

Meža masīva telpiskās struktūras indikatori laika posmā no 1966. gada līdz 2010. gadam

Indices characterizing the landscape spatial structure from 1966 to 2010

Indikatori/ <i>Indicators</i>	Gads / <i>Year</i>				
	1966	1972	1988	1998	2010
TA (ha)	1610	1646	1646	1646	1646
NP	956	997	422	393	207
TE (km)	213.4	413.8	128.3	119.2	73.8
ED (m ha ⁻¹)	133	251	78	72	45
AREA_MN (ha)	1.68	1.65	3.90	4.19	7.95
AREA_AM (ha)	1038	594	918	1074	1059
SHAPE_MN	1.28	1.31	1.36	1.38	1.39
ENN_AM (m)	20	62	24	33	32
SHDI	0.55	0.89	0.70	0.58	0.57

Paskaidrojumi / *Explanations*: TA- kopējā meža masīva platība, ha / *Total area*; NP- plankumu skaits / *Number of patches*; TE- kopējais malu garums, km / *Total edge*; ED- plankumu malu blīvums, m ha⁻¹ / *Edge density*; AREA_MN-vidējā plankuma platība, ha / *Mean patch area*; AREA_AM- vidējā svērtā plankuma platība, ha / *Area-weighted mean patch area*; SHAPE_MN- vidējais plankumu formas indekss (minimālā vērtība 1, kad plankums ir apaļš) / *Mean shape index (minimal value is 1 when patch shape is circle)*; ENN_AM- vidējais svērtais tuvākā kaimiņa Eiklīda attālums, m / *The area-weighted mean Euclidean nearest neighbour distance*; SHDI- Šenona daudzveidības indekss / *Shannon's diversity index*.

Pētītājā meža ainavā uzreiz pēc vētras gandrīz uz pusi samazinājās vidējā svērtā plankuma platība – no 1038 ha 1966. gadā līdz 594 ha 1972. gadā, bet turpmākajos gados vidējā svērtā plankuma platībai novērota tendence atgriezties pirmš vētras līmenī un pat nedaudz to pārsniegt. Meža masīva heterogenitāti raksturojošais Šenona daudzveidības indekss uzreiz pēc vējgāzes palielinājās (no 0.55 – 1966. gadā līdz 0.89 – 1972. gadā), bet pēc 29 gadiem jau bija atgriezies pirmš vētras līmenī.

Lai pilnvērtīgāk novērtētu izmaiņas meža masīvā ilgākā laika posmā, lietderīgi kombinēt ainavas līmeņa un zemes virsmas seguma klases līmeņa analīzes. Konstatēts, ka trīs gadus pirms vējgāzes meža masīva lielāko daļu aizņēma un ainavas pamatni veidoja zemes virsmas seguma klase „mežaudzes” (1310 ha jeb 81.3% no kopējās meža masīva platības), bet „platības ar zemu kokaudzes biomasu” un „nemeža zemes” bija sastopamas galvenokārt atsevišķu plankumu veidā un to kopējā platība veidoja attiecīgi 264 ha un 37 ha jeb 16.4% un 2.3% no kopējās meža masīva platības (3.4., 3.5., 3.6.tab.). Pēc vējgāzes, 1972. gadā „mežaudžu” platība samazinājās līdz 457 ha, un platība „teritorijām ar zemu kokaudzes biomasu” un „nemeža zemēm” palielinājās attiecīgi līdz 1015 ha un 173 ha. Sākot ar 1998. gadu, zemes virsmas seguma klašu platību proporcija bija līdzīga kā

pirms vējgāzes, t.i., 1998. gadā „mežaudzes” veidoja 80.8%, „platības ar zemu kokaudzes biomasu” – 15.4%, bet „nemeža zemes” – 3.7% no kopējās meža masīva teritorijas. Tātad lielākajā daļā vētrā bojāto mežaudžu novērota sekmīga atjaunošanās – 29 gadu laikā pēc vētras izveidojies jauns nepārtraukts vainagu klājs.

3.4. tabula/ Table 3.4.

Fragmentāciju raksturojošie indikatori zemes virsmas seguma klasei „mežaudzes”
Landscape metrics to quantify fragmentation for land cover class „forest areas”

Indikatori/ <i>Indicators</i>	Gads / <i>Year</i>				
	1966	1972	1988	1998	2010
CA (ha)	1310	457	1237	1330	1325
PLAND (%)	81.3	27.8	75.2	80.8	80.5
NP	48	516	32	18	25
PD	3.0	31.4	1.9	1.1	1.5
TE (km)	194.3	317.2	116.2	111.4	71.9
ED (m ha ⁻¹)	121	193	71	68	44
AREA_MN (ha)	27.29	0.89	38.65	30.24*	52.99*
AREA_AM (ha)	1273	23	1210	1324	1305
ENN_AM (m)	16*	61	19*	31*	31*
SHAPE_MN	1.51	1.37	1.53	1.56	1.42

Paskaidrojumi / Explanations: *konstatētas statistiski būtiskas ($p < 0.05$) atšķirības salīdzinājumā ar 1972. gadu / *statistically significant ($p < 0.05$) differences were detected in comparison to 1972*; CA- zemes virsmas seguma klases platība, ha / *Land cover class*; PLAND- klases platības īpatsvars no kopējās ainavas platības, % / *Land cover class area proportion of the landscape*; NP- plankumu skaits / *Number of patches*; PD- plankumu blīvums, t.i., plankumu skaits platības vienībā (ha⁻¹) / *Patch density (number of patches per area unit)*; TE- kopējais malu garums, km / *Total edge*; ED- plankumu malu blīvums, m ha⁻¹ / *Edge density*; AREA_MN- vidējā plankuma platība, ha / *Mean patch area*; AREA_AM- vidējā svērtā plankuma platība, ha / *Area-weighted mean patch area*; ENN_AM- vidējais svērtais tuvākā kaimiņa Eiklīda attālums, m / *The area-weighted mean Euclidean nearest neighbour distance*; SHAPE_MN- vidējais plankuma formas indekss (minimālā vērtība 1, kad plankums ir apaļš) / *Mean shape index (minimal value is 1 when patch shape is cycle)*.

„Mežaudzes” teritoriju 1966. gadā veidoja 48 plankumi jeb 3 plankumi ha⁻¹, kuru vidējā platība bija 27.29 ha. Pēc vējgāzes (1972. gadā) teritorijā ievērojami pieauga plankumu skaits – 516 plankumi jeb 31.4 plankumi ha⁻¹, vidējā plankuma platība samazinājās līdz 0.89 ha. Pēc vējgāzes nākamajos gados plankumu skaits variēja robežās no 18 līdz 32 (no 1.1 līdz 1.9 plankumiem ha⁻¹), un vidējā plankuma platība gan 1998. gadā (30.24 ha), gan 2010. gadā (52.99 ha) bija statistiski būtiski ($p < 0.05$) lielāka nekā 1972. gadā (0.89 ha). Gan pirms vētras (1966. gadā), gan pēc vētras laika periodā no 1988. līdz 2010. gadam „mežaudzes” veidoja plankumi ar vidējo svērto platību no 1210 ha līdz 1324 ha., savukārt uzreiz pēc vētras (1972. gadā) vidējā svērtā plankuma platība „mežaudzēs” bija tikai 23 ha.

