

LATVIJAS VALSTS MEŽZINĀTNES INSTITŪTS "SILAVA"
LATVIAN STATE FOREST RESEARCH INSTITUTE 'SILAVA'

LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
LATVIA UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Mg.silv. SILVA ŠĒNHOFA

**METEOROLOGISKO FAKTORU UN STĀDMATERIĀLA
IETEKME UZ PAPEĻU AUGŠANU**
***EFFECT OF METEOROLOGICAL FACTORS AND PLANTING MATERIAL ON
POPLAR GROWTH***

PROMOCIJAS DARBS
zinātniskā doktora grāda zinātnes doktors (Ph.D.) Lauksaimniecības un zivsaimniecības
zinātnēs, mežzinātnē iegūšanai

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

Promocijas darba vadītājs
Vad. pētn., asoc. prof., Dr.silv. Ā. Jansons

Promocijas darba vadītāja
Vad. pētn., Dr.silv. D. Lazdiņa

Promocijas darba autore
Mg.silv. S. Šēnhofa

Promocijas darba zinātniskie vadītāji / Supervisors:

Dr.silv. Āris JANSONS

Dr.silv. Dagnija LAZDIŅA

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Valsts mežzinātnes institūtā "Silava". Doktorantūras studiju laiks Latvijas Lauksaimniecības universitātes Meža fakultātē no 2018. līdz 2021. gadam. Darbs izstrādāts pētījuma "Lēmumu pieņemšanas atbalsta instruments meža ražības paaugstināšanai, nodrošinot efektīvu un klimatam piemērotu selekcijas efekta pārneš" (ERAF Nr. 1.1.1.1/19/A/111) ietvaros.

The PhD thesis was prepared in Latvian State Forest Research Institute 'Silava'. The PhD studies were carried out in Latvia University of Life Sciences and Technologies, Forestry Faculty in the period from 2018 to 2021. Preparation of the thesis was carried out in the European Regional Development Fund project 'Decision support tool for increased forest productivity via efficient climate adjusted transfer of genetic gain' (No. 1.1.1.1/19/A/111).

Oficiālie recenzenti / Official reviewers:

1. Dr.silv. Kaspars LIEPIŅŠ, Latvijas Valsts mežzinātnes institūts "Silava" / *Latvian State Forest Research Institute 'Silava'*;
2. Dr.silv. Olga MIEZĪTE, Latvijas Lauksaimniecības universitāte / *Latvia University of Life Sciences and Technologies*;
3. Dr. Valda GUDYNAITĒ-FRANCKEVIČIENĒ, Kauņas Meža un Vides inženierzinātņu universitāte, Lietuvas lauksaimniecības un mežsaimniecības zinātnes centrs / *Kaunas Forestry and Environmental Engineering University of Applied Sciences, Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry*.

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Lauksaimniecības universitātes promocijas padomes "Lauksaimniecības un zivsaimniecības zinātnes, mežzinātne" ar specializāciju "Mežzinātne" atklātā sēdē Rīgas 111, Salaspils, Latvijas Valsts mežzinātnes institūta "Silava" bibliotēkā, 2021.gada 28.decembrī plkst. 11:00. / *The public defense of PhD thesis in open session of the Promotion Council of "Agricultural and fisheries sciences, forestry" with specialization in "Forestry" of Latvia University of Life Sciences and Technologies will be held December 28, 2021 at 11:00 in Salaspils, Rīga Street 111, Latvian State Forest Research Institute "Silava" library.*

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

Atsauksmes sūtīt promocijas padomes sekretārei Lienei Bētiņai uz adresi: Akadēmijas iela 11, Jelgava, LV-3001, Latvija vai e-pastā mfdek@llu.lv / *References are welcome to be sent to Lienei Bētiņai, the secretary of the Promotion Council, address: Akadēmijas street 11, Jelgava, LV-3001, Latvia or by email mfdek@llu.lv.*

ANOTĀCIJA

Mežsaimniecība saskaras ar aizvien jauniem izaicinājumiem ilgtspējīgu atjaunojamo dabas resursu nodrošināšanā. Apaļkoksnes produktu un enerģētiskās koksnes ražošana no ātraudzīgo koku sugu kokiem sniedz iespēju palielināt kokrūpniecībai pieejamo resursu apjomu. Ziemeļeiropā augsta ātraudzība raksturīga atsevišķām papeļu sugām (*Populus* spp.) un to hibrīdiem. Papeļu plantāciju produktivitāte galvenokārt atkarīga no tajā izmantotajiem kloniem. Ziemeļeiropas valstīs nenotiek plaša un sistemātiska papeļu selekcija, tādēļ šajā reģionā galvenokārt izmanto citos Eiropas reģionos atlasītus klonus. Kloniem, kas pārvietoti ziemeļu virzienā no to vecāku izcelsmes vietas, jābūt piemērotiem citādiem fotoperioda un meteoroloģiskajiem apstākļiem. Šādas piemērotības pārbaude pirms klonu rekomendēšanas komerciālai izmantošanai ir aktuāla arī Latvijā. Promocijas darba mērķis ir raksturot papeļu klonu augšanu un to determinējošos faktorus Latvijā.

Promocijas darbs sastāv no sešām tematiski vienotām zinātniskajām publikācijām, un to rezultāti liecina par būtisku klimata ietekmi uz papeļu augšanu. *Populus* hibrīdu radiālo pieaugumu negatīvi ietekmē sausuma stress vasaras periodā un palielināta gaisa temperatūras amplitūda miera perioda laikā. Augstuma pieaugumu būtiski ietekmē klons un spraužu garums, un ātraudzīgākiem kloniem ir mazāka augstuma pieauguma jutība pret sezonas meteoroloģisko faktoru svārstību ietekmi. Rudens salnu izraisīti galotnes bojājumi biežāk novērojami ātraudzīgiem kloniem. Koki ar salnu dēļ nokaltušu virszemes daļu veido atvases, bet to augšana uzsākas novēloti. Ziemas sala bojājumi novērojami augšanā atpaliekošajiem kloniem. Kopumā ir iespējams atlasīt ātraudzīgus klonus ar labu rudens salnu un ziemas sala noturību un saglabāšanos.

ABSTRACT

Forestry is challenged by the global demand for sustainable renewable resources. Fast-growing tree species are highly productive and pose the potential to increase roundwood and energy wood production. In Northern Europe, poplars (*Populus* spp.) and their hybrids are among the most productive tree species. The productivity of poplar plantations is mainly determined by selected clones. Northern European countries lack wide and systematic poplar breeding programs, therefore mainly uses clones that are imported from other European regions. Clones that are transferred northward from their parental species origin should be suitable to an altered length of the vegetation period and low temperatures during the winter season. Clonal testing before recommendation for their commercial use is topical also in Latvia. The thesis aims to characterize the growth of the poplar clones in Latvia and the factors affecting it.

This thesis summarizes six thematically linked scientific publications, and their results indicate the significant effect of climatic factors on poplar growth. The radial growth of *Populus* clones is negatively affected by drought-related stress during the growing season and increased temperature range during the dormancy. Height growth is determined by clone and length of the cuttings, and faster-growing clones are more robust to the negative effect of meteorological factors during the growing season. The faster-growing clones are more likely to have damaged leading shoots by early autumn frost. Trees that have withered aboveground shoots by autumn frost are sprouting during the next growing season, but the regrowth is delayed. Winter frost damage is more likely for weakly growing clones. Overall, fast-growing clones with sufficient autumn and winter frost resistance and survival could be selected.

SATURS / CONTENTS

ANOTĀCIJA	3
ABSTRACT	4
SATURS / CONTENTS	5
PUBLIKĀCIJU SARAKSTS / LIST OF PUBLICATIONS	7
AUTORA IEGULDĪJUMS / THE CONTRIBUTION OF THE AUTHOR	8
PĒTĪJUMU REZULTĀTU PREZENTĒŠANA KONFERENCĒS / APPROBATION OF RESEARCH RESULTS	9
1. DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS	10
1.1. Tēmas aktualitāte	10
1.2. Promocijas darba mērķis	11
1.3. Promocijas darba pētnieciskie uzdevumi	11
1.4. Promocijas darba tēzes	11
1.5. Zinātniskā novitāte	11
2. MATERIĀLI UN METODES	12
2.1. Radiālā pieauguma starpgadu dinamika un tā saistība ar meteoroloģiskajiem faktoriem	13
2.1.1. Datu ievākšanas metodika	13
2.1.2. Datu statistiskā apstrāde	14
2.2. Augstuma pieauguma dinamika un tā saistība ar meteoroloģiskajiem faktoriem veģetācijas sezonas ietvaros	15
2.2.1. Datu ievākšanas metodika	15
2.2.2. Datu statistiskā apstrāde	16
2.3. Augstuma pieauguma starpgadu dinamika	16
2.3.1. Datu ievākšanas metodika	16
2.3.2. Datu statistiskā apstrāde	16
2.4. Rudens salnu un ziemas sala bojājumu raksturojums un to saistība ar koku augstuma pieaugumu	17
2.4.1. Datu ievākšanas metodika	17
2.4.2. Datu statistiskā apstrāde	18
2.5. Atvašu veidošana pēc rudens salnu bojājumiem	18
2.5.1. Datu ievākšanas metodika	18
2.5.2. Datu statistiskā apstrāde	20
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	21
3.1. Radiālā pieauguma starpgadu dinamika un tā saistība ar meteoroloģiskajiem faktoriem	21
3.2. Augstuma pieauguma dinamika un tā saistība ar meteoroloģiskajiem faktoriem veģetācijas sezonas laikā	24
3.3. Augstuma pieauguma starpgadu dinamika	26

3.4. Rudens salnu un ziemas sala bojājumu raksturojums un to saistība ar koku augstuma pieaugumu	28
3.5. Atvašu veidošana pēc rudens salnu bojājumiem.....	31
SECINĀJUMI	34
PRIEKŠLIKUMI	34
PATEICĪBAS.....	35
1. GENERAL DESCRIPTION	36
1.1. The topicality of the theme.....	36
1.2. Aim of the thesis	37
1.3. Thesis objectives	37
1.4. Thesis statements.....	37
1.5. Scientific novelty.....	37
2. MATERIALS AND METHODS	38
2.1. Inter-annual dynamics of radial growth and its link to meteorological factors...	39
2.1.1. Data collection	39
2.1.2. Statistical analysis	40
2.2. The intra-annual height growth dynamics and its relation to meteorological factors within the vegetation season.....	41
2.2.1. Data collection	41
2.2.2. Statistical analysis	42
2.3. Inter-annual height growth dynamics.....	42
2.3.1. Data collection.....	42
2.3.2. Statistical analysis	42
2.4. Autumn and winter frost damage and their link to tree height growth	43
2.4.1. Data collection.....	43
2.4.2. Statistical analysis	43
2.5. Sprouting after autumn frost damage	44
2.5.1. Data collection.....	44
2.5.2. Statistical analysis	45
3. RESULTS AND DISCUSSION	46
3.1. Inter-annual radial growth and its relation to meteorological factors	46
3.2. Intra-annual height dynamics and its relation to meteorological factors	49
3.3. Inter-annual height growth dynamics.....	51
3.4. Assessment of autumn and winter frost damage and its link to tree height	53
3.5. Sprouting after the autumn frost damage	57
CONCLUSIONS.....	59
RECOMMENDATIONS	59
ACKNOWLEDGEMENTS	60
LITERATŪRAS SARAKSTS / REFERENCES	61

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS / *LIST OF PUBLICATIONS*

Promocijas darba galvenie rezultāti apkopoti sešās publikācijās, uz kurām atsaucies tekstā veidotas, izmantojot romiešu ciparus:

The doctoral thesis is based on six publications to which references in the text are indicated with Roman numerals:

- I Šēnhofa S.,** Zeps M., Matisons R., Smilga J., Lazdiņa D., Jansons Ā. (2016) Effect of climatic factors on tree ring width of *Populus* hybrids in Latvia. *Silva Fennica*, 50(1), id 1442, 12 p.; <https://doi.org/10.14214/sf.1442>.
- II Jansons Ā.,** Matisons R., **Šēnhofa S.,** Katrevičs, J., Jansons J. (2016) High-frequency variation of tree-ring width of some native and alien tree species in Latvia during the period 1965–2009. *Dendrochronologia*, 40, 151–158; <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.10.003>.
- III Šēnhofa S.,** Zeps M., Ķēniņa L., Neimane U., Kāpostiņš R., Kārklīņa A., Jansons Ā. (2018) Intra-annual height growth of hybrid poplars in Latvia. Results from the year of establishment. *Agronomy Research*, 16(1), 254–262; <https://doi.org/10.15159/ar.17.073>.
- IV Lazdiņa D., Šēnhofa S.,** Zeps M., Makovskis K., Bebre I., Jansons Ā. (2016) The early growth and fall frost damage of poplar clones in Latvia. *Agronomy Research*, 14(1), 109–122.
- V Šēnhofa S.,** Lazdiņa D., Zeps M. (2021) Winter frost damage and its link to early growth and survival in a poplar clone collection. In: *Proceedings of 27th International Scientific Conference ‘Research for Rural Development 2021’*, Jelgava, 12–14 May 2021. Jelgava: LUA, Vol. 36, p. 70–76. [10.22616/rrd.27.2021.010](https://doi.org/10.22616/rrd.27.2021.010).
- VI Senhofa S.,** Neimane U., Grava A., Sisenis L., Lazdina D., Jansons A. (2017) Juvenile growth and frost damages of poplar clone OP42 in Latvia. *Agronomy Research*, 15(5), 2113–2125; <https://doi.org/10.15159/ar.17.061>.

Promocijas darba ietvaros sagatavota recenzēta monogrāfija:

A peer-reviewed monograph was published:

Šēnhofa S., Lazdiņa D., Jansons Ā. (2019) Papeļu (*Populus spp.*) stādījumu ierīkošana un apsaimniekošana. Salaspils: LVMI Silava, DU AA Saule, 84 lpp.

AUTORA IEGULDĪJUMS / *THE CONTRIBUTION OF THE AUTHOR*

	I	II	III	IV	V	VI
Ideja / <i>Original idea</i>	SŠ, ĀJ	RM, ĀJ	SŠ, ĀJ	DL, ĀJ, SŠ	SŠ, DL	SŠ, ĀJ
Pētījuma plāns / <i>Study design</i>	SŠ, RM	SŠ, RM	SŠ, MZ	SŠ, DL	SŠ	SŠ, DL
Datu ievākšana / <i>Data collection</i>	MZ, JS, SŠ	SŠ, JK, JJ, ĀJ	LĶ, UN, RK, AK	MZ, KM, IB	SŠ, DL, MZ	UN, AG, SŠ
Datu analīze / <i>Data analysis</i>	SŠ, RM	SŠ, RM	SŠ, MZ	SŠ	SŠ	SŠ, DL, LS
Manuskripta sagatavošana / <i>Manuscript preparation</i>	SŠ, RM, ĀJ, DL	RM, SŠ	SŠ, ĀJ	SŠ, DL, ĀJ	SŠ, DL, MZ	SŠ, ĀJ
Promocijas darba autora ieguldījums, %/ <i>Contribution of author of the thesis, %</i>	70%	50%	70%	60%	80%	70%

SŠ – Silva Šēnhofa, MZ – Mārtiņš Zeps, RM – Roberts Matisons, JS – Jānis Smilga, DL – Dagnija Lazdiņa, ĀJ – Āris Jansons, JK – Juris Katrevičs, JJ – Jānis Jansons, LĶ – Laura Ķēniņa, UN – Una Neimane, RK – Rolands Kāpostiņš, AK – Annija Kārklīņa, KM – Kristaps Makovskis, IB – Ieva Bebre, AG – Annija Grava, LS – Linards Sisenis.

PĒTĪJUMU REZULTĀTU PREZENTĒŠANA KONFERENCĒS / APPROBATION OF RESEARCH RESULTS

Pētījuma rezultāti prezentēti septiņās zinātniskajās konferencēs:
Study results have been presented in seven scientific conferences:

1. **Šēnhofa S.** (2021) Winter frost damage and its link to early growth and survival in a poplar clone collection. 27th Annual International Scientific Conference *Research for Rural Development 2021*, 12–14 May 2021, Jelgava, Latvia, prezentācija.
2. **Šēnhofa S.** (2021) Assessment of poplar clone plantations in Latvia. Conference *Knowledge Based Forest Sector*, 2021. gada 26.–27. janvāris, Rīga, Latvija, prezentācija.
3. **Šēnhofa S.** (2020) Piemērota meža reproduktīvā materiāla izvēle adaptācijas kontekstā: iespējas un riski. Konference *Eiropas zaļais kurss bioekonomikas attīstībai*, 2020. gada 17. decembris, Jelgava, Latvija, prezentācija.
4. **Šēnhofa S.** (2019) Cold hardiness of *Populus* spp. clones. 25th Annual International Scientific Conference *Research for Rural Development 2019*, 15–17 May 2019, Jelgava, Latvia, prezentācija.
5. **Šēnhofa S.**, Zeps M., Lazdiņa D., Matisons R., Kāpostiņš R., Jansons Ā. (2019) Climate response and risks for poplar plantations. International conference *Alders and other fast-growing trees*, 29–30 April 2019, Kalsnava, Latvia, prezentācija.
6. Neimane U., **Šēnhofa S.**, Grava A., Lazdiņa D., Jansons Ā. (2016) Juvenile growth and frost damage of poplar clone OP42 in Latvia. 4th International Conference of Dendrochronologists and Dendroecologists from the Baltic Sea Region *BaltDendro 2016*. 22–25 August, 2016, Annas Tree School, Latvia, prezentācija.
7. Lazdina D., **Senhofa S.**, Zeps M., Makovskis K., Bebre I., Jansons A. (2016) The selection of the commercial poplar clones in Latvia. 7th International conference *Biosystems Engineering 2016*, 12–13 May 2016, Tartu, Estonia, prezentācija.

1. DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

1.1. Tēmas aktualitāte

Mežsaimniecība saskaras ar aizvien jauniem izaicinājumiem globālā ilgtspējīgu, atjaunojamu dabas resursu nodrošināšanā. Ātraudzīgās koku sugas sniedz iespēju palielināt ārpus meža izaudzētās koksnes apjomu (Mola-Yudego et al., 2017). Šādā veidā iespējams paaugstināt koksni uzglabātā CO₂ daudzumu un aizstāt fosilo resursu izmantošanu, tādējādi kavējot klimata pārmaiņas (Sulaiman et al., 2020) un samazinot nepieciešamību izstrādāt koksni dabiskajos mežos (Pawson et al., 2013). Ziemeļeiropas apstākļos pie kokaugu kultūrām ar augstu produktivitāti pieder papeles (*Populus* spp.) un to hibrīdi (Tullus et al., 2013). Šajā reģionā introducēts ievērojams skaits papeļu klonu (Christersson, 2006; Karačić et al., 2003; Karačić and Weih, 2006), ko izmanto gan biomasas, gan apaļkoksnes audzēšanai ar rotācijas periodu attiecīgi no 5 līdz 10 vai no 20 līdz 30 gadiem (Tullus et al., 2012).

Papeļu plantāciju produktivitāte galvenokārt atkarīga no tajā izvēlētajiem kloniem. Papeļēm pieejama plaša ģenētiskā materiāla bāze, un klonus ir vienkārši pavairot veģetatīvi, iegūstot precīzas māteskoka “kopijas” ar vēlamajām īpašībām. Tomēr dažādu papeļu klonu izmantošana komerciālajai audzēšanai Eiropā joprojām ir ierobežota, dodot priekšroku plašu plantāciju ierīkošanai ar vienu atsevišķu klonu. Dānijā (Stener and Westin, 2017) un Zviedrijā (Karačić et al., 2021) visbiežāk tiek stādīts klons OP42, Dienvideiropā – klons I-214 (FAO, 2016). Šobrīd papeļu selekcijas programma un 16 komerciālai izmantošanai jau reģistrēti kloni pieejami Zviedrijā (Stener and Westin, 2017), savukārt citās Ziemeļeiropas valstīs izmanto tikai stādmateriālu, kas selekcionēts un importēts no dienvidu reģioniem, galvenokārt no Itālijas un Vācijas (Niemczyk et al., 2018).

Klimats ir viens no galvenajiem koku augšanu ietekmējošajiem faktoriem (Lindner et al., 2010). Būtiska meteoroloģisko faktoru ietekme uz *Populus* klonu augšanu vērojama gan veģetācijas sezonas (*intra-annual*) ietvaros (Tullus et al., 2012; Yu et al., 2001), gan ilgtermiņā (*inter-annual*), ietverot meteoroloģiskos apstākļus arī miera periodā. Sugu un hibrīdu krustošana (hibridizācija) izmaina ģenētiski noteiktās adaptīvās pazīmes (Gudynaitė-Franckevičienė et al., 2021). *Populus* hibrīdu augstā produktivitāte saistīta ar spēju izmantot garāku veģetācijas periodu, salīdzinot ar to vecāku sugām (Yu et al., 2001), turklāt lielu daļu no hibrīdiem iespējams audzēt ārpus to vecāku sugu dabiskā izplatības areāla (Sykes and Prentice, 1996). Kloniem, kas pārvietoti ziemeļu virzienā no to vecāku sugu izcelsmes reģiona, garāks fotoperiods var izraisīt novēlotu augšanas pārtraukšanu (Ingvarsson et al., 2006; Kalcsits et al., 2009; Li et al., 2002), kas savukārt saistīts ar sala bojājumu risku (Christersson, 2006, 1996; Ferm et al., 1989; Ilstedt, 1996; Karačić et al., 2003; Pliura et al., 2014; Telenius, 1999). Lai gan vislielākais sala bojājumu risks ir pārejas periodā no aktīvās augšanas uz miera stāvokli (Charrier et al., 2015), ziemeļu reģionos introducētajiem kokiem jāpiemērojas ne tikai citādam augšanas sezonas ilgumam, bet arī zemajām miera perioda temperatūrām, kas mijas ar īslaicīgiem atkušņiem (Schreiber et al., 2013). Tieši nepietiekama introducēto sugu un hibrīdu piemērotība klimatam ir viens no būtiskākajiem plašāka mēroga papeļu audzēšanas izaicinājumiem Ziemeļeiropā (Gudynaitė-Franckevičienė et al., 2021; Karačić et al., 2021; Schreiber et al., 2013), aktualizējot introducēto klonu pārbaužu nepieciešamību pirms to rekomendēšanas komerciālai izmantošanai (Pliura et al., 2014).

Sala bojājumu ietekme ir kompleksa – tie samazina koku vitalitāti un paaugstina mirstību (Cunti et al., 1991; Diamandis and Koukos, 1992; Pliura et al., 2014), samazina stumbra kvalitāti, veicinot dubultās galotnes, līkumu un plaisu veidošanos (Christersson, 2006; Verwijst et al., 1996), un nosalušas dzinumus augšējās daļas samazina koka augstumu. Tomēr vairāki pētījumi liecina, ka uz ziemeļiem pārvietoto sugu un hibrīdu ražība atsver potenciālos ar sala bojājumiem saistītos riskus (Pliura et al., 2014; Schreiber et al., 2013).

1.2. Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir identificēt audzēšanai Latvijā piemērotus papeļu klonus.

1.3. Promocijas darba pētnieciskie uzdevumi

Promocijas darbā izvirzīti trīs uzdevumi:

1. Raksturot papeļu radiālā un augstuma pieauguma jutību pret meteoroloģiskajiem faktoriem.
2. Novērtēt stādmateriāla un klona ietekmi uz papeļu augstuma pieaugumu.
3. Novērtēt salnu un sala bojājumu ietekmi uz papeļu augšanu.

1.4. Promocijas darba tēzes

Promocijas darbā izvirzītas divas tēzes:

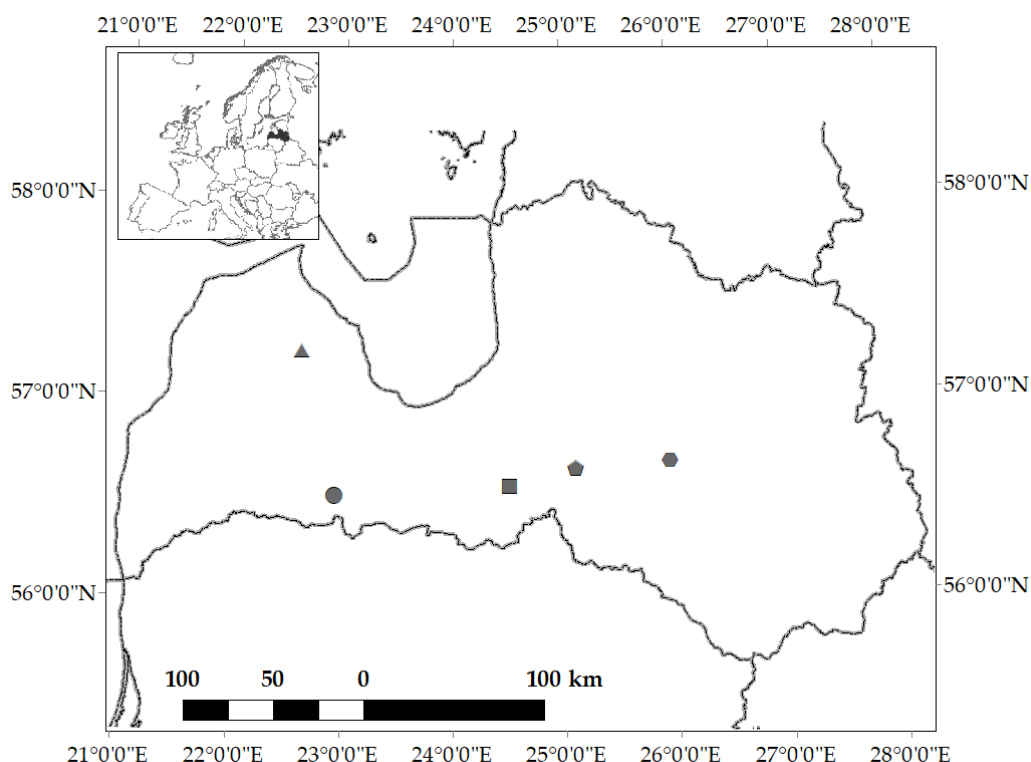
1. Sausuma stress vasaras periodā būtiski negatīvi ietekmē papeļu radiālo pieaugumu.
2. Sala bojājumu negatīvās ietekmes uz koku augstuma pieaugumu pakāpe dažādiem papeļu koniem ir atšķirīga.

1.5. Zinātniskā novitāte

Pirmo reizi Eiropas hemiboreālajos mežos veikta retrospektīvā gadskārtu parametru analīze meteoroloģisko faktoru ilgtermiņa ietekmes uz papeļu augšanu vērtēšanai. Pirmo reizi Baltijas valstīs vērtēta rudens salnu un ziemas sala bojājumu ietekme uz papeļu saglabāšanos un augšanu. Latvijas mērogā iegūta jauna informācija par līdz šim plašāko dažādas izcelsmes papeļu klonu skaitu un dažāda garuma spraudēju piemērotību stādījumiem.

2. MATERIĀLI UN METODES

Pētījumā ievākti un analizēti dati no divām papeļu mežaudzēm Auces un Talsu novada Šķēdes apkārtnē un pieciem stādījumiem iepriekš lauksaimniecībai izmantotā zemē Skrīveru, Vecumnieku un Kalsnavas apkārtnē (2.1. att.). Kopumā stādījumos pārstāvēti 36 dažādas izcelsmes kloni no *Aigeiros* un *Tacamahaca* sekcijām (2.1. tabula). Kloni no Itālijas, Beļģijas, Vācijas, Zviedrijas un Nīderlandes introducēti Latvijā pirms 10–15 gadiem. Kloni ar Latvijas izcelsmi ir pēcnācēji (spraudēni) papelēm, kas Latvijā saglabājušās no introdukcijas ap 1960. gadu (Saliņš, 1971). Hybride275 un OP42 ir viena klona atšķirīgi nosaukumi, bet dažādās stādmateriāla izcelsmes dēļ tie vērtēti kā atsevišķi kloni.



