



GALA PĀRSKATS

PAR PĒTĪJUMA REZULTĀTIEM

PĒTĪJUMA NOSAUKUMS: “Meža apsaimniekošanas risku izmaiņu prognozes un to mazināšana”

IZPILDĪTĀJS: Latvijas Valsts mežzinātnes institūts „Silava”

PASŪTĪTĀJS: AKCIJU SABIEDRĪBA “LATVIJAS valsts meži”
Līguma Nr. 5.5._002t_101.15.57

PĒTĪJUMA ZINĀTNISKAIS

VADĪTĀJS: DR. Āris Jansons, LVMI Silava vadošais
pētnieks

Salaspils, 2020

Kopsavilkums

Pārskatā atspoguļoti galvenie rezultāti, kas sasniegti visā tā realizācijas laikā (2015.–2020. gads).

Meteoroloģiskajiem faktoriem ir būtiska, nelineāra ietekme uz koku pieaugumu, un to ietveršana augšanas gaitas modeļos uzlabo aprēķinu precizitāti. Šajā pētījumu posmā veiktā radiālo piegumu analīze papildināma ar augstumu pieaugumu limitējošo faktoru vērtējumu. Tāpat rekomendējams ietvert adaptāciju raksturojošās pazīmes selekcijas indeksā, īpaši gadījumos, kad plānota stādmateriāla veģetatīvā pavairošana, lai veicinātu jauno audžu piemērotību sagaidāmajiem klimatiskajiem apstākļiem. Šajā aspektā jau uzsākti atsevišķi pētījumi ar mērķi novērtēt klimata un genotipa mijiedarbības ietekmes izmantošanas iespējas audžu vitalitātes un ražības kāpināšanā, kā arī veikts praktisks darbs meža selekcijas programmas ietvaros, kā vērtējot atsevišķas ar adaptāciju saistītas pazīmes, tā nodrošinot klimatiski piemērotu genotipu iekļaušanu priedes selekcijas populācijā. Izstrādāti modeļi dižskābarža un lapegles augšanas gaitas raksturošanai. Apliecināts, ka Latvijas rietumu daļā iespējams izveidot ražīgas dižskābarža audzes. Stādāmo materiālu audžu ierīkošanai rekomendējams ievākt no pluskokiem mūsu valsts apstākļos, par ko liecina konstatētā šo genotipu straujā augšana un sekmīgā adaptācija.

Klimata pārmaiņu kontekstā rekomendējams diversificēt koku sugas mērķtiecīgā meža atjaunošanā, palielināt melnalkšņa īpatsvaru. Ņemot vērā liepas un kļavas jaunaudžu kopšanas eksperimentu rezultātus, kā perspektīvi rekomendējami biežumi 800–1300 koki ha⁻¹. Taču, pieņemot lēmumu par šo koku sugu izmantošanu, jāņem vērā pārnadžu populācijas blīvums konkrētajā teritorijā. Rekomendējams izmantot mistrojumu meža masīva līmenī, mistrojumu audzes izmantojot tikai noteiktu, zināmu bojājumu mazināšanai, kur ir pietiekama informācija par šādas pieejas efektivitāti, jo mistraudzes atsevišķos gadījumos ir būtiski mazāk noturīgas, nekā tīraudzes.

Pētījuma ietvaros ierīkoti 32 jauni pētnieciskie stādījumi ar mērķi analizēt izvēlēto koku sugu augšanas gaitu, stumbra kvalitāti, mežsaimniecības riskus un raksturot perspektīvas šo sugu plašākai izmantošanai.

Saskaņā ar plānoto, rezultāti aprobēti zinātniskās publikācijās, bijuši par pamatu 2 doktora disertāciju izstrādei un meža nozares dalībnieki par tiem informēti Mežzinātnes dienās, kā arī atsevišķos organizētos semināros.

Saturs

Kopsavilkums.....	2
1. Kontrolētos apstākļos vērtēt koku augšanas cikla izmaiņas nākotnes klimatā.....	4
2. Zināšanu uzkrāšana par Latvijā reto, kā arī introducēto koku sugu saglabāšanos un augšanu.....	9
2.1. Liepas un kļavas jaunaudžu kopšanas novērtējums.....	9
2.2. Latvijā reti sastopamo un introducēto koku sugu eskperimentu ierīkošana.....	14
2.3. Dižskābarža un lapegles augšanas gaitas analīze	15
3. Prognozēt koku augšanas gaitas izmaiņas nākotnes klimatā.....	21
3.1. Priedes, egles un bērza radiālā pieauguma atbildes reakcija uz meteoroloģiskajiem faktoriem.....	21
3.2. Radiālās augšanas gaitas modeļi priedei, eglei un bērzam	28
4. Koku sugu mistrojums un noturība.....	32
5. Egles astoņzobu un sešzobu mizgraužu attīstība	36
6. Prognozēto un faktisko vētras postījumu salīdzinājums.....	42
7. Sasalstoša lietus ietekmes uz kokiem modelis: eglei.....	44
8. Epiģenētiskais efekts	48

1. Kontrolētos apstākļos vērtēt koku augšanas cikla izmaiņas nākotnes klimatā

Pamatojums

Klimats nosaka meža ekosistēmas produktivitāti, tomēr pētījumi par prognozēto klimatisko apstākļu izmaiņām un to ietekmi uz koku augšanas gaitu ir atšķirīgs. Katrai koku sugai un arī atsevišķiem genotipiem ir noteikts apstākļu optimums, kura robežās norisinās visaktīvākā augšana, tādējādi kāda meteoroloģiskā faktora ietekme var to palēnināt vai pārtraukt. Tādēļ svarīgi noskaidrot koku potenciālo adaptāciju kā atbildes reakciju uz vides pārmaiņām, lai saglabātu vai paaugstinātu mežaudžu noturību un produktivitāti.

Meteoroloģiskie faktori (it īpaši straujas temperatūra svārstības) būtiski ietekmē koku augstuma pieauguma veidošanos, kas pirmajos to augšanas gados ietekmē ne tikai koku savstarpējo konkurenci, bet arī turpmāko audzes struktūru. Sala radītu bojājumu riski saistīti ar meteoroloģisko apstākļu amplitūdas izmaiņām (temperatūras ekstrēmiem). Lai arī kopumā vidējā atmosfēras temperatūra pieaug, tas nenozīmē, ka pavasarī vai rudenī nebūs salnas.

Lai mazinātu šādu bojājumu riskus, kokiem ir izstrādājies fizioloģisks mehānisms, ar kura palīdzību tiem attīstās salcietība. Tomēr salcietības veidošanās atšķiras starp koku sugām un to augšanas reģioniem, un tas savukārt izskaidro citu koku sugu uzņēmīgumu pret salu.

Pētījuma mērķis - veikt priedes, egles, bērza, hibrīdās apses un melnalkšņa salcietības pārbaudes, audzējot kokus dažādos klimatiskajos režīmos

Plašāka informācija: pētījuma 2015.-2018. gada pārskatā

Metodika

Lai simulētu nākotnes klimatiskos apstākļus un novērtētu to ietekmi, priežu, egļu, bērzu, hibrīdo apšu un melnalkšņu stādus (turpmāk tekstā – sējeņus) audzēja trīs dažādos klimatiskos apstākļu režīmos. Šo trīs režīmu kombinācijas variēja atkarībā no izdzīvojušo sējeņu skaita. Klimatiskie apstākļi (turpmāk tekstā – režīmi), kādos audzēja sējeņus:

- 1) Nākotne – siltumnīca Nr.1. – paaugstināta gaisa temperatūra; kontrolējot vēdināšanas režīmu, uzturēta temperatūra par 4°C augstāka nekā ārpus siltumnīcas. Mēslošanas un laistīšanas režīms saglabāts tāds par, kā otrā siltumnīcā, atbilstoši esošajai stādu audzēšanas praksei;
- 2) Tagadne (siltumnīca Nr.3.) – kontrole siltumnīcas apstākļos; nodrošinot esošajai stādu audzēšanas praksei atbilstošu temperatūras, laistīšanas un mēslošanas režīmu;
- 3) Lauks (kontrole lauka apstākļos) – lauka stādu poligonā, nodrošinot esošajai stādu audzēšanas praksei atbilstošu laistīšanas un mēslošanas režīmu.

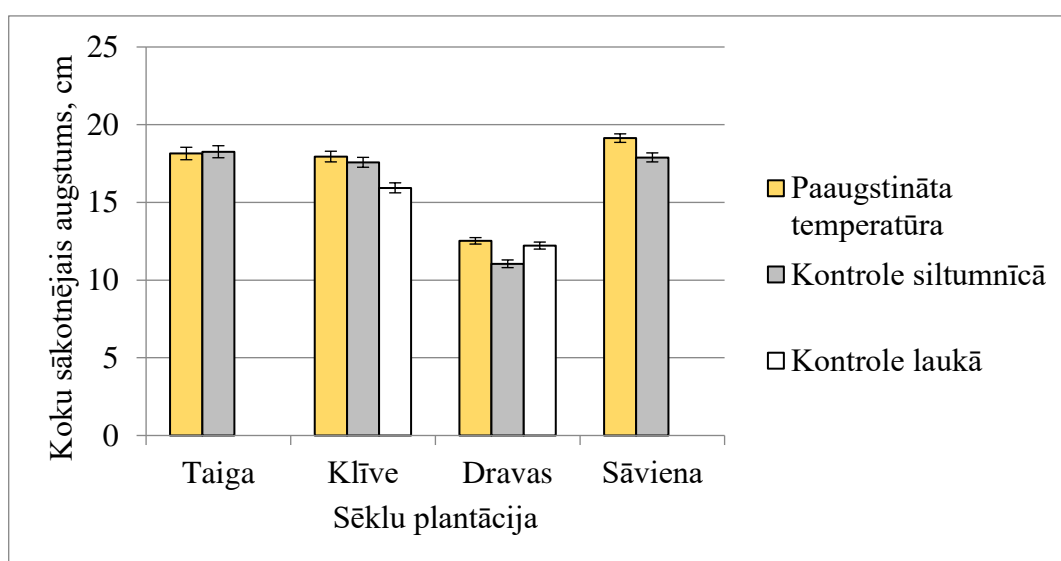
Veģetācijas perioda beigās visi eksperimentā iekļautie sējeņi transportēti uz LVMI "Silava" klimatmāju, kur tie divas nedēļas uzglabāti konstantā temperatūrā (+4°C). Lai raksturotu salcietības iestāšanos, sējeņus pakļāva imitētai salnai. Salnu imitēja stādus (grupās no 10 līdz 20) ievietojot +5°C temperatūrā, kas pakāpeniski samazināta ik pa trim grādiem katru stundu līdz sasniedza -10°C. Šādā temperatūrā sējeņi turēti divas stundas pēc kā temperatūru pakāpeniski paaugstinot ik pa trim grādiem katru stundu līdz +5°C temperatūrai. Pēc saldēšanas eksperimenta, sējeņi divas nedēļas turēti +15°C temperatūrā. Pēc tam stādiem novērtēti sala bojājumi: mērīts kopējais virszemes daļas garums, dzīvās vasas garums un aprēķināts dzīvās daļas īpatsvars, kā arī novērtētas atšķirības dzīvās daļas

īpatsvarā starp eksperimenta grupām (tagadne, nākotne, lauks). Pēc mērījumu pabeigšanas sējeņi transportēti uz MPS Kalsnava kokaudzētavas teritoriju bojājumu novērtēšanai nākamā veģetācijas perioda sākumā tos izmantojot eksperimenta turpināšanai.

Rezultāti

Priedei eksperimentos izmantoti ietvarstādi, kas izaudzēti no četrās sēklu plantācijās iegūtām sēklām: Sāvienas un Taigas (austrumu), un no Dravu un Klīves (rietumu) sēklu plantācijām, priežu sējeņi bija pietiekamā apjomā, kas ļāva tos audzēt visos trīs klimata režīmos. Pirmajā eksperimenta gadā tie audzēti Siltumnīcā Nr.1 (nākotnes klimatiskajos apstākļos) un Siltumnīcā Nr.3 (tagadnes klimatiskajos apstākļos). Lielāks sējeņu augstums veģetācijas perioda beigās konstatēts austrumu izcelsmes siltumnīcā Nr.3 audzētajiem sējeņiem ($19,1 \pm 0,56$ cm), un to vidējais augstums bija būtiski lielāks ($p < 0,001$) nekā rietumu izcelsmes siltumnīcā Nr.3 audzētajām priedēm ($17,7 \pm 0,64$ cm). Savukārt starp austrumu un rietumu siltumnīcā Nr.1 augušām priedēm netika konstatētas statistiski būtiskas atšķirības. Veģetācijas perioda beigās, siltumnīcā Nr.1 augušām austrumu un rietumu izcelsmes priedēm augstums bija līdzīgs. Priedēm no Klīves plantācijā (pluskoki atlasīti audzēs uz kūdras augsnēm) iegūtām sēklām bija raksturīga labāka (agrāk iegūta) salciētība nekā sējeņiem no Dravu un Sāvienas plantācijās iegūtām sēklām.