Pēc platības vismazākā zemes virsmas seguma klase bija „nemeža zemes”. Pēc vājgāzes novērotais „nemeža zemju” platības pieaugums daļēji skaidrojams ar šīs zemes virsmas seguma klases spektrālā parauga diezgan nelielo atšķirību no zemes virsmas seguma klases „platības ar zemu kokaudzes biomasu” spektrālā parauga vērtībām. „Nemeža zemju” platība turpmākajos gados pēc vētras samazinājās līdz 40 ha (2010. gadā), kas varētu liecināt par nemeža zemju aizgušanu.

3.6. tabula / Table 3.6.

Fragmentāciju raksturojošie indikatori zemes virsmas seguma klasei „nemeža zemes”

Landscape metrics to quantify fragmentation for land cover class „non-forest land”

Indikatori/ <i>Indicators</i>	Gads / <i>Year</i>				
	1966	1972	1988	1998	2010
CA (ha)	37	173	95	61	40
PLAND (%)	2.3	10.5	5.8	3.7	2.4
NP	270	409	278	156	74
PD	16.8	24.9	16.9	9.5	4.5
TE (km)	31.2	112.1	60.2	27.3	16.8
ED (m ha ⁻¹)	19	68	37	17	10
AREA_MN (ha)	0.14	0.42*	0.34	0.39	0.54*
AREA_AM (ha)	1	4	3	5	5
ENN_AM (m)	61	75	41	65	84
SHAPE_MN	1.26	1.18	1.35***	1.42***	1.43***

Paskaidrojumi / Explanations: *konstatētas statistiski būtiskas ($p < 0.05$) atšķirības salīdzinājumā ar 1966. gadu / *statistically significant ($p < 0.05$) differences were detected in comparison to 1966*; ***konstatētas statistiski būtiskas ($p < 0.05$) atšķirības gan ar 1966., gan 1972. gadu / *statistically significant ($p < 0.05$) differences were detected in comparison to both 1966 and 1972*; CA- zemes virsmas seguma klases platība, ha / *Land cover class; PLAND- klases platības īpatsvars no kopējās ainavas platības, % / Land cover class area proportion of the landscape*; NP- plankumu skaits / *Number of patches*; PD- plankumu blīvums, t.i., plankumu skaits platības vienībā (ha⁻¹) / *Patch density (number of patches per area unit)*; TE- kopējais malu garums, km / *Total edge*; ED- plankumu malu blīvums, m ha⁻¹ / *Edge density*; AREA_MN- vidējā plankuma platība, ha / *Mean patch area*; AREA_AM- vidējā svērtā plankuma platība, ha / *Area-weighted mean patch area*; ENN_AM- vidējais svērtais tuvākā kaimiņa Eiklīda attālums, m / *The area-weighted mean Euclidean nearest neighbour distance*; SHAPE_MN- vidējais plankuma formas indekss (minimālā vērtība 1, kad plankums ir apaļš) / *Mean shape index (minimal value is 1 when patch shape is circle)*.

Ainavu ekoloģijā svarīga nozīme ir arī ainavas konfigurāciju raksturojošajiem indikatoriem, t.i., plankuma formai un plankuma malas (robežas) garumam (Fahrig, 2003). Pētījumā par Ziemeļvidzemes biosfēras rezervātu A.Tērauds secinājis, ka saimnieciskās darbības rezultātā ainavas konfigurācija ir kļuvusi vienkāršāka, un pārsvarā konstatēta vienkāršotu, četrstūrīgu laukumu formu veidošanās (Tērauds, 2011). Analizējot plankumu

formas indeksu dabisko mežu ainavā šajā pētījumā, nav konstatēti sarežģītas formas plankumi. Lai gan novērota tendence plankuma formām kļūt sarežģītākām, konstatēts, ka laika periodā no 1972. līdz 2010. gadam vidējais formas indekss mainījās nelielās robežās no 1.31 līdz 1.39 ($p > 0.05$). Analizējot zemes virsmas seguma klases atsevišķi, konstatēts, ka „mežaudzēm” vidējais plankuma formas indekss pirms vētras bija 1.51 un uzreiz pēc vētras tas samazinājās līdz 1.37, savukārt 20–40 gadus pēc vētras plankumu formas indekss bija robežās no 1.42 līdz 1.56. Tāpat iepriekšējās saimnieciskās darbības ietekme uz laukumu formu bija zudusi jau laika periodā līdz vētrai (40–50 gadi, kopš pētījuma teritorijā pārtraukta jebkāda veida saimnieciskā darbība). Laika periodā no 1988. līdz 2010. gadam vidējais formas indekss kategorijai „nemeža zemes” bija robežās no 1.35 līdz 1.43, vērtības bija statistiski būtiski ($p < 0.05$) lielākas salīdzinājumā gan ar 1966. gadu (1.26), gan ar 1972. gadu (1.18). Tas varētu būt saistīts ar sarežģītākas formas platību zem ūdeņiem izveidošanos intensīvas bebru darbības ietekmē. „Platībās ar zemu kokaudzes biomasu” pēc vētras pieaugusi plankumu formas sarežģītība, par ko liecina formas indekss: tas pieauga no 1.28 pirms vētras līdz 1.57 pēc vētras. Mežam atjaunojoties pēc vētras, „platībās ar zemu kokaudzes biomasu” plankumu formas indekss samazinājās līdz 1.33 (1998. gadā), un nedaudz pieauga 2010. gadā, kas, iespējams, skaidrojams ar jauniem bojājumiem, piemēram, 2005. gada vētras ietekmē.

Analizējot plankuma malas garuma izmaiņas ainavā pēc vētras, konstatēts, ka, palielinoties plankumu platībai un samazinoties plankumu blīvumam teritorijā, likumsakarīgi samazinājies plankuma vidējais malu garums. Vislielākais kopējais malu garums un malu blīvums konstatēts 1972. gadā – attiecīgi 413.8 km un 251 m ha⁻¹. Pirms vētras 1966. gadā šie indikatori bija attiecīgi 213.4 km un 133 m ha⁻¹, bet vismazākais kopējais malu garums un malu blīvums konstatēts 2010. gadā, attiecīgi, 73.8 km un 45 m ha⁻¹.

Nozīmīgs ainavas konfigurācijas rādītājs ir plankumu izolācija jeb biotopu pieejamības rādītājs, pēc kura var spriest par sugu izplatīšanās iespējām (Foster et al., 1998; Kouki et al., 2001), kā arī vērtēt dažādu sugu dzīvotspēju fragmentētos biotopos (Tērauds, 2011). Pētījuma rezultāti liecina, ka vidējais svērtais tuvākā kaimiņa Eiklīda attālums mežaudzes klases ietvaros uzreiz pēc vētras (1972. gadā) pieauga par 45 m, un bija statistiski būtiski lielāks gan par šo rādītāju pirms vētras 1966. gadā, gan 1988. gadā (attiecīgi 61, 16, 19 m) un vēlākajos gados 31 m).