2.1. att. Pētījuma objektu izvietojums

● – Auce (I un II), ▲ – Šķēde (I un II), ■ – Vecumnieki (III un VI), ◆ – Skrīveri (IV) un
 ● – Kalsnava (IV un V). Vecumniekos un Kalsnavā dati ievākti divos atsevišķos stādījumos

2.1. tabula

Publikācijās pārstāvēto klonu izcelsme

Klons	Publikācija						Ražotājs/ izstrādātājs/ īpašnieks un izcelsmes valsts	Suga/ krustojums/ sekcija
	I	II	III	IV	V	VI		
AF2				x	x		Franco Alasia, Itālija	<i>P. × canadensis</i> ^a
AF6				x	x			<i>P. nigra × P. × generosa</i> ^b
AF7				x	x			<i>P. × generosa</i> ^b × <i>P. × canadensis</i> ^a
AF8				x	x			<i>P. × generosa</i> ^b × <i>P. trichocarpa</i>
AF16					x			<i>P. × canadensis</i> ^a
AF18					x			<i>P. × canadensis</i> ^a

2.1. tabulas turpinājums

Klons	Publikācija						Ražotājs/ izstrādātājs/ īpašnieks un izcelsmes valsts	Suga /krustojums/ sekcija
	I	II	III	IV	V	VI		
Baldo			x		x		Unità di ricerca per le Produzioni Legnose fuori Foresta, Itālija	<i>P. deltoides</i>
Oudenberg			x		x		Eigen Vermogen van het Instituut Voor Natuur en Bosonderzoek, Beļģija	<i>P. × canadensis</i> ^a
Vesten			x		x			
Matrix11				x	x		Nordwestdeutsche Forstlichen	<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>
Matrix24			x	x	x		Versuchsanstalt, Vācija	
Matrix49			x		x			
Max1			x		x			
Max3			x		x		Vācija	<i>P. nigra</i> × <i>P. maximowiczii</i>
Max4					x			
LV1			x	x	x			
LV3			x	x	x			
LV4			x	x	x			
LV5				x	x			
LV7				x	x			
LV9				x	x		Swedish Forestry Agency, reģistrācijas nr. KB-003, Zviedrija	<i>Tacamahara</i>
LV10				x	x			
LV11				x	x			
LV12				x	x			
LV14				x	x			
LVX				x	x			
P0114	x	x		x	x			<i>P. balsamifera</i> × <i>P. laurifolia</i>
Pop1				x	x			
Pop2				x	x		Latvijā atrastu pieaugušu papeļu pēcnācēji (spraudēni), introducēti	nezināms
Pop3				x			20. gs. 60. gados (Saliņš, 1971)	
Pop4				x	x			
Pop5				x	x			
Pop6				x	x			
Pop7				x				
Hybride275			x		x		North West Forest Research Station, Vācija Nīderlande, sākotnēji selekcionēts Oxford Paper Company (ASV)	<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>
OP42			x	x	x	x		

^a *P. × canadensis* ir hibrīds *P. nigra* × *P. deltoides*; ^b *P. × generosa* ir hibrīds *P. deltoides* × *P. trichocarpa*.

2.1. Radiālā pieauguma starpgadu dinamika un tā saistība ar meteoroloģiskajiem faktoriem

2.1.1. Datu ievākšanas metodika

Starpgadu radiālā pieauguma saistība ar meteoroloģiskajiem faktoriem vērtēta divās papeļu hibrīda *Populus balsamifera* L. × *P. laurifolia* Ledeb. audzēs ar normāla mitruma režīma augsnēm (Vr) netālu no Auces (56° 31' N, 22° 56' E) un Šķēdes (57° 14' N, 22° 37' E)

(2.1. att.). Audžu vecums pēc taksācijas datiem attiecīgi 62 un 64 gadi, sākotnējais biežums aptuveni 5000 koki ha⁻¹, nav veikta kopšanas cirte.

Aucē atlasīti 12 un Šķēdē atlasīti 10 audzes caurmēra sadalījumu reprezentējoši vizuāli vitāli koki bez bojājumu pazīmēm. No katra koka 2013./2014. gada ziemā 1.3 m augstumā virs sakņu kakla ievākti stumbra šķērsriezuma diski. Šie diski laboratorijā izžāvēti līdz gaissausas koksnes mitruma līmenim un slīpēti ar slīppapīru, pakāpeniski nomainot tā graudainību no P80 līdz P400. Gadskārtas platuma mērījumi veikti, izmantojot Lintab 5 (RinnTECH, Germany, Heidelberg) sistēmu ar precizitāti līdz 0.01 mm. Mērījumi veikti divos pretējos šķērsriezuma ripas virzienos.

Meteoroloģisko novērojumi dati iegūti no UEA *Climatic Research Unit* mājaslapas (Harris et al., 2014) tīkla punktiem, kas atrodas iespējami tuvu (<30 km) pētījumos iekļautajām audzēm. Izmantotie meteoroloģiskie rādītāji:

1. minimālā, maksimālā un vidējā mēneša gaisa temperatūra, mēneša temperatūras amplitūda, mēneša nokrišņu summa un potenciālā evapotranspirācija (PET) laika posmam no janvāra gadu pirms gadskārtas veidošanās līdz septembrim gadskārtas veidošanās gadā;
2. mēneša vidējā gaisa temperatūra un nokrišņu summa, un standartizēts nokrišņu evapotranspirācijas indekss (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010) laika posmam no jūlija gadu pirms gadskārtas veidošanās līdz septembrim gadskārtas veidošanās gadā.

2.1.2. Datu statistiskā apstrāde

Gadskārtu platuma sēriju kvalitāte un to savstarpējā sakritība audzes ietvaros un starp tām vērtēta vizuāli un izmantojot statistisko šķērsdatēšanu programmā COFECHA (Grissino-Mayer, 2001). Atmestas sērijas, kas uzrādīja zemu sakritību ($r < 0.40$) ar kopējo datu kopu. Gadskārtu sēriju atlikumu hronoloģijas katrai audzei aprēķinātas programmā ARSTAN (Cook and Holmes, 1986). Tām veikta dubultā detrendēšana ar vecumu un konkurenci saistītās datu variācijas daļas noņemšanai. Vecuma ietekme noņemta, izmantojot modificēto negatīvi eksponenciālo funkciju, un konkurences ietekme noņemta, izmantojot trešās kārtas polinomiālo funkciju (*spline*) ar viļņa garumu 40 gadi vai 48 gadi, saglabājot 50% no sākotnējās datu variācijas. Gadskārtu platuma sēriju variācijas raksturošanai izmantota vidējā jutība (SENS), vidējās starpsēriju korelācijas ($r\text{-bar}$), sinhronitāte (*Gleichläufigkeit* (GLK)), populācijas signāla izpausmes (EPS), pirmās pakāpes autokorelācijas (AC) un signāla stipruma (*signal to noise ratio* (SNR)) indeksi (Wigley et al., 1984), kas aprēķināti detrendētām sērijām.

Datu analīze veikta laika periodam no 1965. līdz 2009. gadam. Salīdzināta papeļu hibrīda, kārpainā bērza (*Betula pendula* Roth), parastās egles (*Picea abies* H. Karst.), parastās priedes (*Pinus sylvestris* L.), melnalkšņa (*Alnus glutinosa* Gaertn.), Eiropas lapegles (*Larix decidua* Mill.), Eiropas dižskābarža (*Fagus sylvatica* L.), sarkanā ozola (*Quercus rubra* L.) un hibrīdapses (*Populus tremuloides* Michx. × *P. tremula* L.) augšanu ietekmējošo meteoroloģisko faktoru līdzība attiecīgajai sugai raksturīgos saimnieciskajos mežos. Pieauguma ikgadējā mainība, ko reprezentē hronoloģiju indeksi (ikgadējais radiālais papildpieaugums), starp sugām un audzēm analizēta ar galveno komponentu analīzi (PCA) (Jolliffe, 1986), kur audžu atlikumu hronoloģijas izmantotas kā paraugi, un gadi (gadskārtu sēriju indeksi) – kā mainīgie. Galveno komponentu būtiskums noteikts ar randomizācijas testu (*broken stick*) ar 10³ atkārtojumiem. Meteoroloģiskie faktori, kas veido galvenās komponentes, noteikti, izmantojot būtstrepas (Johnson, 2001) Pīrsona korelācijas analīzi ar 10³ atkārtojumiem starp mainīgo (gadu) īpašvērtībām un meteoroloģiskajiem faktoriem Latvijas rietumu un centrālajai daļai. Būtisko meteoroloģisko faktoru ietekmes noteikšanai izmantota būtstrepas Pīrsona korelācijas analīze. Datu statistiskā apstrāde veikta brīvprogrammatūrā R 3.3.1 (R Core Team, 2020), izmantojot paketi *dplR* (Bunn, 2008).

2.2. Augstuma pieauguma dinamika un tā saistība ar meteoroloģiskajiem faktoriem veģetācijas sezonas ietvaros

2.2.1. Datu ievākšanas metodika

Papeļu klonu augšanas dinamika un tās saistība ar meteoroloģiskajiem faktoriem veģetācijas sezonas ietvaros vērtēta stādījumā Vecumnieki-1 (56° 34' N, 24° 31' E; 2.1. att.). Stādījums ierīkots 2016. gada pavasarī auglīgā, nosusinātā kūdras augsnē ar pH reakcijas līmeni 6. Stādīti neapsakņoti sprauņi ar garumu 30 un 50 cm (tālāk tekstā attiecīgi “īsie” un “garie”), virs zemes atstājot 3–5 cm. Pārstāvēti 12 kloni (2.2. tabula), veidotas viena klona rindas trīs atkārtojumos ar attālumu starp rindām 4 m, un starp kokiem rindā 2 m.

Augstuma mērījumi pirmajā augšanas sezonā veikti katra klona un sprauņu garuma grupas 20 nejauši izvēlētiem rametiem, vidēji 6 rametiem no viena atkārtojuma. Veikti deviņi augstuma mērījumu atkārtojumi ar vidēji 11 dienu intervālu starp tiem (no 5 līdz 18 dienām). Augstums mērīts no zemes virskārtas līmeņa. Aptuveni pusei no rametiem bija vērojami briežu dzimtas dzīvnieku un gliemežu radīti bojājumi; tikai nebojāto koku dati izmantoti datu analīzē.

2.2. tabula

Izmantotie papeļu kloni

Klons	Rametu skaits	Sprauņu garums, cm
OP42	3	30
Max1	6	
Max3	7	
Matrix24	6	
Matrix49	7	
Hybride275	9	
LV1	3	
LV3	6	
LV4	6	
Baldo	7	30
	9	50
Oudenberg	8	30
	10	50
Vesten	7	50

Katram kokam aprēķināta vidējā augšanas intensitāte (mm dienā) periodam starp veiktajiem mērījumiem. Katram klonam un tā sprauņu garuma grupai aprēķināts gada vidējais augstuma pieaugums, vidējā augšanas intensitāte. Novērojumu perioda beigās “īsie” kloni iedalīti trīs grupās atkarībā no to augstuma pieauguma: (1) “īsie-max” – Hybrid275, Oudenberg, (2) “īsie-average” – Baldo, Max1, Max3, Matrix24, Matrix49, (3) “īsie-min” – OP42, LV1, LV3, LV4. Augšanas gaitas salīdzināšanai no “garo” klonu grupas iekļauti tikai kloni Oudenberg un Vesten, jo klona Baldo koku augstums bija būtiski ($p < 0.05$) mazāks.

Gaisa temperatūras un nokrišņu summas stundu vidējās vērtības iegūtas no tuvākās Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra stacijas netālu no Bauskas (56° 22' N, 24° 13' E).

2.2.2. Datu statistiskā apstrāde

Augstuma pieauguma un augšanas intensitātes atšķirību vērtēšanai starp spraudēju garuma grupām un kloniem izmantota viena faktora dispersijas analīze (ANOVA) un *Tukey HSD* tests. Katram kokam augstuma mērījumi aproksimēti ar Gompertz vienādojumu:

$$f(A) = \alpha \exp(-\beta \exp(-kA)), \quad (2.1.)$$

kur:

α – asimptota (*asymptote parameter*) – maksimālās vērtības koeficients pieauguma izlīdzināšanās laikā jeb stacionārajā fāzē;

β – pārliekuma punkts (*displacement parameter*) – horizontālās nobīdes koeficients, kas raksturo pieauguma tempa izmaiņu uzsākšanas laiku;

k – pieauguma temps – koeficients, kas raksturo attiecību starp asimptotu un pārliekuma punktu;

A – novērojuma diena.

Atšķirības starp Gompertz parametriem (α , β , k) vērtētas, izmantojot ANOVA. Pieauguma tempa koeficienta no jūnija līdz septembrim saistība ar šī perioda meteoroloģiskajiem faktoriem vērtēta, izmantojot Pīrsona korelācijas analīzi. Pieauguma tempa koeficienta un temperatūras atšķirības starp mērījumu periodiem vērtētas ar ANOVA. Visi testi veikti pie būtiskuma līmeņa $\alpha = 0.05$. Norādītas vidējās vērtības un to ticamības intervāli. Aprēķini veikti brīvprogrammatūrā R 3.3.1 (R Core Team, 2020).

2.3. Augstuma pieauguma starpgadu dinamika

2.3.1. Datu ievākšanas metodika

Augstuma pieauguma starpgadu dinamika vērtēta stādījumos Skrīveros (56° 39' N, 25° 7' E) un Kalsnavā (56° 41' N, 25° 58' E) (2.1. att.). Skrīveru stādījums ierīkots 2011. gadā. Stādījumā pārstāvēti 23 papeļu kloni (2.1. tabula). Katram klonam stādīti vismaz 30 spraudēni viena klona rindās ar attālumu starp rindām 2.2 m, un starp kokiem rindā 0.7 m.

Klonu sērija AF stādīta trīs atkārtojumos, pārējie kloni vienā līdz divos atkārtojumos, kas vienmērīgi un nejauši izvietoti laukā. Pēc pirmās augšanas sezonas visiem kloniem, izņemot kloniem no AF sērijas, to dzinumus pilnībā līdz zemei nopostīja briežu dzimtas dzīvnieki. Augstuma mērījumi veikti pēc otrās, trešās un piektās augšanas sezonas. Klonu sērijai AF augstuma mērījumi veikti arī pēc pirmās un ceturtās augšanas sezonas.

Kalsnavas stādījums (turpmāk tekstā – Kalsnava-1) ierīkots 2016. gada pavasarī vienlaidus sagatavotā augsnē. Pārstāvēti 34 papeļu kloni, katram klonam stādīti 97 līdz 102 aptuveni 25 cm gari spraudēni viena klona rindās ar attālumu starp rindām 3.5 m, un starp kokiem rindā 0.5 m. Veikta zāles pļaušana starp rindām, stādījums iežogots. Visiem dzīvajiem kokiem (izņemot klonu OP42) augstums mērīts pēc pirmās (2017. gada pavasarī) un trešās augšanas sezonas (2019. gada pavasarī). Pēc ceturtās augšanas sezonas (2020. gada pavasarī) visiem kloniem augstums mērīts katram otrajam kokam rindā.

2.3.2. Datu statistiskā apstrāde

Datu atbilstības normālajam sadalījumam pārbaude veikta, izmantojot Šapiro-Vilka testu. Augstuma atšķirības starp kloniem vērtētas ar ANOVA vai Kruskala-Vallisa testu, kam būtisko pāru vērtējums veikts, izmantojot Dunna multiplās salīdzināšanas testu. Visi testi veikti pie

būtiskuma līmeņa $\alpha = 0.05$. Norādītas vidējās vērtības un to ticamības intervāli. Aprēķini veikti brīvprogrammatūrā R 4.0.2 (R Core Team, 2020).

2.4. Rudens salnu un ziemas sala bojājumu raksturojums un to saistība ar koku augstuma pieaugumu

2.4.1. Datu ievākšanas metodika

Rudens salnu bojājumi vērtēti abos Kalsnavas stādījumos, savukārt ziemas sala bojājumi vērtēti tikai vienā no Kalsnavas stādījumiem (2.1. att.; turpmāk tekstā – Kalsnava-2). Kalsnava-2 stādījums ierīkots 2014. un 2015. gadā, izmantojot Skrīveru stādījumā ievāktus spraudņus. Stādījums ierīkots atklātā, līdzenā laukā, viena klona rindās bez atkārtojumiem. Agrās rudens salnas novērotas 2015. gada rudenī (informāciju par meteoroloģiskajiem apstākļiem skatīt 2.5.1. apakšnodaļā). Salnu bojājumi vērtēti 19 viengadīgiem un divgadīgiem kloniem (2.1. tabula). Sakarība starp koku augstumu (dati no Kalsnavas-2 stādījuma) un salnu bojājumiem (dati no Skrīveru stādījuma) vērtēta 16 kloniem, kas atradās abos stādījumos. Kalsnava-1 stādījumā (stādījuma apraksts 2.3.1. nodaļā) rudens salnu vērtējums veikts pēc pirmās augšanas sezonas 2017. gada pavasarī.

Lapu un stumbra salnu bojājumu vizuālā vērtēšana Kalsnava-2 stādījumā veikta piecu ballu skalā (2.2. att.) 15. oktobrī. Koku atbilstība miera vai aktīvās augšanas stāvoklim noteikta pēc pumpuru fenoloģijas. Kalsnava-1 stādījumā veikta rudens salnu bojāto koku uzskaitē.

Vērtējums, balles					
(a)	1 _L	2 _L	3 _L	4 _L	5 _L
					
	bez vizuāliem bojājumiem	atsevišķas bojātas lapas	bojāta lielākā daļa tekošā gada dzinuma lapu	bojāta lielākā daļa lapu	koki miera stāvoklī, t.i., lapas nobirušas, pumpuri izveidojušies pirms salnas
(b)	1 _{ST}	2 _{ST}	3 _{ST}	4 _{ST}	5 _{ST}
					
	bez vizuāliem bojājumiem	atsevišķi zaru bojājumi	atsevišķi stumbra bojājumi	bojāta vairāk nekā 1/3 stumbra	pilnībā bojāts stumbrs

2.2. att. Shematisks (a) lapu un (b) stumbra bojājumu vērtējuma attēlojums (D. Lazdiņas zīmējumi)

Ziemas sala bojājumi novēroti Kalsnava-1 stādījumā pēc otrās augšanas sezonas (2018. gada pavasarī). Kloni vizuāli vērtēti piecu ballu skalā: 0 – gājis bojā, 1 – stipri bojāts, 2 – vidēji stipri bojāts, 3 – nelieli bojājumi, 4 – vizuāli nebojāts.

2.4.2. Datu statistiskā apstrāde

Klona un vecuma ietekme uz koka fenoloģisko fāzi un rudens salnu lapu un stumbra bojājumiem, kā arī lapu un stumbra bojājumu balles ietekme uz koka augstumu vērtēta, izmantojot vispārīgu lineāru modeli. Koku vecuma ietekme uz salnu bojājumu intensitāti (balli) vērtēta 10 kloniem individuālu koku līmenī. Atšķirības starp koku skaita sadalījumu pa rudens salnu lapu bojājumu ballēm viengadīgiem un divgadīgiem klonu LV4, LV11 un LV12 rametiem vērtētas ar Hī kvadrāta testu.

Bojāto un ne bojāto koku augstuma salīdzināšanai klonu līmenī izmantots Manna-Vitnija U-tests. Sakarības starp koku un klonu augšanas parametriem un rudens salnu un ziemas sala bojājumiem vērtētas, izmantojot Spīrmēna korelācijas analīzi.

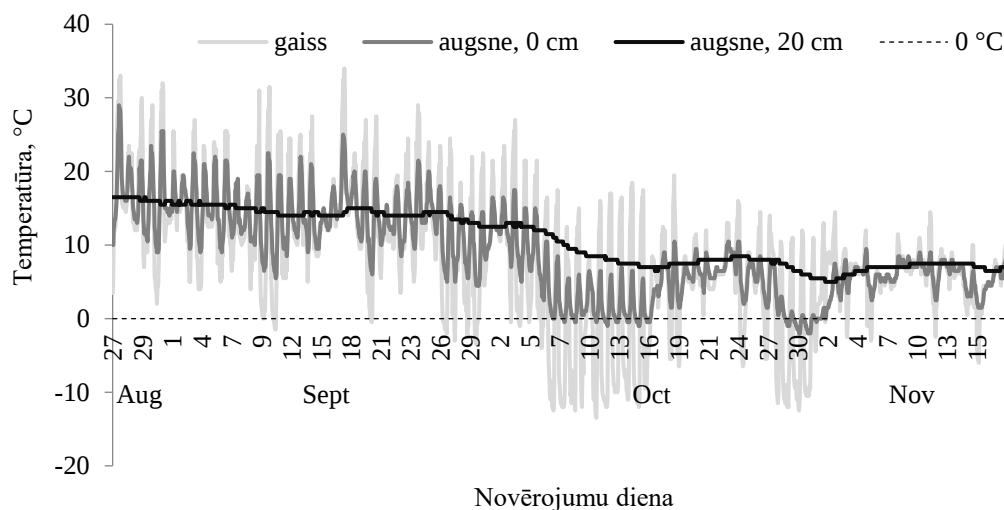
Visi testi veikti pie būtiskuma līmeņa $\alpha = 0.05$. Norādītas vidējās vērtības un to ticamības intervāli. Aprēķini veikti brīvprogrammatūrā R 3.0.2 un R 4.0.2 (R Core Team, 2020).

2.5. Atvašu veidošana pēc rudens salnu bojājumiem

2.5.1. Datu ievākšanas metodika

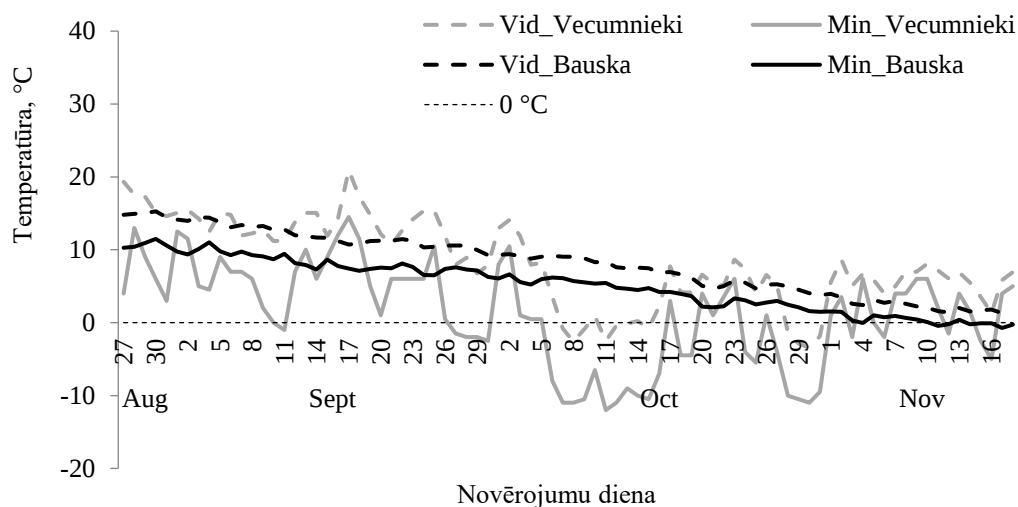
Atvašu veidošana pēc rudens salnu bojājumiem vērtēta stādījumā Vecumnieki-2 (2.1. att.). Stādījums ierīkots kūdras augsnē (pH 6) 2015. gada pavasarī, izmantojot 30 cm garus klonu OP42 spraudņus, kas ievākti no māteskokiem Latvijas rietumu daļā. Koki stādīti, ievērojot attālumu starp rindām 4 m, un starp kokiem rindā – 2 m. Nezāļu ierobežošanai rudenī pirms stādīšanas veikta platības aršana un apstrāde ar herbicīdu, bet augšanas sezonas laikā – ravēšana aptuveni 25 cm rādiusā ap koku.

Rudens salnas novērotas 2015. gada rudenī. Meteoroloģiskie dati iegūti uz lauka, reizi stundā veicot temperatūras mērījumus: (1) gaisa temperatūra 20 cm augstumā virs zemes, (2) augsnes temperatūra virskārtas līmenī un (3) 20 cm dziļumā (2.3. att.). Negatīva gaisa temperatūra pirmo reizi reģistrēta 11. septembrī, un līdz 6. oktobrim tā periodiski (deviņās no 22 dienām) atkārtojās. Šajā periodā garākie negatīvas gaisa temperatūras periodi reģistrēti 27. septembrī (deviņas stundas, minimālā temperatūra -2°C) un 30. septembrī (septiņas stundas, minimālā temperatūra -3°C). Salna pieņēmas spēkā 7. oktobrī: negatīva gaisa temperatūra saglabājās 14 stundas un sasniedza -12.5°C . Minimālā gaisa temperatūra no -9.5 līdz -13.5°C ar ilgumu no 11 līdz 16 stundām saglabājās 10 dienas. Līdzīgi apstākļi atkārtojās periodā no 28. līdz 31. oktobrim. Abos šajos periodos negatīva temperatūra reģistrēta arī augsnes virskārtā. Pirmo reizi negatīva augsnes virskārtas temperatūra reģistrēta 8. oktobrī, un tā saglabājās divas stundas, 13. oktobrī negatīva temperatūra saglabājās septiņas stundas, bet 30. un 31. oktobrī – 15 stundas (minimālā temperatūra -2°C). Augsnē 20 cm dziļumā negatīva temperatūra novērojumu periodā nav konstatēta.



2.3. att. Gaisa (20 cm augstumā virs zemes) un augsnes (virskārtas (0 cm) līmenī un 20 cm dziļumā) temperatūra laika periodā no 27.08.2015. līdz 18.11.2015.

Ilgtermiņa meteoroloģisko apstākļu dati attiecīgajam laika periodam iegūti no tuvākās LVĢMC novērojumu stacijas netālu no Bauskas ($56^{\circ} 22' N$, $24^{\circ} 13' E$). Tajos negatīva vidējā minimālā gaisa temperatūra pirmo reizi reģistrēta 11. novembrī (2.4. att.), kas ir ievērojami vēlāk nekā analizētajā augšanas sezonā.



2.4. att. Gaisa temperatūra stādījumā (Vecumnieki) un ilgtermiņa novērojumi tuvākajā LVĢMC stacijā (Bauska) laika periodā no 27.08.2015. līdz 18.11.2015.

“Vid_Vecumnieki” – vidējā diennakts temperatūra, aprēķināta no stundas mērījumiem; “Min_Vecumnieki” – minimālā diennakts temperatūra; “Vid_Bauska” – vidējā diennakts temperatūra 30 gadu periodam; “Min_Bauska” – vidējā minimālā diennakts temperatūra 30 gadu periodam

Nākamās augšanas sezonas sākumā (jūnijā) visiem kokiem konstatēti pilnībā nokaltuši pirmā gada dzinumi. Daļa no kokiem veidoja celma atvases. Katram kokam mērīts garākā iepriekšējās sezonas dzinuma augstums un caurmērs pie sakņu kakla, un zaru garums, noteikts iepriekšējās sezonas dzinumu un zaru (garāki par 5 cm) skaits. Katram kokam noteikta dzīvnieku radīto bojājumu un jauno dzinumu sastopamība (0/1). Kopumā dati ievākti 3025 kokiem. Atkārtots atvašu veidošanas vērtējums veikts jūlija vidū daļā no stādījuma (1018 kokiem).