Pirms uzsāka nākamās augšanas dinamikas un salciētības testus (2017. gads), vispirms izvēlējās sējeņus ar līdzīgu sākotnējo augstumu. Secināts, ka stādu augstumu būtiski ietekmē gan klimatiskais režīms, gan izcelsme, gan to mijiedarbība (1.1. attēls).



1.1.attēls. Atšķirīgā temperatūrā audzētas priedes augstums veģetācijas sezonas beigās.

Lai raksturotu koku kopējo sezonas augstuma pieauguma atšķirību starp klimatiskajiem režīmiem un izcelsmēm, katram kokam aprēķināts relatīvais augstuma pieaugums, attiecinot absolūto augstuma pieaugumu pret koka sākotnējo augstumu, tādējādi mazinot koku sākotnējā augstuma atšķirību ietekmi. Kopumā neatkarīgi no režīma lielākais relatīvais pieaugums konstatēts Dravu izcelsmes kokiem ($1,85 \pm 0,03$ cm), savukārt mazāks Sāvienas ($1,20 \pm 0,02$ cm), Klīves ($1,09 \pm 0,02$ cm) un Taigas ($1,03 \pm 0,02$ cm) izcelsmes sējeņiem. Tā kā gan režīmam, gan izcelsmei, gan to mijiedarbībai ir būtiska ietekme uz

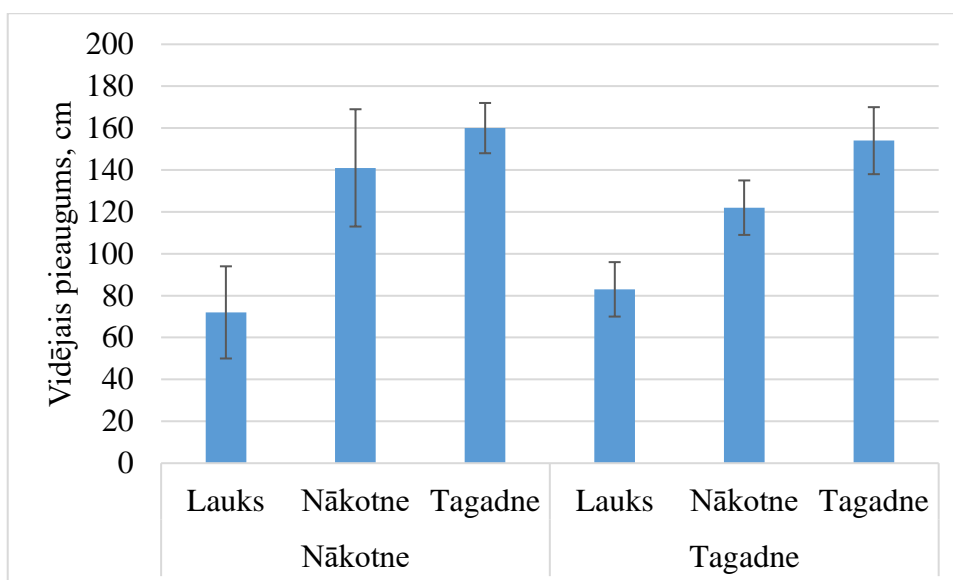
augstuma pieaugumu, katra izcelsmes vieta analizēta atsevišķi. Lai gan atšķirības starp dažādos režīmos audzētiem sējeņiem ir būtiskas, nav novērotas konkrētas likumsakarības.

Sala bojājumu īpatsvars priedēm atšķirās starp saldēšanas laiku (grupām) un izcelsmēm. Pirmās grupas sējeņiem vēl nebija izstrādājusies salcietība, savukārt nākamo grupu sējeņiem izdzīvojušo koku īpatsvars bija no 94 līdz 97%. Tomēr, ņemot vērā 2016. gada rezultātus, netika gūts apstiprinājums, ka priedes no kūdras augsnēm uzrāda labākus salcietības rezultātus. Priedes salcietības veidošanos lielā mērā noteikusi ģenētika un tā atbildes reakciju uz fotoperiodu. Tas liecina, ka veģetācijas pierodam kļūstot garākam un salam iestājoties vēlāk, nav sagaidāma izteikta sala bojājumu apjoma palielināšanās priežu jaunaudzēs.

Eglēm izmantoti kailsakņu stādi ar uzlabotu sakņu sistēmu, kas iegūti no Remtes (rietumu) un Suntažu (centrālās) sēkļu plantācijām. Egļu sējeņi audzēti divos klimatiskajos režīmos: Nākotnes un tagadnes temperatūras režīmā (Siltumnīcā Nr.1 un Nr. 3) un salīdzinot augstuma pieauguma dinamiku starp izcelsmēm, secināts, ka rietumdaļas eglēm pieaugums sācis veidoties agrāk. Tomēr abu reģionu eglēm nākotnes klimatā augšana turpinājās ilgāk nekā tagadnes un to vienas veģetācijas sezonas augstuma pieaugums bija statistiski būtiski lielāks ($p < 0,001$).

Pirmajā eksperimenta etapā, egļu sējeņiem salcietība nebija izveidojusies tikai pirmajai saldēšanas grupai, kamēr pārējās grupās netika konstatēta būtiska sala ietekme. Rietumdaļas eglēm salcietība izveidojās ātrāk nekā kokiem ar centrālās daļas izcelsmi. Eglei, jau sākot ar otro eksperimenta etapu, konstatēti koki, kuru sala bojājumi uzskatāmi par nenozīmīgiem, tāpēc eglei klimata pārmaiņu (paaugstinātas temperatūras un ilgāka veģetācijas perioda) apstākļos, visticamāk nebūs raksturīga zemākas salcietības veidošanās tādā mērā, kas nozīmīgi ietekmētu saglabāšanos, kaut arī sala bojājumu dēļ iespējama augstuma pieauguma samazināšanās pirmajos augšanas gados. Novērtējot egļu augstuma pieaugumu, jāņem vērā, augusta dzinumumu ietekme uz kopējo augstuma pieaugumu, kas varētu mazināt sala ietekmi (Jansone, 2020). Konstatēts, ka klimata pārmaiņu dēļ paaugstinās augusta dzinumumu veidošanās biežums, kas palielinātu egles augstuma pieaugumus.

Bērzam izmantoti 2-gadīgi kailsakņu stādi ar uzlabotu sakņu sistēmu, kas iegūti no "Kalsnava-2" (rietumdaļas) sēkļu plantācijas sēklām. Pirmajā eksperimenta gadā bērzu sējeņi pārstāvēti divos klimatiskajos režīmos – nākotnes (siltumnīca Nr.1) un tagadnes (siltumnīcā Nr.3). Savukārt otrajā gadā sējeņi turēti trīs klimatiskajos režīmos. Beidzoties veģetācijas sezonai, netika konstatēta būtiska atšķirība starp dažādos režīmos augušajiem kokiem. Veģetācijas sezonas beigās Siltumnīcas Nr.1 kokiem augstums bija $154,2 \pm 2,44$ cm, bet Siltumnīcas Nr.3 kokiem – $152,9 \pm 2,21$ cm (1.2.attēls).



1.2.attēls. Vidējais bērzu sējeņu augstuma pieaugums Siltumnīcas Nr.3 un lauka apstākļos (tagadnes) un Siltumnīcas Nr.1 (nākotnes) klimata režīmos

Nākotnes prognozētajai vides temperatūrai ir pozitīva ietekme uz bērzu augšanu, tomēr lielāki vidējie augstumi bija sējeņiem, kas pirmajā gadā audzēti nākotnes un otrajā tagadnes temperatūras režīmā.

Sala bojājumu īpatsvars bērziem atšķirās starp saldēšanas grupām. Sējeņiem, kurus saldēja pirmajā grupā vēl nebija izstrādājusies salcietība. Savukārt nākamo grupu sējeņiem sala bojājumi konstatēti tikai 5% koku. Sējeņi, kas audzēt nākotnes temperatūras režīmā, salcietības eksperimentā guva lielākus bojājumus.

Apšu hibrīdu (*Populus tremula* x *Populus tremuloides*) kloni, kas selekcionēti Latvijā un **melnalkšņu** sēklas, kas iegūtas Latvijas valsts mežu (LVM) sēklu plantācijā “Platenes”, audzētas divos temperatūras režīmos: tagadnes (siltumnīcā Nr.3) un nākotnes (siltumnīcā Nr.1). Hibrīdās apses nākotnes temperatūrā sasniedza būtiski lielāku augstumu, nekā tagadnes. Melnalkšņa vidējais augstuma pieaugums vērtētajos režīmos neatšķirās būtiski, liecinot par šīs koku sugas audzēšanas perspektīvām klimata pārmaiņu kontekstā.

Apšu hibrīdu sējeņiem konstatētas nozīmīgas salcietības svārstības, nevis pakāpeniska tās iestāšanās saglabāšanās. No nākotnes temperatūras režīmā augušajiem proporcionāli mazāk bija tādu, kam sala bojājumiem klasificēti kā mazi vai bojājumu nebija vispār.

Secinājumi

1. Nākotnē veģetācijas periodam kļūstot garākam un salam iestājoties vēlāk, nav sagaidāma izteikta sala bojājumu apjoma palielināšanās jaunajos stādījumos arī tad, ja kokiem biežāk veidosies augsta dzinumi.
2. Priedei kopumā nākotnes klimats būs augšanai labvēlīgs, un var sagaidīt lielāku šīs sugas koku augstuma pieaugumu juvenilā vecumā.
3. Melnalkšņiem augstākai gaisa temperatūrai nebūs nozīmīgas ietekmes uz augstuma pieaugumu, liecinot par šīs koku sugas audzēšanas perspektīvām klimata pārmaiņu kontekstā.
4. Eglei paaugstināta gaisa temperatūra samazina kopējo augstuma pieaugumu, bet nav novērota ietekme uz salcietības veidošanos. Jāatzīmē, ka klimata pārmaiņu dēļ

- paaugstinās augsta dzinumu veidošanās biežums. Juvenilā vecumā konstatēta pozitīva atgriezeniskā saikne starp egles augstumu un augsta dzinumu veidošanos.
5. Bērzu augšanu pozitīvi ietekmē paaugstināta atmosfēras temperatūra, bet tie kļūst nenoturīgāki pret salu.
 6. Hibrīdajai apsei un bērzam labvēlīgāki ir tagadnes klimatiskie apstākļi. Bērzam un hibrīdajai apsei šāds rezultāts, visticamāk, saistīts ar nokrišņu apjoma būtisko ietekmi, determinējot spēju formēt lielu augstuma pieaugumu.

Rekomendācijas

1. Nepieciešams ietvert adaptāciju raksturojošās pazīmes selekcijas indeksā, īpaši gadījumos, kad plānota stādmateriāla veģetatīvā pavairošana, lai veicinātu jauno audžu piemērotību sagaidāmajiem klimatiskajiem apstākļiem.
2. Rekomendējams palielināt melnalkšņa īpatsvaru mērķtiecīgā meža atjaunošanā.

2. Zināšanu uzkrāšana par Latvijā reto, kā arī introducēto koku sugu saglabāšanos un augšanu

Saskaņā ar pētījuma plānu, analizēta liepa, kļava, dižskābardis, lapegle sarkanais ozols, Klinškalnu priede, baltegle. Šeit atspoguļoti tikai apjomīgāko darbu kopsavilkumi: liepas un kļavas jaunaudžu kopšanas novērtējums, dižskābarža un lapegles augšanas gaitas analīze un eksperimentu ierīkošana. Plašāka informācija: pētījuma 2016.-2020. gada pārskatā un L. Jansones promocijas darbā “Eiropas dižskābarža (*Fagus sylvatica* L.) kokaudžu atjaunošanās un augšana Latvijā”.