Konstatēts, ka lielākā daļa ainavas fragmentāciju raksturojošo indikatoru līdz 29 gadus ilgā laika posmā pēc 1969. gada liela mēroga vējgāzes bija atgriezušies pirms vētras līmenī. Tātad, ja spēcīgas vētras (vai citi dabiskie traucējumi) seko cita citai ar pietiekami lielu laika intervālu, tām līdzīgos apstākļos nebūs paliekošas ietekmes uz ainavas fragmentāciju teritorijās bez cilvēka saimnieciskās darbības.

SECINĀJUMI

1. Sasalstoša lietus bojāto koku īpatsvars priedes un egles audzēs būtiski neatšķirās (attiecīgi 28% un 27%). Abu skuju koku sugu audzēs lauzto koku bija vairāk nekā saliekto vai izgāzto, liecinot, ka skuju koku sugu savstarpēja nomaīņa nav izmantojama kā līdzeklis bojājumu apjoma (riska) samazināšanai.
2. Skujkoku individuālo un kolektīvo noturību pret sasalstoša lietus bojājumiem noteicošie rādītāji bija koku augstums, augstuma/caurmēra attiecība un audzes šķērslaukums; to ietekmi koriģēja pēdējo 3 gadu periodā pirms šīs meteoroloģiskās parādības veikta retināšana. Savlaicīga audžu kopšana, veicinot koku individuālo noturību un vainaga simetriju, samazina ar šo meteoroloģisko parādību saistīto kokaudžu bojājumu risku.
3. Vētras izgāzto egļu audžu vietā 45 gadus pēc tās platībā bez saimnieciskās darbības visbiežāk sastopamā koku suga bija egle (44%). Tā sekmīgi konkurēja ar pioniersugām un bija valdošā 23% sausieņu un 43% slapjaiņu platību, turklāt mežaudzes pirmā stāva koku vidējais augstums un caurmērs statistiski būtiski neatšķirās no pioniersugām (izņemot apsi) konstatētā.
4. Bērzu, melnalkšņu un apšu vidējais stumbra caurmērs un augstums būtiski neatšķirās platībās ar dažādu egļu īpatsvaru audzes pirmajā stāvā, liecinot par šo platību vienādu piemērotību pioniersugu augšanai. Tātad egļu sastopamību noteica paaugas klātbūtne vētras brīdī un tās atjaunošanās pēc vētras. Slapjainos attālumiem līdz potenciālajam sēklu avotam bija statistiski būtiska ietekme uz egļu īpatsvaru audzes pirmajā stāvā. Savukārt sausieņos, kur ievērojami biežāk konstatēti pirms vētras paaugas koki (vērī 59% no pirmā stāva eglēm), attālumiem līdz sēklu avotam nebija būtiskas ietekmes.
5. Pirmā stāva egļu vecums pārsniedza vienas vecumklases robežas 29% platību. No pašreiz pirmajā stāvā augošajām eglēm 49% vētras brīdī bijušas paaugā, bet pārējās ieviesušās galvenokārt pirmajos 10 gados pēc vētras. Nav konstatētas būtiskas koku dimensiju atšķirības starp šīm divām egļu grupām.
6. Vējgāze palielināja meža ainavas fragmentāciju, un tās ietekme uz mežaudzi saglabājās līdz pat 30 gados ilgā laika periodā, par ko liecināja plankumu platību, formu un savstarpējo attālumu raksturojošie indikatori. Vētrām atkārtoties biežāk, sagaidāmas paliekošas telpiskās struktūras izmaiņas ainavā.

1. GENERAL DESCRIPTION

1.1. Topicality of the theme

Natural disturbances affect individual stand and forest landscape, and their development. Most important natural disturbances in hemiboreal forests are windthrows (causing both tree felling and breakage), forest fires, snow, and freezing rain. Natural disturbances have influence on economy by changing availability of local wood resources, reducing timber quality and value, reducing recreational value etc. Additionally, they have ecological impact by, for instance, reducing a proportion of old trees within forest stand and landscape, creating novel habitats, and changing movement possibilities of species within landscape.

Occurrence of freezing rain has notable differences among regions in Latvia; and there are no predictions that, under a changing climate, there would be a change in possibility of occurrence or in regions where the freezing rain is the most common. Therefore, effect of this meteorological phenomenon should be assessed on stand level, leading to recommendations to risk mitigation, reducing damage and main concerns of stand monitoring to timely detect damage after an event of freezing rain.

During the last decades, the activity of cyclones has increased, causing more severe storms in Northern Europe. The damage caused by storms in European forests is expected to increase in relation to more frequent and severe storms and changing climate, i.e., due to a prolonged vegetation period, the storms will occur before trees have dropt leaves, and while soil is not frozen. Information about long-term stand regeneration and growth after windthrow in unmanaged forests is important to extend knowledge of natural succession in hemiboreal forests. Such knowledge would complement recommendations to develop management of specific situations and regions, where mimicking natural disturbances is practised in order to increase biological diversity, as well as this knowledge would improve an evaluation of specific measures, which are used to simulate natural disturbances. Additionally, information about species structure in unmanaged stands is crucial for carbon sequestration calculations, and it is needed for total carbon sequestration assessment in Latvia regarding its international commitments.

1.2. Aim of the thesis

To describe long-term impacts of disturbances in unmanaged stands and forest landscape, as well as to assess the factors that determine resistance of forest stands to impact of freezing rain.

1.3. Research objectives:

1. to assess factors, that determine resistance of forest stand to freezing rain in coniferous stands;
2. to characterize structure of forest stands, that are regenerated after large scale windthrow, and factors affecting them;
3. to assess long-term effect of large scale windthrow on forest landscape.

1.4. Proposed theses:

1. damage caused by freezing rain depends on both individual tree and stand stability determining parameters;
2. spruce regeneration after large scale windthrow mainly occurs by advance regeneration, spruces of different age classes are found in overstorey;
3. effect of intense large scale disturbance on spatial indicators of forest landscape remains for longer than 20 years.

1.5. Scientific novelty

This is the first extensive long-term assessment of forest regeneration (in the length of 45 years) in unmanaged areas after windthrow in Latvia. Only few such studies have been carried out in hemiboreal forests by now, with an investigating period up to 20 years. Furthermore, the first long-term assessment of forest fragmentation after windthrow in Latvia provides basis for further studies of possible natural disturbances and influence of their dynamics on biological diversity.

Assessment in the following research provides extended and detailed description of freezing rain damages in hemiboreal coniferous forests of Europe; former studies of influence of freezing rain on forests have mainly been carried out in North America. In this study, for the first time in Latvia, equations to describe freezing rain effect on stand damage, have been developed.

1.6. Practical significance

The developed equations of freezing rain effect on stand damage could be implemented in stand monitoring after occurrence of this meteorological phenomenon to assess necessity and priorities of following measures, therefore ensuring fast determination of damage and timber extraction to reduce loss of its value and decrease risk of pest outbreak.

Knowledge of long-term effect of windthrow (the most important natural disturbance in Latvia) on forest stand and landscape should be adopted in development of biological diversity protection schemes (concepts).