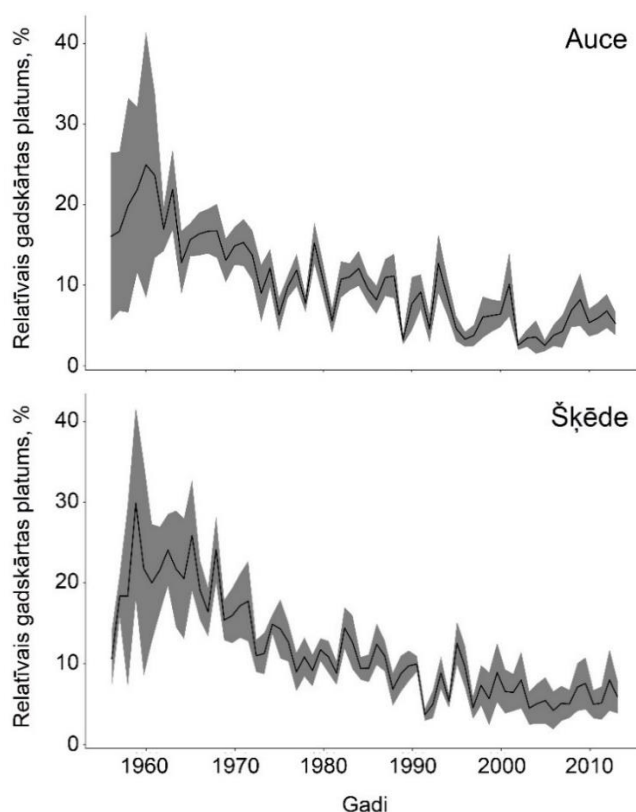
2.5.2. Datu statistiskā apstrāde

Datu atbilstības normālajam sadalījumam pārbaude veikta, izmantojot Šapiro-Vilka testu. Augstuma, caurmēra un zaru garuma atšķirības kokiem, kas bija izveidojuši vienu, divus, trīs un vairāk nekā trīs stumbrus, vērtētas, izmantojot ANOVA. Hī kvadrāta tests izmantots, lai vērtētu (1) zaru skaita, kā arī atvases veidojošo koku īpatsvara un dzīvnieku bojāto koku īpatsvara atšķirības starp kokiem ar dažādu stumbru skaitu, (2) atvases veidojošo koku īpatsvara atšķirības starp dzīvnieku bojātiem un nebojātiem kokiem un (3) atvases veidojošo koku īpatsvara atšķirības starp stādījuma rindām. Pīrsona korelācijas analīze izmantota, lai vērtētu saistību starp atvases veidojošo koku īpatsvaru un vidējo koku augstumu rindā. Spīrmēna korelācijas analīze izmantota, lai vērtētu saistības starp (1) koka zaru un stumbru skaitu, (2) zaru garumu un skaitu, un (3) zaru garumu un stumbru skaitu. Telpiskā autokorelācija vērtēta, izmantojot Morana I testu. Visi testi veikti pie būtiskuma līmeņa $\alpha = 0.05$. Norādītas vidējās vērtības un to ticamības intervāli.

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Radiālā pieauguma starpgadu dinamika un tā saistība ar meteoroloģiskajiem faktoriem

Vērtējot starpgadu radiālā pieauguma saistību ar meteoroloģiskajiem faktoriem divās papeļu hibrīda audzēs 62–64 gadu vecumā, šķērsdatētās gadskārtu platuma sērijas uzrādīja augstu sakritību starp koku mērījumiem ar starpsēriju korelācijas koeficientu 0.42–0.51 un sēriju sinhronitātes rādītāju GLK 0.68–0.69, norādot uz izteikti vienotu vides faktoru ietekmi uz papeļu hibrīda radiālo pieaugumu. Par to liecina arī cieša ($r > 0.75$) sakarība starp audžu hronoloģijām. Abās audzēs papeļu augšanas dinamika bija līdzīga – tekošais vidēji periodiskais radiālais pieaugums kulminē 10 līdz 15 gadu vecumā un izlīdzinās, sasniedzot 25 līdz 30 gadu vecumu (3.1. att.).



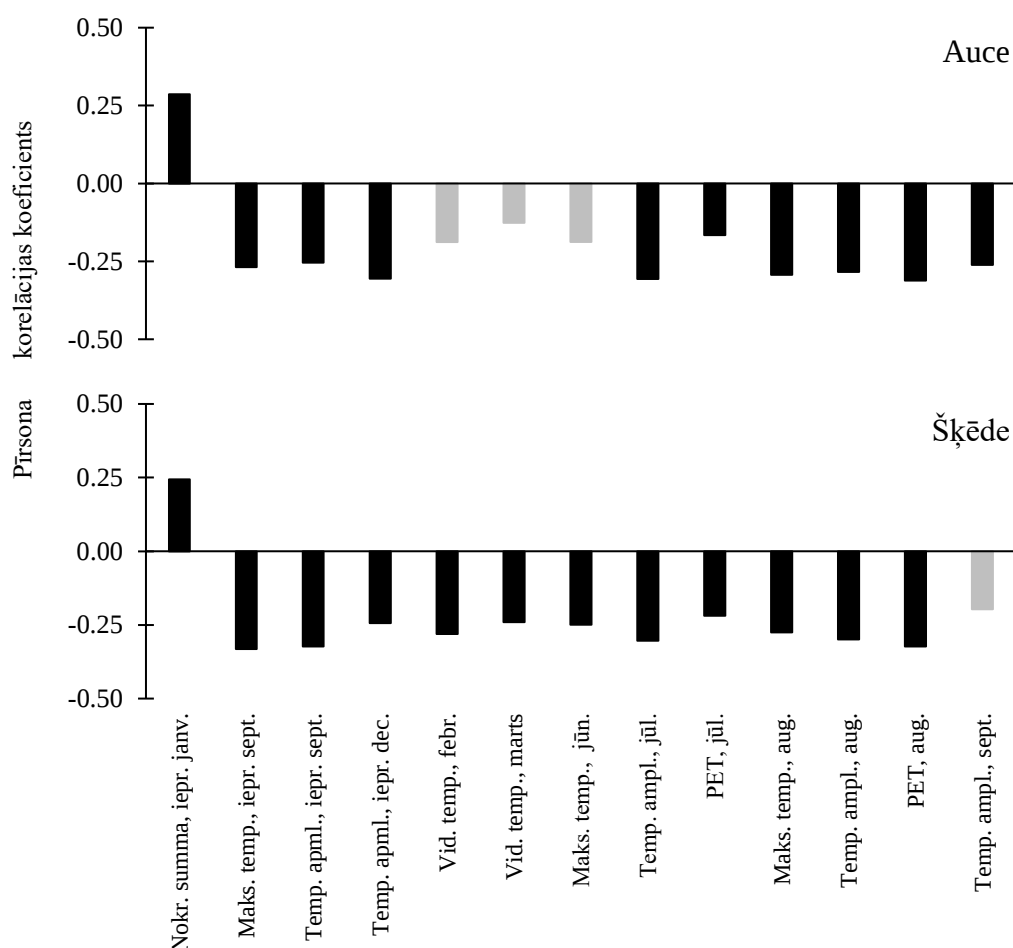
3.1. att. Papeļu hibrīda relatīvais gadskārtas platums Aucē un Šķēdē

Augstie signāla intensitātes rādītāji SNR (6.17–10.77) skaidrojami ar homogēniem augšanas apstākļiem audzē un vienvēdīgu ģenētisko materiālu (pārstāvēts viens klons). Samērā lielās SNR atšķirības norāda uz klimatiskajām atšķirībām audzēs, kas, iespējams, skaidrojamas ar izteiktāku kontinentalitāti Aucē. Populācijas signāla (EPS) vērtības bija pietiekoši augstas (0.86–0.92), lai raksturotu gadskārtu platumu ietekmējošos faktorus abās analizētajās audzēs (Wigley et al., 1984). Par ārējo faktoru ietekmi liecina izteiktas gadskārtu platuma atšķirības starp gadiem, jutības koeficientam sasniedzot vērtības 0.40–0.42. Vidēji cieša līdz augsta autokorelācija (0.56–0.74) liecina par iepriekšējās augšanas ietekmi uz tekošā gada gadskārtas veidošanos. Sērijām vērojamas arī atsevišķas krasas izmaiņas (gadskārtu platuma samazinājums) 1975., 1989. un 2002. gadā, ko izraisījusi zema gaisa temperatūra rudenī gadu pirms gadskārtas veidošanās, kam sekoja īpaši augsta vidējā mēneša temperatūra laika periodā no decembra pirms gadskārtas veidošanās līdz augustam gadskārtas veidošanās gadā.

Atlikumu sērijas uzrādīja būtisku korelāciju ar 12 no 132 pārbaudītajiem faktoriem, un astoņi no tiem bija būtiski abās audzēs. Ņemot vērā, ka gadskārtas platumu būtiski ietekmē liels

skaitis faktoru, kas savstarpēji mijiedarbojas, katrs atsevišķs faktors izskaidroja salīdzinoši nelielu daļu no variācijas, un to korelācijas koeficientu vērtības nepārsniedza 0.35. Zemās korelācijas koeficientu vērtības, iespējams, saistītas arī ar faktoru ietekmes stipruma izmaiņām laika gaitā (Büntgen et al., 2006; Cook et al., 1992).

Kopumā paņēmu hibrīds *Populus balsamifera* × *P. laurifolia* uzrādīja jutību pret gaisa temperatūru vasaras otrajā pusē (jūlijs–septembris) gan gadskārtas veidošanās gadā, gan gadu pirms tās veidošanās. Šķēdē gadskārtas platumu būtiski ietekmēja arī gaisa temperatūra gadskārtas veidošanās gada februārī, martā un jūnijā, kamēr Aucē – temperatūras amplitūda septembrī. Meteoroloģisko faktoru ietekme gadu pirms gadskārtas veidošanās saistīta ar barības vielu uzkrājuma veidošanu (Barbaroux and Bréda, 2002; Pallardy, 2008), kas noris veģetācijas sezonas beigās un tiek izmantots augšanas uzsākšanai nākamā gada pavasarī (Jones et al., 2004; Landhäusser and Lieffers, 2003; Regier et al., 2010). Paaugstināta gaisa temperatūra veicina evapotranspirāciju (Trajkovic, 2005), kas var izraisīt īslaicīgu ūdens deficītu un radīt sausuma stresu (Pallardy, 2008). Šādos apstākļos tiek traucēta barības vielu veidošana (Regier et al., 2009), iespējams, izskaidrojot arī konstatēto negatīvo saistību starp gadskārtu platumu un augusta PET (3.2. att.). Turklāt karstās vasarās tipiski ir arī samazināts nokrišņu daudzums. Papeļēm, līdzīgi kā citām ātraudzīgām lapu koku sugām, raksturīga intensīva evapotranspirācija (Perry et al., 2001), kas palielina ūdens deficītu augsnē, tādējādi nepietiekamas ūdens pieejamības apstākļos pastiprinot sausuma radīto ietekmi.



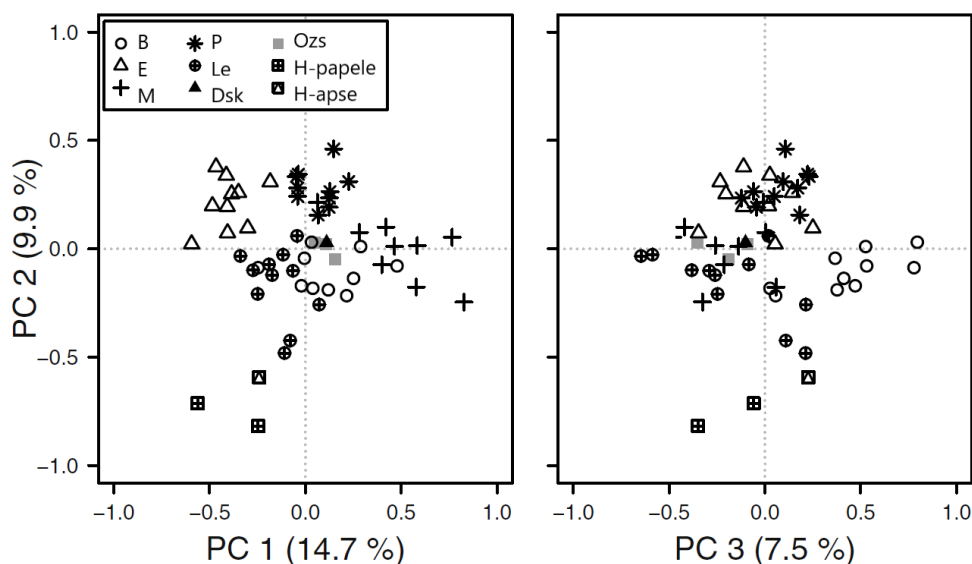
3.2. att. Pīrsona korelācijas koeficienti starp meteoroloģiskajiem faktoriem un gadskārtu platuma atlikuma hronoloģijām Aucē un Šķēdē

Faktori, kas kādā no audzēm nebija būtiski, iekrāsoti pelēki. Parādīti tikai nekolineārie faktori. Nokr. – nokrišņu, iep. – iepriekšējā gada, Maks. – maksimālā, temp. – temperatūra, ampl. – amplitūda, Vid. – vidējā, PET – potenciālā evapotranspirācija

Tekošā gada meteoroloģisko faktoru ietekme saistīta ar konkrētā brīža barības vielu izmantošanu (Deslauriers et al., 2009), kas ietekmē koksnes veidošanos veģetācijas perioda laikā (Lebourgeois et al., 2005). Paaugstināta gaisa temperatūra var kavēt fotosintēzi (Haldimann and Feller, 2004) un kambijs aktivitatē ksilogēnēzes jeb koksnes veidošanās procesā (Oberhuber and Gruber, 2010). Savukārt mēneša gaisa temperatūras amplitūdas negatīvā ietekme augšanas sezonas laikā saistīta ar nepieciešamību mainīgajiem apstākļiem strauji pielāgot koka bioķīmiskos un fizioloģiskos procesus (Pallardy, 2008).

Radiālā pieauguma negatīvā sakarība ar septembra gaisa temperatūru saistīta ar pāreju no aktīvās augšanas uz miera stāvokli, kad papeles ir pakļautas rudens salnu bojājumiem. Savukārt decembrī, kad koki atrodas miera stāvoklī, gaisa temperatūras amplitūdas negatīvā ietekme, visticamāk, saistāma ar salcietības mazināšanās reakciju atkušņu dēļ (Cox and Stushnoff, 2001), pakļaujot kokus spēcīgākai sala ietekmei, temperatūrai atkal krītoties (Hänninen, 2006). Traucēts miera stāvoklis var paātrināt arī barības vielu rezervju izmantošanu intensīvākas elpošanas dēļ (Ögren et al., 1997). Nokrišņu (parasti – sniega) summa janvārī gadu pirms gadskārtas veidošanās bija vienīgais faktors, kas pozitīvi ietekmēja gadskārtas platumu. Biezāka sniega sega nodrošina labāku termoizolāciju, samazinot augsnes sasalšanas dziļumu un augsnes temperatūras svārstības (Hardy et al., 2001), tādējādi samazinot sakņu mirstību (Tierney et al., 2001) un labvēlīgi ietekmējot ūdens uzņemšanu.

Galveno komponentu analīzē pirmie trīs komponenti bija būtiski ($p < 0.01$) un kopā izskaidroja 32.1% no kopējās datu variācijas (3.3. att.). Pirmais komponents (PC1) atspoguļoja koku reakciju uz veģetācijas perioda garumu un ūdens pieejamību aktīvās augšanas laikā, kas izpaudās kā būtiskas korelācijas ar gaisa temperatūru septembrī gadu pirms gadskārtas veidošanās ($r = 0.36$) un nokrišņu summu jūnijā ($r = -0.33$). Otrais galvenais komponents (PC2) norādīja uz temperatūras ietekmi un korelēja ar gaisa temperatūru tekošā gada februārī un martā (attiecīgi $r = 0.38$ un $r = 0.55$), un iepriekšējā gada jūlijā ($r = 0.33$). Trešais galvenais komponents (PC3) bija saistīts ar koku reakciju uz ūdens deficītu vasaras vidū, korelējot ar gaisa temperatūru, nokrišņu summu un SPEI jūlijā gadu pirms gadskārtas veidošanās (attiecīgi $r = 0.32$, $r = -0.39$ un $r = -0.30$).



3.3. att. Gadskārtu platumu atlikumu hronoloģiju (1965–2009) izkārtojums atkarībā no trim galvenajiem komponentiem (PC1, PC2 un PC3)

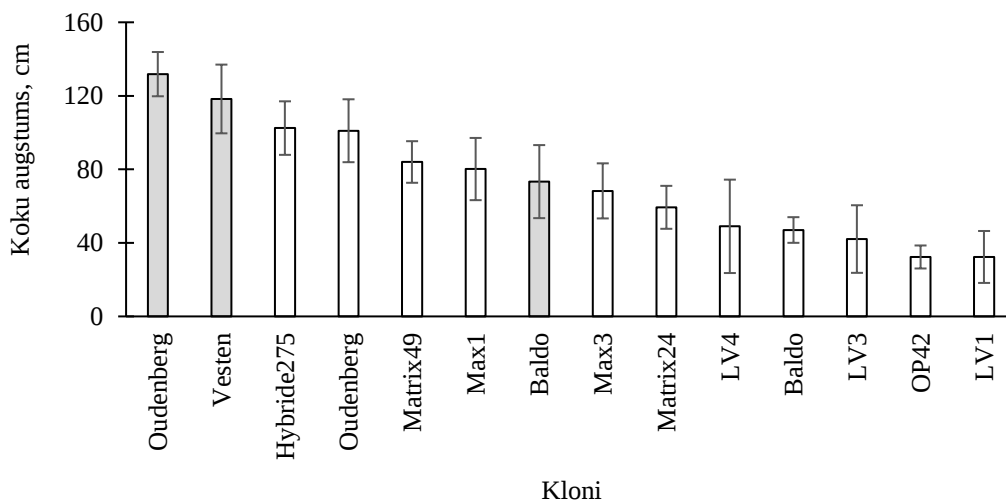
Iekavās norādīta katra komponenta izskaidrotā variācijas daļa (%). B – *Betula pendula* Roth, E – *Picea abies* H. Karst., M – *Alnus glutinosa* Gaertn., P – *Pinus sylvestris* L., Le – *Larix decidua* Mill., Dsk – *Fagus sylvatica* L., Ozs – *Quercus rubra* L., H-papele – *Populus balsamifera* L. × *P. laurifolia* Ledeb., H-apse – *Populus tremuloides* Michx. × *P. tremula* L.

Gadskārtu platumu atlikumu hronoloģiju izvietojums pēc pirmā un otrā komponenta veidoja izteiktu sugu grupēšanos koordinātu plaknē (3.3. att.) un norādīja uz dažādu sugu atšķirīgu jutību pret dažādiem klimatiskajiem faktoriem. Arī izvietojums pēc otrā un trešā komponenta vairumam vietējo un introducēto koku sugu veidoja salīdzinoši ciešu punktu mākonī, daļai sugu pārklājoties. Papeļu hibrīdu hronoloģijas abos gadījumos atradās izteikti nomaļus no citu sugu hronoloģijām, norādot uz atšķirīgām gadskārtu platuma variācijas iezīmēm. Iespējams, tas saistīts ar hibrizāciju, kas vecākkoku īpašību kombinācijas dēļ var izraisīt specifisku pēcnācēja – hibrīda – reakciju uz vides apstākļiem (Li et al., 1998).

3.2. Augstuma pieauguma dinamika un tā saistība ar meteoroloģiskajiem faktoriem veģetācijas sezonas laikā

Dažādu papeļu klonu stādījumā Vecumnieki-1 pirmajā augšanas sezonā augstuma mērījumu uzsākšanas brīdī vidējais galotnes dzinumu garums bija sasniedzis 4.0 ± 1.6 cm. Klonam OP42 un “īsajam” klonam Baldo galotnes dzinums bija būtiski ($p < 0.05$) īsāks (attiecīgi 1.6 un 1.8 cm), savukārt “īsajam” klonam Oudenberg un “garajiem” kloniem Vesten un Oudenberg – būtiski garāks (attiecīgi 11.8, 12.1 un 14.2 cm) nekā vidēji stādījumā.

Vidējais koku augstums pirmās augšanas sezonas beigās bija 81.0 ± 6.8 cm. Tas būtiski ($p < 0.001$) atšķīrās starp kloniem, un bija no 32 līdz 132 cm (3.4. att.). Vidējais augstums “īsajiem” kloniem bija 69.2 ± 6.9 cm. Kloni Hybride275, Oudenberg un Matrix49 bija būtiski ($p < 0.05$) augstāki, bet kloni OP42 un LV1 būtiski zemāki par stādījuma vidējo augstumu. Vidējais augstums kloniem, kam izmantoti “garie” sprauņi, bija 107.9 ± 13.4 cm. Kloni Oudenberg un Vesten bija būtiski ($p < 0.05$) garāki nekā klons Baldo: augstums pirmās sezonas beigās attiecīgi 131.8, 118.3 un 73.3 cm.



3.4. att. Papeļu klonu augstums pirmās augšanas sezonas beigās ($\pm$ ticamības intervāls)

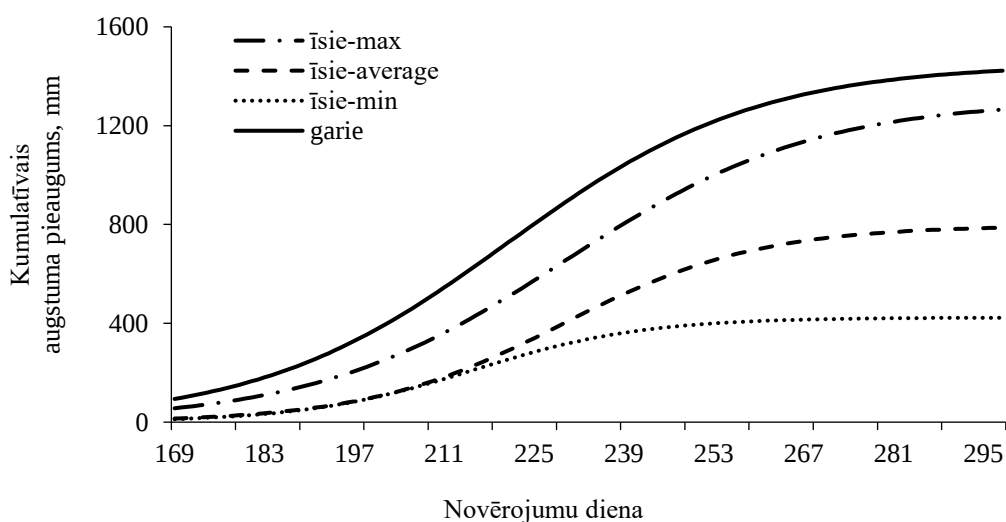
Baltie stabiņi norāda klonus, kam izmantoti “īsie” (30 cm) sprauņi, pelēkie stabiņi norāda klonus, kam izmantoti “garie” (50 cm) sprauņi

Kloniem Oudenberg un Baldo koku augstumu būtiski ($p < 0.001$) ietekmēja gan klons, gan sprauņu garums, bet ne šo faktoru mijiedarbība ($p = 0.74$; $R^2 = 0.75$). Klonam Oudenberg augstums ramiem no “garajiem” sprauņiem bija par 31% lielāks nekā “īsajiem” sprauņiem: attiecīgi 132 ± 12.0 cm un 101 ± 17.1 cm. Savukārt klonam Baldo augstums ramiem no “garajiem” sprauņiem bija par 55% lielāks nekā “īsajiem” sprauņiem: attiecīgi 73 ± 20.0 cm un 47 ± 7.0 cm. Rezultāti norāda uz garāku sprauņu pārākumu augstuma veidošanā, kas sakrīt ar citu pētījumu rezultātiem (Burgess et al., 1990; Camp et al., 2012; Rossi, 1999) un, iespējams, saistīts ar lielākām barības vielu rezervēm (Buhler et al.,

1998; Marino and Gross, 1998), nodrošinot priekšrocības to augšanai. Piemēram, salīdzinot 20 un 40 cm garu klonu Max4 spraužu biomasu pēc vienas augšanas sezonas, stumbra un lapu biomasu garo spraužu ramiem bija attiecīgi 46.6 ± 3.2 un 47.7 ± 3.3 g sausnes, savukārt īso spraužu ramiem attiecīgi 39.5 ± 2.8 un 33.1 ± 1.6 g sausnes (Vigl and Rewald, 2014). Konstatēts, ka kopējā biomasu pēc vienas augšanas sezonas būtiski pozitīvi korelē ar sprauža sākotnējo masu (Vigl and Rewald, 2014).

Vidējā augšanas intensitāte visos starpmērījumu posmos bija no 10 līdz 15 mm dienā. Atsevišķiem kloniem (piemēram, OP42, LV1, LV3) augšanas intensitāte nepārsniedza 10 mm dienā, kamēr kloni “garais” Vesten, “īsa” Oudenberg un Hybride275 pārsniedza augstuma pieaugumu 15 mm dienā vismaz divos no starpmērījumu posmiem, norādot uz atšķirīgām augšanas dinamikas stratēģijām (Devine et al., 2010).

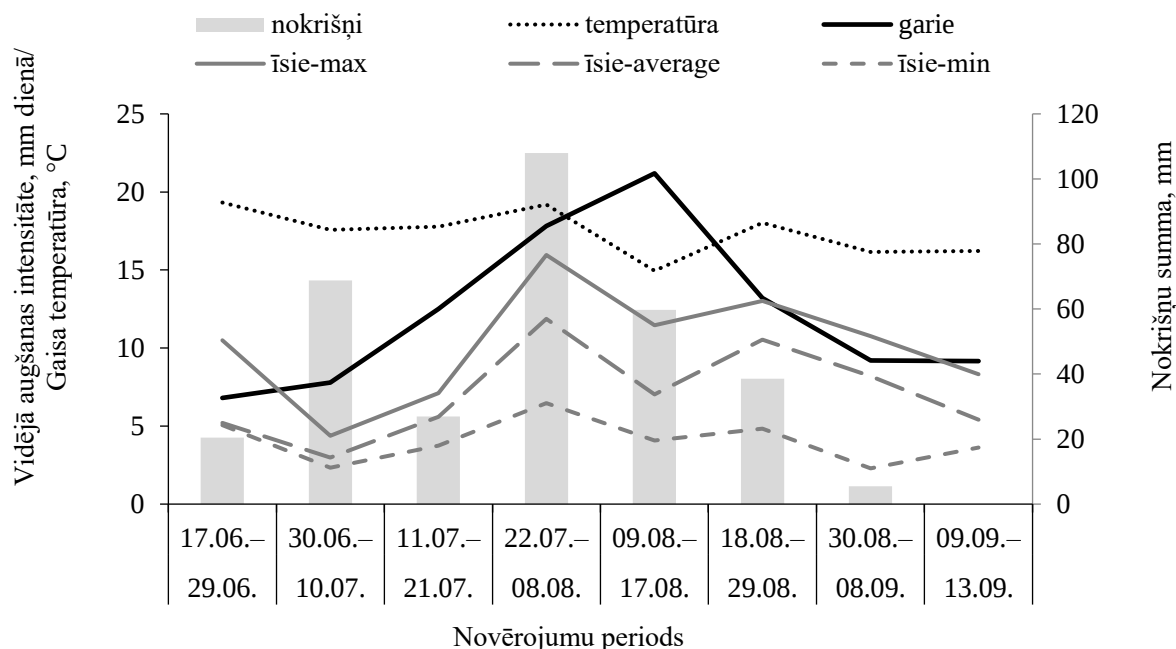
Gompertz modeļa asimptotās (maksimālās vērtības) parametrs būtiski ($p < 0.05$) atšķirās starp “īso” klonu grupām, lai gan to pieauguma tempa izmaiņu uzsākšanas laiks būtiski neatšķirās (3.5. att.). Līdz ar to vērojamas būtiskas ($p < 0.05$) atšķirības pieauguma tempa koeficientam k starp klonu grupām “īsie-min” un “īsie-max”. Šīs atšķirības liecina, ka kloniem, kas augšanas sezonas beigās sasniedza lielāku augstumu, bija straujāka augšana jūlija sākumā, un tas daļēji varētu būt saistīts ar ģenētiski noteiktām lapu plaukšanas laika atšķirībām (Jansons et al., 2014). Kloniem no grupas “īsie-max” un “garie” atšķirības starp visiem modeļa parametriem (α , β , k) nebija statistiski būtiskas.



3.5. att. Aproximētās Gompertz vienādojuma līknes vidējam augstuma pieaugumam klonu grupām “īsie-max”, “īsie-average”; “īsie-min” (spraužu garums 30 cm) un “garie” (spraužu garums 50 cm)

Augšanas intensitāte uzrādīja vidēji ciešu ($p > 0.05$, $r = 0.60$) pozitīvu korelāciju ar nokrišņu daudzumu, bet vāju ($p > 0.05$, $r = 0.17$) korelāciju ar gaisa temperatūru (3.6. att.). Līdzīgi, arī Chhin (2010) konstatējis izteiktāku nokrišņu ietekmi uz papeļu pieaugumu, salīdzinot ar dažādiem gaisa temperatūras rādītājiem. Otrajā novērojumu periodā (30.06.–10.07.) vidējā gaisa temperatūra pazeminājās no 19.3 uz 17.6 °C, izraisot augšanas intensitātes samazināšanos vidēji par 2.2 mm dienā. Maksimālā augstuma pieauguma intensitāte bija 12.7 mm dienā, un tā sasniegta jūlija beigās (22.07.–08.08.), periodā ar lielāko nokrišņu daudzumu (108 mm). Augšanas intensitāte ceturtajā novērojumu periodā uzrādīja ievērojamas atšķirības starp kloniem, un bija no 4.6 mm dienā klonam LV1 līdz 18.5 mm dienā “garajam” klonam Oudenberg. Netipiskas gaisa temperatūras un nokrišņu daudzuma izmaiņas konstatētas augusta vidū (09.08.–17.08.), kad šie rādītāji saruka attiecīgi līdz 14.9 °C un 60 mm, izraisot augšanas intensitātes samazināšanos līdz vidēji 10.2 mm dienā. Kloni, kas novērojumu perioda beigās bija sasnieguši lielāko augstuma pieaugumu (“garie” Vesten un Oudenberg),

turpināja augšanu arī šajā (09.08.–17.08.) periodā, kamēr pārējie kloni to samazināja (3.6. att.). Līdzīga ātraudzīgo klonu noturība pret meteoroloģisko faktoru izmaiņām novērota hibrīdam *Populus tremuloides* × *P. tremula* (Jansons et al., 2014). Nākamajā novērojumu periodā (18.08.–29.08.) gaisa temperatūra atkal pieauga, tomēr augšanas intensitāte palika gandrīz nemainīga (10.3 mm dienā). Turpmākajos novērojumu periodos gan gaisa temperatūra un nokrišņu daudzums, gan augšanas intensitāte pakāpeniski samazinājās.