2.1. Liepas un kļavas jaunaudžu kopšanas novērtējums

Pamatojums

Klimats mainās strauji un līdz gadsimta beigām tas Latvijā atbildīs nemorālajiem mežiem raksturīgajam (šobrīd Centrāleiropā) un būs optimāls vairāku šobrīd mūsu valstī mazāk pārstāvētu sastopamu un/vai introducētu koku sugu audzēšanai (Hickler et al., 2012) un augstas ražības nodrošināšanai (Lindner et al., 2010; Hanewinkel et al., 2012). Ņemot vērā koku sugu relatīvi lēno migrāciju un cilvēka saimnieciskās darbības ietekmi uz to īpatsvaru mežos, uz zināšanām balstīta koku sugu maiņa ir instruments efektīvākai sagaidāmo klimatisko apstākļu piedāvāto iespēju (augstāka temperatūra, garāks veģetācijas periods) izmantošanai (Spittlehouse, Stewart, 2004; Kirilenko, Sedjo, 2007). Jāņem vērā, ka klimata pārmaiņu ietekme uz koku augšanu nosakošajiem biotiskajiem un abiotiskajiem faktoriem ne vienmēr ir prognozējama. Par to liecina jau novērotā atsevišķu koku sugu kalšana lielā to izplatības areāla daļā, t.sk. Latvijā, piemēram, goba, osis (Pautasso et al., 2013; Matisone et al., 2018). Šādā gadījumā būtiska ir informācija par iespējamām citām sugām (alternatīvām), ko varētu izmantot kādas noteiktas koku sugas bojāejas gadījumā. Tāpat plašāka koku sugu klāsta izmantošana mežsaimniecībā sadala (diversificē) nezināmos, ar klimata pārmaiņu ietekmi saistītos riskus un var nodrošināt plašāk ekosistēmas pakalpojumu klāstu.

Pētījuma mērķis bija raksturot jaunaudžu kopšanas ietekmi uz liepas un kļavas augšanu.

Metodika

LVM zemēs atlasītas 14 liepas un 8 kļavas audzes. Liepas un kļavas audzes izvietotas plašā Latvijas teritorijā – no Zemgales līdz Vidzemes ziemeļaustrumiem un Latgales dienvidaustrumiem. Audzēs (platība $\leq 0,16$ ha) ierīkoti patstāvīgie parauglaukumi 500 m² vai 100 m² platībā atkarībā no nogabalu izvietojuma, blakus audzes ietekmes un meža tipa. Kopumā ierīkoti 62 parauglaukumi liepas audzēs (viens līdz septiņi parauglaukumi audzē) un 25 parauglaukumi kļavas audzēs (viens līdz seši parauglaukumi audzē). Katrā audzē ierīkots maksimālais parauglaukumu skaits, ņemot vērā sākotnējo audzes sastāvu, koku izvietojuma vienmērīgumu, nogabala konfigurāciju, iespējamo malas (blakus audzes) ietekmi un meža tipu.

Ierīkotajos parauglaukumos veikta uzmērīšana un kopšana, saglabājot sākotnēji noteiktos audzes biezumus no 2016. līdz 2020. gadam. Liepas audzēs (2.1. att.) sākotnēji noteiktais koku skaits bija:

- a) 800 liepas ha⁻¹;
- b) 1300 liepas ha⁻¹;

- c) 1800 liepas ha⁻¹;
- d) liepas atstātas grupās (citas koku sugas nozāģētas, nekopjot liepas);
- e) kontroles parauglaukumi, kuros nav veikta kopšana (nekopts/ kontrole).

Kļavas audzēs sākotnēji noteiktais audzes biežums bija:

- a) 400 kļavas ha⁻¹;
- b) 650 kļavas ha⁻¹;
- c) 800 kļavas ha⁻¹;
- d) 1300 kļavas ha⁻¹;
- e) 1800 kļavas ha⁻¹;
- f) kļavas atstātas grupās (citas koku sugas nozāģētas, nekopjot kļavas);
- e) kontroles parauglaukumi, kuros nav veikta kopšana (nekopts/ kontrole).

Atkarībā no audzes platības, ne visus sākotnējos biežumus bija iespējams ierīkot visos objektos.



2.1. att. Liepas audzēs ierīkotie parauglaukumi ar atšķirīgu sākotnējo biežumu.

Pirmā kopšana liepas audzēs veikta 2016. gada novembrī un decembrī, kļavas audzēs veikta 2017. gada decembrī. Pēc tam audzes regulāri apsekotas un veikta atkārtota kopšana tajos parauglaukumos, kur tas bija nepieciešams (citu koku sugu augstums tuvs liepas vai kļavas augstumam) laika posmā no 2018. līdz 2020. gadam. Gan kļavas, gan liepas audzēs konstatēta mistraudze ar bērzu un apsi. Liepas audzēs piemistrojumā (800 līdz 1800 koki ha⁻¹, liepas grupas un kontroles/nekopts parauglaukumi) bērza un apses augstums nedaudz pārsniedza liepas augstumu, izņemot gadījumā ar sākotnējo biežumu 800 liepas ha⁻¹. Parauglaukumos, kur koku skaits samazināts līdz 1300 koki ha⁻¹ un 1800 koki ha⁻¹, bērzs un apse stipri konkurēja ar liepu.

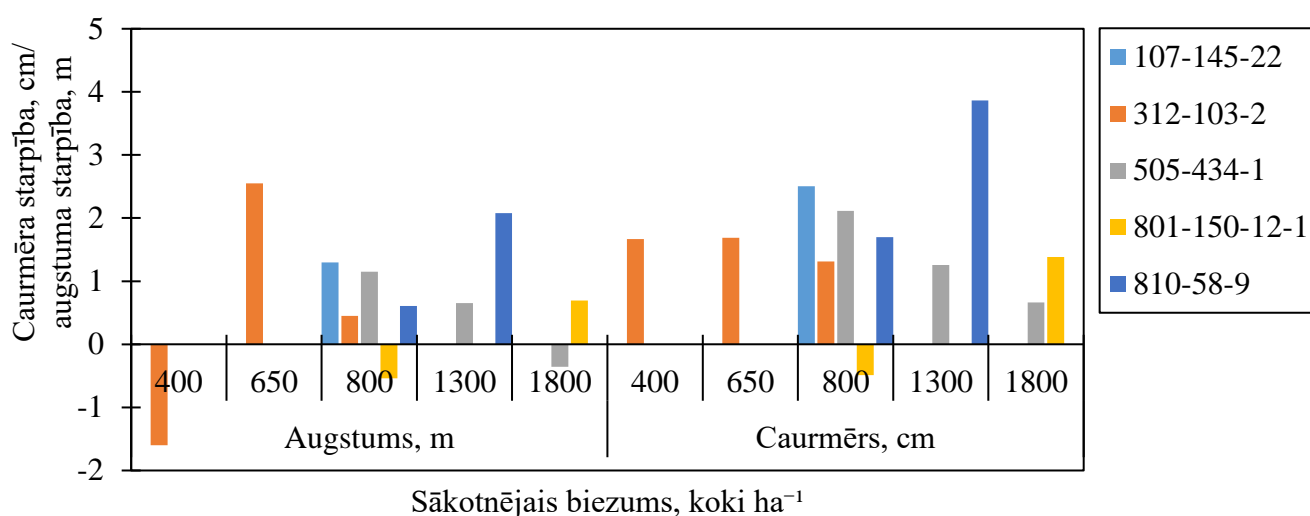
Liepas un kļavas vidējie rādītāji (vidējais caurmērs un vidējais augstums) nekopts/kontroles parauglaukumos pēc trim veģetācijas sezonām nozīmīgi atšķīrās starp objektiem, norādot uz objektu atšķirībām augšanas apstākļos un citu dažādu faktoru kopumā, kas ietekmē koku augšanu. Šo atšķirību starp objektiem dēļ dažāda sākotnējā biežuma ietekme uz koku augšanu vērtēta, salīdzinot augšanas starpības (starp sākotnējā biežuma variantu un kontroles/nekopts rezultātu).

Rezultāti

Kļavas audzes

Kopšanā saglabātais koku skaits ietekmēja kļavas augšanu, salīdzinot ar kontroles/nekoptiem parauglaukumiem. Samazinot koku skaitu līdz 800 kokiem ha⁻¹, konstatēts ievērojams kļavas vidējā augstuma (0,9 m) un caurmēra (1,9 cm) pieaugums četros no pieciem analizētajiem objektiem. Izņēmums bija objekts 801-150-12-1, kur konstatētas negatīvas augstuma (-0,5 m) un caurmēra (-0,5 cm) pieauguma vērtības,

salīdzinot ar kontroles/nekoptiem parauglaukumiem (2.2. att.). Arī divos ierīkotajos parauglaukumos ar biežumu 650 koki ha⁻¹ novērots pozitīvs pieaugums caurmēram (1,7 cm) un augstumam (2,6 m), salīdzinot ar kontroles/nekopts parauglaukumiem.



2.2. att. Kļavas vidējā caurmēra un vidējā augstuma starpība kļavas audzēs atkarībā no tās sākotnējā biežuma (400, 650, 800, 1300 un 1800 koki ha⁻¹) trīs gadus pēc kopšanas (2020. gadā).

Vislielākās atšķirības kļavas augšanai, salīdzinot ar kontrole/nekopts parauglaukumiem, novērotas objektā 810-58-9, kas izkopts līdz biežumam 1300 koki ha⁻¹: pozitīvā starpība caurmēram 3,9 cm un augstumam 2,1 m. Visretākajā objektā (400 koki ha⁻¹) novērots pozitīvs caurmēra pieaugums (starpība 1,7 cm), bet koku augstums (-1,6 m) šajā biežumā atpaliek no kontroles/nekopts parauglaukumā augušajām kļavām. Izkopjot līdz biežumam 1300 koki ha⁻¹, kļavu vidējā augstuma starpība bija 1,4 m un caurmēra starpība 2,6 cm. Arī izkopjot līdz 1800 ha⁻¹ konstatēta pozitīva starpība vidējam caurmēram (1,0 cm), bet augstumam vienā objektā konstatēta pozitīva (0,7 m), bet otrā negatīva (-0,4 m) starpība, salīdzinot ar kontroli/nekoptiem parauglaukumiem. Objektos, kur kopšanā kļava saglabāta grupās, augstumam un caurmēram nav vērojama konkrēta augšanas tendence (novērotas gan pozitīvas, gan negatīvas augstuma un caurmēra starpības), salīdzinot rezultātus ar kontroles datiem.

Kopšanas intensitātes ietekme uz bojājuma īpatsvaru audzē vērtēta, salīdzinot bojāto (stumbra bojājumi, piemēram, mizas nobrāzumi, galotņu/dzinumu apkodumi, nolauzta galotne) un veselo koku īpatsvaru pie noteikta sākotnējā audzes biežuma ar kontroles/nekopts parauglaukumiem. Bojātajiem kokiem bieži novērotas divas galotnes un padēli.