1.7. Structure and coverage of thesis

Chapter 1 contains a summary of earlier studies, related to effect of natural disturbances on forest stand. In the first sub-chapter, climatic and meteorological factors, which cause formation of freezing rain, as well as observations of effect of icing and snow-caused damage on forest stands are described. The second sub-chapter contains information about storm-causing atmospheric phenomena and summarises results of studies on forest stand and landscape resistance and resilience to windthrow in relation to spatial scale and soil conditions, as well as stand regeneration and development of remaining trees. Chapter 2 contains description of study materials and methods. Chapter 3 contains results of the studies. The first sub-chapter includes analysis of characteristics of individual trees and a stand, which determines freezing rain caused damage. The second sub-chapter contains analysis of stand regeneration after intense natural disturbance –

windthrow, while the third sub-chapter describes changes to indicator of forest landscape spatial structure after this disturbance.

This thesis contains 132 pages, information has been summarised in 19 tables and 87 figures, 229 literature references have been used.

1.8. Approbation of research results:

Research results have been summarised in four publications and research results have been presented in 12 scientific conferences.

2. MATERIAL AND METHODS

Natural disturbances are any kind of external processes or conditions, which cause sudden plant biomass reduction in a considerably shorter period of time than production of new biomass. In this research, each natural disturbance was assessed in the region of Latvia, where it has occurred most frequently according to observations during the last 50 years by Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre (LEGMC). Icing is a meteorological phenomenon, when ice and snow accumulate on surface, which is exposed in atmosphere (ISO-12494). Formation of icing is usually related to specific atmospheric conditions, and it could form not only by condensation of fog, but also by rain when air temperature rapidly decreases below 0°C (Zirnītis, 1968, Ahrens, 2007). One of the icing types – freezing rain – forms in a contact zone of air masses with radically different temperature: precipitation from a higher warm layer falls through a particularly thick cold layer and forms small ice drops filled with unfrozen water. Icing forms, when these ice drops fall and disperse on a hard surface (Fikke et al., 2005). The research includes only damage, which is caused by freezing rain, and not by the other types of icing, therefore the term “icing” is not further used.

Data for assessment of factors that determine impact of freezing rain was collected in coniferous stands (at least 70% of standing volume according to stand inventory data), which were damaged by this disturbance in December 2012 in forests of JSC “Latvia’s State Forests” in municipalities of Rēzekne, Baltinava, Balvi, and Kārsava. Randomly selected pine and spruce stands were 12 to 123 and 20 to 123 years old, respectively. The stands were located on 12 forest types: *Cladinoso–callunosa*, *Vacciniosa*, *Myrtillosa*, *Hylocomiosa*, *Oxalidosa*, *Vaccinioso–sphagnosa*, *Myrtilloso–sphagnosa*, *Myrtilloso–polytrichosa*, *Caricoso–phragmitosa*, *Myrtillosa mel.*, *Myrtillosa turf. mel.*, and *Oxalidosa turf. mel.* In 98 pine, 51 spruce and 14 mixed pine-spruce (the latter is not included in the summary) stands (area ≥ 0.8 ha) on average eight circular sample plots (200 m²; R=7.96 m) were systematically distributed. For each tree (DBH>2 cm), stem diameter at breast height (DBH), height of living crown and total height were measured, and type of damage (broken or bent) was determined. For broken trees, height of breakage was measured and, if possible, height of the broken part was measured to reconstruct the total tree height. When direct measurements of a broken part were not possible, tree height was calculated by Petersen or Gaffrey height curves (Donis, 2009). Tree was classified as bent, if stem deviation from vertical axis exceeded 15°, including trees with bent top, leaning and bent

trees. For each stand mean DBH, height (H), basal area (G) and volume (V) was calculated. Stands were classified into three groups according to severity of damage: (1) $G > 0.5$ from Treťjakov normal basal area; (2) $0.5 \geq G > 0.3$; and (3) $G \leq 0.3$.

Binary logical regression was applied to determine factors, which influence possibility of stand damage, using SPSS 14 tool “*Advanced Regression*” and “*Backward Stepwise LR*” algorithm. Multicollinearity was assessed with tool “*Multicollinearity Diagnostics*”. Factors were assumed independent, if correlation coefficient was lower than 0.8.

Long-term effect of large scale windthrow was assessed in the oldest part of Slitere National Park (SNP), where no silvicultural measures have been done since 1923. Forests are located on wet mineral soils (41% of area) – *Vaccinoso-sphagnosa*, *Myrtilloso-sphagnosa*, *Myrtilloso-polytrichosa*, and *Dryopteriosa*, further in the study classified as the site type “wet”; dry mineral soils (18% of area) – *Hylacomiosa*, *Oxalidosa*, and *Aegopodiosa*; and wet peat soils (8% of area) – *Sphagnosa*, *Caricoso-phragmitosa*, and *Filipendulosa*, classified as the site type “mesic”. SNP was damaged by severe windthrow on November 2, 1969. According to the post-storm stand inventory data and satellite image analysis (more than 90% of canopy loss), most (55%) of damaged stands were 70–130 years old spruce dominated stands. In these areas, 226 (179 on mesic site and 63 on wet sites) circular plots ($R=5.64$ m) were systematically distributed; 17 plots on most represented forest types were extended to 500 m^2 ($R=12.62$ m). In each plot, all trees ($\text{DBH} > 2$ cm) were counted, and mean height and DBH were measured according to species and stand layer. A note was added, if a tree was classified as survived from previous generation, i.e., established before the storm in 1969. In the extended plots, increment cores of at least 15 trees of different DBH were sampled according to species. Additionally, increment cores of all trees which were classified as survived from previous generation were sampled coring near the root collar.

Tree diameter distribution was calculated using Weibull distribution of three parameters (2.1) (Bailey, Dell, 1973):

$$f(d) = \frac{c}{b} \left(\frac{d-a}{b} \right)^{c-1} \exp \left(- \left(\frac{d-a}{b} \right)^c \right) \quad (2.1.)$$

where,

c – parameter of shape;

b – parameter of scale;

a – parameter of location.

Coefficients of Weibull distribution for each plot was calculated using ‘*the Method of Maximum Likelihood*’ and approximated using multiple regression. In regression model, each of Weibull parameters was used as resultative value, and stand parameters, which had low collinearity ($r < 0.50$), were used as independent values. The best equation was found with “*Backward Stepwise LR*” algorithm excluding non-significant ($p > 0.05$) regressors, and using Akaike information criteria (Akaike, 1974).

Changes of forest cover spatial distribution within landscape was analysed to the forest massif that is a part of the SNP and is situated in Slitere Nature Reserve. Five

satellite images were obtained from *Corona* and *Landsat*, which were collected from 1966 to 2010. Images of Corona KH-4B mission in 1966 and 1972 were scanned panchromatic scenes without coordinates. Therefore, Corona images were georeferenced to LKS92 coordinate system according to the ground control points recognizable on the original Corona images as well on recent aerial and satellite images. To compare multiple datasets, the images cell size must be the same, therefore “*k-nearest neighbours*” interpolation method was used. For the images of 1966 and 1972, a spatial resolution of one pixel was reduced from 1.8×1.8 m and 2.75×2.75 m to 30×30 m, respectively (McGarigal et al., 1995, Buyantuyev, Wu, 2007).