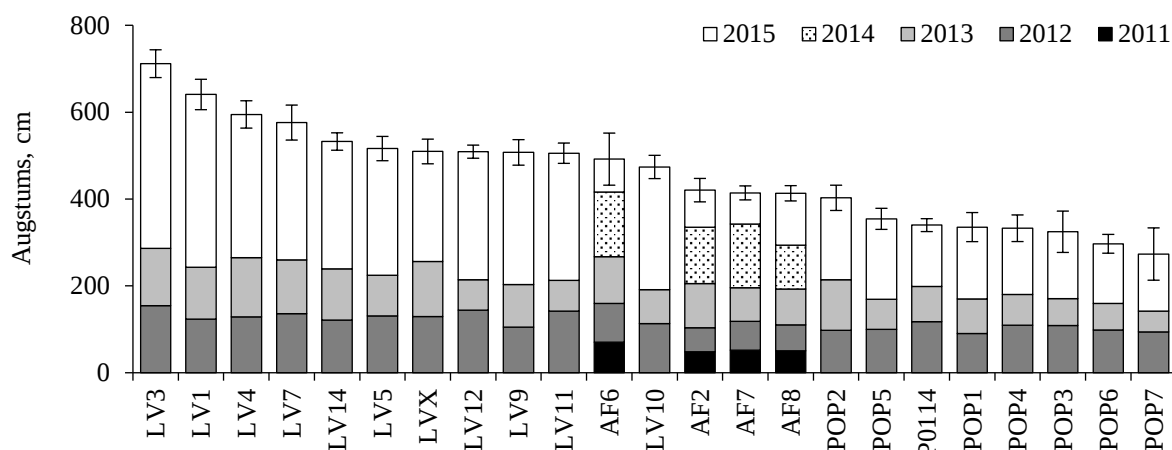


3.6. att. Vidējā augšanas intensitāte klonu grupām “īsie-max”, “īsie-average”; “īsie-min” (spraudeņu garums 30 cm) un “garie” (spraudeņu garums 50 cm) atkarībā no perioda vidējās gaisa temperatūras un nokrišņu summas

Lai gan korelācijas starp augšanas intensitāti un vērtētajiem meteoroloģiskajiem faktoriem nebija statistiski būtiskas, temperatūras ietekme uz augšanu izpaudās kā ievērojamas augšanas intensitātes izmaiņas starp periodiem ar straujām temperatūras izmaiņām (3.6. att.), t.i., starp trešo un ceturto, ceturto un piekto, kā arī sesto un septīto novērojumu periodu, kas saistītas ar papeļu spēju strauji reaģēt uz vides signāliem (Rohde et al., 2011).

3.3. Augstuma pieauguma starpgadu dinamika

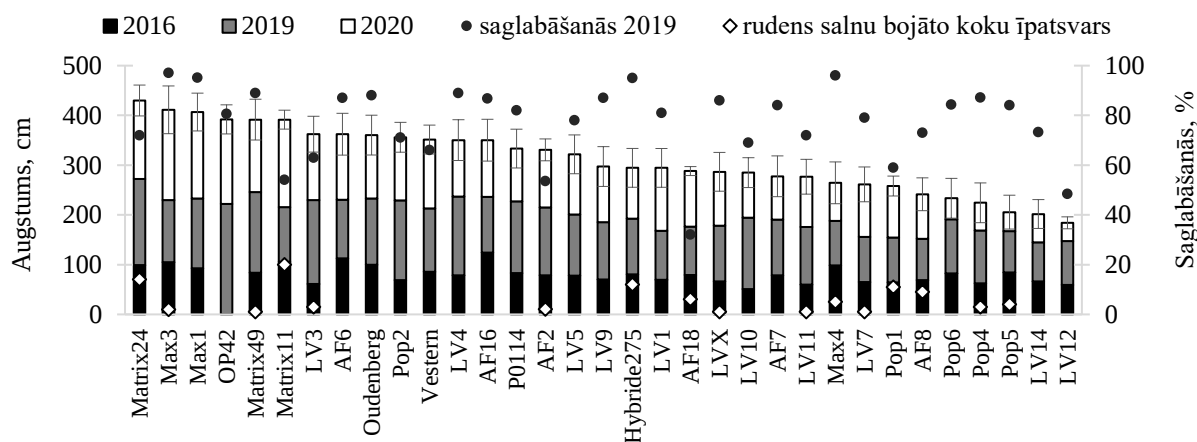
Skrīveru stādījumā divu gadu vecumā lielāko augstumu uzrādīja kloni AF6, LV3 un LV12: attiecīgi 159.5 ± 10.5 , 154.3 ± 14.2 un 143.9 ± 8.5 cm (3.7. att.). Konstatētas būtiskas atšķirības starp dažādu klonu augstumu ($p < 0.01$); būtiski lielāks koku augstums bija klonam AF6, bet būtiski mazāks – kloniem POP1, POP2 un POP6. Kaut arī pēc pirmās augšanas sezonas daudziem kloniem to dzinumus pilnībā bija nopostījuši briežu dzimtas dzīvnieki, tomēr vairumam no tiem divu gadu vecumā netika konstatētas būtiskas augstuma atšķirības no kloniem AF2, AF8 un AF7, ko dzīvnieki nebija bojājuši. Straujā ataugšana, iespējams, saistīta ar jau izveidotu sakņu sistēmu (Christersson, 1986), un attiecīgi veicina lielāku otrās rotācijas ražību, salīdzinot ar ražību stādījumu ierīkošanas gadā (Dillen et al., 2013).



Kloni

3.7. att. Klonu augstums viena (2011), divu (2012), trīs (2013), četru (2014) un piecu (2015; $\pm 95\%$ ticamības intervāls) gadu vecumā

Kalsnava-1 stādījumā klonu augstums viena gada vecumā bija no 51 ± 8 līdz 124 ± 5 cm dzīvajiem kokiem (V; 3.8. att.) un no 37 ± 9 līdz 159 ± 25 cm nebojātajiem kokiem. Konstatēta cieša, būtiska korelācija starp dzīvo un nebojāto koku augstumu ($\rho = 0.82$, $p < 0.001$). Atsevišķiem kloniem bojājumi ievērojami ietekmēja to augstumu: klonam AF16 nebojātie koki bija par 28% īsāki nekā dzīvie koki, savukārt klonam LV3 nebojātie koki bija par 39% garāki nekā dzīvie koki.



Clone

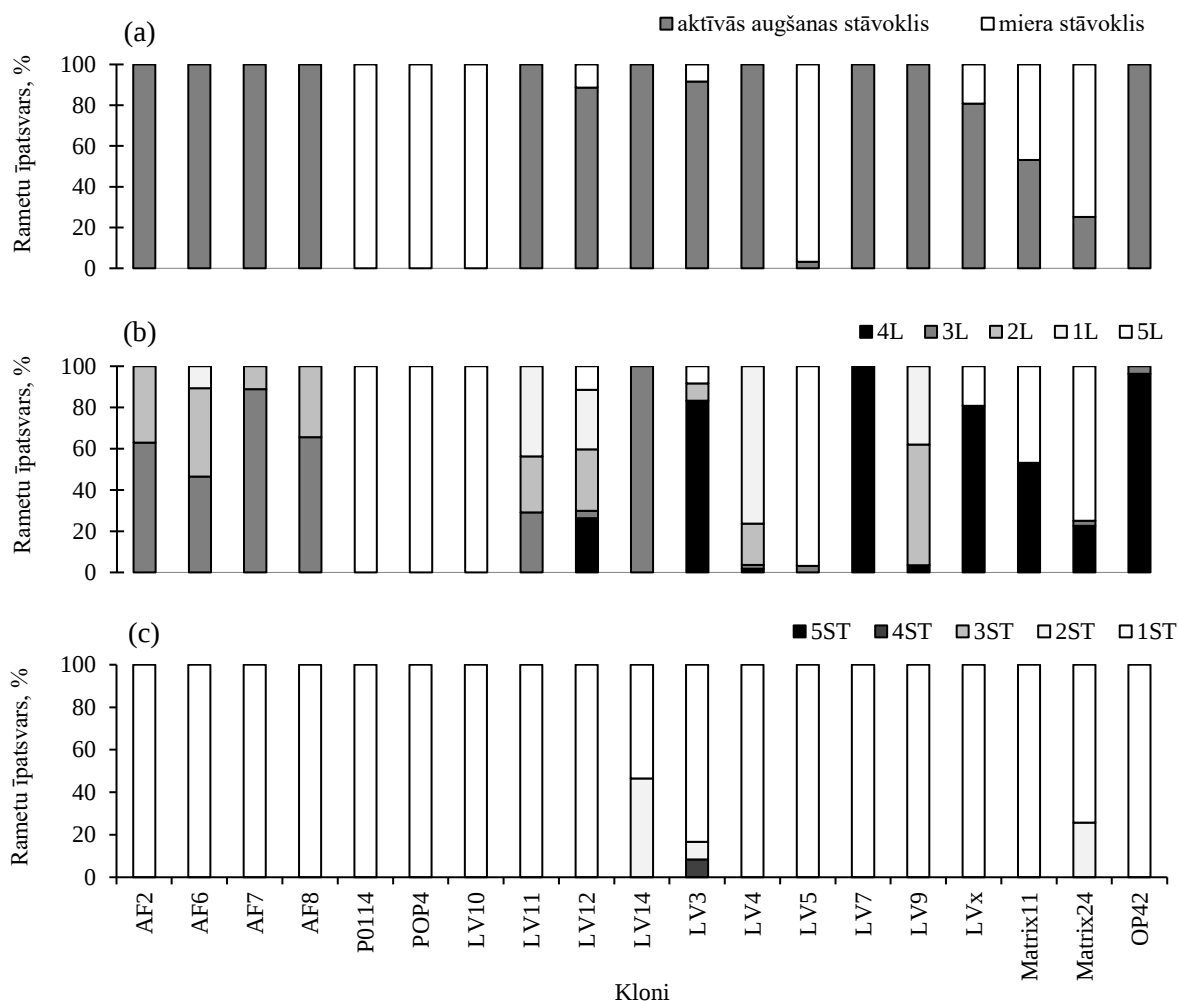
3.8. att. Klonu augstums viena (2016), trīs (2019) un četru (2020; $\pm 95\%$ ticamības intervāls) gadu vecumā un saglabāšanās (2019) trīs gadu vecumā

Abos stādījumos visos salīdzinātajos vecumos augstuma atšķirības starp kloniem bija būtiskas (visi $p < 0.001$; 3.7. un 3.8. att.), un tās palielinājās līdz ar vecumu. Skrīveru stādījumā divu gadu vecumā konstatēti 80 būtisko atšķirību pāri, trīs gadu vecumā šis skaits pieauga līdz 124, un četru gadu vecumā līdz 169, savukārt Kalsnava-1 stādījumā augstuma atšķirība starp augstāko un zemāko klonu pieauga no 2.4 reizēm viena gada vecumā līdz 2.9 reizēm trīs gadu vecumā. Kaut arī Kalsnava-1 stādījumā konstatēta būtiska korelācija starp klona augstuma mērījumiem viena un trīs gadu vecumā ($\rho = 0.61$, $p < 0.001$), tomēr ir kloni, kas ievērojami mainījuši savu rangu (3.9.a. att.). Tas saistīts ar atšķirīgu augšanas dinamiku, ko ietekmē klonu alometrija (Karačić et al., 2021) un spēja apsakņoties (Zalesny et al., 2005; Zhao et al., 2014). Četru gadu vecumā atšķirība starp augstāko un zemāko klonu bija nedaudz mazāka, un korelācija starp klona augstumu trīs un četru gadu vecumā – ciešāka nekā iepriekšējā periodā

Dārtveiktā līnija norāda noteiktā ranga pozīciju. Kļoni virs pārveiktās līnijas ir ieguvuši zemāku rangu, un kļoni zem

Starp kloniem, kas atradās aktīvās augšanas stāvoklī, lapu bojājumi konstatēti 81% koku

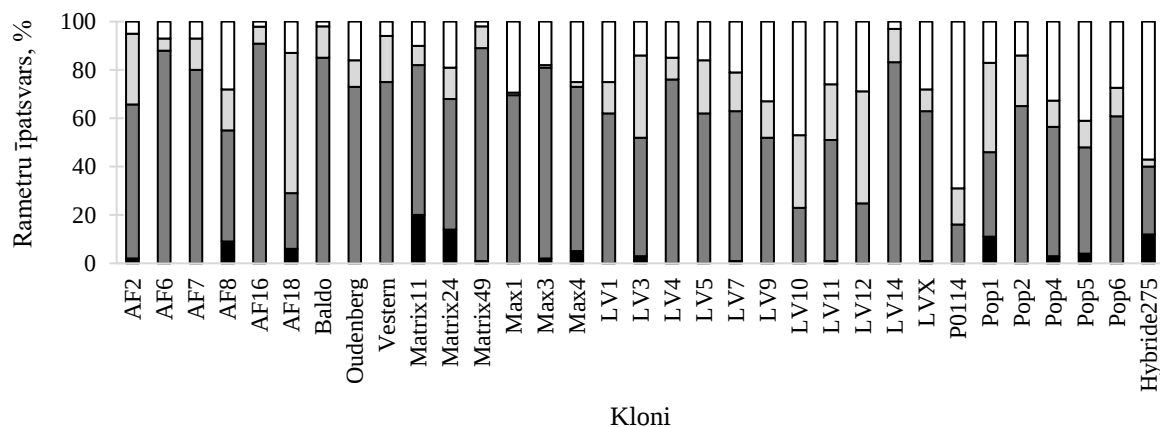
Stumbram salnu bojājumi konstatēti retāk nekā lapām (3.10.c att.). Starp miera stāvoklī



3.10 att. Rametu īpatsvars (a) fenoloģiskā stāvokļa, (b) lapu un (c) stumbra bojājumu vērtējuma ballēs

Lapu salnu bojājumu vērtējums: 1_L – bez vizuāliem bojājumiem, 2_L – atsevišķas bojātas lapas, 3_L – bojāta lielākā daļa tekošā gada dzinuma lapu, 4_L – bojāta lielākā daļa lapu, 5_L – koki miera stāvoklī. Stumbra salnu bojājumu vērtējums: 1_{ST} – bez vizuāliem bojājumiem, 2_{ST} – atsevišķi zaru bojājumi, 3_{ST} – atsevišķi stumbra bojājumi, 4_{ST} – bojāta vairāk nekā 1/3 daļa stumbra, 5_{ST} – pilnībā bojāts stumbrs

Kalsnava-1 stādījumā pēc 2016. gada rudens salnām (otrās augšanas sezonas sākumā) rudens salnu bojājumi novēroti 16 no 33 kloniem (3.11. att.). Vairumam klonu bojāti tikai atsevišķi rameti (bojāto koku īpatsvara mediāna bija 4%), bet kloni no krustojuma *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* bija jutīgāki pret rudens salnām nekā citi: klonam Hybride275 bojāti 12%, klonam Matrix24 – 14%, un klonam Matrix11 – 20% rametu.



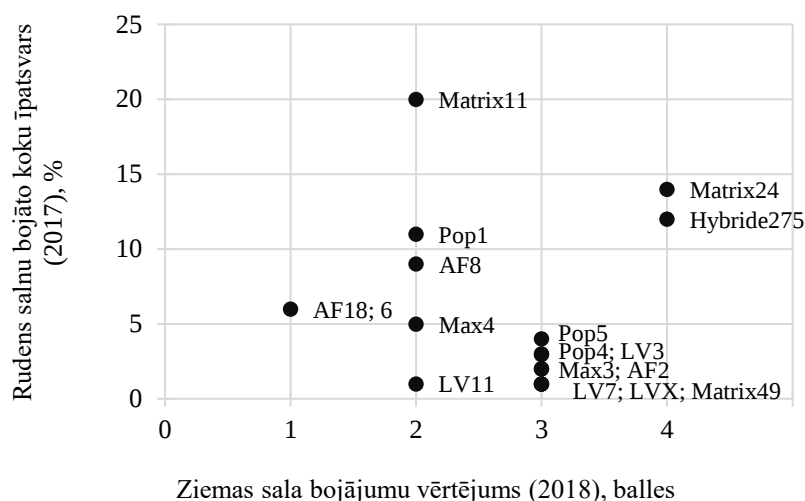
3.11. att. **Bojāto rāmetu īpatsvars pēc pirmās augšanas sezonas**

Salikto stabiņu krāsa: melns – rudens salnu bojātie koki, tumši pelēks – dzīvnieku bojātie koki, gaiši pelēks – bojā gājušie koki, balts – nebojātie koki

Kalsnava-2 stādījumā individuālu koku līmenī koku vecums būtiski ($p < 0.01$) ietekmēja salnu bojājumus lapām, bet ne stumbram ($p > 0.05$). Būtiskas ($p < 0.01$) atšķirības konstatētas arī starp kloniem vienādā vecumā. Kloniem LV4 un LV11 visi rāmeti atradās aktīvās augšanas stāvoklī neatkarīgi no vecuma. Arī klonam LV12 visi divgadīgie un vairums (87%) viengadīgo rāmetu bija aktīvās augšanas stāvoklī. Šiem trim kloniem konstatētas būtiskas ($p < 0.01$) lapu bojājumu atšķirības dažāda vecuma rāmetiem. Kloniem LV4 un LV11 visi divgadīgie rāmeti bija bez bojājumiem (balle 1_L), kamēr starp viengadīgajiem rāmetiem konstatēti gan koki ar bojātām atsevišķām lapām, gan ar bojātu lielāko daļu no tekošā dzinuma lapām (balles 2_L un 3_L). Savukārt klonam LV12 vairums divgadīgo rāmetu bija bojāta lielākā daļa lapu (balle 4_L), bet viengadīgajiem rāmetiem konstatēti mazāki bojājumi (balles 3_L un 4_L).

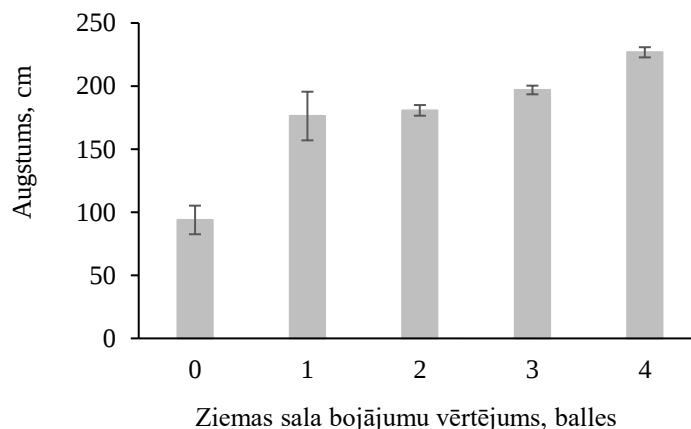
Rudens salnu bojājumiem nav konstatēta negatīva ietekme uz saglabāšanos ($\rho = 0.53$, $p < 0.001$). Koka augstumam nebija saistības ar salnu izraisītiem lapu bojājumiem ($p > 0.05$), bet abos Kalsnavas stādījumos novērota saistība starp koku augstumu un salnu izraisītiem stumbra bojājumiem. Kalsnava-2 stādījumā šī sakarība galvenokārt skaidrojama ar klonu LV14 un LV3 rādītājiem: relatīvi augsti kloni, kam stumbra bojājumi konstatēti attiecīgi 46.5% un 16.6% koku. Kalsnava-1 stādījumā augstums klonu līmenī nebija saistīts ar rudens salnu bojāto koku īpatsvaru ($\rho = 0.42$, $p > 0.05$), bet salnu bojātie koki bija būtiski ($p < 0.001$) augstāki nekā nebojātie koki: attiecīgi 105.3 ± 7.9 un 72.0 ± 2.5 cm. Ievērojamās augstuma atšķirības liecina, ka ātraudzīgāki koki ir jutīgāki pret salnām augšanas sezonas beigās, jo, izmantojot garāku veģetācijas periodu, neuzsāk laicīgi gatavoties miera periodam, t.sk. pazeminātai gaisa temperatūrai (Pliura et al., 2014).

Rudens salnu bojāto koku īpatsvaram nav konstatēta sakarība ar ziemas sala vērtējumu (3.12. att.). Pretēji novērotajam rudens salnu bojājumu gadījumā, kloniem ar ziemas sala bojājumiem bija mazāks augstums (3.13. att.) un zemāka saglabāšanās ($\rho = 0.47$, $p < 0.01$) nekā ziemas sala nebojātiem koki. Kloniem ar stipriem ziemas sala bojājumiem (vērtējuma balle 1) saglabāšanās trīs gadu vecumā bija 32%, vidēji stipri bojātiem kloniem (vērtējuma balle 2) – 72%, kloniem ar nelieliem bojājumiem (vērtējuma balle 3) – 78%, un vizuāli nebojātiem kloniem (vērtējuma balle 4) – 85%. Šī sakarība saistīta ar koksnes parametriem – ksilēmas vadaudu izmērs ir atkarīgs no koka dimensijām, un tas ietekmē koka sala noturību (Schreiber et al., 2013).



3.12. att. Rudens salnu (vērtēti 2017. gada pavasarī) bojāto koku īpatsvars un ziemas sala bojājumu vērtējums (vērtēti 2018. gada pavasarī)

Ziemas sala bojājumi vizuāli vērtēti piecu ballu skalā: 0 – gājis bojā, 1 – stipri bojāts, 2 – vidēji stipri bojāts, 3 – nelieli bojājumi, 4 – vizuāli nebojāts



3.13. att. Koku augstums trīs gadu vecumā atkarībā no ziemas sala bojājumu vērtējuma

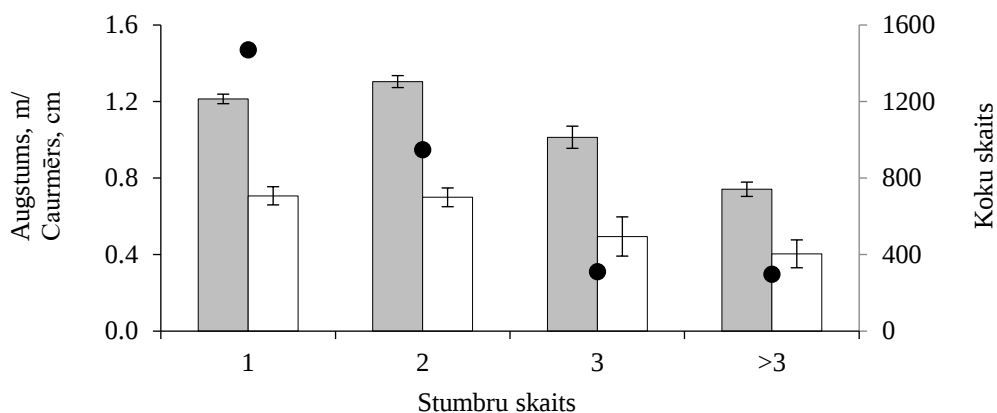
Ziemas sala bojājumi vizuāli vērtēti piecu ballu skalā: 0 – gājis bojā, 1 – stipri bojāts, 2 – vidēji stipri bojāts, 3 – nelieli bojājumi, 4 – vizuāli nebojāts

Rezultāti liecina par iespēju atlasīt ātraudzīgus klonus ar labu sala noturību (piemēram, kloni Max1, Max3 un Matrix49; 3.8. att.). Savukārt, citi kloni (piemēram, Matrix24 un Matrix11), kaut arī cietuši no rudens salnu izraisītiem bojājumiem, tomēr bija starp augstākajiem, t.i., to ātraudzība kompensēja nepietiekamo noturību pret salnām. Kloni no sugu krustojuma *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* arī citos pētījumos saglabājuši pozīciju starp augstākajiem kokiem, neskatoties uz ievērojamu galvenā dzinuma augstuma samazinājumu salnu dēļ (Gudynaitė-Franckevičienė et al., 2021). Kopumā vietēji atlasīto papeļu klonu sala noturība nenodrošina lielāku augstumu, salīdzinot ar salnās bojātajiem ātraudzīgākajiem introducētajiem kloniem.

3.5. Atvašu veidošana pēc rudens salnu bojājumiem

Pirms rudens salnu bojājumiem (pirmās augšanas sezonas beigās) stādījumā Vecumnieki-2 (2.1. att.) 49% koku bija izveidojuši vienu stumbru, 31% – divus, 10% – trīs un 10% – četrus vai vairāk stumbrus. Koku augstums bija no 10 līdz 251 cm (vidēji 118 ± 1.18 cm). Koki ar vienu stumbru bija būtiski ($p < 0.001$) augstāki nekā koki, kas bija

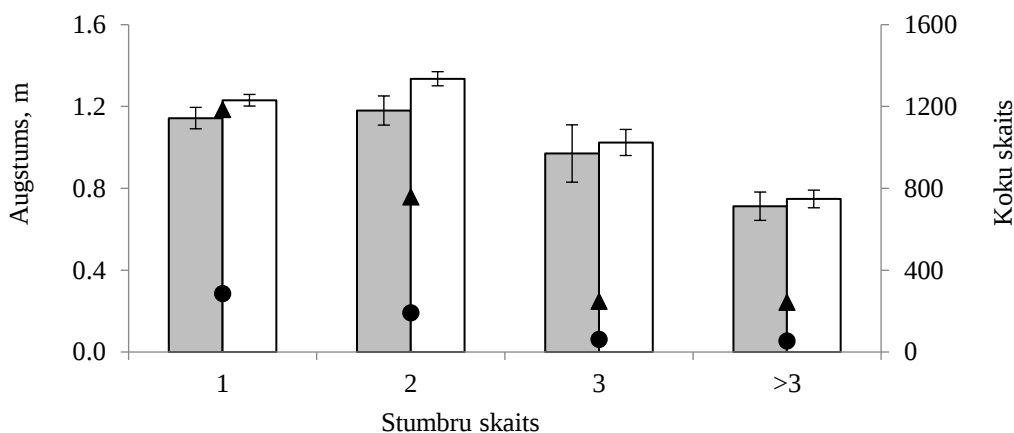
veidojuši vairāk nekā vienu stumbru, vidējais garākā stumbra augstums attiecīgi 121 ± 2.5 un 114 ± 2.6 cm (3.14. att.). Vidējais caurmērs pie sakņu koka bija 6.6 ± 0.32 mm, un koki ar lielāku stumbru skaitu bija tievāki (3.14. att.). Vidējais caurmērs kokiem ar vienu un diviem stumbriem bija līdzīgs ($p > 0.05$, attiecīgi 7.1 ± 0.48 un 7.0 ± 0.49 mm), un tie bija būtiski resnāki nekā koki ar trim vai vairāk stumbriem (attiecīgi 4.9 ± 1.0 un 4.0 ± 0.73 cm).



3.14. att. Vidējais augstums (pelēkie stabiņi), caurmērs (baltie stabiņi) pie sakņu kakla ($\pm 95\%$ ticamības intervāls) un koku skaits (punkti) atkarībā no koka stumbru skaita pēc vērtēšanas pirmās sezonas beigās

Pēc 2015. gada rudens salnām visiem kokiem konstatēta pilnībā nokaltusi virszemes daļa. Novērtējot atvašu veidošanos jūnijā, jaunu dzinumu augšana no augsnes virskārtas līmeņa konstatēta 19.6% koku. Pētījumi liecina, ka papeles labi veido atvases, un otrās rotācijas biomasa tipiski pārsniedz pirmās (ierīkošanas) rotācijas ražību, un virszemes daļas nogriešana neatstāj negatīvu ietekmi uz spraudņu saglabāšanos (Dillen et al., 2013; Laureysens et al., 2005, 2003; Verlinden et al., 2015). Tomēr jāņem vērā, ka šajā gadījumā virszemes biomasa nevis nogriezta, bet nokaltusi sala radītu bojājumu dēļ, kas, iespējams, ietekmējis arī sakņu sistēmas vitalitāti.