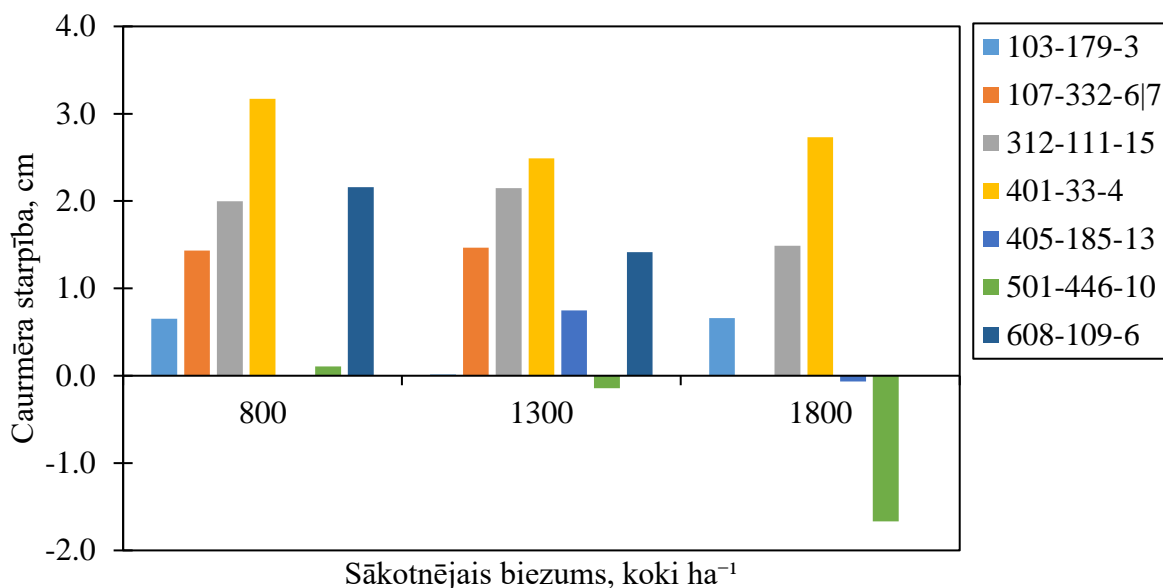
Kļavu ar pārnadžu bojājumiem īpatsvars pa pētījuma objektiem bija vidēji no 25% līdz 82% (vidēji 53% starp visiem objektiem). Divos objektos konstatēta īpaši augsta (71% un 81%) bojājumu intensitāte, tādēļ krāsas atšķirības novērotas arī vērtējumos starp variantiem. Starp objektiem vidējais bojāto kļavu īpatsvars bija 61% (21%–91%) kontroles/nekopts parauglaukumos, 51% (25%–91%) parauglaukumos ar biežumu 800 koki

ha⁻¹, 47% (10%–91%) parauglaukumos ar biežumu 1300 koki ha⁻¹ un 65% (54%–67%) parauglaukumos ar biežumu 1800 koki ha⁻¹.

Kopumā kļavai novērota laba reakcija uz kopšanu (sākotnējo biežumu), un arī pēc intensīvas skaita samazināšanas (650 koki ha⁻¹ un 800 koki ha⁻¹) trīs veģetāciju sezonu laikā iegūtas pozitīvas caurmēra un augstuma starpības, salīdzinot ar kontroles/nekopts parauglaukumiem. Negatīvas starpības vērtības konstatētas tikai vienā objektā, un visdrīzāk saistāmas ar audzes reakciju uz kopšanu (pirmajos gados pēc kopšanas koku augšana ir lēnāka), kas novērota arī citos šāda veida pētījumos. Bojāto kļavu īpatsvara saistību ar audzes biežumu pēc kopšanas nav iespējams konstatēt, jo rezultāti starp objektiem ir ļoti atšķirīgi, liecinot par pārnadžu populācijas blīvuma atšķirībām konkrētajā vietā.

Liepas audzes

Kopšanā atstātais koku skaits atšķirīgi ietekmēja liepas caurmēru un augstumu. Caurmēra starpība liepām ar sākotnējo biežumu 800 koki ha⁻¹ un kontroles/nekopts parauglaukumos bija pozitīva (1,6 cm) visos analizētajos objektos, bet vidējais augstuma pieaugums bija mazāks nekā (-0,3 m) kontroles/nekopts parauglaukumos. Līdzīga tendence bija liepām ar sākotnējo skaitu 1300 koki ha⁻¹: pozitīvs vidējā caurmēra pieaugums (1,2 cm), bet negatīvs (-0,3 m) vidējā augstuma pieaugums, salīdzinot ar kontroles/nekopts parauglaukumiem (2.3. att.).



2.3. att. Liepas vidējā caurmēra starpība liepas audzēs atkarībā no tās sākotnējā biežuma (800, 1300 un 1800 koki ha⁻¹) četrus gadus pēc kopšanas (2020. gadā).

Savukārt, izkopjot līdz biežumam 1800 koki ha⁻¹, liepas reaģē atšķirīgi: trīs objektos vidējā caurmēra starpība liepām bija pozitīva (1,6 cm), bet divos objektos tā bija negatīva, salīdzinot ar kontrole/nekopts parauglaukumiem (-0,9 cm). Arī liepām, kas atstātas grupās, nav vērojama konkrēta augšanas tendence, salīdzinot to rezultātus ar kontroles datiem. Vērtību starpības caurmēram bija no -2,2 līdz 0,7 cm, bet augstumam no -1,9 līdz 0,5 cm.

Bojājumu īpatsvars liepas objektos bija no 22% līdz 76% (vidēji 42% starp visiem objektiem). Divos objektos (107-332-6|7 un 501-466-10) bojāto liepu īpatsvars pārsniedza

pusi no liepām (attiecīgi 64% un 66%). Sākotnējam audzes biežumam nebija statistiski būtiska ietekme uz bojāto koku īpatsvaru, un tas bija 41%–44%.

Izvērtējot atšķirīgus sākotnējā biežuma variantus liepas audzēs, secināts, ka liepa ļoti labi reaģē uz intensīvu kopšanu (800 koki ha^{-1}), nodrošinot pozitīvu caurmēra papildpieaugumu (pret kontrole/nekopts parauglaukumiem) pēdējo četru veģetācijas sezonu laikā. Koptajos parauglaukumos bojāto koku īpatsvars ir nedaudz lielāks nekā kontroles/nekopts un liepas grupu parauglaukumos, bet biežuma ietekme nav tik nozīmīga kā kļavas audzēs.

Lai novērtētu sākotnējā biežuma ietekmi uz audzes dendrometriskajiem rādītājiem ilgtermiņā (ilgāk par trim veģetācijas sezonām), identificēti un analizēti trīs vecāki liepas stādījumi Meža pētīšanas stacijas mežos: a) Šķēdē – vecums 53 gadi, sākotnējais stādīšanas biežums 625 koki ha^{-1} ; b) Aucē1 – vecums 79 gadi, sākotnējais stādīšanas biežums 2500 koki ha^{-1} ; un c) Aucē2 – vecums 79 gadi, sākotnējais stādīšanas biežums 3300 koki ha^{-1} .

Vislielākais vidējais caurmērs konstatēts Šķēdes stādījumā ($27,8 \pm 1,3$ cm). Būtiski mazāki vidējie caurmēri bija stādījumā Aucē1 ($20,7 \pm 1,3$ cm) un Aucē2 ($18,7 \pm 1,8$ cm). Līdzīgi, arī lielākais vidējais koku augstums konstatēts Šķēdes stādījumā ($21,4 \pm 0,6$ m), un tas bija būtiski lielāks nekā stādījumos Aucē1 ($18,3 \pm 0,9$ m) un Aucē2 ($17,7 \pm 1,4$ m), kur stādīšanas biežums un audzes vecums ir lielāks. Savukārt lielākā vidējā krāja bija stādījumā Aucē1 (734 ± 112 m^3 ha^{-1}). Stādījumos Aucē2 (530 ± 247 m^3 ha^{-1}) un Šķēde (274 ± 37 m^3 ha^{-1}) vidējā krāja bija mazāka nekā Aucē1, bet šīs atšķirības nav statistiski būtiskas, jo katra stādījuma ietvaros novērojama augsta variācija. Visaugstākā stādījuma saglabāšanās konstatēta stādījumā Aucē1 (60%), bet stādījumos Šķēdē (56%) un Aucē2 (40%) saglabāšanās bija nedaudz zemāka.

Visos trīs stādījumos vērtēti arī ārēji redzami stumbra vērtību pazeminoši bojājumi (apkodumi, padēli, divas galotnes, nolauzts u.c.). Vislielākais koku ar bojājumiem īpatsvars konstatēts stādījumā ar viszemāko sākotnējo biežumu (Šķēde). Rezultāti norāda, ka ļoti zems (<700 koki ha^{-1}) sākotnējais biežums var negatīvi ietekmēt iegūstamo liepas augstvērtīgo sortimentu iznākumu. Tomēr nelielā analizēto stādījumu skaita dēļ šie rezultāti uzskatāmi tikai par indikāciju, nevis bāzi plaši izmantojamu secinājumu izdarīšanai.

Secinājumi

1. Liepai un kļavai konstatēta nozīmīga un pozitīva atsaucē reakcija uz kopšanu. Ņemot vērā rezultātus jaunaudzju kopšanas eksperimentos un vecākās audzēs ar dažādu biežumu, kā perspektīvi rekomendējami biežumi 800 – 1300 koki ha^{-1} .
2. Briežu dzimtas dzīvnieku radīto bojājumu mazināšana nav uzskatām par argumentu augstāka audzes biežuma saglabāšanai, jo biežumam pēc kopšanas nebija statistiski būtiska ietekme uz liepu vai kļavu ar stumbra miza bojājumiem īpatsvaru.

Rekomendācijas

1. Izvēloties veidot liepas vai kļavas audzes, jāņem vērā pārnadžu populācijas blīvums konkrētajā teritorijā, jo bojāto koku īpatsvars kopumā bija augsts un būtiski atkarīgs no objekta (atrašanās vietas).
2. Papildpieauguma novērtēšanai būtiski veikt atkārtotu mērījumu pēc pietiekami ilga laika (5 un 10 gadi), vienlaikus ievācot un analizēto informāciju par stumbra mizas bojājumu ilgtermiņa ietekmi.

2.2. Latvijā reti sastopamo un introducēto koku sugu eskperimentu ierīkošana

Pamatojums

Ierīkoti pētnieciskie stādījumi ar mērķi analizēt izvēlēto koku sugu augšanas gaitu, stumbra kvalitāti, mežsaimniecības riskus un raksturot perspektīvas šo sugu plašākai izmantošanai. Ierīkota dižskābarža retināšanas eskperimentu sērija ar mērķi raksturot šī mežsaimnieciskā pasākuma ietekmi uz papildpieaugumu un iegūt pamatinformāciju tā audzēšanas rekomendācijām (2.1. tabula). Šajā etapā veikti darbi eskperimentu ierīkošanā un nav izdarāmi nekādi specifiski secinājumi.

2.1. tabula

Latvijā reti sastopamo un introducēto koku sugu stādījumu un dižskābarža audžu kopšanas eskperimentu pamatinformācija

Reģions	Kv.	Nog.	Platība, ha	Meža tips	Koku sugas	Ierīkošanas gads
Stādījumu ierīkošanas						
Auce	19	1,1	1,36	Vr	Dsk, E	2016
Auce	36	8;10	2,68	Vr	Le, E, L, B, Soz, Dsk	2017
Auce	36	18;21	1,55	Vr	Soz, Le, Dsk, Oz	2017
Auce	36	24	1,5	Vr	Soz, Dsk, E	2017
Auce	114	14	1,01	Ap	Soz	2019
Auce	47	30	1,89	Vr	Le, E	2018
Auce	75	5	0,98	Vr	B	2018
Auce	84	18	0,9	Vr	B, E	2018
Auce	107	16	3,96	Vr	Le, Soz, E	2018
Auce	85	4	3,91	Vr	Soz, E, Le	2019
Auce	85	8;9	1,54	Vr, Kp	Soz, E	2019
Auce	85	3	1,21	As	Soz, E	2019
Auce	30	12,1	0,33	Vr	Be	2018
Jelgava	66	16	1,95	Dm	Le, E	2018
Jelgava	44	23	0,9	Dm	Dsk	2020
Jelgava	63	38	1,56	Dm	Le, E	2019
Jelgava	1	17	1,44	Dms	Ma, E	2020
Jelgava	33	10	1,62	Dms	Ma, E	2020
Kalsnava	163	47,48	1,47	Dm	Le, Soz, E	2018/2020
Kalsnava	223	1;6	1,47	Dm, Ln	Soz, E	2018
Kalsnava	198	27,3	1,09	Dm, As	L, E	2020
Kalsnava	292	9,15,21	1,85	Dm	Pcont, Soz, L, E	2020
Kalsnava	184	14;15,1;16	1,48	Dm	Soz, E	2018
Mežole	193	32	2,09	Dm	Soz, E	2019
Mežole	72	23,24	1,5	Gr, Grs	E sel	2020
Šķēde	56	16	0,99	As	Soz, E	2018
Šķēde	9	13	2,02	Vr	Soz, E	2018
Šķēde	22	14,17,20,21,30	2,25	Vr	Soz, E	2019
Šķēde	7	19,20,22	1,58	Vr	Soz, E	2020
Šķēde	3	7,15	2,25	Vr, Vrs	E	2020
Krājas kopšana un valdaudzes koku retināšana						
Kalsnava	158	6;7	2,74	Dm	Dsk	2017/2018
Šķēde	21	16,30,38,42	4,07	Vr	Dsk	2019/2020

2.3. Dižskābarža un lapegles augšanas gaitas analīze

Pamatojums

Dižskābardis ir pret vētru ietekmi noturīga, ēncietīga, pārnadžu maz bojāta un daudzviet Eiropā arī komerciāli nozīmīga koku suga. Savukārt lapegles jaunaudzēs vecumā ir ātraudzīga, nodrošinot iespējas diversificēt koku sugu sastāvu un iegūt pret biotiskajiem faktoriem noturīgu koksnī. Prognozes liecina, ka Eiropas dižskābarža augšanai piemērotais areāls līdz gadsimta vidum ietvers arī visu Latvijas un Igaunijas teritoriju (Kramer *et al.*, 2010). Tomēr šīs koku sugas faktisko izplatību noteiks saimnieciskā darbība. Tieši tāpat saimnieciskā darbība noteikta arī lapegles īpatsvara izmaiņas Latvijas mežos.