Supervised classification of satellite images was done using Grass GIS 6.4.3. (Vitti, 2008). Forest maps of 1973 from LVMI “Silava” archive and available information about stands within studied forest area from State Register of Forests were used to classify three land cover classes: (1) “areas with low woody biomass” (swamps, heathlands, flooding areas, obsolescent stands, and young stands); (2) “non-forest land” (agricultural land, roads, water bodies, and industrial areas); and (3) “forest areas”. Forest landscape composition, structure, and fragmentation were assessed using Fragstats 4.2 software (McGarigal et al., 1995). Software ArcGIS Desktop 10.2.2. was used for spatial visualization.

One-way ANOVA was used to assess influence of studied parameters. Distribution of the studied parameters within different categories was assessed using Chi-squared test. Relation between the parameters was assessed using linear regression. Calculations were mainly done using R 2.13.0 (R Development Core Team 2011).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Assessment of tree and stand parameters that determine the extent of damage caused by freezing rain

Amount of ice, which was accumulated on trees after freezing rain, was assessed for 57 broken overstorey trees (representing DBH 3–18 cm) from 12 stands – aboveground biomass of these trees was measured with and without icing. Mass of ice was 1.5 ± 0.27 times higher than tree biomass in a naturally moist stage. Correlation between tree biomass and ice mass on it was tight and significant ($r=0.92$, $p<0.01$). Tree biomass with and without ice was dependent on a stem diameter, and this relation was described the best by a power function (Fig. 3.1.). However, results suggest that threshold of ice mass of trees with similar DBH could notably differ. Presumably, it is related to tree crown asymmetry or impact of wind, which might result in the tree breakage under lower ice mass. There is insufficient information about thresholds of ice layer thickness that cause tree breakage; some studies have reported 1–2 cm (Greene et al., 2007).

The proportion of damaged trees in pine and spruce stands was similar ($p>0.05$) — 26% and 27%, respectively. The proportion of broken trees was higher than that of bent trees: 18% and 9% in pine stands and 16% and 11% in spruce stands, respectively. The proportion of damaged (total and broken) trees is summarized in Table 3.1. according to stands dominant species (pine or spruce), and these stands are divided by different stem DBH groups (mean DBH of dominating species overstorey trees) and tree species (pine,

spruce, and birch). In pine stands, 26% of trees (26% of pines, 20% of spruces, and 32% of birches) were damaged. There was a similar proportion of damaged trees in spruce stands – 27% (28% of pines, 27% of spruces, and 32% of birches).

The effect of tree height on the proportion of damaged trees was analysed using overstorey trees. In the spruce stands, 8 m high trees had the highest proportion (25%) of bent trees. For higher trees, the proportion of bent trees was from 1% to 7%. No broken trees were found for trees smaller than 9.1 m, and the proportion of broken trees was low (2–7%) when they did not exceed 13 m height. A rapid increase in the proportion of broken trees was for 13 to 15 m high trees – from 2% to 33%, respectively. It was followed by a decrease to ca. 20% for 16–17 m high trees. The highest proportion (41%) of broken trees was observed for 18 m high trees, and it was followed by a decrease for higher trees.

For assessment of height of stem breakage, it is necessary to analyse types and quality classes of extracted timber. In spruce stands, overstorey trees have 57% of living crown, but mean relative height of breakage was 76% (Fig. 3.2.). In spruce stands 31% of broken trees were damaged below the crown, i.e., lower than the first living branch. Stem breakage below the crown was mostly (9%) found for trees with DBH 8.1–10.0 cm, and it decreased for larger trees. Crown breakage gradually increased in the trees with stem DBH, peaked (21%) for trees with DBH 22.1–24.0 cm, and decreased for larger trees.

In pine stands, 3.5–4.0 m high trees had the highest (33%) proportion of bent trees. For larger trees, the proportion of bent trees decreased: 8 m high trees had 4%, while higher trees – 0–7% of bent trees. The proportion of broken trees decreased from 10% to 2% for 3.5 m to 8 m high trees, followed by an increase to 16% for 11 m high trees. A rapid increase (from 3% to 38%) was observed for 14 m to 21 m tall trees. Just like spruce stands, higher trees had rapid decrease in the proportion of broken trees.

Mean crown length of pines was 52%, but relative height of stem breakage – 64% (Fig. 3.3.). The proportion of trees, which were broken below the crown, rapidly (from 1% to 22%) increased for trees with DBH from 2.1 to 18.0 cm, but the proportion of trees with crown breakage increased gradually and reached 10%. The proportion of trees, which were broken below the crown, peaked (20% to 22%) for trees with DBH from 16.1 to 24.0%, followed by a rapid decrease, and no such tree was found among the trees with DBH larger than 42 cm. The proportion of trees with crown breakage increased from 9% to 16% for trees with DBH from 18.1 to 28.0 cm, and decreased for larger trees. Tendency of a higher proportion of trees broken below the crown changed, when trees reached 21.4–26.0 cm DBH – and larger trees had a higher proportion of trees which were broken at living crown than below it. The results suggest that stem breakage below the crown is more common for smaller trees, while crown breakage – for larger trees.

Stands were divided into two groups: recently (during the last three years before freezing rain) thinned and other stands; data of overstorey trees was used. In the recently thinned pine stands proportion of damaged trees was 25%, but in other pine stands 26%; in recently thinned spruce stands – 31%, and in other spruce stands – 23% of damaged trees (Tab. 3.2.).

The proportion of damaged trees in both pine and spruce stands was significantly higher for understory trees, in comparison to overstorey trees. In both overstorey and understory of pine stands, there were significantly ($p < 0.05$) more broken trees found in the

other stands, i.e., which were not thinned during the last 3 years. Significantly ($p < 0.05$) more trees were broken in understory of recently thinned spruce stands; in overstorey no significant ($p > 0.05$) differences were found between recently thinned and the other spruce stands. Overall, results do not support assumption that a higher proportion of trees is damaged in recently thinned stands, indirectly suggesting that other factors have stronger effect on stand damage intensity.

Tree height and diameter ratio was higher for damaged than undamaged trees – in recently thinned pine stands it was 1.07 and 0.93, in recently thinned spruce stands 1.03 and 0.95, in the other pine stands 1.01 and 0.94, and in the other spruce stands 1.03 and 0.97, respectively. The proportion of damaged pines and spruces, according to tree height and diameter ratio groups, is shown in Figures 3.4. and 3.5. Within each DBH group (from 4 to 32), the higher proportion of damaged trees was found in the group with lower stem taper.

Results of binary regression suggest that in order to classify stands into “damaged” and “obsolescent”, the following indicators were statistically significant: independent value for pine stands $G_{\min} * G_{\text{fakt}}^{-1}$ and a constant (3.1.), but for spruce stands – H , D , $H^2 D^{-1}$, $G_{\min} * G_{\text{fakt}}^{-1}$ and a constant (3.2.):

$$P(y)_{\text{pine}} = \frac{1}{1 + e^{-(31.243 \times \frac{G_{\min}}{G_{\text{fakt}}} - 24.489)}} \quad (3.1.)$$

$$P(y)_{\text{spruce}} = \frac{1}{1 + e^{-((8.951 \times H) + (3.665 \times D) + (5.267 \times H^2 D^{-1}) + 25.827 \times (\frac{G_{\min}}{G_{\text{fakt}}} - 18.928))}} \quad (3.2.)$$

where,

$P(y)$ – acquired possibility that stand is damaged/ obsolescent;

H – mean height of stand, m;

D – mean diameter of stand, cm;

G_{\min} – minimal basal area of stand, $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$,

G_{fakt} – real basal area of stand, $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$.