Neatkarīgi no iepriekšējās sezonas stumbru skaita koki, kas veidoja atvases, iepriekšējā augšanas sezonā bijuši nedaudz, tomēr statistiski būtiski ($p < 0.001$) zemāki nekā koki, kas neveidoja atvases, attiecīgi 110 ± 3.9 un 119 ± 2.0 cm (3.15. att.). Pētījumi liecina, ka tas saistāms ar koksnes strukturālajām īpašībām – koku augstums ir pozitīvi saistīts ar vadaudu diametru (Martínez-Cabrera et al., 2011), kas ir galvenais parametrs, kas nosaka koka jutību pret embolismu (Sperry and Sullivan, 1992). Augi visefektīvāk nodrošina vadītspēju, veidojot nelielu skaitu platu un garu vadaudu (Sperry et al., 2008), kamēr pret embolismu noturīgāki ir koki ar daudz smalkiem vadaudiem (Davis et al., 1999).



3.15. att. Vidējais augstums (stabiņi; $\pm 95\%$ ticamības intervāls) un skaits (simboli) kokiem ar atvasēm (pelēkie stabiņi un punkti) un bez atvasēm (baltie stabiņi un trijstūri) atkarībā no stumbru skaita iepriekšējā sezonā pēc pirmās vērtēšanas

Atvases veidojošo koku īpatsvars kokiem ar iepriekšējā sezonā novērotu vienu, diviem, trim vai vairāk stumbriem nebija būtiski atšķirīgs ($p = 0.89$), attiecīgi 19.4%, 20.1%, 20.0% un 18.2%. Būtiskas ($p = 0.006$) atvases veidojošo koku īpatsvara atšķirības konstatētas starp kokiem ar dzīvnieku radītiem bojājumiem (12.6%) un kokiem bez šādiem bojājumiem (20.1%). Lai gan atvases veidojošo koku īpatsvars būtiski ($p < 0.001$) atšķīrās starp rindām, nav konstatēta sakarība ($p > 0.90$) starp atvases veidojošo koku īpatsvaru rindā un vidējo augstumu tajā. Arī telpiskais atvases veidojošo koku izkārtojums bija nejaušs ($p > 0.05$).

Atkārtotajā novērtējumā jūlijā atvases veidojošo koku īpatsvars bija pieaudzis līdz 44.0%. Saistība ar iepriekšējā gada augstumu neatkarīgi no stumbru skaita saglabājās līdzīga kā jūnijā veiktajā novērtējumā: atvases veidojošie koki iepriekšējā sezonā bijuši būtiski ($p < 0.001$) zemāki nekā koki, kas atvases neveidoja, attiecīgi 111 ± 4.6 un 123 ± 4.5 cm.

SECINĀJUMI

1. Papeļu radiālo pieaugumu negatīvi ietekmē sausuma stress vasaras periodā, ko raksturo paaugstināta gaisa temperatūra un samazināts standartizētais nokrišņu evapotranspirācijas indekss. Tāpat to negatīvi ietekmē gaisa temperatūras amplitūda decembrī, ietekmējot/traucējot koka fizioloģiskos procesus miera stāvoklī. Klimata pārmaiņu kontekstā piemērotu klonu atlasē nepieciešams iekļaut klonus ar mazāku jutību pret šiem meteoroloģiskajiem faktoriem.
2. Augstuma pieaugumu būtiski ietekmē gan klons, gan spraudeņa garums. Garāki spraudeņi nodrošina straujāku sākotnējo augšanu: izmantojot 50 cm garus spraudeņus, koku augstums pirmā veģetācijas perioda beigās bija par 31–55% lielāks nekā izmantojot 30 cm garus spraudeņus. Ātraudzīgākajiem kloniem raksturīgs augstāks fenotipiskais plastiskums, t.i., mazāka jutība pret sezonas meteoroloģisko faktoru svārstībām.
3. Rudens salnu izraisīti galotnes bojājumi novēroti ātraudzīgākajiem kokiem (kokiem ar salnu bojājumiem augstums bija būtiski lielāks nekā kokiem bez šādiem bojājumiem). Ziemas sala bojājumi novēroti augšanā atpaliekošajiem kloniem, un saglabāšanās trīs gadu vecumā bija no 32% kloniem ar nozīmīgiem ziemas sala bojājumiem līdz 85% vizuāli nebojātiem kloniem.
4. Izšķiroši ir izmantot Latvijas klimatam piemērotus klonus. Koki ar salnu dēļ nokaltušu virszemes daļu var veidot atvases, bet to augšana uzsākas novēloti: jūnija sākumā atvases konstatētas 20% koku, un jūlija vidū – 44% koku.
5. Ir iespējams atlasīt ātraudzīgus klonus ar labu rudens salnu un ziemas sala noturību un saglabāšanos. Par to liecina no selekcija viedokļa pozitīvas vai nebūtiskas klonu vidējo vērtību (ģenētiskās) korelācijas starp ātraudzību un pārējām pazīmēm.

PRIEKŠLIKUMI

Stādījumu ierīkošanai rekomendējams izmantot klonus Matrix49, Max1 un Max3, kam raksturīga laba augšana un saglabāšanās, kā arī zems salnu un sala bojājumu risks. Papeļu stādījumus ieteicams ierīkot rudens salnu maz apdraudētās platībās.

Populus balsamifera × *P. laurifolia* klona tekošais vidēji periodiskais radiālais pieaugums kulminē 10 līdz 15 gadu vecumā un izlīdzinās pēc 25 līdz 30 gadu vecuma. Rekomendējams turpināt pētījumus optimāla aprites cikla garuma noteikšanai.

Atziņas par papeļu jutību pret sausuma stresu vasaras periodā, rudens salnām un ziemas salu izmantojamas sākotnējās klonu piemērotības pārbaudēs kontrolētos apstākļos.

PATEICĪBAS

Darbs izstrādāts pētījuma “Lēmumu pieņemšanas atbalsta instruments meža ražības paaugstināšanai, nodrošinot efektīvu un klimatam piemērotu selekcijas efekta pārnei” (ERAF Nr. 1.1.1.1/19/A/111) ietvaros. Atsevišķu zinātnisko rakstu sagatavošanai materiāls ievākts Latvijas Valsts mežzinātnes institūtā “Silava” Eiropas Reģionālās attīstības fonda finansētajos projektos “Ātraudzīgo koku sugu plantāciju ierīkošanas un apsaimniekošanas metožu izpēte un iegūstamās koksnes piemērotības novērtējums koksnes granulu ražošanai” (Nr. 2DP/2.1.1.1/13/APIA/VIAA/031) un “Daudzfunkcionālu lapu koku un enerģētisko augu plantāciju ierīkošanas un apsaimniekošanas modeļu izstrāde” (Nr. 2010/0268/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/118), Latvijas Zinātnes padomes finansētajā projektā “Meža koku adaptācijas potenciāls un tā paaugstināšanas iespējas” (Nr. 454/2012), SIA “Meža nozares kompetences centrs” finansētajos projektos “P2 Metodes selekcijas rezultātu efektīvai praktiskai izmantošanai un adaptācijas pārbaudēm lapu kokiem” (Nr. 1.2.1.1/16/A/009) un “Tehnoloģijas ģenētiskā ieguvuma efektīvai pārnesei stādu ražošanā un mežkopībā” (Nr. 1.2.1.1/18/A/004), kā arī Valsts pētījumu programmas projekta “Latvijas ekosistēmu vērtība un tās dinamika klimata ietekmē (EVIDEnT)” un Eiropas Savienības pētniecības un inovācijas atbalsta programmas “Horizon 2000” projekta “Lauksaimniecībai mazpiemērotas (marginālas) platības: apgrūtinājuma pārvēršana iespējā (MAGIC)” (Nr. 727698) ietvaros.

1. GENERAL DESCRIPTION

1.1. The topicality of the theme

Forestry is challenged by the global demand for sustainable renewable resources. Fast-growing tree species are highly productive and pose the potential to increase roundwood and energy wood production outside the forest land (Mola-Yudego et al., 2017). This helps to increase the sequestered CO₂ within the wood and replace the use of fossil resources, hence mitigating the climate change (Sulaiman et al., 2020) and reducing wood extraction pressure on natural forests (Pawson et al., 2013). In Northern Europe, poplars (*Populus* spp.) and their hybrids are among the most productive tree species (Tullus et al., 2013). In this region, a vast number of clones are introduced (Christersson, 2006; Karačić et al., 2003; Karačić and Weih, 2006) for biomass and roundwood production at the rotation length of 5 to 10 or 20 to 30 years, respectively (Tullus et al., 2012).

The productivity of poplar plantations is mainly determined by selected clones. The productivity of poplar plantations is mainly determined by the selected clones. Poplars have a wide genetic material basis and are easily propagated vegetatively, obtaining precise ‘copies’ of the mother tree with the desired characteristics. However, a limited number of clones are commercially used in Europe, mostly establishing monoclonal plantations. In Denmark (Stener and Westin, 2017) and Sweden (Karačić et al., 2021), the most popular clone is OP42, in Southern Europe—clone I-214 (FAO, 2016). Currently, an active poplar breeding program and 16 clones for commercial use are registered in Sweden (Stener and Westin, 2017), while other Northern European countries rely on planting material that is imported from more southern regions, mainly from Italy and Germany (Niemczyk et al., 2018).

Climate is among the main factors that determined tree growth (Lindner et al., 2010). Significant effect of meteorological factors on the growth of *Populus* clones is observed during the vegetation period (intra-annual) (Tullus et al., 2012; Yu et al., 2001) as well as in long term (inter-annual), including meteorological factors during dormancy. Crossing (hybridization) of species and hybrids alters genetically set adaptive traits (Gudynaitė-Franckevičienė et al., 2021). The high productivity of *Populus* hybrids is linked to their ability to use longer vegetation periods compared to their parental species (Yu et al., 2001), and most of the hybrids could be grown outside the natural range of their parental species (Sykes and Prentice, 1996). Clones that are transferred northward from their parental species origin should be suitable to an altered length of the vegetation period that can delay growth cessation (Ingvarsson et al., 2006; Kalcsits et al., 2009; Li et al., 2002), hence posing risk to frost damage (Christersson, 2006, 1996; Ferm et al., 1989; Ilstedt, 1996; Karačić et al., 2003; Pliura et al., 2014; Telenius, 1999). Although the highest risk of frost damage occurs during the transition from active growth to dormancy (Charrier et al., 2015), clones that are transferred northward should be also adapted to low temperatures and freeze-thaw cycles during the winter season (Schreiber et al., 2013). The insufficient suitability of the introduced species and hybrids to climate is among the main challenges for the wider use of poplars in Northern Europe (Gudynaitė-Franckevičienė et al., 2021; Karačić et al., 2021; Schreiber et al., 2013), underlying the importance of the clonal testing before their recommendations for commercial use (Pliura et al., 2014).

The effect of frost damage is complex—they decrease tree vitality and increase mortality (Cunti et al., 1991; Diamandis and Koukos, 1992; Pliura et al., 2014), reduces stem quality by increased formation of double leaders, crooks, and cracks (Christersson, 2006; Verwijst et al., 1996), and the dead tops reduce tree height. However, studies have shown that the productivity of the northward transferred species and hybrids outweighs potential frost-related risks (Pliura et al., 2014; Schreiber et al., 2013).

1.2. Aim of the thesis

The thesis aimed to identify poplar clones suitable for growing in Latvia.

1.3. Thesis objectives

Three research objectives have been advanced:

1. To characterize the sensitivity of poplar radial and height growth on meteorological factors.
2. To assess the effect of planting material and clone on poplar height growth.
3. To assess the effect of autumn and winter frost damage on poplar growth.

1.4. Thesis statements

Thesis statements:

1. The drought stress during the growing season negatively affects poplar radial growth.
2. The negative relation between tree height growth and frost damage differs for various clones.

1.5. Scientific novelty

For the first time, the retrospective analysis of the meteorological factors affecting the long-term growth of the poplar clones was analyzed in the European hemiboreal forest zone. For the first time in the Baltic States, the effect of autumn and winter frost damage on poplar survival and growth was assessed. For the first time in Latvia, new information of the largest set of poplar clones with different origins and the suitability of different lengths of the poplar cuttings were obtained.

2. MATERIALS AND METHODS

The study was done in two poplar stands near Auce and Šķēde, and five plantations on former agricultural land near Skrīveri, Vecumnieki, and Kalsnava (Fig. 2.1). In total, 36 clones with different origins from the sections *Aigeiros* and *Tacamahaca* are represented (Table 2.1). Clones from Italy, Belgium, Germany, Sweden, and the Netherlands were introduced into Latvia 10–15 years ago. Clones originating in Latvia are progenies (cuttings) from poplars that have remained from introduction around the 1960s (Saliņš, 1971). Hybride275 and OP42 are different synonyms for a single clone but are assessed as separate clones due to their different origins.

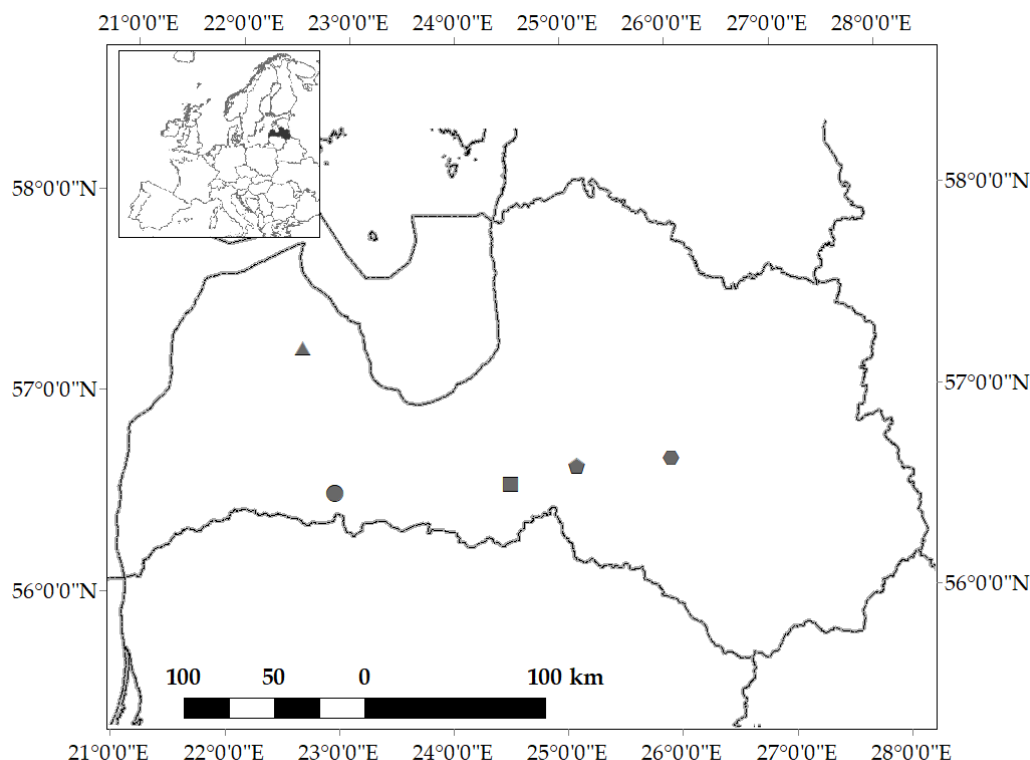


Fig. 2.1. Location of the study objects

●—Auce (I and II), ▲—Šķēde (I and II), ■—Vecumnieki (III and VI), ◆—Skrīveri (IV), and ●—Kalsnava (IV and V).
In Vecumnieki and Kalsnava, two separate plantations are studied

Table 2.1

Origin of the poplar clones

Clone	Publication						Breeder/ owner and country of origin	Species/ hybrid/ section
	I	II	III	IV	V	VI		
AF2				x	x		Franco Alasia, Italy	<i>P. × canadensis</i> ^a
AF6				x	x			<i>P. nigra</i> × <i>P. × generosa</i> ^b
AF7				x	x			<i>P. × generosa</i> ^b × <i>P. × canadensis</i> ^a
AF8				x	x			<i>P. × generosa</i> ^b × <i>P. trichocarpa</i>
AF16					x			<i>P. × canadensis</i> ^a
AF18					x			<i>P. × canadensis</i> ^a
Baldo			x		x		Unità di ricerca per le Produzioni Legnose fuori Foresta, Italy	<i>P. deltoides</i>

Continuation of table 2.1

Clone	Publication						Breeder/ owner and country of origin	Species/ hybrid/ section
	I	II	III	IV	V	VI		
Oudenberg			x		x		Eigen Vermogen van het Instituut Voor Natuur en Bosonderzoek, Belgium	<i>P. × canadensis</i> ^a
Vesten			x		x			
Matrix11				x	x		Nordwestdeutsche Forstlichen Versuchsanstalt, Germany	<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>
Matrix24			x	x	x			
Matrix49			x		x			
Max1			x		x		Germany	<i>P. nigra</i> × <i>P. maximowiczii</i>
Max3			x		x			
Max4					x			
LV1			x	x	x		Swedish Forestry Agency, registration no. KB-003, Sweden	<i>Tacamahara</i>
LV3			x	x	x			
LV4			x	x	x			
LV5				x	x			
LV7				x	x			
LV9				x	x			
LV10				x	x			
LV11				x	x			
LV12				x	x			
LV14				x	x			
LVX				x	x			
P0114	x	x		x	x		Progenies (cuttings) of poplars collected across Latvia, introduced (origin unknown) in 1960s (Salinš, 1971)	<i>P. balsamifera</i> × <i>P. laurifolia</i>
Pop1				x	x			
Pop2				x	x			unknown
Pop3				x				
Pop4				x	x			
Pop5				x	x			
Pop6				x	x			
Pop7				x				
Hybride275			x		x		North West Forest Research Station, Germany	<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>
OP42			x	x	x	x	The Netherland, initially bred by Oxford Paper Company (USA)	

^a *P. × canadensis*—*P. nigra* × *P. deltoides*; ^b *P. × generosa*—*P. deltoides* × *P. trichocarpa*.

2.1. Inter-annual dynamics of radial growth and its link to meteorological factors

2.1.1. Data collection

The link between inter-annual radial growth and meteorological factors was studied in two poplar hybrid *Populus balsamifera* L. × *P. laurifolia* Ledeb. stands on soils with normal moisture regime (site type *Oxalidosa*) near Auce (56° 31' N, 22° 56' E) and Šķēde (57° 14' N, 22° 37' E) (Fig. 2.1). According to stand inventory data, stand age was 62 and 64 years, respectively. The initial stand density in both stands was 5000 trees ha⁻¹, no thinning was done prior to the data collection.

We selected 12 and 10 visually healthy trees representing the diameter distribution of the stands in Auce and Šķēde, respectively. In the winter of 2013/2014, cross-section discs at a breast height of the trunk were collected from each tree. These disks were dried to an air-dry

state in the laboratory and gradually ground with sandpaper with grain per inch from P80 to P400. The ring width measurements were done using the Lintab 5 (RinnTECH, Germany, Heidelberg) system with an accuracy of 0.01 mm. Measurements were made in two opposite directions of the discs.

Meteorological data were obtained from the UEA Climatic Research Unit (Harris et al., 2014) network, located as close as possible (< 30 km) to the studied stands. The studied meteorological factors were:

1. Minimum, maximum, and average monthly air temperature, monthly temperature amplitude, monthly precipitation, and potential evapotranspiration (PET) for the period from January year preceding the ring width formation to September in the year of the tree-ring formation;
2. Average monthly air temperature and amount of precipitation, and standardized precipitation evapotranspiration indices (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010) for the period from July year preceding the ring width formation to September in the year of the tree-ring formation.

2.1.2. Statistical analysis

The validity and quality of the ring-width series within and between the stands were assessed visually and by statistical crossdating in the program COFECHA (Grissino-Mayer, 2001). Series that showed a low correlation ($r < 0.40$) with the total data set were discarded. A residual chronology of the tree ring series for each stand was calculated in the program ARSTAN (Cook and Holmes, 1986). Double detrending for removal of age- and competition-related data variation was applied. The effect of age was removed by a negative exponential function and the effect of competition was removed and by a cubic spline with a wavelength of 40 years or 48 years, retaining 50% of the original data variation. Mean sensitivity (SENS), mean inter-series correlations ($\bar{r}$), synchronicity (Gleichläufigkeit (GLK)), expressed population signal (EPS), first-grade autocorrelation (AC), and signal to noise ratio (SNR) indices (Wigley et al., 1984) were used to characterize the residual chronologies.

The period between 1965 and 2009 was analyzed. The effect of meteorological factors on radial growth was assessed for poplar hybrid, silver birch (*Betula pendula* Roth), Norway spruce (*Picea abies* H. Karst.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), black alder (*Alnus glutinosa* Gaertn.), European larch (*Larix decidua* Mill.), European beech (*Fagus sylvatica* L.), red oak (*Quercus rubra* L.), and hybrid aspen (*Populus tremuloides* Michx. $\times$ *P. tremula* L.). All species and hybrids were growing in stands on species-optimal sites.

The annual variability of the radial growth between species and stands was analyzed by principal component analysis (PCA) (Jolliffe, 1986), with residues chronologies used as samples and years as variables. The significance of the main principal components (PCs) was determined by a randomization test ('broken stick') with 10^3 iterations. The climatic signals captured by the PCs were determined by a bootstrapped (Johnson, 2001) Pearson correlation analysis between variable scores and climatic factors averaged for western, central, and eastern regions of Latvia. The significant meteorological factors were determined by bootstrapped Pearson correlation analysis. The statistical analysis was done in R 3.3.1 (R Core Team, 2020) using the package 'dplR' (Bunn, 2008).

2.2. The intra-annual height growth dynamics and its relation to meteorological factors within the vegetation season

2.2.1. Data collection

The growth dynamics of poplar clones and their relation to meteorological factors during the vegetation season were studied in the plantation in Vecumnieki (56° 34' N, 24° 31' E; Fig. 2.1). The plantation was established in the spring of 2016 in a fertile, drained peat soil with a pH level of 6. Unrooted cuttings with the length of 30 and 50 cm (hereinafter 'short' and 'long', respectively) were planted, leaving 3–5 cm above the ground. In total, 12 clones were represented (Table 2.2) in monoclonal rows in three replications with a distance between rows of 4 m and between trees in a row of 2 m.

Height was measured for 20 randomly selected ramets of each clone and cutting length group, with an average of 6 ramets per replication. Nine height measurements were performed with an average interval of 11 days between them (from 5 to 18 days). Height was measured from the ground level. About half of the ramets were damaged by deer and snails; only intact tree data were used for data analysis.

Table 2.2

The studied poplar clones

Clone	Number of ramets	Cutting length, cm
OP42	3	30
Max1	6	
Max3	7	
Matrix24	6	
Matrix49	7	
Hybride275	9	
LV1	3	
LV3	6	
LV4	6	
Baldo	7	30
	9	50
Oudenberg	8	30
	10	50
Vesten	7	50

For each tree, the average growth intensity (mm per day) for the period between measurements was calculated. For each clone and its cuttings length group, mean height and mean growth intensity was calculated. At the end of the observation period, 'short' clones were divided into three groups according to their height increase: (1) 'short-max'—Hybrid275, Oudenberg, (2) 'short-average'—Baldo, Max1, Max3, Matrix24, Matrix49, (3) 'short-min'—OP42, LV1, LV3, LV4. Only clones from Oudenberg and Vesten were included in the group of 'long' as clone Baldo was significantly ($p < 0.05$) shorter than them.

The mean hourly values of air temperature and precipitation sum were obtained from the nearest station of the Latvian Environment, Geology and Meteorology Center near Bauska (56° 22' N, 24° 13' E).

2.2.2. Statistical analysis

The differences in height growth and its dynamics between groups of cutting length groups and clones were assessed using one-way analysis of variance (ANOVA) and Tukey honest significance test. For each tree, height measurements were approximated by the Gompertz equation:

$$f(A) = \alpha \exp(-\beta \exp(-kA)), \quad (2.1)$$

where:

α – asymptote parameter;

β – displacement parameter;

k – maximum relative intensity;

A – day of measurements.

Differences among the Gompertz model parameters (α , β , k) were assessed by ANOVA. The link between maximum relative intensity and meteorological factors from June till September was assessed using Pearson's correlation analysis. Differences in maximum relative intensity and air temperature among the measurement periods were assessed by ANOVA. All tests were done at $\alpha = 0.05$. Mean values and their confidence intervals are shown. All calculations were done in R 3.3.1 (R Core Team, 2020).

2.3. Inter-annual height growth dynamics

2.3.1. Data collection

The inter-annual height growth dynamics were studied in plantations in Skrīveri (56° 39' N, 25° 7' E) and Kalsnava (56° 41' N, 25° 58' E) (Fig. 2.1). In Skrīveri, the plantation was established in 2011, using 23 poplar clones (Table 2.1). For each clone, at least 30 cuttings were planted in monoclonal rows with the distance between the rows 2.2 m and between trees 0.7 m.

The clone series AF was planted in three replications, all other clones in one or two replications that were evenly and randomly distributed in the field. After the first growing season all clones, except clones from the AF series, were browsed to the ground level. Height measurements were done after the second, third, and fifth growing season. For clone series AF, additional height measurements were done after the first and fourth growing season.

In Kalsnava, the plantation was established in spring 2016. In total, 34 poplar clones were represented. For each clone, 97 to 102 cuttings were planted in monoclonal rows with a distance between the rows of 3.5 m and between trees 0.5 m. The height of all living trees was measured after the first and third growing season, and the height of every second tree was measured after the fourth growing season.

2.3.2. Statistical analysis

The data normality was assessed using the Shapiro-Wilk test. The differences in height among the clones were assessed by ANOVA or Kruskal-Wallis test that was followed by Dunn multiple comparison post-hoc test. All tests were done at $\alpha = 0.05$. Mean values and their confidence intervals are shown. All calculations were done in R 4.0.2 (R Core Team, 2020).

2.4. Autumn and winter frost damage and their link to tree height growth

2.4.1. Data collection

Autumn frost damage was studied in both plantations in Kalsnava, and winter frost damage was studied in one of the plantations in Kalsnava (Fig. 2.1). One of the plantations was established in 2014 and 2015, using cuttings from the Skrīveri plantation. It was established in a flat open field with monoclonal rows with no replications. Early autumn frost was observed in 2015 (detailed meteorological information, see in chapter 2.5.1). Frost damage was assessed for 19 one- and two-year-old clones (Table 2.1). The relation between tree height and frost damage was assessed for 16 clones that overlapped in Kalsnava and Skrīveri plantations. In the other Kalsnava plantation autumn frost damage was observed after the first growing season in spring 2017.

Leaf and stem damage was visually assessed at the five-grade scale (Fig. 2.2) on the 15th of October. The status of active growth or dormancy was determined by bud phenology. In the other Kalsnava plantation, the number of autumn frost-damaged trees per clone was counted.