Līdzšinējos pētījumos veikta šo koku sugu izplatības kartēšanu Latvijas teritorijā, atsevišķi analizēta dažādu audžu augšana (galvenokārt radiālais pieaugums, krāja), raksturoti piemērotie apstākļi. Tomēr nav pietiekamas informācijas par koku augstuma pieauguma dinamiku.

Pētījuma mērķis bija izstrādāt vienādojumus dižskābarža un lapegles augšanas gaitas raksturošanai Latvijā.

Šeit analizētas tikai radiālā pieauguma veidošanās sakarības un rezultāti nodoti pētījuma “Augšanas gaitas modeļu pilnveidošana” radošajai grupai.

Metodika

Augšanas gaitas modeļu sagatavošanai, dižskābaržu un lapegļu audzēs veikta parauglūkumu uzmērīšana desmit audzēs MPS Šķēdes un Auces meža novados (2.2. tabula), nosakot audzes taksācijas rādītājus tiešā katra izvēlēta paraugkoka tuvumā. Paraugkoki izvēlēti tikai no I krafta klases, lai samazinātu iespējamās konkurences ietekmi uz augstuma pieaugumu (Brunner and Nigh, 2000). Lapeglei kopumā analizēti 32 koki vecumā no 43 līdz 119 gadiem, dižskābardim 20 koki vecumā no 70 līdz 140 gadiem. Katram nozāģētajam kokam nomērīts stumbra garums un sākot no koka sakņu kakla tas samarķēts vienu metru garos nogriežņos, papildus atzīmējot 0,5 m un 1,3 m; no katra nogriežņa gala izzāģētas aptuveni 3-5 cm biezas ripas gadskārtu skaita un platuma mērīšanai. Laboratorijā katram paraugam (ripai) noteikts kambiālais vecums. Gadskārtu platums mērīts un to skaits noteikts izmantojot LINTAB 5 mērgaldu un TSAP programmatūru (RinnTECH, Heidelberg, Vācija).

Lai pārliecinātos par noteiktā vecuma atbilstību faktiskajam, gadskārtu mērījumu sērijas salīdzinātas savstarpēji (šķērsdatētas). Ņemot vērā, ka izmantotā stumbra analīzes metode neparāda koka patieso augstumu attiecīgajā vecumā, faktiskais koku augstums (konkrētā vecumā) aproksimēts balstoties uz stumbra ripu augstumu un vecumu starpību. Aprēķinam izmantota Carmean (1972) pieeja:

$$h = H_1 + 0,5 \frac{H_1 - H_0}{t_0 - t_1}, \quad (1)$$

kur H – koka faktiskais augstums, H_0 , H_1 , t_0 , t_1 attiecīgi secīgu ripu augstums un kambiālais vecums.

Faktisko augstumu un vecuma sērijas, kas iegūtas balstoties uz koksnes paraugiem, papildinātas ar koku augstumu un pārveidotas tā, lai raksturotu augstuma un vecuma izmaiņas, attiecīgi viens ieraksts saturēja informāciju par h_0 un h_1 , kas ir koka augstums (metros) vecumā t_0 un t_1 (gados).

Dižskābaržu un lapegļu audžu parauglūkumu taksācijas rādītāji

Vieta	Kvartāls- nogalabs	Vecums	H,m	D,cm	G, m ²
MPS					
Šķēdes MN					
	14-3	70	29	31	28
	21-1	132	29	39	33
	21-14	58	24	23	15
	21-16	45	19	20	30
	21-26	92	30	41	37
	21-27	62	22	25	23
	21-28	132	35	37	48
	21-30	66	25	26	38
MPS Auces					
MN					
	16-12	80	28,7	27,9	41,5
	16-15	80	33,4	34,6	46,9
	16-22	118	34,4	53,3	47,9
	16-36	83	30,2	29,8	54,9
	17-11	123	22,8	25,5	23,6
	23-19	85	34,2	36,0	45,6
	33-14	67	20,3	24,9	38,1
	54-6	81	25,0	30,0	28,6
	54-9	81	26,5	28,8	23,1
	116-6	65	24,0	26,5	35,9

Augstuma pieauguma gaitas raksturošanai veidoti nelineāri, balstoties uz algebriskās diferences pieejas transformēti, pieauguma modeļi, kas ir neatkarīgi no audžu auglības un raksturo pieauguma veidošanos (Cieszewski and Baily, 2000; Sharma et al., 2011). Modelēšanā izmantoti Čapmana-Ričardsa, Hosfelda, Hosfelda I, Kinga-Prodana, Slobodas, Stranda, Korfa, un Log-logistiskie testi. Modeļi iestrādāti augstuma pieaugumam virs 1,3 m, lai mazinātu kļūdas, kas ir saistītas ar koka augšanu agrīnā vecumā. Lai arī dati no viena koka un audzes ir savstarpēji atkarīgi, jaukta tipa efekta modeļi, kas ņem vērā šādas saistības, tomēr ir pretrunā ar algebriskās diferences pieejas pieauguma modelēšanu (Cieszewski and Strub, 2018). Tādejādi šādi modeļi netika izmantoti, lai novērstu kļūdas, kas ir saistītas ar variantu atdalīšanu modelēšanas gaitā. Modelēšanā izmantoti fiksēto faktoru nelineāra regresija. Izveidoto modeļu precizitāti un efektivitāti raksturoja veicot grafisko analīzi, ar statistiskajiem rādītājiem, kā arī balstoties uz bioloģiskās realitātes principiem (Goelz and Burk, 1992). Izmantotajiem precizitātes rādītājiem bija vidējā kļūda (MR); MakNemaras pseido-R² (pseudoR²), vidējā kvadrātiskā kļūda (RMSE), Akaika un Baja informācijas kritēriji (AIC un BIC), kā arī atlikumu standartkļūda (RSE).

Rezultāti

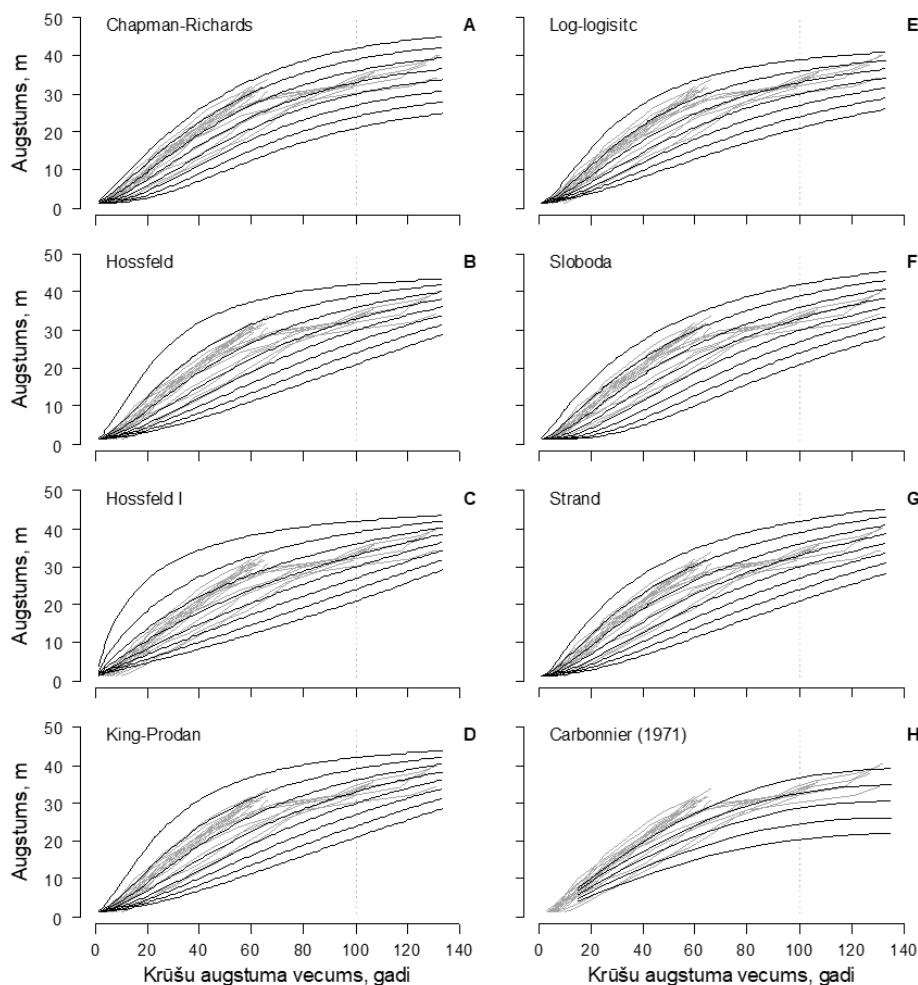
Dižskābardis

Dižskābārža augstuma augšanas gaitas raksturošanai, balstoties uz matemātiskā modeļa atbilstību novērojumiem (AIC), precīzākie bija Sloboda un Čapmana-Ričardsa modeļi, kas arī vislabāk arī atbilda bioloģiskā reālisma principam (2.3. tabula, 2.4. attāls). Izmantojot šo pašu pieeju, līdzīgs secinājums izdarīts arī par caurmēra pieauguma veidošanos. Savukārt, salīdzinot augstuma pieauguma veidošanos ar otrās paaudzes kokiem no Zviedrijas dienvidu daļas (Carbonnier, 1971), dižskābarži Latvijā uzrādīju labāku augstuma pieaugumu. Pieauguma veidošanās atšķirības starp pirmās un otrās paaudzes (Latvijā) dižskābāržiem ir galvenokārt saistīta ar dabisko un antropogēnu (stādmateriāla) atlasī.

2.3. tabula.

Dižskābārža augšanas gaitas modeļu parametri un to precizitāte (t -vērtības), kā arī modeļu kopējo precizitāti raksturojošie rādītāji (vidējā absolūtā kļūda (MR), atlikumu standartkļūda (RSE, RMSE), Akaike informācijas kritērijs (AIC), pielāgotā R^2 vērtība, un nejaušo faktoru kopējā variācija (VAR).

	Čapmana-Ričardsa	Hosfelda	Hosfelda I	Kinga-Prodana	Log-logistiskais	Slobodas	Stranda
Koeficientu vērtības							
b1	0,0227	43,7466	0,0228	1,576	43,803	52,9402	0,1789
b2	-9,8636	121,078	-0,0054	118,678	-104,29	0,2502	-0,0034
b3	42,6561	1,5954		-5281,7	-1,6153	0,6489	2,2777
Koeficientu precizitāte (t -vērtība)							
b1	16,88	10,36	11,47	37,15	11,83	7,8	8,48
b2	1,91	2,65	4,7	2,17	0,06	7,57	2,03
b3	2,23	37,81		2,03	38,12	12,98	15,7
Modeļu raksturojums							
MR (m)	0,48	0,51	0,72	0,52	0,53	0,49	0,51
RSE (m)	0,6	0,65	0,83	0,65	0,67	0,63	0,64
RMSE (m)	0,6	0,64	0,82	0,65	0,66	0,62	0,64
AIC	660,3	685,3	835	686,9	694,3	656,8	677,7
Piel. R^2	0,9963	0,9956	0,9958	0,9956	0,9954	0,9959	0,9958
VAR (koks)	0,317	1,125	0,133	0,013	0,432	0,721	0,009
VAR (audze)	0,011	1,965	2,231	2,023	0,414	0,168	0,377
VAR (atlikuma)	0,367	0,418	0,553	0,422	0,441	0,384	0,409



2.4. attēls. Nelineārie dižskābarža augšanas modeļi (melnās līnijas), kas veidoti balsoties uz stumbra analīzes datiem (pelēkās līnijas) bonitātes klasēm 100 gadu vecumā ar trīs metru intervālu (A–G), kā arī Zviedrijas dienvidu daļas pieauguma līknes (Carbonnier, 1971) ar 4 m virsaugstuma bonitāšu intervāliem (100 gadu vecumā).