Interpretation of the results: if possibility $P(y) < 0.5$ was acquired, stand is not obsolescent, if $P(y) \geq 0.5$ – stand is damaged/ obsolescent. By applying these relations and according to forest inventory data, stands with the highest possibility of damage after freezing rain could be selected for monitoring and planning extraction of damaged trees. These prognoses can be implemented in strategic planning, during development of thinning model within the area with the highest possibilities of freezing rain. The proportion of damaged basal area of overstorey in pine stands depends on thinning (thinned or not thinned during the last three years), $H10$ and $H^2 D^{-1}$ (3.3.), but in spruce stands – on $H10$, $H^2 D^{-1}$ and basal area of overstorey (3.4.):

$$G_{\text{damaged(Pine)}} = 6.106 - (1.442 \times R) - (0.403 \times H) + (0.420 \times \frac{H^2}{D}) \quad (3.3.)$$

$$G_{\text{damaged(Spruce)}} = 6.033 - (0.137 \times G) - (0.837 \times H) + (0.706 \times \frac{H^2}{D}) \quad (3.4.)$$

where,

R – if thinning was done during the last three years, $R=1$;

H10 – mean height of dominating species overstorey trees, m;

H^2D^{-1} – tree height (m) squared relative to stem diameter (cm);

G – basal area of overstorey, $m^2 ha^{-1}$.

These relations can be used to determine stands, where the highest damage of overstorey basal area is possible, as well as to plan a thinning model for stands in the regions with the highest possibility of freezing rain occurrence in order to promote resistance to this damage.

3.2. Stand regeneration after intense natural disturbance

In the area, where 70 years and older spruce stands were present prior to windstorm, 11 tree species were found 44–45 years after this disturbance. The most common species was spruce (44% of total number of trees), silver and downy birch (22%), black alder (11%), and aspen (6%). Analysis of species distribution among stand layers suggests that most common species in overstorey was pioneer species birch (40%), and also spruce has relatively high proportion (26%). From all spruces, 19% were overstorey trees (192 ± 37.0 trees ha^{-1}), 55% understory trees (575 ± 72.5 trees ha^{-1}), and 26% advance regeneration trees (273 ± 65.6 trees ha^{-1}) (Fig. 3.6.). Significant ($p < 0.01$) differences were found between the number of spruces in overstorey and understory, as well as between the number of trees (but not the proportion) between mesic and wet sites, according to stand layer. The higher proportion of spruces in understory and as advance regeneration in comparison to overstorey could be related to regeneration specifics of this species. A number of studies have shown that spruce has more successful regeneration on decomposed uprooted or broken tree debris than on undamaged soil or on open soil, which is formed by tree uprooting (Hytteborn, Packham, 1987; Ilisson et al., 2007; Zielonka, 2006). In the study area, stands were completely obsolescent, trees were felled into piles, thus their decomposition into suitable substrate for spruce regeneration could be delayed (Harrington, Bluhm, 2001; Storaunet, Rolstad, 2002).

In overstorey, spruce was found in 48% of plots, and was dominant species in 23% of plots on mesic and in 43% of plots on wet sites. The proportion of spruce higher than 70% of all trees in a plot was in 18% of plots, and such plots were found significantly ($p < 0.001$) more on wet sites (33%) than on mesic sites (11%). In understory, spruce was more common – it was found in 83% of plots. In this stand layer, a high ($\geq 70\%$) proportion of spruce was found in 40% of plots.

Distance to undamaged or little damaged stand had significant effect ($p < 0.001$) on the proportion of overstorey spruce on the wet sites, but not on the mesic sites (Fig. 3.7.). These results are consistent with other studies where spatial distribution of spruce depending on distance to seed source have been examined (Coates, 2002). More detailed analysis of seed source effect is hampered by lack of information about wind direction and speed during the seed dispersal, as well as lack of information about seed production at this time. It is known, that spruce flowering in the western part of Latvia in 1969 and 1970 was estimated as medium and number of seeds available from tree was relatively low, but seeds

had high quality (Zviedre, 1971). However, these aspects can notably differ among the stands, especially if they are located on forest types with different soil moisture regime (Rone, 1965). Even density of overstorey spruces, regardless of a distance from undamaged (remaining after windthrow) spruce stands on mesic sites, could be due to establishing from seeds of windthrown spruces, which had cones of mature seeds at the time of disturbance. Nevertheless, several remaining spruces (33 trees ha⁻¹ on average) were detected within the windthrown areas, which also could serve as a seed source. The distance from undamaged forest had no effect on height of overstorey spruces neither on dry nor on wet sites. It should be kept in mind, that the present stand structure was affected not only by seed availability but also by establishment, which, in turn, is determined by differences of climatic and microclimatic conditions (Clinton, Bake, 2000). A significantly higher proportion of plots with the high proportion of understorey spruces was found farther than 25 m from undamaged stands. Presumably, this is a result of simultaneous seed availability and not too high competition from undamaged stands, in combination with the high proportion of spruces in overstorey.

Occurrence of spruce in regenerated stands was also affected by pre-storm advance regeneration. In stand inventory data of 1963 (pre-storm), advance regeneration was denoted only in three out of 32 plots, where this study was carried out. During the data collection, in the plots where the occurrence of pre-storm advance regeneration was detected visually, 95% of these trees were now classified as overstorey trees. Furthermore, 49% of all overstorey spruces were found in these plots, where pre-storm advance regeneration was detected. Stand density in the plots, where pre-storm advance regeneration was denoted, and in plots, where pre-storm advance regeneration was not denoted, was similar. However, significant ($p < 0.01$) differences of overstorey density were found – in the plots, where pre-storm advance regeneration was or was not denoted, overstorey density was 177.0 ± 95.8 spruces ha⁻¹ un 256 ± 53 spruces ha⁻¹. These results suggest that regeneration by seeds was hampered in the plots where pre-storm regeneration was established.

In order to justify visual assessment of advance regeneration, in spruce stands on two forest types (*Myrtilloso-sphagnosa* and *Oxalidosa*), the size of plots was extended and increment cores were sampled from the trees, which were visually classified as pre-storm advance regeneration. Results show that the pre-storm regeneration ensures 19% and 59% of the total number of overstorey trees 45 years after windthrow. The most successful establishment occurred during the first 10 years after windthrow, when most of overstorey spruces were established – 85% on *Myrtilloso-sphagnosa* forest type and 62% on *Oxalidosa* forest type (Fig. 3.8.).