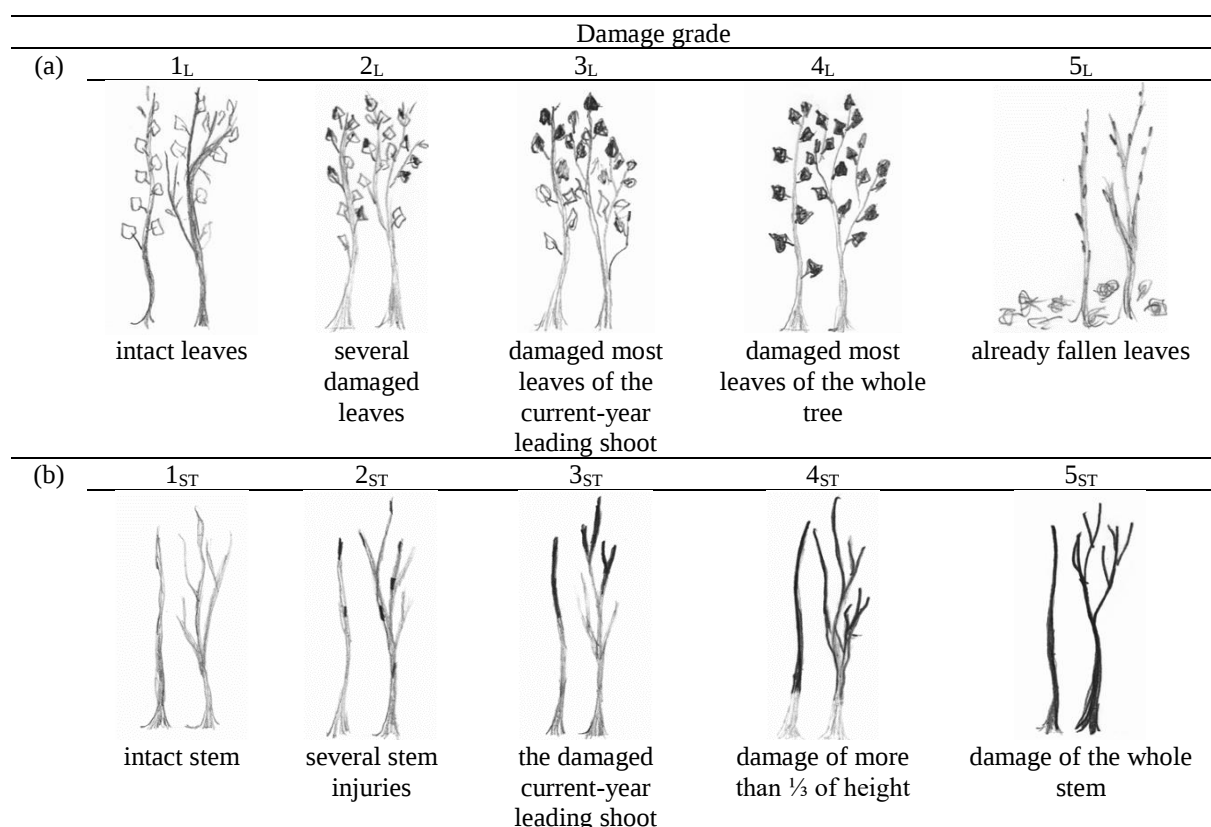


Fig. 2.2. The schematic visualization of (a) leaf and (b) stem damage grades (drawn by D. Lazdiņa)

Winter frost damage was observed in one of the plantations in Kalsnava after the second growing season in spring 2018. Clones were visually evaluated on a five-scale grade: 0—dead, 1—severe damage, 2—mild damage, tree recovers, 3—minor damage, and 4—no visible winter frost damage.

2.4.2. Statistical analysis

The effect of tree age on its phenotypical state and autumn frost damage, as well as the effect of leaf and stem damage grade on tree height, were assessed using a generalized linear

model. The effect of tree age on autumn frost damage was assessed for 10 clones at individual tree levels. The differences in the number of trees among the autumn frost leaf damage for one- and two-year-old ramets of clones LV4, LV11, and LV12 were assessed by Chi-squared test.

The differences in height of the damaged and undamaged trees at the clone level were done by the Mann-Whitney U test. The link between tree and clone growth parameters and autumn and winter frost damage was assessed by Spearman's correlation analysis. All tests were done at $\alpha = 0.05$. Mean values and their confidence intervals are shown. All calculations were done in R 4.0.2 (R Core Team, 2020).

2.5. Sprouting after autumn frost damage

2.5.1. Data collection

Sprouting after autumn frost damage was observed in the plantation in Vecumnieki (Fig. 2.1). The plantation was established on drained peat soil (pH 6) in spring 2015 using 30 cm long cuttings from clone OP42 that were collected from mother-tree growing in the western part of Latvia. Trees were planted with a distance between rows 4 m and between trees 2 m. Weed control was done by plowing and applying herbicide in the autumn before planting and by manual weed control in a 25 cm radius around the trees during the vegetation season.

The autumn frost was observed in autumn 2015. Meteorological data were measured in the field once per hour: (1) air temperature 20 cm above the ground, (2) soil temperature at the ground level, and (3) in the depth of 20 cm (Fig. 2.3). The negative air temperature was first registered on September 11, and periodically (nine out of 22 days) recurred until October 6. During this period, the longest periods of negative temperature were observed on September 27 (nine hours, minimal temperature -2°C) and September 30 (seven hours, minimal temperature -3°C). Frost enhances on October 7th: negative air temperature persisted for 14 hours and reached -12.5°C . Minimal air temperature from -9.5 to -13.5°C with the duration from 11 to 16 hours continued for 10 days. Similar conditions occurred in the period from 28th to 31st October. In both periods, the negative temperature was recorded also at the ground level. The negative temperature at the ground level was first recorded on October 8, and it persisted for two hours. On October 13, negative temperature persisted for seven hours but on October 30 and 31—15 hours (minimal temperature -2°C). In the depth of 20 cm, negative soil temperature was not observed.

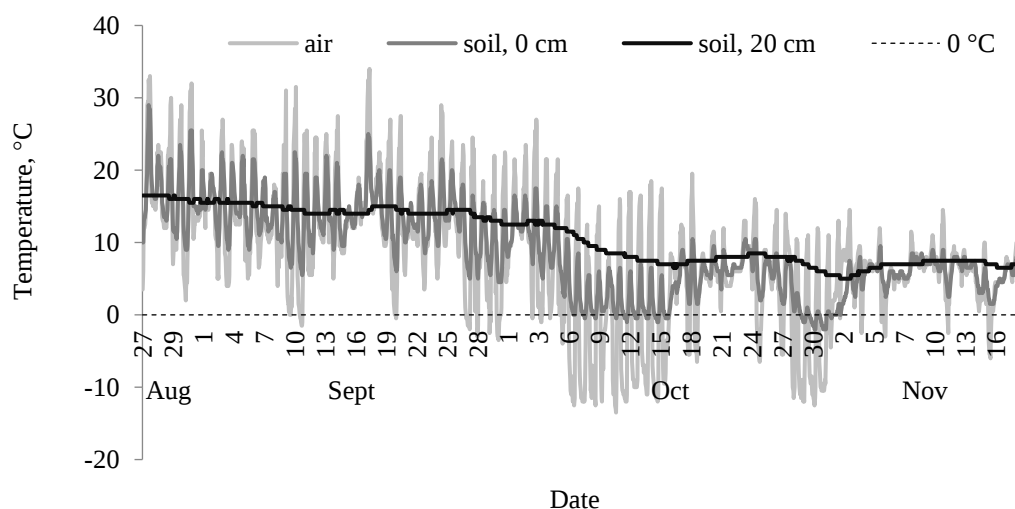


Fig. 2.3. Soil temperature 20 cm above the ground and soil temperature at the ground level (0 cm) and in the depth of 20 cm during the period of 27.08.2015–18.11.2015

The long-term meteorological records for the studied period were obtained from the nearest Latvian Environment, Geology, and Meteorology Centre station near Bauska (56° 22' N, 24° 13' E). In the long-term data, the negative mean minimum air temperature was first observed on November 11 (Fig. 2.4).

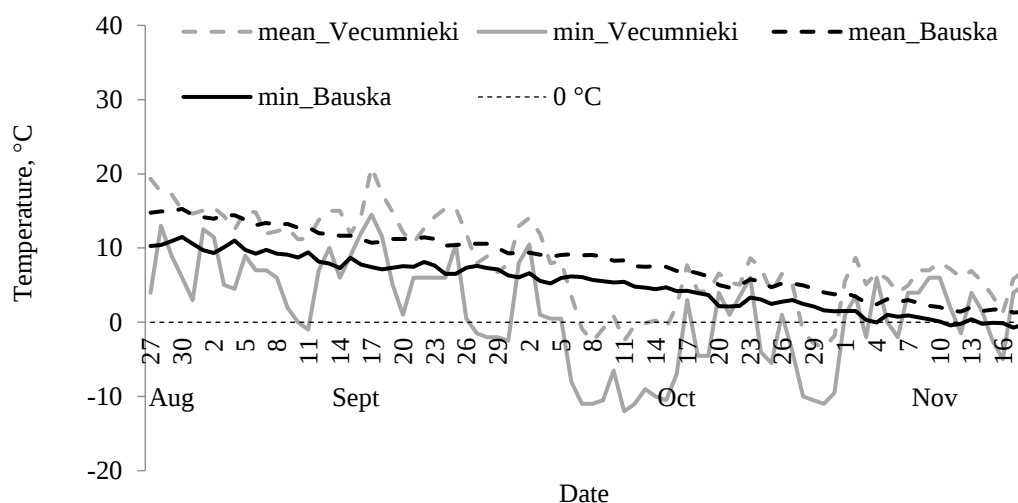


Fig. 2.4. Air temperature in Vecumnieki plantation and the long-term records from the nearest Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre station (Bauska) during the period of 27.08.2015–18.11.2015

‘Mean_Vecumnieki’—mean diurnal temperature, calculated from hourly measurements; ‘Min_Vecumnieki’—mean minimal diurnal temperature; ‘Mean_Bauska’—mean diurnal temperature for a 30-year period; ‘Min_Bauska’—mean minimal diurnal temperature for a 30-year period

In June of the next growing season, all trees had completely withered above-ground parts (stems), and part of the trees was sprouting from the ground level. For each tree, height, diameter at the root collar, and length of the longest branch were measured for the longest stem, and the number of stems and branches (longer than 5 cm) was counted. For each tree presence (0/1) of the browsing damage and sprouts was noted. In total, 3025 trees were measured. The repeated assessment was done in July for 1018 trees.

2.5.2. Statistical analysis

The data normality was assessed using the Shapiro-Wilk test. The differences in height, diameter, and length of branches for trees with one, two, three, and more than three stems were assessed using ANOVA. Chi-squared test was used to assess (1) differences in the number of branches and proportion of sprouting and browsed trees among trees with the different number of stems, (2) differences in the proportion of sprouting trees between browsed and undamaged trees, and (3) differences in the proportion of sprouting trees among the rows. Pearson’s correlation analysis was used to assess the relationship between the proportion of sprouting trees and mean tree height in the row. Spearman’s correlation analysis was used to assess the relation between (1) number of branches and stems, (2) length and the number of branches, (3) and length of branches and number of stems. The spatial autocorrelation was assessed using Moran’s I test. All tests were done at $\alpha = 0.05$. Mean values and their confidence intervals are shown.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Inter-annual radial growth and its relation to meteorological factors

The obtained ring-width time-series showed good agreement with mean inter-series correlation 0.42–0.51 and GLK 0.68–0.69, indicating a strongly uniform effect of the environmental factors on poplar radial growth. This was supported by tight ($r > 0.75$) relation between chronologies of stands. In both stands, growth dynamics were similar—mean relative radial increment peaks at the age of 10 to 15 years and flattens out after the age of 25 to 30 years (Fig. 3.1).

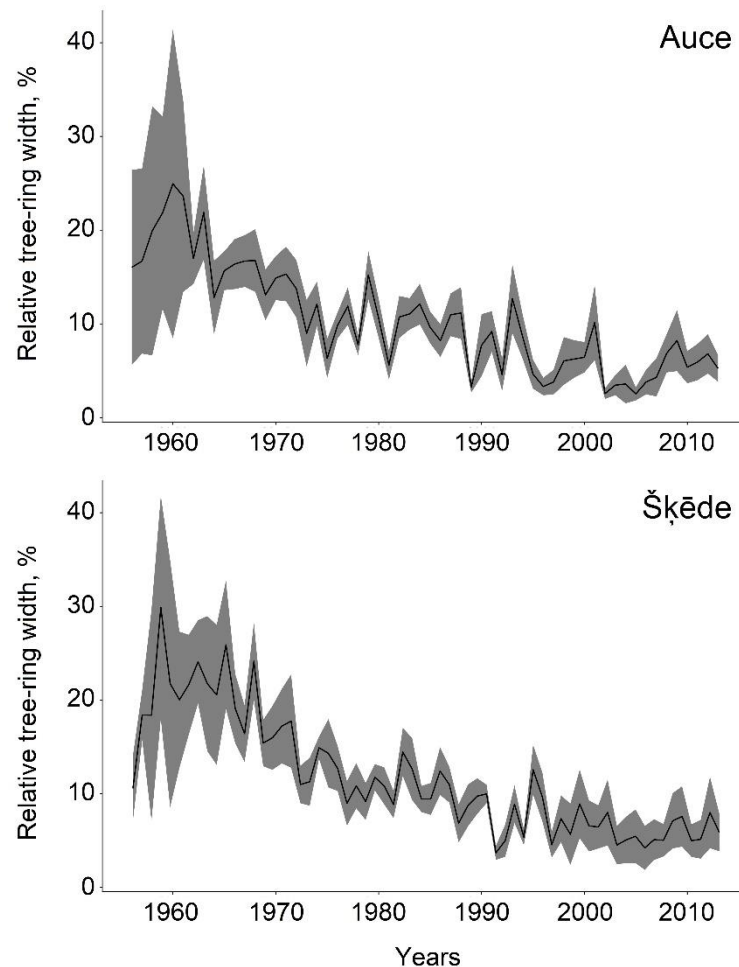


Fig. 3.1. Mean relative tree-ring width of the poplar hybrid in Auce and Šķēde

The high signal intensity indicator SNR (6.17–10.77) suggests homogenous conditions within the stand and uniform genetic material (single clone represented). The relatively large differences in SNR indicate climatic differences between the stands that presumably are related to more continental conditions in Auce. The population signal (EPS) values were sufficiently high (0.86–0.92) to characterize factors that affect tree-ring width in both analyzed stands (Wigley et al., 1984). The effect of external factors was expressed by notable differences in tree-ring width among the years, sensitivity coefficient reaching values of 0.40–0.42. Moderate to high autocorrelation (0.56–0.74) indicates the effect of the previous growth on the formation of the current-year tree-ring width. The time series had several sudden changes (decrease in tree-ring width) in 1975, 1989, and 2002, that was caused by low temperature on autumn in a year before the formation of the tree-ring width that was followed by high mean temperature in a period between December before the tree-ring formation to August on the year of the tree-ring formation.

The residual chronologies had a significant correlation with 12 out of 132 assessed factors, and eight of them were significant in both stands. Each factor explained a relatively small part of the variation with correlation values not exceeding 0.35 as the ring-width is affected by a large number of factors that mutually interact. The low correlation values presumably are also affected by temporal changes in the significance of the factors (Büntgen et al., 2006; Cook et al., 1992).

Poplar hybrid showed sensitivity to a temperature at the end of the growing season (July to September) both on the year of tree-ring formation and a year prior to it. In Šķēde, tree-ring width was also affected by temperature in February, March, and June, whereas in Auce—a temperature range in September. The effect of meteorological factors in a year prior to tree-ring formation is linked to the accumulation of nutrients (Barbaroux and Bréda, 2002; Pallardy, 2008) that occurs at the end of the growing season, and is depleted in the following spring (Jones et al., 2004; Landhäusser and Liefers, 2003; Regier et al., 2010). The increased temperature increases evapotranspiration (Trajkovic, 2005) that can cause short-term water deficiency and drought stress (Pallardy, 2008). In such conditions, the accumulation of nutrients is hampered (Regier et al., 2009), presumably, explaining the observed relation between tree-ring width and PET in August (Fig. 3.2). Moreover, hot summers typically have decreased amount of precipitation. Poplars, similarly to other fast-growing tree species, are characterized by intense evapotranspiration (Perry et al., 2001) that increases water deficit in soil, hence, reinforcing the effect of drought stress.

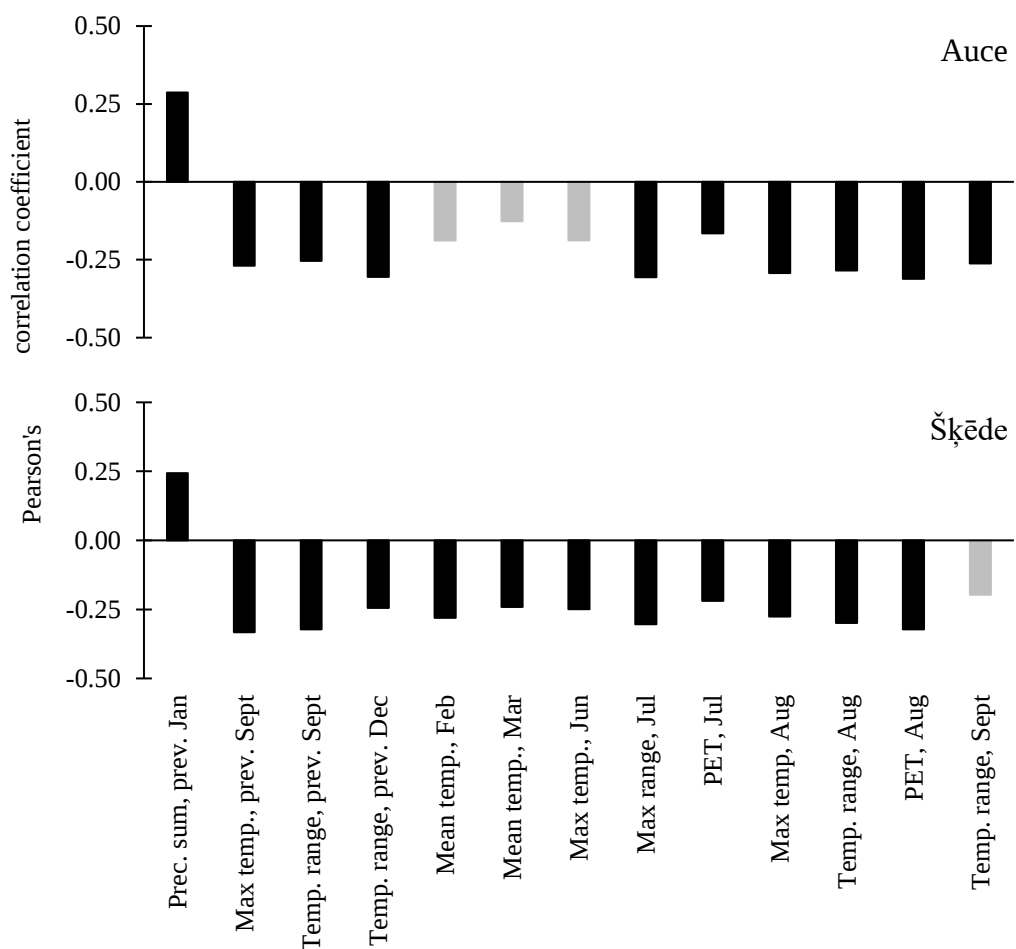


Fig. 3.2. Significant Pearson correlation coefficients between climatic factors and residual chronologies of the TRW of hybrid poplar in Auce and Šķēde

Factors that were not significant in either of the stands are colored grey. Collinear factors have been omitted.
Prec.—precipitation, prev.—previous year, temp.—temperature, PET—potential evapotranspiration

The effect of the current year meteorological factors is linked to nutrient use during the growing season (Deslauriers et al., 2009) that affects the wood formation (Lebourgeois et al., 2005). The increased temperature might hamper photosynthesis (Haldimann and Feller, 2004) and cambium activity during xylogenesis (Oberhuber and Gruber, 2010), whereas the negative effect of temperature range during the growing season is linked to the adaption of biochemical and physiological processes to these sudden changes (Pallardy, 2008).

The negative relation between radial growth and temperature in September is linked to the transition from active growth to dormancy when poplars are sensitive to frost. The negative effect of temperature on December, when trees are dormant, is linked to frost dehardening as a response to thaw events (Cox and Stushnoff, 2001) that poses trees to the more intense effect of frost when the temperature drops again (Hänninen, 2006). Hampered dormancy might increase depletion of nutrient reserves due to increased respiration (Ögren et al., 1997). Precipitation (typically snow) sum on January in a year prior to tree-ring formation was the only factor that had a positive effect on radial growth. A thick layer of snow ensures better thermoinsulation, reducing the depth of the frozen soil and temperature changes in soil (Hardy et al., 2001), hence reducing root mortality (Tierney et al., 2001) and positively affecting water uptake.

The first three principal components were significant ($p < 0.01$) and together explained 32.1% of the total data variation (Fig. 3.3). The first principal component (PC1) was related to the length of the vegetation period and water availability during the active growth and was expressed as significant correlations with temperature on September in a year prior to tree-ring formation ($r = 0.36$) and precipitation sum on June ($r = -0.33$). The second principal component indicated the effect of temperature and correlated with temperature on the current year February and March ($r = 0.38$ and $r = 0.55$, respectively) and on the previous year July ($r = 0.33$). The third principal component (PC3) was related to tree reaction on water deficit in the middle of summer and correlated with temperature, precipitation sum, and SPEI in July in a year prior to tree-ring formation ($r = 0.32$, $r = -0.39$, and $r = -0.30$ respectively).

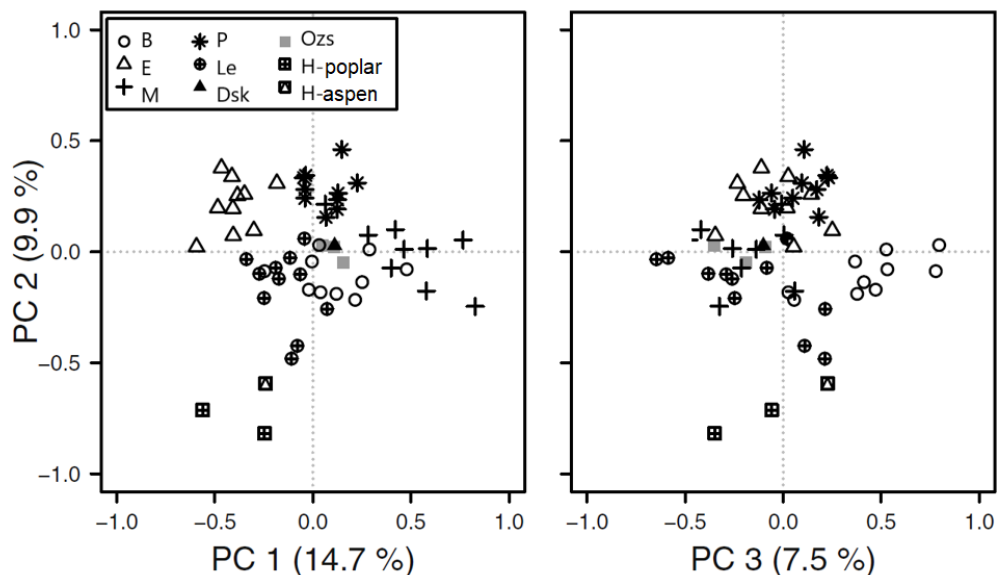


Fig. 3.3. The distribution of the residual chronologies according to the first three principal components (PC1, PC2, and PC3) was calculated for the tree-ring chronologies for the period 1965–2009

On the axes, the numbers in parentheses show the percentage of explained variance (%). B—*Betula pendula* Roth, E—*Picea abies* H. Karst., M—*Alnus glutinosa* Gaertn., P—*Pinus sylvestris* L., Le—*Larix decidua* Mill., Dsk—*Fagus sylvatica* L., Ozs—*Quercus rubra* L., H-poplar—*Populus balsamifera* L. × *P. laurifolia* Ledeb., H-aspen—*Populus tremuloides* Michx. × *P. tremula* L.

The distribution according to the first and second, as well as the second and third principal components showed grouping by species (Fig. 3.3), indicating different sensitivity to meteorological factors of the studied tree species. In both cases, the poplar chronologies were located separately, suggesting different features of tree-ring width variation. Presumably, this is related to the effect of heterosis, i.e. pronounced characteristics of the parental species and their combination, causing the specific reaction to the environment (Li et al., 1998).

3.2. Intra-annual height dynamics and its relation to meteorological factors

Tree height at the time of the first measurement was reached 4.0 ± 1.6 cm. Clones OP42 and ‘short’ Baldo were significantly ($p < 0.05$) shorter (1.6 and 1.8 cm, respectively), whereas clones ‘short’ Oudenberg and ‘long’ Vesten and Oudenberg—significantly longer (11.8, 12.1, and 14.2 cm) than plantation mean height.

Mean tree height at the end of the growing season was 81.0 ± 6.8 cm. Mean height significantly ($p < 0.001$) differed among the clones and was from 32 to 132 cm (Fig. 3.4). The mean height of the ‘short’ clones was 69.2 ± 6.9 cm. Clones Hybride275, Oudenberg, and Matrix49 were significantly ($p < 0.05$) higher but clones OP42 and LV1 were significantly shorter than the plantation mean. The mean height for clones with ‘long’ cuttings was 107.9 ± 13.4 cm. Clones Oudenberg and Venten were significantly ($p < 0.05$) longer than clone Baldo: height at the end of the first growing season was 131.8, 118.3, 73.3 cm, respectively.

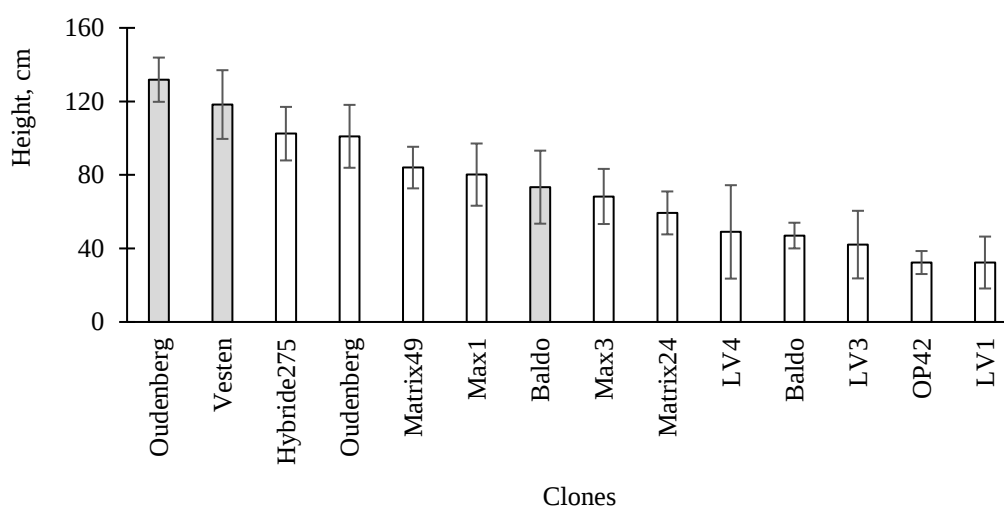


Fig. 3.4. Mean height of the poplar clones at the end of the first growing season ($\pm$ confidence interval)

White bars indicate clones with ‘short’ (30 cm) cuttings, grey bars indicate clones with ‘long’ (50 cm) cuttings

For clones Oudenberg and Baldo, height was significantly ($p < 0.001$) affected by clone and length of the cuttings but not the interaction between these factors ($p = 0.74$; $R^2 = 0.75$). For clone Oudenberg, the height of the ramets with ‘long’ cuttings was 31% larger than for ramets with ‘short’ cuttings: 132 ± 12.0 cm and 101 ± 17.1 cm, respectively. For clone Baldo, the height of the ramets with ‘long’ cuttings was 55% larger than for ramets with ‘short’ cuttings: 73 ± 20.0 cm and 47 ± 7.0 cm, respectively. The results indicate the superiority of longer cuttings for height growth that is in accordance with other studies (Burgess et al., 1990; Camp et al., 2012; Rossi, 1999) and, presumably, is related to larger nutrient reserves (Buhler et al., 1998; Marino and Gross, 1998), ensuring advantage for their growth. For instance, in a study of 20 and 40 cm long cuttings of Max4, stem and leaf biomass after the first growing season

was 46.6 ± 3.2 and 47.7 ± 3.3 g dry matter, respectively, for ramets of the long cuttings and 39.5 ± 2.8 and 33.1 ± 1.6 g dry matter, respectively, for ramets of the short cuttings (Vigl and Rewald, 2014). The total biomass after the first growing season is significantly positively correlated with initial weight of the cutting (Vigl and Rewald, 2014).

The mean growth intensity in all measurement periods was from 10 to 15 mm per day. For some clones (e.g. OP42, LV1, and LV3) growth intensity did not reach 10 mm per day whereas clones ‘long’ Vesten and ‘short’ Oudenberg and Hybride275 exceeded height growth of 15 mm per day, suggesting different height growth strategies (Devine et al., 2010).

The Gompertz model asymptote parameter (maximal value) was differed significantly ($p < 0.05$) among the groups of ‘short’ clones, although the timing of the growth onset was similar (Fig. 3.5). This led to significant ($p < 0.05$) differences in growth intensity parameter k between clone groups ‘short-min’ and ‘short-max’. These differences indicate that clones with the largest height at the end of the growing season had more rapid growth at the beginning of July, and could be linked to genetically determined differences in leaf flush (Jansons et al., 2014). No significant differences were found between groups ‘long’ and ‘short-max’ for all model parameters (α , β , k).