Lapegle

Izveidotie modeļi (2.5.attēls) uzrādīja atšķirīgu atbilstību bioloģiskās realitātes principam (Goelz and Burk, 1992), kā arī atšķirīgus precizitātes rādītājus (2.4. tabula).

Izstrādātie modeļi kopumā uzrādīja līdzīgu precizitāti (kļūdas) izņemot Hosfelda I modelis, kam kļūdu rādītāji bija augstāki. Hosfelda I modelis uzrādīja zemāku efektivitāti, par ko liecināja augtākas AIC un BIC vērtības. Neatkarīgi no tipa, determinācijas koeficienti visos gadījumos bija augsti ($\text{pseudo}R^2 > 0,99$). Parametru precizitāte bija apmierinoša, jo $t > 2$, kā arī parametri bija būtiski (nav parādīts), izņemot b1 parametru log-loģistiskajā modelī. Konstatētās parametru vērtības bija salīdzināmas ar citu autoru publicētajām (Sharma et al., 2011), apliecinot izstrādāto modeļu ticamību.

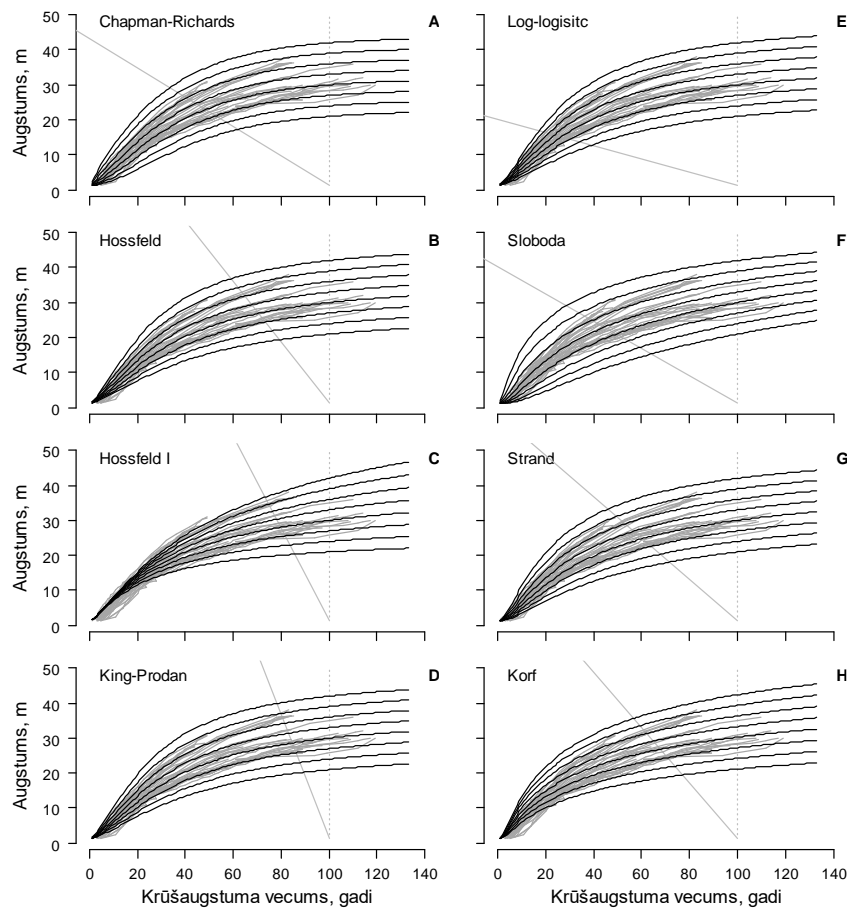
2.4. tabula.

Modeļu parametri, to precizitāte (t -vērtības), modeļu kopējās precizitāte (PMSE, MR un RSE) un efektivitātes rādītāji

	Čapmana-Ričards	Slobodas	Stranda	Log-logistiskais	Hosfelda	Kinga-Prodana	Hosfelda I	Korfa
Koefficientu vērtības								
b1	0,033	56,635	0,152	7,409	68,531	1,479	3,993	0,152
b2	-3,730	0,490	0,014	5288,542	-5,852	-5,852	-4,201	25,449
b3	17,906	0,943	2,280	-1,474	1,479	401,038	-	0,541
Koefficientu precizitāte (t -vērtība)								
tb1	27,0	11,1	8,1	0,6	4,9	48,1	12,2	6,9
tb2	2,9	15,7	3,0	2,3	2,2	2,2	9,0	25,4
tb3	4,0	24,5	20,1	47,9	48,1	3,8	-	32,7
Modeļu raksturojus								
RMSE	0,51	0,52	0,52	0,53	0,53	0,53	0,67	0,51
MR	0,36	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36	0,45	0,36
AIC	1353	1365	1366	1415	1417	1417	1836	1335
BIC	1372	1384	1385	1434	1436	1436	1851	1354
pseudoR ²	0,996	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,994	0,995
RSE	0,514	0,518	0,518	0,532	0,533	0,533	0,674	0,509

Balstoties uz modelēto virsaugstuma bonitāšu līknēm (2.5. attēls) Čapmana-Ričardsa un Slobodas modeļi visvairāk atbilda bioloģiskās realitātes principam (Goelz and Burk, 1992), jo šie modeļi aptvēra empīrisko datu izkliedi neatkarīgi no vecuma un uzrādīja zemākas kļūdas un augstu efektivitāti (2.4. tabula). Pārējie modeļi uzrādīja izteiktas neprecizitātes jaunaudzēs vecumā (< 20 gadi). Ņemot vērā, ka lapegle agrīnā vecumā ir saulmīlis, šīm neprecizitātēm var būt otršķirīga loma.

Neatkarīgi no modeļa (2.5.attēls.), galvenokārt jaunākajiem kokiem novērotas novirzes no prognozētās augšanas gaitas pēdējo 20–30 gadu laikā. Šādas anomālijas novērotas arī dižskābardim. Lai arī dižskābardim šādas atšķirības saistītas ar labāka stādmateriāla atlasīti no introducētajiem genotipiem, lapegles gadījumā novērots primārā pieauguma uzlabojums, kas varētu būt saistāms ar klimata pārmaiņām un attiecīgi augšanas apstākļu uzlabojumu. Par augšanas apstākļu uzlabojumu liecina arī vecāko koku pieaugums pēdējo gadu laikā (pozitīvs papildpieaugums). Līdz ar to izstrādāto modeļu prognozes vērtējamas kā konservatīvas. Balstoties uz modeļu precizitāti un reālismu, Čapmana-Ričardsa, Slobodas, Hosfelda un Stranda modeļus var ieteikt lapegles augšanas gaitas prognozēšanai Latvijā.



2.5. attēls. Lapegles augstuma pieauguma nelineārie algebriskās diferences modeļi (melnās līnijas) un empīriskie stumbru analīzes dati (pelēkās līnijas). Modeļi parādīti virsaugstuma bonitātēm 100 gadu vecumā ar trīs metru soli intervālā no 21 līdz 42 m augstumam.

Secinājumi

1. Izveidotie dižskābarža augšanas gaitas vienādojumi liecina par šīs sugas otrās paaudzes veiksmīgu adaptāciju Latvijas klimatam. Tāpat lapegles straujā augšana liecina par tās mežsaimnieciskas izmantošanas perspektīvu.
2. Abu vērtēto koku sugu pieauguma ietekmē mitruma deficīts, kas var to samazināt vai pat īslaicīgi apstādināt, līdz koka stumbrā atjaunojas ūdens uzkrājums. Tomēr šajā nav nozīmīgas atšķirības no citām šajā pētījumā analizētajām biežāk sastopamajām koku sugām, tātad pavairošanai meklējami pret šo abiotisko faktoru noturīgāki genotipi sugas ietvaros.

Rekomendācijas

1. izmantot iegūtos koeficientus dižskābarža un lapegles augšanas gaitas modelēšanai Latvijā.
2. Latvijas rietumu daļā iespējams izveidot ražīgas dižskābarža audzes. Stādāmo materiālu audžu ierīkošanai rekomendējams ievākt no pluskokiem Latvijā esošajās audzēs.
3. Kontrolētos apstākļos (salcietības testi) un eksperimentālajos stādījumos rekomendējams turpināt pārbaudīt dižskābarža adaptāciju Latvijas austrumu daļas klimatiskajiem apstākļiem, kā arī vērtēt lapegles hibrīdu piemērotību klimata ekstrēmiem.

3. Prognozēt koku augšanas gaitas izmaiņas nākotnes klimatā

3.1. Priedes, egles un bērza radiālā pieauguma atbildes reakcija uz meteoroloģiskajiem faktoriem

Pamatojums

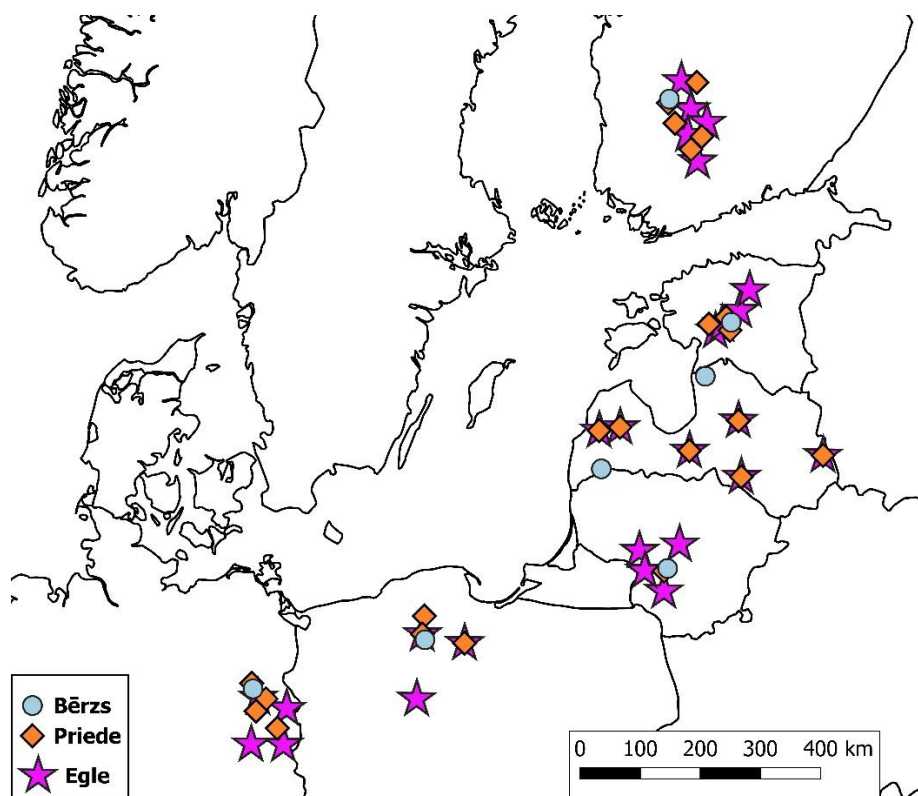
Klimats jeb noteikta perioda meteoroloģiskie apstākļi ir viens no pieaugumu nosakošajiem (limitējošajiem) faktoriem. Meteoroloģiskās komponentes iekļaušana augšanas gaitas modeļos spēj sniegt precīzākas ilgtermiņa prognozes (Sharma et al., 2012) un salīdzināt atšķirīgu klimata attīstības scenāriju ietekmi, ļaujot nodrošināt pamatotākus mežsaimnieciskos lēmumus.