Impact of pre-storm advance regeneration on spruce occurrence after 45 years was higher than could be predicted from the pre-storm stand inventory data, indicating that also relatively small groups of advance regeneration with low density (which are not denoted in inventory data) have notable impact on stand regeneration. No differences were found between dimensions of initial pre-storm advance regeneration trees and trees that emerged after the windthrow. This is related to a necessity of adapting to notably different light (and in certain cases also soil moisture regime), changing needles (photosynthetic mechanism), and adapting their root system to altered conditions (Kneeshaw et al., 2002). Only

afterwards these trees can form height and radial increment (Panayotov et al., 2011). In a meantime, trees that were established after the windthrow can reach similar dimensions.

The analysis of all regenerated trees showed that height of overstorey spruces (20.7 ± 0.66 m) was significantly ($p < 0.01$) lower than height of aspen (27.3 ± 1.53 m), and similar to height of birch (21.7 ± 0.50 m), black alder (21.5 ± 0.68 m), and other species (19.2 ± 1.03 m). Height of overstorey spruces, as well as birch and black alder, was similar, regardless of different spruce density within the plots. Height of spruces on mesic sites was significantly ($p < 0.001$) higher than on wet sites, 22.5 ± 0.54 m and 17.7 ± 1.01 m, respectively. Height of understory trees differed significantly ($p < 0.001$) among the species. Spruces (10.6 ± 0.46 m) had the lowest height, and height of other species was from 12.4 ± 0.63 m (for other species) to 16.7 ± 1.18 m (for aspen).

The DBH of overstorey spruce (22.3 ± 0.94 cm) was significantly ($p < 0.01$) lower than DBH of aspen (25.7 ± 2.06 cm), but higher than DBH of birch (19.3 ± 0.80 cm), black alder (21.6 ± 1.47 cm), and other (19.4 ± 1.72 cm) species (Fig. 3.9.).

Like height, also DBH of spruce was similar, regardless of its density between the plots. Within the plots with no spruce, overstorey birch, aspen, and other species had DBH 19.5 ± 0.91 cm, 25.7 ± 2.97 cm and 18.2 ± 2.22 cm, and it was similar within the plots, where spruce was found. In contrast, black alder was thicker within the plots, where spruce was found than where it was not found: 22.7 ± 1.93 cm and 17.8 ± 1.75 cm, respectively. These results indicated that pioneer species had no noticeable effect on growth of spruce, and indirectly indicated that tree establishment (occurrence and survival of pre-storm advance regeneration, seed and suitable substrate availability, climatic conditions during the first years of seedling establishment, etc.) is the main factor that affects species composition after windthrow.

Similarly to overstorey spruce height, also its DBH was significantly ($p < 0.01$) lower on wet sites (19.4 ± 1.48 cm) than on mesic sites (23.8 ± 1.04 cm). Dimensions of understory spruce were similar, regardless of the proportion of spruce within the plots and between the forest types.

In most stands on *Oxalidos* forest type, the proportion of trees according to tree DBH fit to Weibull distribution (Kolmogorov-Smirnov test; $p > 0.05$), but on *Myrtilloso-sphagnosa* forest type – only few (20%) stands fit therein. Mean values of this distribution between the forest types differed significantly ($p < 0.05$): values of shape and scale on *Myrtilloso-sphagnosa* forest type (0.79 and 5.60, respectively) were lower than on *Oxalidos* forest type (1.90 and 15.90, respectively); however, the coefficient of location on *Myrtilloso-sphagnosa* forest type was higher (7.93 and 5.10, respectively) than on *Oxalidos* forest type (Fig. 3.10.). According to Bailey and Dell (1973), if theoretical distribution coefficient of shape is < 1 (likewise on *Myrtilloso-sphagnosa* forest type), tree diameter distribution can be characterised by a negative exponential function. Such tree diameter distribution is commonly found for stands with trees of different age (Burkhart, Tomé, 2012). On *Oxalidos* forest type, tree diameter distribution can be explained by a unimodal positive function.

Multiple factor ANOVA showed significant ($p < 0.05$) relation among coefficients of shape ($R^2 = 0.79$), scale ($R^2 = 0.80$), and location ($R^2 = 0.53$) of Weibull distribution with mean DBH and DBH range (3.5., 3.6., and 3.7.).

$$y \text{ (shape)}=0.54368*D-0.09174D_{range}-4.85681 \quad (3.5)$$

$$y \text{ (scale)}=3.3651*D-0.3884D_{range}-33.9265 \quad (3.6)$$

$$y \text{ (location)}=-1.4240*D+0.5217D_{range}+14.2451 \quad (3.7)$$

where

D – the mean stem diameter at 1.3 m height, cm;

D_{range} – residual between the highest and the lowest DBH within plot.

Relation between coefficients of Weibull distribution and stand basal area and density, which has been observed in other studies (Kilkki et al., 1989), was not found in this study.

Asymmetry of DBH distribution can be caused by a large number of suppressed, but still living trees, which is common for shade-tolerant species in high density stands (Lorimer, Krug, 1983). In this study, stand relative density on *Oxalidososa* forest type was higher than on *Myrtilloso-sphagnosa* forest type: 0.8 and 0.45, respectively. Difference between the basal area of these forest types was notable and significant ($p < 0.001$): $36.8 \pm 6.39 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ on *Oxalidososa* forest type and $18.3 \pm 2.37 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ on *Myrtilloso-sphagnosa* forest type. Mean stand density of both forest types was similar ($p > 0.05$): $1295 \pm 181 \text{ trees ha}^{-1}$ on *Oxalidososa* forest type and $1222 \pm 213 \text{ trees ha}^{-1}$ on *Myrtilloso-sphagnosa* forest type. However, a high proportion of dead trees indicated intense self-thinning on *Oxalidososa* forest type: from 16 to 36% of all trees, compared to *Myrtilloso-sphagnosa* forest type where it was $\leq 5\%$. Rouvinen and Kuuluvainen (2005) in an unmanaged area after another natural disturbance (forest fire) have found, that after intense self-thinning (at age of 50–60 years), DBH distribution in spruce forest changes from negative exponential to bimodal.

The equation from this study could be applied to characterize unmanaged forests in similar forest types.

3.3. Long-term dynamic of landscape after disturbance

During the last 50 years after windthrow in 1969, the largest changes of landscape were observed in the study area of Slitere National Park. Large area of forest was affected in large area damaging both stands and individual trees and groups of trees; as a result, homogeneous areas, i.e., patches, of different size and structure were formed. In this research, the term “*patch*” is defined as relatively homogenous nonlinear area that differs from the surrounding area by its characteristics and appearance (Forman, 1995).

Forest maps with different land cover classes and their dynamics are showed in Figure 3.11.

The total number of the patches was similar three years before (956 in 1966) and three years after (997 in 1972) windthrow, but in 2010, the landscape consisted of a notably lower (207) number of the patches (Tab. 3.3.). Mean area of a patch from 1966 to 2010 increased from 1.68 ha to 7.95 ha. Within landscapes, where one or several patches dominate and a high number of small patches occurs, it is recommended to use area-weighted mean patch size (Tērauds, 2011). In the studied area, the area-weighted mean patch size decreased after the windthrow – from 1038 ha in 1966 to 594 ha in 1972; but in

following years, it reached the pre-storm size and even slightly exceeded it. The indices of landscape heterogeneity – Shannon diversity index increased (from 0.55 in 1966 to 0.89 in 1972), but after 29 years, it returned to pre-storm level.