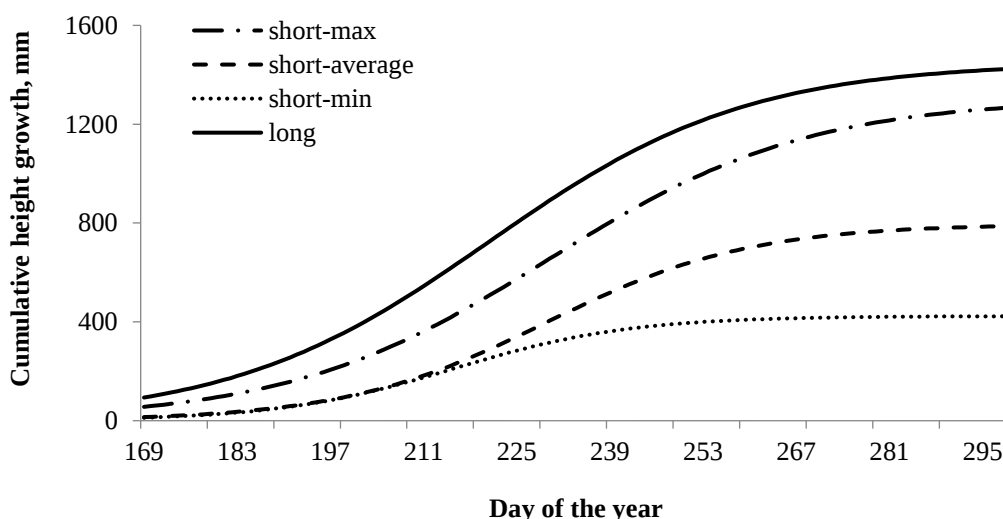


Fig. 3.5. Gompertz model for groups of poplar clones ‘short-max’, ‘short -average’; ‘short -min’ (cutting length 30 cm), and ‘long’ (cutting length 50 cm)

Height growth intensity had moderately tight ($p > 0.05$, $r = 0.60$) positive correlation with precipitation sum but weak ($p > 0.05$, $r = 0.17$) correlation with temperature (Fig. 3.6). Similarly, Chhin (2010) has observed more pronounced effect of precipitation of poplar growth compared to temperature parameters. During the second measurement period (30.06–10.07) mean temperature decreased from 19.3 to 17.6 °C, causing a decrease of growth intensity by 2.2 mm per day. Maximal height increment intensity was 12.7 mm per day, and it occurred at the end of July (22.07–08.08) in a period with the maximum precipitation sum (108 mm). The growth intensity during the fourth measurement period showed notable differences among the clones and was from 4.6 mm per day for clone LV1 to 18.5 mm per day for clone ‘long’ Oudenberg.

Atypical changes in temperature and precipitation sum were observed in the middle of August (09.08–17.08) when these values were reduced to 14.9 °C and 60 mm, respectively, and caused growth reduction by 10.2 mm per day on average. Clones that were the highest at the end of the growing season (‘long’ Vesten and Oudenberg) continued their growth during this period, whereas other clones reduced growth (Fig. 3.5). in the next measurement period (18.08–29.08) temperature again increased but the growth intensity remained at the same level

(10.3 mm per day). During the following measurement periods, temperature, precipitation sum, and growth intensity decreased.

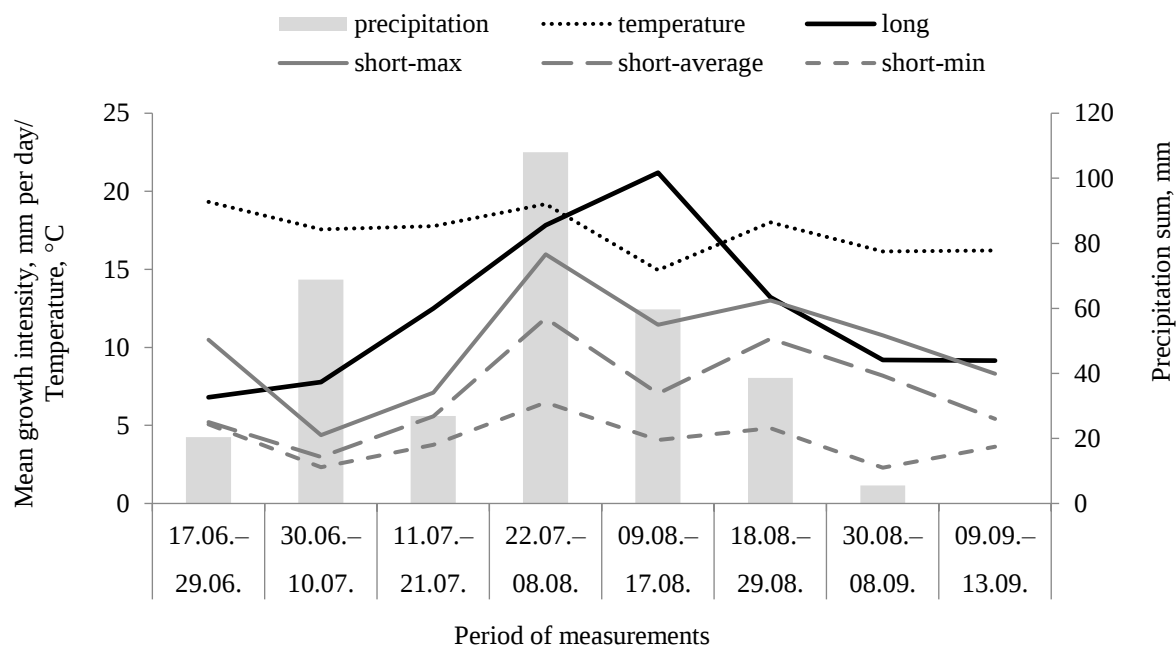


Fig. 3.6. Mean growth intensity for clone groups ‘short-max’, ‘short-average’; ‘short-min’ (cutting length 30 cm), and ‘long’ (cutting length 50 cm) in relation to mean temperature and precipitation sum

Although the correlations between growth intensity and studied meteorological factors were not significant, the effect of temperature was expressed as notable changes in growth intensity between periods with sudden changes of temperature (Fig. 3.6), i.e. between the third and fourth, the fourth and fifth, and sixth and seventh measurement periods.

3.3. Inter-annual height growth dynamics

In Skriveri the highest clones at the age of two years were AF6, LV3, and LV12: 159.5 ± 10.5 , 154.3 ± 14.2 , and 143.9 ± 8.5 cm, respectively (Fig. 3.7). The significant differences among the clonal height were mainly caused by clone AF6 that was higher and clones POP1, POP2, and POP6 that were shorter than the rest of the clones. Regardless of the browsing damage after the first growing season, most clones had a similar height to clones AF2, AF8, and AF7 that were not browsed. The rapid growth of the browsed clones, presumably, is related to already established root system (Christersson, 1986), that promotes larger yield of the second rotation compared to the first rotation after plantation establishment (Dillen et al., 2013).

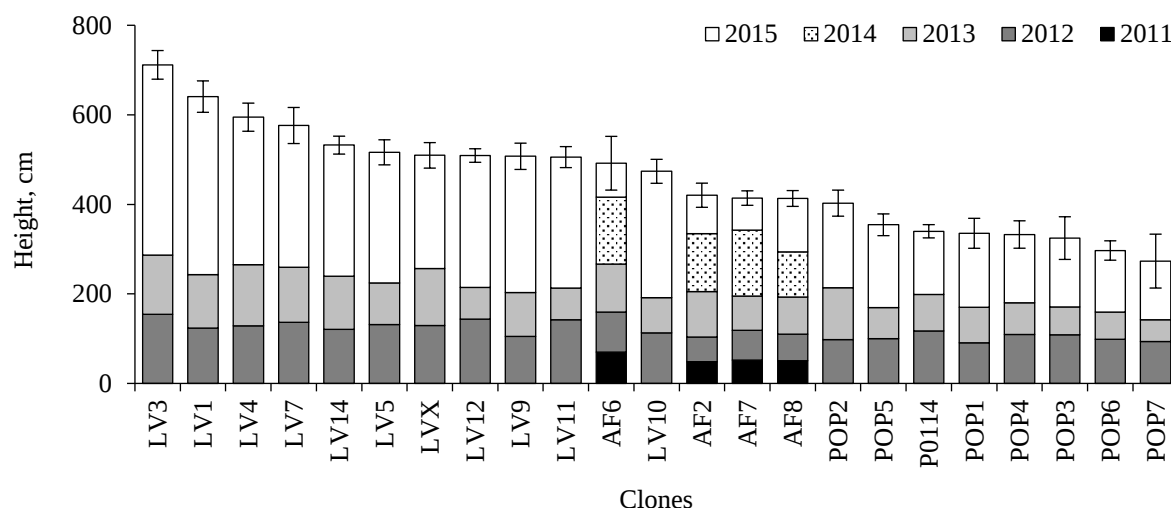


Fig. 3.7. Height of the clones at the age of one (2011), two (2012), three (2013), four (2014), and five (2015; $\pm$ confidence interval) years

In Kalsnava, mean height at the age of one year was from 51 ± 8 to 124 ± 5 cm for all alive trees (Fig. 3.8) and from 37 ± 9 to 159 ± 25 cm for undamaged trees. There was a tight, significant correlation between the height of alive and undamaged trees ($\rho = 0.82$, $p < 0.001$). However, for some clones browsing had a considerable effect on mean height: for clone AF16, undamaged trees were 28% shorter than alive trees, while for clone LV3, undamaged trees were 39% higher than alive trees.

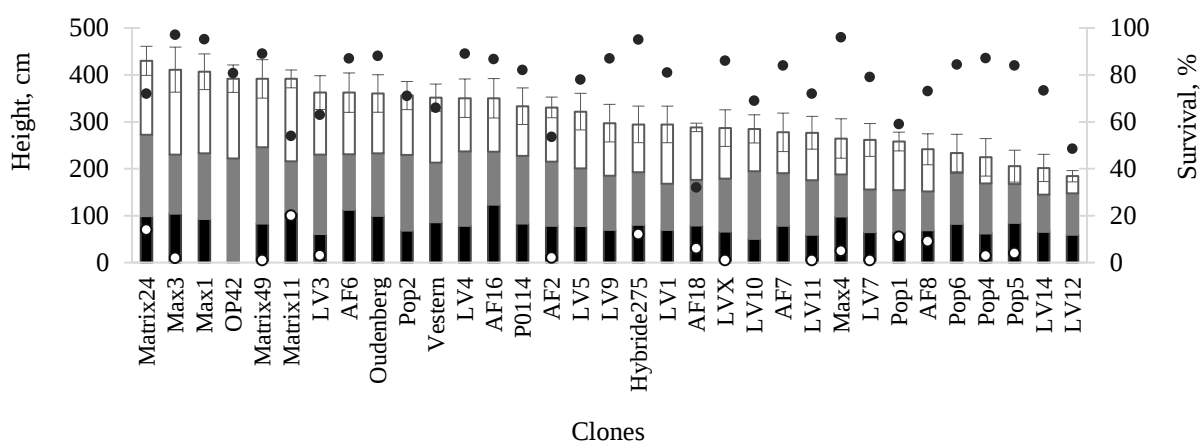


Fig. 3.8. Height of the clones at the age of one (2016), three (2019), and four (2020; $\pm$ confidence interval) years and survival at the age of three years

In both plantations, differences in tree height among the clones were significant at all studied ages (all $p < 0.001$; Figs. 3.7 and 3.8) and they increased by age. In Skřivari, a number of pairs with significant differences were 80 at the age of two years, 124 at the age of three years, and 169 at the age of four years, while in Kalsnava difference between the highest and lowest clone increased from 2.4 times at the age of one year to 2.9 times at the age of three years. Between these years of assessment, clones were notably changed their ranking (Fig. 3.9a): correlation between the height measurements was $\rho = 0.61$, $p < 0.001$. The change of ranking is linked to differences in growth dynamics that affect clone allometry (Karačić et al., 2021) and rooting ability (Zalesny et al., 2005; Zhao et al., 2014). At the age of four years, the difference between the height of the highest and lowest clone was slightly smaller, and the ranking between the ages of three and four years was changed less ($\rho = 0.90$, $p < 0.001$; maximal difference: 10 positions for clone Pop6; Fig. 3.9b) than between the ages of one and three years (maximal difference: 20 positions for clone LV3; Fig. 3.9a).

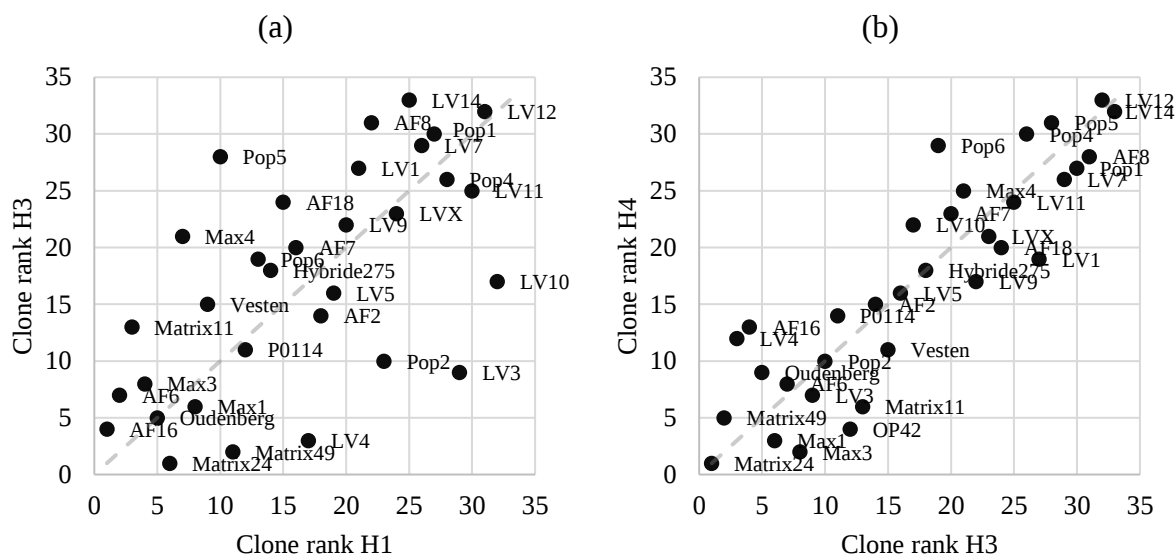


Fig. 3.9. The changes in clone ranking for height (a) between the age of one (H1) and three years (H3) and (b) between the age of three (H3) and four (H4) years

The dashed lines represent the unchanged position of a rank between the different ages. Clones above the line have decreased rank and clones below the line have increased the rank

3.4. Assessment of autumn and winter frost damage and its link to tree height

In one of the plantations in Kalsnava after the autumn frost in 2015, 65.4% of autumn frost-damaged trees were actively growing. For three clones, all ramets were dormant, for 10 clones, all ramets were actively growing, and for six clones, part of the ramets were both dormant and actively growing (Fig. 3.10a). Significant ($p < 0.01$) differences in the phenological state among the clones are linked to medium to the strong effect of genetics (Christersson, 2006; Friedman et al., 2008; Hall et al., 2007; Howe et al., 2000; Rohde et al., 2011).

Among the clones that were actively growing, leaf damage was observed for 81% of trees (Fig. 3.10b). Four clones had more than 80% of ramets with damaged most of the leaves (Grade 4_L). Clone LV4 had the highest frost tolerance with 76% of the ramets with intact leaves (Grade 1_L).

Damage to the stem was observed rarely (Fig. 3.10c). Among the dormant clones, clone LV3 had one ramet with several stem injuries (Grade 2_{ST}), while among the actively growing clones, clones Matrix24 and LV14 had 87% and 100% of ramets with several stem injuries (Grade 2_{ST}), respectively. Only clone LV3 had damaged more than $\frac{1}{3}$ of the stem (Grade 4_{ST}). The results support the findings of other studies that trees that set buds later in autumn are more susceptible to frost damage (Howe et al., 2000; Junttila and Kaurin, 1990).

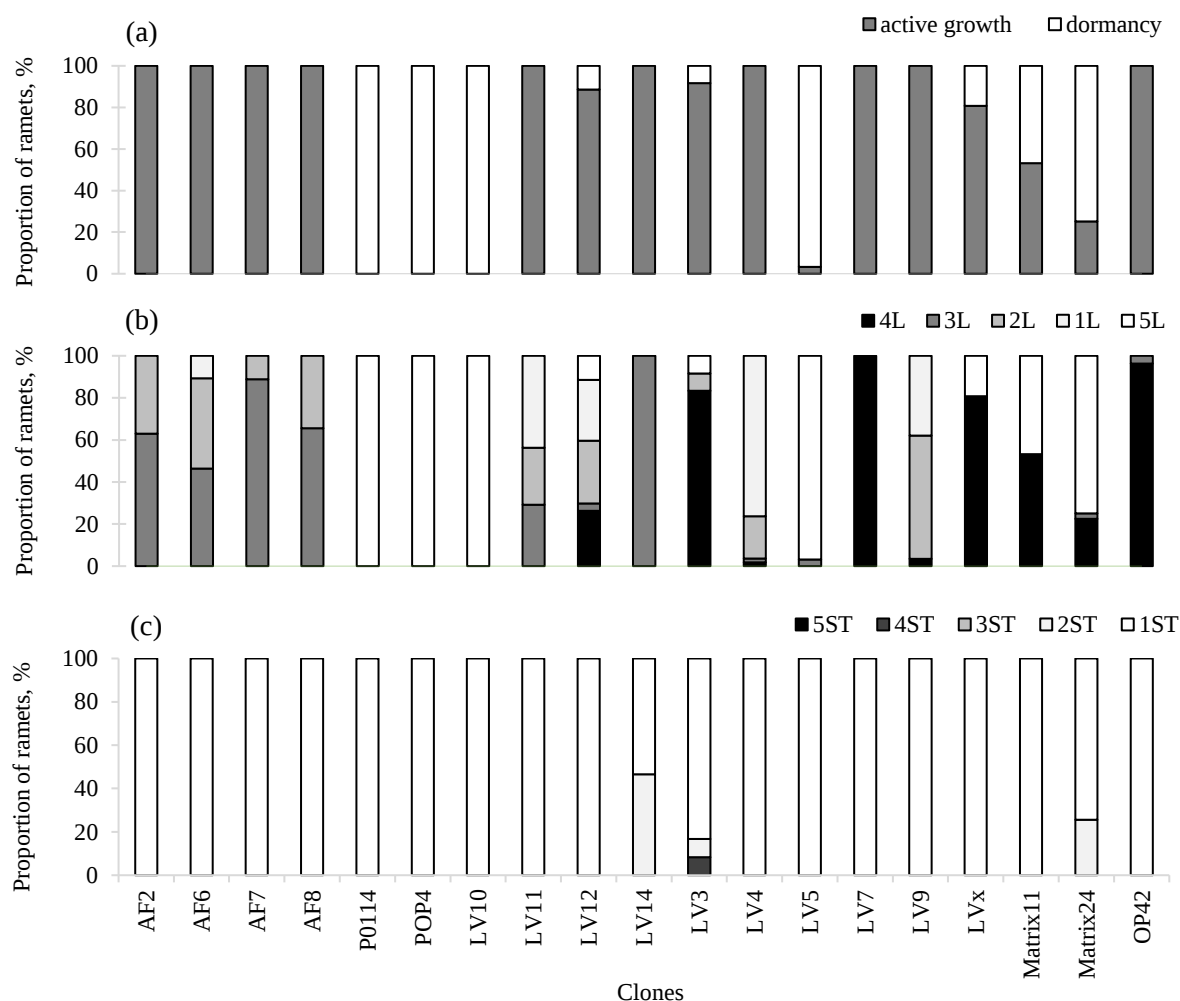


Fig. 3.10. The proportion of ramets according to (a) phenological state, (b) leaf, and (c) stem damage grades

Leaf frost damage grades: 1_L—intact leaves, 2_L—several damaged leaves, 3_L—damaged most leaves of the current-year leading shoot, 4_L—damaged most leaves of the whole tree, 5_L—already fallen leaves.

Stem frost damage grades: 1_{ST}—intact stem, 2_{ST}—several stem injuries, 3_{ST}—damaged current-year leading shoot, 4_{ST}—damage of more than 1/3 of height, 5_{ST}—damage of the whole stem

In the other plantation in Kalsnava after the autumn frost in 2016, autumn frost damage was observed for 16 out of 33 clones (Fig. 3.11). For the majority of clones, only a small part of ramets was damaged: the median of the proportion of damaged trees was 4%. Clones of the crossing *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* were more sensitive to frost than others: clones Hybride275, Matrix24, and Matrix11 had damaged 21%, 14%, and 11% of ramets.

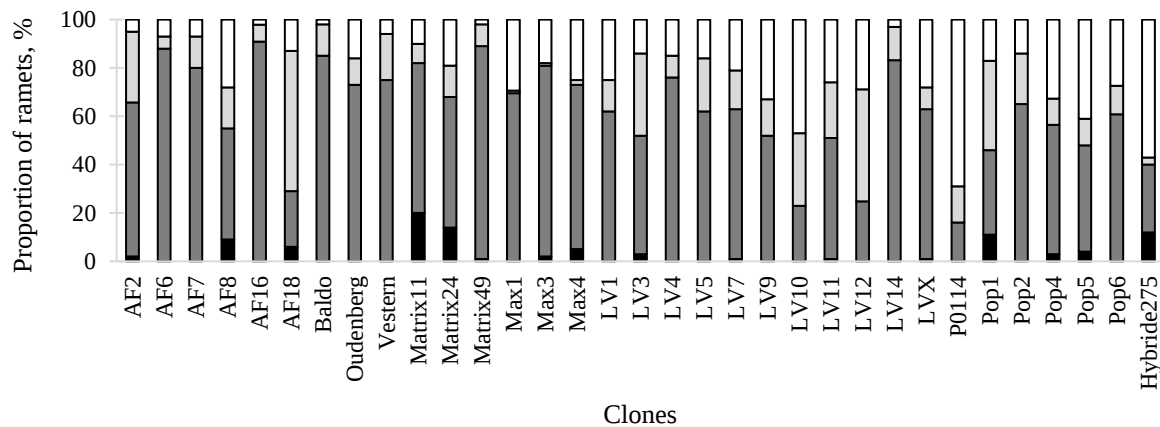


Fig. 3.11. The proportion of damaged ramets after the first growing season

Color of the stacked bard: black—autumn frost- damage, dark grey—browsing damage, light grey—dead, white—undamaged

At the individual tree level, tree age significantly affected autumn frost damage to leaves ($p < 0.01$) but not to stems ($p > 0.05$). Significant ($p < 0.01$) differences were observed also for clones at the same age. For clones LV4 and LV11 all ramets were actively growing regardless of age. Also, for clone LV12 all two-year-old and most (87%) of the one-year-old ramets were actively growing. For these three clones, ramets of different ages had significant ($p < 0.01$) differences in leaf damage. For clones LV4 and LV11, all two-year-old ramets were intact (Grade 1_L), while for one-year-old ramets had damaged several or most of the leaves (Grades 2_L and 3_L). For clone LV12, most of the two-year-old trees had damaged most of the leaves (Grade 4_L) while for one-year-old ramets less severe damage was observed (Grades 3_L and 4_L).

Autumn frost damage did not have negative effect on survival ($\rho = 0.53$, $p < 0.001$). Tree height was not related to leaf damage ($p > 0.05$) but in both plantations, tree height was linked to stem damage. In one of the plantations, this relation was caused by clones LV14 and LV3—relatively high trees that had damaged 46.5% and 16.6% of ramets, respectively. In the other plantation, no link between clone height and proportion of autumn-damaged trees was found ($\rho = 0.42$, $p > 0.05$) but frost-damaged trees were significantly higher ($p < 0.001$) than the undamaged trees: 105.3 ± 7.9 vs 72.0 ± 2.5 cm, respectively. These differences concur that fast-growing trees are sensitive to frost at the end of the growing season (Pliura et al., 2014).

The proportion of autumn-damaged trees was not related to the winter damage grade of the same clone (Fig. 3.12). Unlike for autumn frost damage, clones with winter frost damage were shorter (Fig. 3.13) and with lower survival ($\rho = 0.47$, $p < 0.01$) than undamaged trees. Clones with severe winter frost damage (Grade 1) had survival of 32%, moderately damaged clones (Grade 2) of 72%, clones with mild damage (Grade 3) of 78%, and intact clones (Grade 4) of 85%. This is related to structural traits of wood, namely, xylem vessel size that also affects tree cold tolerance (Schreiber et al., 2013).

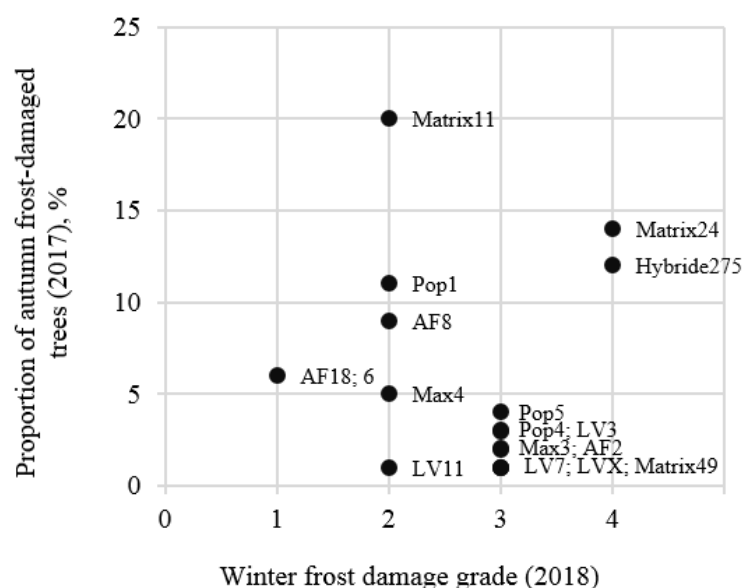


Fig. 3.12. The proportion of autumn frost-damaged trees (assessed in spring 2017) and winter frost damage grade (assessed in spring 2018)

Winter frost damage grades: 0—dead, 1—severe damage, 2—mild damage, tree recovers, 3—minor damage, 4—no visible winter frost damage

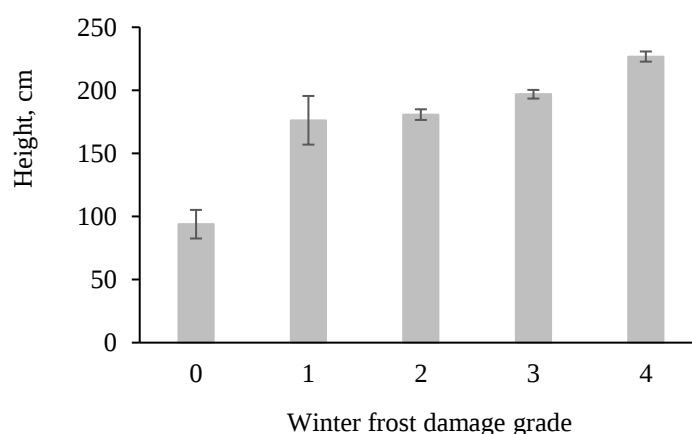


Fig. 3.13. Height at the age of three years according to winter frost damage grade

Winter frost damage grades: 0—dead, 1—severe damage, 2—mild damage, tree recovers, 3—minor damage, and 4—no visible winter frost damage

The results suggest that fast-growing clones with sufficient frost tolerance could be selected (e.g. clones Max1 and Matrix49, Fig. 3.8). Other clones (e.g. clones Matrix24 and Matrix11), however, were among the highest despite the autumn frost damage, i.e. their damage was compensated by the fast growth. Progenies of the same parental species as clone series Matrix (*P. maximowiczii* × *P. trichocarpa*) have shown similar results by remaining position among the tallest clones regardless of significant height loss due to stem withering (Gudynaitė-Franckevičienė, Pliūra, Suchockas, 2020). Overall, suitable tolerance to cold injuries of locally collected clones has not sufficient advantage to gain a higher yield, as compared to highly productive, although more sensitive, introduced clones.