Kritiskie pieaugumu ietekmējošie faktori atšķiras reģionos ar dažādu klimatu (Speer, 2010; Friedrichs et al., 2009) un mainās, kokam novecojot (Carrer, Urbinati, 2004). Tas nozīmē, ka pieaugumu ietekmējošie faktori atšķiras arī vienā un tajā pašā vietā tagadnes un nākotnē sagaidāmajā klimatā. Nākotnē prognozētas ne tikai vidējās temperatūras un nokrišņu rādītāju izmaiņas, bet arī meteoroloģisko faktoru ekstrēmu biežuma un amplitūdas palielināšanās (Beniston, 2004; Avotniece et al., 2012; Jansons et al., 2015). Šīm prognozētajām izmaiņām ir būtiska ietekme uz koku sugu izplatības areāliem un saglabāšanos (Fuhrer et al., 2006; Schlyter et al., 2006; Lindner et al., 2010), kā arī pieaugumu (Allen et al., 2010). Koku atbildes reakcijas uz meteoroloģiskajiem faktoriem raksturs un īpatnības ir būtiskas, izstrādājot ilgtermiņa pieauguma izmaiņu prognozes.

Pētījuma mērķis bija novērtēt Latvijā izplatītāko koku sugu radiālā papildpieauguma atbildes reakciju uz meteoroloģiskajiem faktoriem.

Metodika

Meteoroloģisko faktoru ietekmes uz priedes, egles un bērza gadskārtu platumu, kā arī pieauguma reakcijas plastiskuma vērtēšanai Baltijas jūras austrumu reģiona klimatiskajā gradientā nosprausta aptuveni 1500 km gara transekte. Transekte šķērsoja reģionu no Somijas dienvidiem līdz Vācijas ziemeļiem (3.1. att.). Gar transekti atlasītas 17 bērza, 22 priedes un 26 egles audzes ($\geq 80\%$ no krājas), kas atbilda sugai tipiskiem apstākļiem (sausieņi) audzēs ar smilts vai mālsmilts augsni. Atlasītās audzes atradās saimnieciskajos mežos. Audžu atlase veikta reģionālā klimatiskā gradienta raksturošanai. Audžu vecums bija no 60 līdz 130 gadiem, tajās bija neliels citu sugu (galvenokārt priede, egle, bērzs un apse) piemistrojums. Izvēlētās audzes reprezentē Latvijā pagātnē un tuvākajā nākotnē sagaidāmos klimatiskos apstākļus. Ģeogrāfiskais augstums visās audzēs bija salīdzinoši neliels (< 450 m v.j.l.).



3.1. att. Izvēlēto priedes, egles un bērza audžu izvietojums.

Katrā audzē no 10–30 valdošajiem kokiem (I–II Krafta klase) ar Preslera svārpstu 1,3 m augstumā ievākti divi urbumi no nejaušām pretējām stumbra pusēm. Paraugi izžāvēti un ielīmēti fiksācijas plānšetēs. Priedes un egles paraugiem veikta slīpēšana ar dažāda raupjuma (120–800) slīppapīru. Ņemot vērā, ka bērzam raksturīgas neizteiktas gadskārtu robežas, koksnes paraugu sagatavošanai mērījumiem izmantotas mikroskopijas un kvantitatīvās koksnes anatomijas metodes (von Arx et al., 2016; Gärtner, Schweingruber, 2013). Gadskārtu platums mērīts manuāli, izmantojot LINTAB6 mērgaldu (RinnTech, Heidelberg, Vācija) ar precizitāti līdz 0,01 mm.

Mērījumu laika rindu kvalitāte un datējums pārbaudīts, veicot grafisku un statistisku šķērsdatēšanu izmantojot brīvprogrammatūru COFECHA (Grissino-Mayer, 2001). Koku vidējās laika rindas divkārt detrendētas ar negatīvo eksponenciālo un trešās kārtas polinomiālo modeli (līkni). Autokorelācijas ietekme noņemta ar pirmās kārtas autoregresīvo funkciju (“ar1”). Audzes hronoloģija aprēķināta, izmantojot *biweight robust mean*, kas ir datu kopām ar bimodālu sadalījumu paredzēta vidējo vērtību aprēķināšanas metode (Cook, 1965). Iegūto hronoloģiju raksturošanai aprēķināti populācijas signāla izpausmes (EPS), signāla stipruma (SNR) un starpsēriju korelācijas (*r-bar*) rādītāji (Bunn, 2008; Wigley et al., 1984). Hronoloģiju savstarpējās līdzības raksturošanai veikta uz korelāciju matrici balstīta galveno komponentu analīze. Gadi uzskatīti kā mainīgie, bet audzes kā paraugi. Galveno komponentu būtiskums novērtēts ar randomizācijas (Monte Carlo) metodi, veicot 1000 permutācijas. Analīze veikta laika periodam, ko reprezentēja visas hronoloģijas (1954.–2017. gads). Analīze veikta katrai sugai atsevišķi.

Lokālās (audzes) lineārās pieauguma saistības ar meteoroloģiskajiem faktoriem raksturotas ar Pīrsona korelācijas analīzi. Korelācijas koeficientu būtiskums novērtēts, izmantojot neparametrisko būtstrapu ar 1500 iterācijām (Zang, Biondi, 2012). Pieauguma

un meteoroloģisko saistību izmaiņas laikā vērtētas ar slīdošo korelācijas analīzi, tādējādi raksturojot to stacionaritāti (Wilmking et al., 2017, 2020). Slīdošā intervāla garums pielāgots atbilstoši kopējā perioda ilgumam. Izmantotie meteoroloģiskie faktori bija mēnešu vidējās temperatūras un nokrišņu summas. Mitruma bilances raksturošanai aprēķināts standartizētais nokrišņu evapotranspirācijas indekss (SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010). Meteoroloģiskie faktori apkopoti ietekmes periodā no iepriekšējā jūnija (pirms gadskārtas veidošanās) līdz oktobrim gadskārtas veidošanās gadā. Meteoroloģiskā informācija iegūta no CRU (*Climatic Research Unit*) repozitorija novērojuma stacijām, kas atrodas <35 km attālumā no pētītajām audzēm. (Harris et al., 2014). Galveno reģionālo radiālo pieaugumu ietekmējošo meteoroloģisko faktoru, kā arī pieauguma atbildes reakcijas plastiskuma un nelinearitātes raksturošanai (Wilmking et al., 2020) izmantots jaukta tipa vispārinātais aditīvais modelis (GAMM; Wood, 2011).

Rezultāti

Visām vērtētajām koku sugām konstatēts konkrētam reģionam specifisks gadskārtu platuma ikgadējas mainības ritms. Vērojamas lokālas variācijas iezīmes, kā arī atsevišķas kopīgas iezīmes (zīmīgie gadi). Pirmās divas galvenās komponentes bija būtiskas, un kopā izskaidroja ap 30% no variācijas priedei, ap 40% eglei un vairāk nekā 70% bērzam (piemērs priedei: 1.2. att. A). Pirmā galvenā variācijas komponente visām analizētajām sugām uzskatāmi sarindoja audzes atbilstoši to ģeogrāfiskajam platumam, norādot uz saikni ar temperatūras režīmu (piemērs priedei: 3.2. att. B).

Otrā komponente visām vērtētajām koku sugām bija saistīta ar vasaras ūdens režīmu: šī perioda nokrišņu daudzumu un izkliedi. Konstatēts, ka gan temperatūra, gan mitrums noteiktos gada posmos mūsu reģionā var būt caurmēra pieaugumu nozīmīgi ietekmējoši faktori. Audžu ordinācija norāda uz radiālajam papildpieaugumam un tā jutībai raksturīgām graduālām izmaiņām reģiona ietvaros.

Lineārā pieauguma un meteoroloģisko faktoru saistību vērtējums priedei liecina, ka siltākos klimatiskajos apstākļos Lietuvā, Polijā un Vācijā gadskārtu platumu izteikti ietekmēja gan ziemas temperatūra, gan nokrišņi un ūdens deficīts vasarā. Lai arī ziemā (decembris–aprīlis) koki neveido vasas pieaugumu, Hansen un Beck (1994) novērojuši aktīvu sakņu attīstību, kas ir atkarīga no augsnes temperatūras (Tierney et al., 2001). Sakņu attīstība būtiski ietekmē ūdens un minerālvielu apriti kokā augšanas sezonas laikā. Plašāka sakņu sistēma paaugstina koka kā bioloģiskas sistēmas plastiskumu mainīgā vidē (Kramer, Boyer, 1995; Tierney et al., 2001), izskaidrojot izteiktās sakarības, it īpaši, ņemot vērā pieaugošos ūdens deficīta apstākļus augšanas sezonas laikā (Hartmann et al., 2013). Ziemas nokrišņu ietekme skaidrojama ar sniega slāņa termoizolējošajām īpašībām, kas kavē augsnes sasalšanu, atvieglojot sakņu attīstību (Tierney et al., 2001). Tiešo ūdens deficīta ietekmi uz radiālo pieaugumu (visintensīvākais jūnijā (Martinez-Vilalta et al., 2012)), raksturo tā saikne ar nokrišņu summu un sausuma indeksu. Vācijā (vissiltākais klimats analizētajā reģionā) negatīvās vasaras gaisa temperatūras ietekme uz gadskārtu platumu norāda uz karstuma šoka ietekmi uz asimilāciju, iespējot gan ksiloģenēzi, gan rezerves barības vielu veidošanos (Allen et al., 2010).

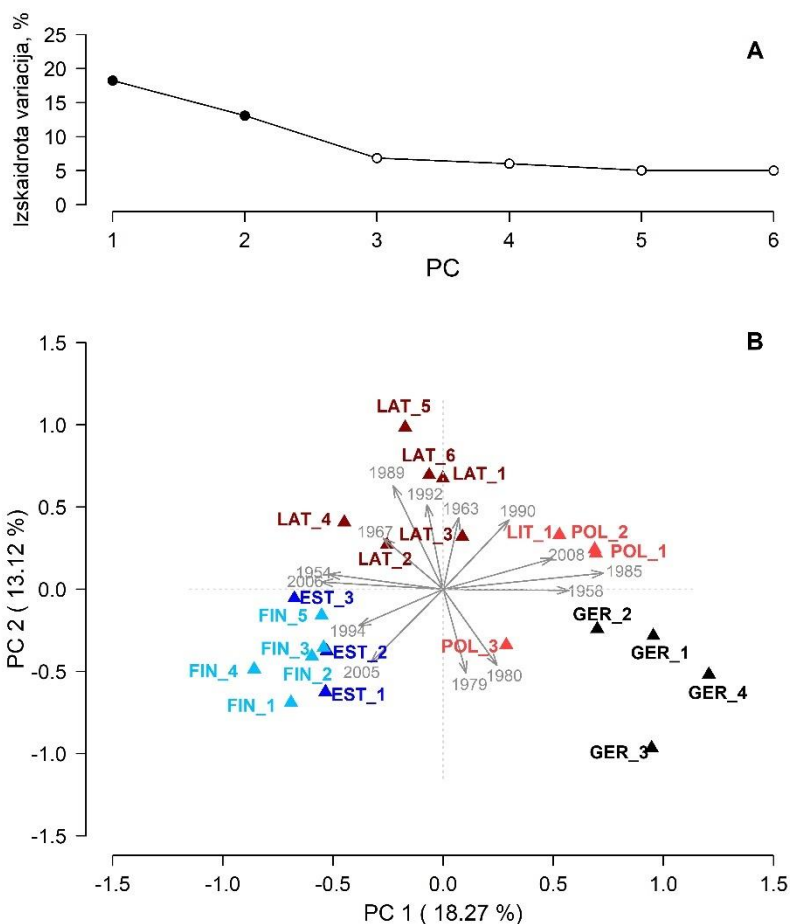
Līdzīgas sakarības konstatētas arī eglei un bērzam. Eglei kā mitruma prasīgai sugai (Mina et al., 2016) novērota izteiktāka ar ūdens pieejamību vasarā saistītu meteoroloģisko faktoru limitējošās ietekmes pastiprināšanās pētītā reģiona dienvidu virzienā. Novērotais

reģionālais saistību gradients liecina arī par ietekmes mainību laikā (Speer, 2010). Polijā un Vācijā egles gadskārtu platuma saistības ar meteoroloģiskajiem faktoriem bija izteikti līdzīgas. Pētījuma transektes dienvidu daļā, līdzīgi kā Baltijas valstīs, pieauguma un meteoroloģisko faktoru saistības bija izteikti kompleksas (Friedrichs et al., 2009), norādot uz paaugstinātu un pakārtotu jutību pret vides mainību. Galvenokārt novērotas saistības ar vasaras sausumu (pozitīvas saistības ar nokrišņu daudzumu un SPEI, negatīvas saistības ar temperatūru) raksturojošiem meteoroloģiskajiem faktoriem, bet, salīdzinājumā ar Lietuvu, koki pret to bija uzņēmīgi visas veģetācijas sezonas laikā (maijs–septembris). Saistību izmaiņas laikā norāda uz sausuma limitējošās ietekmes pastiprināšanos (Lindner et al., 2010). Balstoties uz novērotajām korelācijām, secināms, ka Baltijas jūras austrumu krasta reģionā ir sagaidāma meteoroloģisko faktoru ietekmes uz egles pieaugumu intensificēšanās. Šādu intensificēšanos primāri parāda lielāks novēroto augšanas–meteoroloģisko faktoru saistību skaits audzēs Polijā un Vācijā, salīdzinot ar Somiju un Igauniju.