Long-term changes within the forest landscape could be combined with analysis of landscape level and land cover class level. Three years before the windstorm, most of forest landscape was covered by land cover class “forest areas” (1310 ha or 81.3% of the total area), but land cover class “areas with low woody biomass” and “non-forest land” were found as several discrete patches, and they formed 264 ha and 37 ha or 16.4% and 2.3% from the total area, respectively (Tabs. 3.4., 3.5., and 3.6.). After the windthrow, “forest areas” area decreased to 457 ha, but “areas with low woody biomass” and “non-forest land” increased to 1015 ha and 173 ha, respectively. Since 1988, the proportion of land cover was similar to the pre-storm level, i.e., in 1988 “forest areas” covered 80.8%, “areas with low woody biomass” 15.4%, and “non-forest land” 3.7% of the total studied area. Hence, forest has successfully regenerated in the major part of the damaged area—canopy cover has formed continuously 29 years after windthrow.

In 1966, the area of “forest areas” consisted of 48 patches (three patches per ha), with mean area 27.29 ha. After windthrow (in 1972), the number of patches notably increased – 516 patches or 31.4 patches ha⁻¹ with mean size of 0.89 ha. In the following years, the number of patches varied from 18 to 32 (from 1.1 to 1.9 patches ha⁻¹), and mean patch area in 1998 (30.24 ha) and 2010 (52.99 ha) was significantly ($p < 0.05$) larger than in 1972 (0.89 ha). Before the storm (in 1966) and from 1988 to 2010, the area-weighted mean patch size of “forest areas” was from 1210 ha to 1324 ha, but soon after the windthrow (in 1972) it was only 23 ha.

Land cover class “areas with low woody biomass” consisted of 638 patches in 1966, and decreased to 72 in 1972; 39.6 and 4.4 patches ha⁻¹, respectively. Significant ($p < 0.05$) differences were found between the mean patch size in 1966 and 1972, 0.41 ha and 14.1 ha, respectively. Significant ($p < 0.05$) differences were found also between the mean patch size in 1972 and 1988 (1.16 ha). Also the area-weighted mean patch size increased after the windthrow – from 16 ha in 1966 to 952 ha in 1972. Notable additional damage to landscape caused by beavers was visually observed – since 2005 land cover class “areas with low woody biomass” increased to 2.60 ha in 2010, and the area-weighted mean patch size increased to 48 ha.

The smallest land cover class was “non-forest land”. After windthrow, its area partly increased due to small spectral value differences from that of “areas with low woody biomass”. “Non-forest land” decreased to 40 ha in 2010, which could indicate natural afforestation of these areas.

In landscape ecology, also patch shape and length of its edge are important parameters (Fahrig, 2003). In the study of The Northern Vidzeme Biosphere Reserve, A Tērauds has observed that land management alters configuration of landscape, and it becomes simpler and mostly has quadrangular shaped patches (Tērauds, 2011). Similarly, also in this study natural forest landscape has simple shaped patches. Tendency of shapes to become more complex was observed, but during the 1972 to 2010 the mean index of shape changed from 1.31 to 1.39 ($p > 0.05$). Analysis of each land-use category showed that the mean shape index of “forest areas” before windthrow was 1.51 and decreased to 1.37

after it, but 20–40 years after the windthrow it was from 1.42 to 1.56. Thus, effect of former land management was gone already before the windthrow. From 1988 to 2010, the mean shape index of “non-forest land” was from 1.35 to 1.43, and it was significantly ($p < 0.05$) higher in comparison to 1966 (1.26) and 1972 (1.18). That could be related to more complex shaped patches below waterbodies, caused by an activity of beavers.

Complexity of the patches shape increased for “areas with low woody biomass”, indicated by the shape index increase from 1.28 before the windthrow to 1.57 after it. During the forest regeneration, the shape index decreased to 1.33 in 1998. It slightly increased in 2010, presumably caused by new damage after windthrow in 2005.

Analysis of length of the patch edge showed that decrease in the patch size and increase in the patch density within landscape cause decrease of the mean length of the patch edge. The largest total length and density of the edges were observed in 1972 – 413.8 km and 251 m ha⁻¹, respectively. Before the windthrow, these indicators were 213.4 km and 133 m ha⁻¹, respectively; but the lowest total length and density of the edges were observed in 2010 – 73.8 km and 45 m ha⁻¹, respectively.

Patch isolation or an indicator of habitat availability is an important indicator of landscape configuration, and it shows possibilities for species to spread and move (Foster et al., 1998; Kouki et al., 2001), as well as it allows assessing vitality of species within fragmented habitats (Térauds, 2011). The results of the study show that the area-weighted mean nearest neighbour distance soon after the windthrow (in 1972) increased by 45 m and was significantly higher before and after the storm (61, 16, and 19 m, respectively).

The results indicate that most of the indicators of landscape fragmentation reached their pre-storm level in 29 years after the windthrow in 1969. Hence, if intense windthrows or other natural disturbances follow subsequently each other after a long-enough time lapse under similar conditions, they will not have permanent impact on landscape fragmentation in an unmanaged area.

CONCLUSIONS

1. The proportion of trees damaged by freezing rain in pine and spruce stands did not differ significantly and was 28% and 27%, respectively. Both coniferous species stands had more broken trees than bent/uprooted, indicating that the interchangeability with both coniferous species should not be used as a measure to reduce risk of the freezing rain damages.
2. The parameters of individual and collective stability coniferous trees against freezing rain damages are tree height, the height to diameter at breast height ratio, and stands basal area; the impact has been adjusted by recent (in the last 3 years before this meteorological phenomena) commercial thinning. Timely thinning in advance to improve the tree individual stability and crown asymmetry can reduce the resilience of the stands to this meteorological phenomenon.
3. In the place of the storm disturbed Norway spruce stands 45 years after the storm and without any management, the most abundant tree species were spruce (44 %).

However, it successfully competed with the pioneer species and dominated in 23 % on the mesic sites and in 43 % on the wet sites, in addition the height and diameter at breast height of the overstorey spruce did not differ statistically significantly between the pioneer species (except aspen).

4. Both the mean diameter and height did not differ significantly among birch, black alder, and aspen regardless of the proportion of spruce in the overstorey showing these areas as suitable for the growth of the pioneer species. Consequently, the occurrence and regeneration of spruce was determined by the presence of the initial pre-storm advance regeneration trees. The distance to the seed source had statistically significant impact on the proportion of overstorey spruces on the wet sites. In contrast, on the mesic sites, where advance regeneration (59 % of overstorey spruces on *Oxalidos* forest type) was detected more commonly, the proportion of spruces was not affected by the distance to the seed source.
5. Overstorey spruces exceeded one age-class on 29 % of the area. Furthermore, 49 % from all these overstorey spruces prior to the storm in 1969 were detected as advance regeneration. No significant differences were detected between initial pre-storm advance regeneration trees and trees that had emerged after the windthrow.
6. Windthrow increased forest landscape fragmentation, and its impact on forest was maintained over the time period of up to 30 years, as showed by the patch size, shape, and distance indices. More often recurrence of the storms is expected to make permanent changes to the spatial structure of the landscape.