3.5. Sprouting after the autumn frost damage

Before the autumn frost damage in Vecumnieki at the end of the first growing season (Fig. 2.1), 49% of trees had formed one, 31% had formed two, 10% had formed three, and 10% had formed four or more stems. Tree height was from 10 to 215 cm (mean 118 ± 1.18 cm). Trees that had formed one stem were significantly ($p < 0.001$) higher than trees that had formed more stems: 121 ± 2.5 and 114 ± 2.6 cm, respectively. The mean diameter at the root collar was 6.6 ± 0.32 mm, and trees with a larger number of stems were thinner (Fig. 3.14). The mean diameter for trees with one and two stems was similar ($p > 0.05$; 7.1 ± 0.48 and 7.0 ± 0.49 mm, respectively) and they were significantly ($p < 0.05$) thicker than trees with more than three stems (4.9 ± 1.0 and 4.0 ± 0.73 cm, respectively).

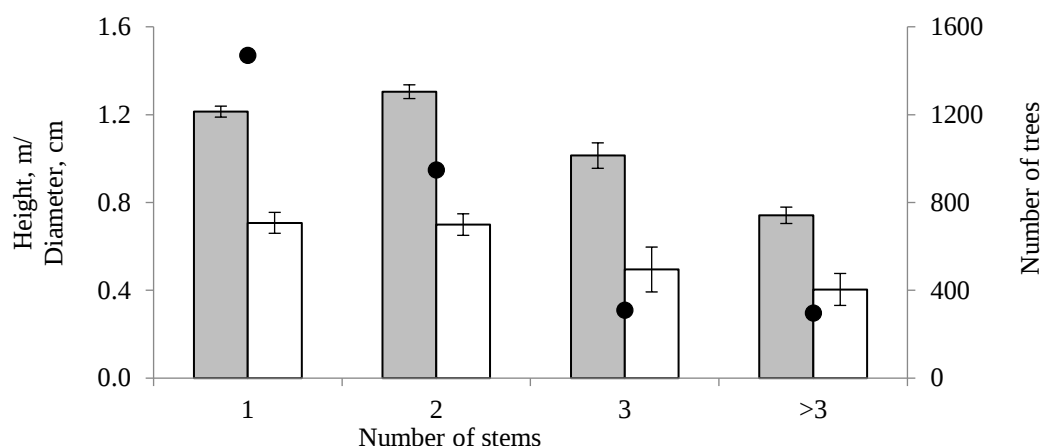


Fig. 3.14. Mean height (grey bars), diameter (white bars) at root collar ($\pm$ confidence interval), and number of trees (bullets) at the first assessment according to number of stems

After the autumn frost, all trees had completely withered the above-ground part. At the first assessment in June, new shoots were noted for 19.6% of trees. A number of studies have showed that poplars have good sprouting ability, and biomass from the second rotation typically exceeds that after the first (establishment) rotation, and harvesting of the aboveground part has no negative effect on stool survival (Dillen et al., 2013; Laureysens et al., 2003, 2005; Verlinden et al., 2015). However, it should be stressed that in the studied plantation the aboveground biomass was not harvested, instead, it was withered in a result of a frost damage, hence, trees, possibly, had negatively affected vitality of the root system.

Regardless of the number of stems, trees that were sprouting were slightly but significantly lower than trees that did not sprout, 110 ± 3.9 and 119 ± 2.0 cm, respectively (Fig. 3.15). Studied have showed that this link might be related to structural properties of wood—tree height is positively correlated to vessel diameter (Martínez-Cabrera et al., 2011) that is the main parameter that determined tree sensitivity to embolism (Sperry and Sullivan, 1992). Plants most effectively ensure conductivity by forming few wide and long vessels (Sperry et al., 2008), while trees with many narrow vessels are more resistant to embolism (Davis et al., 1999).

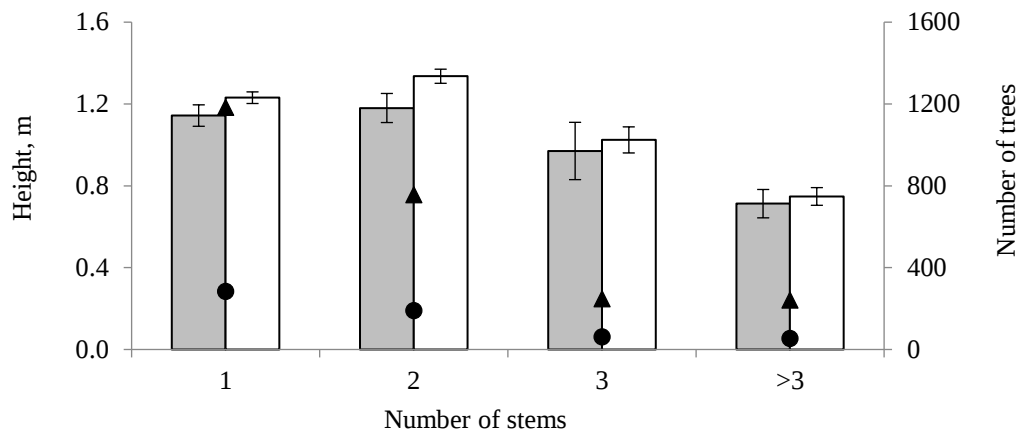


Fig. 3.15. Mean height (bars; $\pm$ confidence interval) and number of trees (symbols) for trees with (grey bars and bullets) and without (white bars and triangles) at the first assessment according to number of stems

The proportion of sprouting trees was not related ($p = 0.89$) to the number of stems: trees with one, two, three, or more stems had 19.4%, 20.1%, 20.0% and 18.2% of sprouting trees, respectively. Significant ($p = 0.006$) differences in the proportion of sprouting trees were noted for browsed (12.6%) and undamaged (20.1%) trees. The proportion of sprouting trees differed significantly ($p < 0.001$), but no link ($p > 0.90$) was found between mean height in a row and the proportion of sprouting trees. The spatial distribution of sprouting trees was random ($p > 0.05$).

At the repeated assessment in July, the proportion of sprouting trees was increased to 44.0%. The observed relation between the height of the previous year's shoots and the number of stems remained: the sprouting trees were significantly lower than trees that did not sprout, 111 ± 4.6 and 123 ± 4.5 cm, respectively.

CONCLUSIONS

1. Poplar radial growth is negatively affected by drought stress in summer, indicated by increased temperature and reduced standardized precipitation evapotranspiration index. It is also negatively affected by increased temperature range in December, affecting/hampering tree physiological processes during dormancy. In the context of climate change, clone selection should include clones with lower sensitivity to these meteorological factors.
2. Height increment is significantly affected by clone and cutting length. Longer cuttings ensure faster initial growth: at the end of the first growing season, the height of the 50 cm long cuttings exceeded the height of the 30 cm long cuttings by 31–55%. Fast-growing clones have higher phenotypical plasticity, i.e., lower sensitivity to meteorological changes during the growing season.
3. Autumn frost damage to the top of the leading shoot is typical for fast-growing trees (trees with frost damage were significantly higher than the undamaged trees). Winter frost damage is typical for trees with inferior growth, and survival at the age of three years was from 32% for clones with severe winter frost damage to 85% for visually intact trees.
4. The use of clones that are suitable to the Latvia climate is crucial. Trees that, as a result of frost, had completely withered aboveground parts are sprouting but their growth is delayed: at the beginning of June, sprouts were noted for 19.6% of trees and in the middle of June for 44.0% of trees.
5. Fast-growing clones with sufficient autumn and winter frost tolerance and survival could be selected. This is indicated by from a breeding perspective positive or not significant clone mean (genetic) correlations between the growth and other parameters.

RECOMMENDATIONS

Clones Matrix49, Max1, and Max3 with decent growth and survival and low risk of frost damage are recommended for plantations. Poplar plantations should be established on sites with a low risk of frost occurrence. Mean radial increment of the clone *Populus balsamifera* × *P. laurifolia* peaks at the age of 10 to 15 years and levels out after the age of 25 to 30 years. More research is needed for the optimal length of the rotation period. Sensitivity to drought stress during the growing season and autumn frost should be tested in a controlled environment during the initial clonal testing.

ACKNOWLEDGEMENTS

Preparation of the thesis was carried out in the European Regional Development Fund project ‘Decision support tool for increased forest productivity via efficient climate adjusted transfer of genetic gain’ (No 1.1.1.1/19/A/111). Data for scientific publications were collected in Latvian State Forest Research Institute ‘Silava’, implemented within the scope of projects ‘Fast growing tree plantations: development of methods of establishment and management and assessment of suitability of wood for production of pellets’ (No 2DP/2.1.1.1/13/APIA/VIAA/031) and ‘Development of multifunctional deciduous tree and energy plant plantations model establishment and management’ (No 2010/0268/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/118) financed by European Regional Development Fund, ‘Adaptive capacity of forest trees and possibilities to improve it’ (No 454/2012) and ‘The value and dynamic of Latvia’s ecosystems under changing climate (EVIDEnT)’ financed by Latvian Council of Science, ‘Methods for efficient practical application tree breeding results and adaptation tests for deciduous trees’ (No 1.2.1.1/16/A/009) and ‘Technologies for efficient transfer of genetic gain in plant production and forestry’ (No 1.2.1.1./18/A/004) financed by the Forest Sector Competence Center, and ‘Marginal lands for Growing Industrial Crops (MAGIC)’ (No 727698) financed by the European Union’s research and innovation program Horizon 2020.

LITERATŪRAS SARAKSTS / REFERENCES

- Barbaroux C., Bréda N. (2002) Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. *Tree Physiol.*, 22, 1201–1210; <https://doi.org/10.1093/treephys/22.17.1201>.
- Buhler D.D., Netzer D.A., Riemenschneider D.E., Hartzler R.G. (1998) Weed management in short rotation poplar and herbaceous perennial crops grown for biofuel production. *Biomass and Bioenergy*, 14, 385–394; [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)10075-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)10075-7).
- Bunn A.G. (2008) A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26, 115–124; <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>.
- Büntgen U., Frank D.C., Schmidhalter M., Neuwirth B., Seifert M., Esper J. (2006) Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology. *Trees - Struct. Funct.*, 20, 99–110; <https://doi.org/10.1007/s00468-005-0017-3>.
- Burgess D., Hendrickson O.Q., Roy L. (1990) The importance of initial cutting size for improving the growth performance of *Salix alba* L. *Scand. J. For. Res.*, 5, 215–224; <https://doi.org/10.1080/02827589009382607>.
- Camp J.C., Rousseau R.J., Gardiner E.S. (2012) Longer black willow cuttings result in better initial height and diameter growth in biomass plantations. In: Butnor J.R. (Ed.) *Proceedings of the 16th Biennial Southern Silvicultural Research Conference*. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC, pp. 43–46.
- Charrier G., Ngao J., Saudreau M., Améglio T. (2015) Effects of environmental factors and management practices on microclimate, winter physiology, and frost resistance in trees. *Front. Plant Sci.*, 6; <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00259>.
- Chhin S. (2010) Influence of climate on the growth of hybrid poplar in Michigan. *Forests*, 1, 209–229; <https://doi.org/10.3390/f1040209>.
- Christersson L. (2006) Biomass production of intensively grown poplars in the southernmost part of Sweden: Observations of characters, traits and growth potential. *Biomass and Bioenergy*, 30, 497–508; <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.10.003>.
- Christersson L. (1996) Future research on hybrid aspen and hybrid poplar cultivation in Sweden. In: *Biomass and Bioenergy*. Pergamon Press Inc, pp. 109–113; [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(96\)00014-1](https://doi.org/10.1016/0961-9534(96)00014-1).
- Christersson L. (1986) High technology biomass production by *Salix* clones on a sandy soil in southern Sweden. *Tree Physiol.*, 2, 261–272; <https://doi.org/10.1093/TREEPHYS/2.1-2-3.261>.
- Cook E.R., Briffa K., Shiyatov S., Mazepa V. (1992) Tree-ring standardization and growth trend estimation. In: Cook E.R., Kairiukstis L.A. (Eds.) *Methods of Dendrochronology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 104–123.
- Cook E.R., Holmes R.L. (1986) Guide for computer program ARSTAN. In: Holmes R.L., Adams R.K., Fritts H.C. (Eds.) *Tree-Ring Chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 50–65.
- Cox S.E., Stushnoff C. (2001) Temperature-related shifts in soluble carbohydrate content during dormancy and cold acclimation in *Populus tremuloides*. *Can. J. For. Res.*, 31, 730–737; <https://doi.org/10.1139/x00-206>.
- Cunti X., Haifeng S., Guisheng L., Xingyin W., Zhuo L., Wenqiang D., Jinghua Z., Xipin Z. (1991) Bacterial swollen stem canker on poplar: The disease and its causes. *J. Northeast For. Univ.*, 2, 48–55; <https://doi.org/10.1007/BF02874791>.
- Davis S.D., Sperry J.S., Hacke U.G. (1999) The relationship between xylem conduit diameter and cavitation caused by freezing. *Am. J. Bot.*, 86, 1367–1372; <https://doi.org/10.2307/2656919>.
- Deslauriers A., Giovannelli A., Rossi S., Castro G., Fragnelli G., Traversi L. (2009) Intra-

- annual cambial activity and carbon availability in stem of poplar. *Tree Physiol.*, 29, 1223–1235; <https://doi.org/10.1093/treephys/tpp061>.
- Devine W.D., Harrington C.A., Debell D.S. (2010) Intra-annual growth and mortality of four *Populus* clones in pure and mixed plantings. *New For.*, 39, 287–299; <https://doi.org/10.1007/s11056-009-9171-6>.
- Diamandis S., Koukos P. (1992) Effect of bacteria on the mechanical and chemical properties of wood in poplars damaged by frost cracks. *Eur. J. For. Pathol.*, 22, 362–370; <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1992.tb00308.x>.
- Dillen S.Y., Djomo S.N., Al Afas N., Vanbeverem S., Ceulemans R. (2013) Biomass yield and energy balance of a short-rotation poplar coppice with multiple clones on degraded land during 16 years. *Biomass and Bioenergy*, 56, 157–165; <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2013.04.019>.
- FAO (2016) Poplars and other fast-growing trees—renewable resources for future green economies. *Synth. Ctry. Prog. Reports*. 25th Sess. Int. Poplar Comm. Berlin, Fed. Repub. Ger. 120.
- Ferm A., Hytönen J., Vuori J. (1989) Effect of spacing and nitrogen fertilization on the establishment and biomass production of short rotation poplar in Finland. *Biomass*, 18, 95–108; [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(89\)90087-5](https://doi.org/10.1016/0144-4565(89)90087-5).
- Friedman J.M., Roelle J.E., Gaskin J.F., Pepper A.E., Manhart J.R. (2008) Latitudinal variation in cold hardiness in introduced *Tamarix* and native *Populus*. *Evol. Appl.*, 1, 598–607; <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2008.00044.x>.
- Grissino-Mayer H.D. (2001) Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Res.*, 57, 205–221.
- Gudynaitė-Franckevičienė V., Pliūra A., Suchockas V. (2021) Ecogenetic plasticity and genetic variation in populus hybrids under the impact of simulated climate change related stressors. *Balt. For.*, 26, 1–13; <https://doi.org/10.46490/BF462>.
- Haldimann P., Feller U. (2004) Inhibition of photosynthesis by high temperature in oak (*Quercus pubescens* L.) leaves grown under natural conditions closely correlates with a reversible heat-dependent reduction of the activation state of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase. *Plant, Cell Environ.*, 27, 1169–1183; <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01222.x>.
- Hall D., Luquez V., Garcia V.M., St Onge K.R., Jansson S., Ingvarsson P.K. (2007) Adaptive population differentiation in phenology across a latitudinal gradient in European aspen (*Populus tremula* L.): A comparison of neutral markers, candidate genes and phenotypic traits. *Evolution* (N. Y.), 61, 2849–2860; <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2007.00230.x>.
- Hänninen H. (2006) Climate warming and the risk of frost damage to boreal forest trees: Identification of critical ecophysiological traits. *Tree Physiol.*, 26, 889–898; <https://doi.org/10.1093/treephys/26.7.889>.
- Hardy J.P., Groffman P.M., Fitzhugh R.D., Henry K.S., Welman A.T., Demers J.D., Fahey T.J., Driscoll C.T., Tierney G.L., Nolan S. (2001) Snow depth manipulation and its influence on soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 56, 151–174; <https://doi.org/10.1023/A:1013036803050>.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. (2014) Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 34, 623–642; <https://doi.org/10.1002/joc.3711>.
- Howe G.T., Saruul P., Davis J., Chen T.H.H. (2000) Quantitative genetics of bud phenology, frost damage, and winter survival in an F2 family of hybrid poplars. *Theor. Appl. Genet.*, 101, 632–642; <https://doi.org/10.1007/s001220051525>.
- Ilstedt B. (1996) Genetics and performance of Belgian poplar clones tested in Sweden. *For. Genet.*, 3, 183–195.
- Ingvarsson P.K., García M.V., Hall D., Luquez V., Jansson S. (2006) Clinal variation in

- phyB2, a candidate gene for day-length-induced growth cessation and bud set, across a latitudinal gradient in European aspen (*Populus tremula*). *Genetics*, 172, 1845–1853; <https://doi.org/10.1534/genetics.105.047522>.
- Jansons Ā., Zeps M., Rieksts-Riekstiņš J., Matisons R., Krišāns O. (2014) Height increment of hybrid aspen *Populus tremuloides* × *P. tremula* as a function of weather conditions in south-western part of Latvia. *Silva Fenn.*, 48(5); <https://doi.org/10.14214/sf.1124>.
- Johnson R.W. (2001) An introduction to the bootstrap. *Teach. Stat.*, 23, 49–54.
- Jolliffe I.T. (1986) *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag, Berlin.
- Jones B., Tardif J., Westwood R. (2004) Weekly xylem production in trembling aspen (*Populus tremuloides*) in response to artificial defoliation. *Can. J. Bot.*, 82, 590–597; <https://doi.org/10.1139/b04-032>.
- Junttila O., Kaurin Ā. (1990) Environmental control of cold acclimation in *Salix pentandra*. *Scand. J. For. Res.*, 5, 195–204; <https://doi.org/10.1080/02827589009382605>.
- Kalcsits L.A., Silim S., Tanino K. (2009) Warm temperature accelerates short photoperiod-induced growth cessation and dormancy induction in hybrid poplar (*Populus* × spp.). *Trees - Struct. Funct.*, 23, 971–979; <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0339-7>.
- Karačić A., Adler A., Weih M., Christersson L. (2021) An analysis of poplar growth and quality traits to facilitate identification of climate-adapted plant material for Sweden. *Bioenergy Res.*, 14, 409–425; <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10210-y>.
- Karačić A., Verwijst T., Weih M. (2003) Above-ground woody biomass production of short-rotation *Populus* plantations on agricultural land in Sweden. *Scand. J. For. Res.*, 18, 427–437; <https://doi.org/10.1080/02827580310009113>.
- Karačić A., Weih M. (2006) Variation in growth and resource utilisation among eight poplar clones grown under different irrigation and fertilisation regimes in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 30, 115–124; <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.11.007>.
- Landhäusser S.M., Lieffers V.J. (2003) Seasonal changes in carbohydrate reserves in mature northern *Populus tremuloides* clones. *Trees - Struct. Funct.*, 17, 471–476; <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0263-1>.
- Laureysens I., Deraedt W., Indeherberge T., Ceulemans R. (2003) Population dynamics in a 6-year old coppice culture of poplar. I. Clonal differences in stool mortality, shoot dynamics and shoot diameter distribution in relation to biomass production. *Biomass and Bioenergy*, 24, 81–95; [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00105-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00105-8).
- Laureysens I., Pellis A., Willems J., Ceulemans R. (2005) Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar. III Second rotation results. *Biomass and Bioenergy*, 29, 10–21; <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2005.02.005>.
- Lebourgeois F., Bréda N., Ulrich E., Granier A. (2005) Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees - Struct. Funct.*, 19, 385–401; <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0397-9>.
- Li B., Howe G.T., Wu R. (1998) Developmental factors responsible for heterosis in aspen hybrids (*Populus tremuloides* × *P. tremula*). *Tree Physiol.*, 18, 29–36; <https://doi.org/10.1093/treephys/18.1.29>.
- Li C., Puhakainen T., Welling A., Viherä-Aarnio A., Ernstsén A., Junttila O., Heino P., Palva E.T. (2002) Cold acclimation in silver birch (*Betula pendula*). Development of freezing tolerance in different tissues and climatic ecotypes. *Physiol. Plant.*, 116, 478–488; <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2002.1160406.x>.
- Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., Garcia-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Kolström M., Lexer M.J., Marchetti M. (2010) Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.*, 259, 698–709; <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>.
- Marino P.C., Gross K.L. (1998) Competitive effects of conspecific and herbaceous (weeds) plants on growth and branch architecture of *Populus* × *euramericana* cv. Eugenei. *Can. J.*

- For. Res., 28, 359–367; <https://doi.org/10.1139/x97-223>.
- Martínez-Cabrera H.I., Schenk H.J., Cevallos-Ferriz S.R.S., Jones C.S. (2011) Integration of vessel traits, wood density, and height in angiosperm shrubs and trees on JSTOR. *Am. J. Bot.*, 98, 915–922.
- Mola-Yudego B., Arevalo J., Díaz-Yáñez O., Dimitriou I., Freshwater E., Haapala A., Khanam T., Selkimäki M. (2017) Reviewing wood biomass potentials for energy in Europe: the role of forests and fast growing plantations. *Biofuels*, 8(4), 401–410; <https://doi.org/10.1080/17597269.2016.1271627>.
- Niemczyk M., Kaliszewski A., Jewiarz M., Wróbel M., Mudryk K. (2018) Productivity and biomass characteristics of selected poplar (*Populus* spp.) cultivars under the climatic conditions of northern Poland. *Biomass and Bioenergy*, 111, 46–51; <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.002>.
- Oberhuber W., Gruber A. (2010) Climatic influences on intra-annual stem radial increment of *Pinus sylvestris* (L.) exposed to drought. *Trees - Struct. Funct.*, 24, 887–898; <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0458-1>.
- Ögren E., Nilsson T., Sundblad L.G. (1997) Relationship between respiratory depletion of sugars and loss of cold hardiness in coniferous seedlings over-wintering at raised temperature: Indications of different sensitivities of spruce and pine. *Plant, Cell Environ.*, 20, 247–253; <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1997.d01-56.x>.
- Pallardy S.G. (2008) *Physiology of woody plants*. Elsevier, London, UK.
- Pawson S.M., Brin A., Brockerhoff E.G., Lamb D., Payn T.W., Paquette A., Parrotta J.A. (2013) Plantation forests, climate change and biodiversity. *Biodivers. Conserv.*, 22, 1203–1227; <https://doi.org/10.1007/s10531-013-0458-8>.
- Perry C.H., Miller R.C., Brooks K.N. (2001) Impacts of short-rotation hybrid poplar plantations on regional water yield. In: *Forest Ecology and Management*. Elsevier, pp. 143–151; [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00513-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00513-2).
- Pliura A., Suchocka V., Sarsekova D., Gudynaite V. (2014) Genotypic variation and heritability of growth and adaptive traits, and adaptation of young poplar hybrids at northern margins of natural distribution of *Populus nigra* in Europe. *Biomass and Bioenergy*, 70, 513–529; <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.09.011>.
- R Core Team (2020) *R: The R project for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Regier N., Streb S., Coccozza C., Schaub M., Cherubini P., Zeeman S.C., Frey B. (2009) Drought tolerance of two black poplar (*Populus nigra* L.) clones: Contribution of carbohydrates and oxidative stress defence. *Plant, Cell Environ.*, 32, 1724–1736; <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02030.x>.
- Regier N., Streb S., Zeeman S.C., Frey B. (2010) Seasonal changes in starch and sugar content of poplar (*Populus deltoides* × *nigra* cv. Dorskamp) and the impact of stem girdling on carbohydrate allocation to roots. *Tree Physiol.*, 30, 979–987; <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq047>.
- Rohde A., Bastien C., Boerjan W. (2011) Temperature signals contribute to the timing of photoperiodic growth cessation and bud set in poplar. *Tree Physiol.*, 31, 472–482; <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr038>.
- Rossi P. (1999) Length of cuttings in establishment and production of short-rotation plantations of *Salix* “Aquatika”. *New For.*, 18, 161–177; <https://doi.org/10.1023/A:1006525716499>.
- Saliņš S. (1971) Speciālo kultūru veidi. Grām.: Meža Kultūras. Zvaigzne, Rīga, 379.–409. lpp.
- Schreiber S.G., Ding C., Hamann A., Hacke U.G., Thomas B.R., Brouard J.S. (2013) Frost hardiness vs. growth performance in trembling aspen: An experimental test of assisted migration. *J. Appl. Ecol.*, 50, 939–949; <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12102>.
- Sperry J., Meinzer F., McCulloh K. (2008) Safety and efficiency conflicts in hydraulic architecture: scaling from tissues to trees. *Plant. Cell Environ.*, 31, 632–645; <https://doi.org/10.1111/J.1365-3040.2007.01765.X>.

- Sperry J.S., Sullivan J.E.M. (1992) Xylem Embolism in Response to Freeze-Thaw Cycles and Water Stress in Ring-Porous, Diffuse-Porous, and Conifer Species. *Plant Physiol.*, 100, 605; <https://doi.org/10.1104/PP.100.2.605>.
- Stener L.-G., Westin J. (2017) Early growth and phenology of hybrid aspen and poplar in clonal field tests in Scandinavia. *Silva Fenn.*, 51, 5656; <https://doi.org/10.14214/sf.5656>.
- Sulaiman C., Abdul-Rahim A.S., Ofozor C.A. (2020) Does wood biomass energy use reduce CO₂ emissions in European Union member countries? Evidence from 27 members. *J. Clean. Prod.*, 253, 119996; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119996>.
- Sykes M.T., Prentice I.C. (1996) Climate change, tree species distributions and forest dynamics: A case study in the mixed conifer/northern hardwoods zone of northern Europe. *Clim. Change*, 34, 161–177; <https://doi.org/10.1007/BF00224628>.
- Telenius B.F. (1999) Stand growth of deciduous pioneer tree species on fertile agricultural land in southern Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 16, 13–23; [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(98\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(98)00073-7).
- Tierney G.L., Fahey T.J., Groffman P.M., Hardy J.P., Fitzhugh R.D., Driscoll C.T. (2001) Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 56, 175–190; <https://doi.org/10.1023/A:1013072519889>.
- Trajkovic S. (2005) Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131, 316–323; [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2005\)131:4\(316\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2005)131:4(316)).
- Tullus A., Rytter L., Tullus T., Weih M., Tullus H. (2012) Short-rotation forestry with hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *P. tremuloides* Michx.) in Northern Europe. *Scand. J. For. Res.*, 27(1), 10–29; <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.628949>.
- Tullus H., Tullus A., Rytter L. (2013) Short-rotation forestry for supplying biomass for energy production. In: *Forest BioEnergy Production: Management, Carbon Sequestration and Adaptation*. Springer New York, pp. 39–56; https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8391-5_3.
- Verlinden M.S., Broeckx L.S., Ceulemans R. (2015) First vs. second rotation of a poplar short rotation coppice: Above-ground biomass productivity and shoot dynamics. *Biomass and Bioenergy*, 73, 174–185; <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2014.12.012>.
- Verwijst T., Elowson S., Li X., Leng G. (1996) Production losses due to a summer frost in a *Salix viminalis* short-rotation forest in southern Sweden. *Scand. J. For. Res.*, 11, 104–110; <https://doi.org/10.1080/02827589609382917>.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. (2010) A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.*, 23, 1696–1718; <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- Vigl F., Rewald B. (2014) Size matters?—The diverging influence of cutting length on growth and allometry of two Salicaceae clones. *Biomass and Bioenergy*, 60, 130–136; <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.020>.
- Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. (1984) On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 23, 201–213; [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2).
- Yu Q., Tigerstedt P.M.A., Haapanen M. (2001) Growth and phenology hybrid aspen clones (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.). *Silva Fenn.*, 35, 15–25; <https://doi.org/10.14214/sf.600>.
- Zalesny R.S., Riemenschneider D.E., Hall R.B. (2005) Early rooting of dormant hardwood cuttings of *Populus*: Analysis of quantitative genetics and genotype x environment interactions. *Can. J. For. Res.*, 35, 918–929; <https://doi.org/10.1139/x05-018>.
- Zhao X., Zheng H., Li S., Yang C., Jiang J., Liu G. (2014) The rooting of poplar cuttings: A review. *New For.*, 45, 21–34; <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9389-1>.