Bērzam pārsvarā novērotas saistības ar ūdens pieejamību raksturojošiem faktoriem (nokrišņu daudzums un sausuma indekss), norādot uz bērza jutību pret sausumu hemiboreālajā zonā. Korelācijām konstatēts reģionāls gradients, norādot uz to būtisko saistību ar klimatu – tārad potenciālo klimata pārmaiņu ietekmi. Īpaši šai koku sugai siltāka klimata apstākļos vasaras temperatūras negatīvā ietekme skaidrojama ar pastiprinātu iztvaikošanu (Trajkovic, 2005) un ar iztvaikošanu saistīto ūdens deficītu (Pallardy, 2008).

Atsevišķām lineārajām gadskārtu platuma un meteoroloģisko faktoru saistībām novērotas izmaiņas laikā, kas, ņemot vērā salīdzinoši nelielo koku vecumu, visticamāk ir skaidrojamas ar klimata pārmaiņām (Restaino et al., 2016; Ohse et al., 2012; Vieira et al., 2009). Vasaras un rudens nokrišņu ietekmei bija tendence pastiprināties, norādot uz ūdens deficīta intensificēšanos, līdzīgi kā novērots citviet ziemeļu reģionos (Ohse et al., 2012). Saistības ar temperatūru vājinājās, bet nokrišņu ietekme pieauga.

Priedei Latvijā izmaiņas korelācijā starp papildpieaugumu un meteoroloģiskajiem faktoriem galvenokārt saistītas ar ziemas un pavasara temperatūras ietekmes pastiprināšanos, kas norāda uz agrākām miera sezonas beigām, un līdz ar to garāku koku uzņēmības periodu pret meteoroloģisko faktoru svārstībām ikgadējās augšanas sākuma posmā (Beck et al., 2004). Vienlaikus novērota vasaras nokrišņu ietekmes pastiprināšanās, kas norāda uz pieaugošu ūdens deficītu un tā ietekmi. Negatīvas saistības ar sausumu iepriekšējā veģetācijas sezonā saistāmas ar augšanas–vairošanās intensitātes izmaiņām, pieaugot šī perioda gaisa temperatūrai (Hacket-Pain et al., 2018). Lietuvā un Polijā, kur klimats ir siltāks un sausāks (Harris et al., 2014), priedei pārsvarā novērots ar ūdens deficītu saistīto faktoru ietekmes pieaugums. Kopš 20. gs. 70.-tajiem gadiem pastiprinājusies vasaras nokrišņu un temperatūras (sekmē evapotranspirāciju (Trajkovic, 2005)) ietekme.



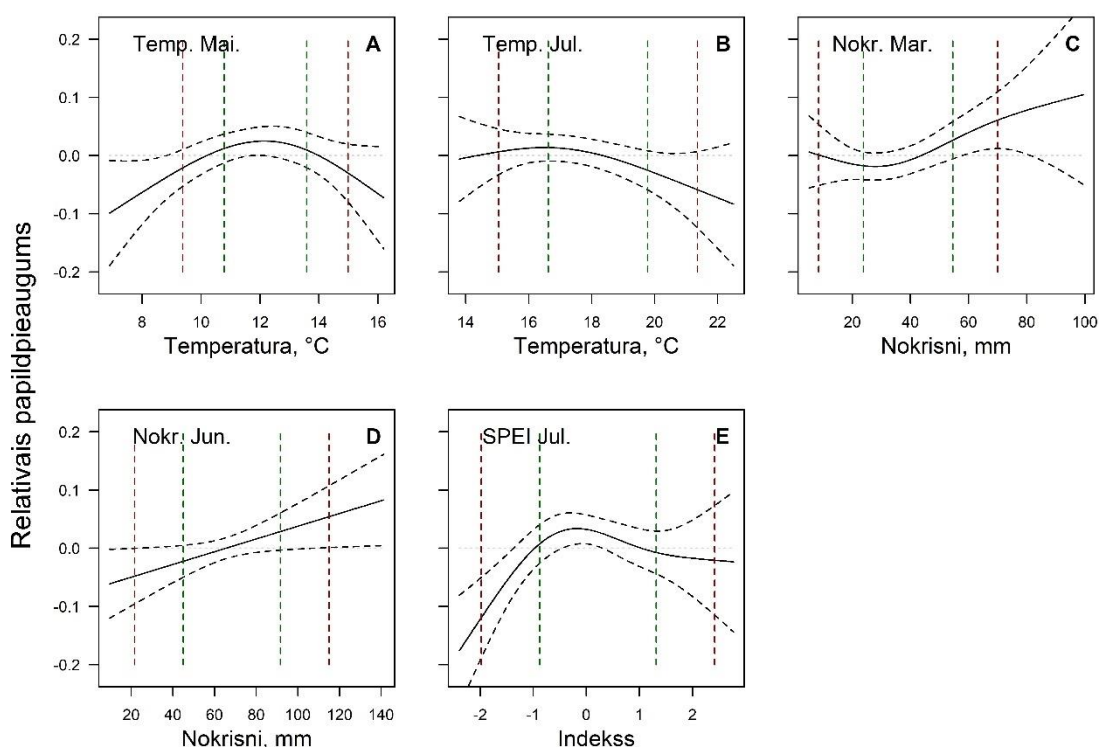
3.2. att. (A) Priedes relatīvā papildpieauguma pirmo sešu galveno komponentu (PC) īpašvērtības un būtiskums (melnie punkti, p -vērtība $< 0,05$) un (B) pētīto audžu ordinācija atkarībā no pirmajām divām galvenajām komponentēm. Skaitļi iekavās parāda katras komponentes izskaidroto variācijas daļu. Audžu atrašanās vietas: Somija (FIN), Igaunija (EST), Latvija (LAT), Lietuva (LIT), Polija (POL), Vācija (GER).

Iepriekš aprakstītās lineārās sakarības ir vispārpieņemta koku pieauguma saiknes ar meteoroloģiskajiem faktoriem analīzes pieeja, bet lineāras saistības ir vērojamas tikai ierobežotās gradientu daļās (Krebs, 2009). Lai iegūtu izpratni par faktoru ietekmes uz pieaugumu izmaiņām starp šiem reģioniem, savstarpēji salīdzina rezultātus analīzei katrā no reģioniem (piemēram, atsevišķi Latvijā un noteiktā Vācijas apgabalā).

Ir iespējama arī citāda pieeja, analīzē uzreiz ņemot vērā, ka plašākā teritorijā ekoloģiskās atbildes reakcijas un gradienti parasti ir nelineāri, piemēram, kvadrātiski, kubiski, (Lloyd et al., 2013; Paine et al., 2012; Loehle, 1998) un ar kritiskajām (robežas, sliekšņa) vērtībām. Koku lielās dzīvildzes dēļ tie ir pielāgojušies mainīgiem apstākļiem (Aitken, Bemmels, 2016), un savas dzīves laikā reaģējuši uz daudzveidīgiem vides notikumiem, veidojot gradientu laikā. Šādu iespēju nodrošina ģenētiskā adaptācija konkrētiem apstākļiem un fenotipiskais plastiskums, kas attiecas arī uz fizioloģiskajām un strukturālajām atbildes reakcijām (Nabais et al., 2018; Aitken, Bemmels, 2016). Klimata pārmaiņas, kas acīmredzami apsteidz koku dabiskās adaptācijas ātrumu, pakļauj kokus ekstrēmiem apstākļiem (Aitken, Bemmels, 2016). Konstatētās gadskārtu platuma un meteoroloģisko faktoru saistības vairumā gadījumu bija laikā mainīgas, kas skaidrojams ar

izmaiņām klimatā (Ohse et al., 2012; Carrer, Urbinati, 2006; Wilmking et al., 2004) un veģetācijas sezonas pieaugumu (Menzel, Fabian, 1999). Pieauguma atbildes reakcijas plastiskuma raksturošanai (par ko liecina graduālas korelāciju ar meteoroloģiskajiem faktoriem izmaiņas laikā un telpā) izmantojama reģionālu gadskārtu platumu datu kopa ar pietiekamām analizēto meteoroloģisko faktoru atšķirībām (Valladares et al., 2014; Lloyd et al., 2013; Wang et al., 2010).

Vispārinātais aditīvais modelis, kas ņem vērā audzes un pieauguma veidošanās gada ietekmes, norādīja uz saikni starp klimatu un pieauguma jutību pret meteoroloģiskajiem faktoriem (piemērs bērzam: 3.3. att.). Katrai no vērtētajām koku sugām identificēti vairāki reģionāli nozīmīgi pieaugumu ietekmējoši meteoroloģiskie faktori.



3.3. att. Jaukta tipa aditīvā modeļa uzrādītās bērza gadskārtu platumu atlikuma hronoloģiju un meteoroloģisko faktoru reģionālās saistības Baltijas jūras reģiona austrumu daļā. Vertikālās līnijas parāda attiecīgā meteoroloģiskā faktora klimatisko vidējo vērtību pēdējiem 30 gadiem \pm vienu standartnovirzi (iekšējās pārtrauktās vertikālās līnijas) un divas standartnovirzes (ārējās pārtrauktās vertikālās līnijas) Latvijā. Līkni pavadošās pārtrauktās līnijas parāda atbildes reakcijas ticamības intervālu.

Reģionā identificētie būtiskie meteoroloģiskie faktori ir līdzīgi tiem, kas jau konstatēti lineārās korelācijas analīzē, bet vairumā gadījumu to ietekme ir nelineāra. Identificēto faktoru kopums bērzam, atšķirībā no skujkokiem, norāda uz nelielu meteoroloģisko faktoru ietekmes pārnesei laikā (nav saistības ar iepriekšējās veģetācijas sezonas apstākļiem), liecinot par tiešu ksiloģenēzes saikni ar laikapstākļiem.

Kopumā iegūtie rezultāti norāda uz lielāku priedes pieaugumu sagaidāmajās klimata pārmaiņās (ziemas un pavasara temperatūras paaugstināšanās). Lai arī nokrišņu sadalījumam ir tendence kļūt heterogēnākam, izraisot ūdens deficītu vai pat sausuma

apstākļus, priedes atbildes reakciju līknes norāda, ka šādu izmaiņu ietekme būs neliela. Bērza un egles radiālo pieaugumu klimata pārmaiņas mazinās, galvenokārt siltāku pavasaru un sausāku vasaru dēļ. Šo ietekmi nespēs kompensēt prognozētais nokrišņu daudzuma pieaugums ziemas periodā. Līdz ar to pieaug siltākam un sausākam klimatam adaptējušos populāciju (Nabais et al., 2018; Aitken, Bemmels, 2016) ģenētiskā materiāla pielietošanas potenciāls un nozīme audžu ražības nodrošināšanā nākotnē (Nabuurs et al., 2018).

Secinājumi

1. Analizēto koku sugu radiālā pieauguma atbildes reakcija uz šiem faktoriem liecina par kopumā negatīvu klimata pārmaiņu (vidēji un meteoroloģisko rādītāju ekstrēmiem) ietekmi uz egles un bērza pieaugumu. Priedei, turpretim novērotās saistības norāda uz identificēto būtisko pozitīvo un negatīvo ietekmju savstarpēju kompensēšanos.
2. Pētījumā konstatētā ar audzi saistītā parciālā pieauguma mainības dispersija norāda uz lokālu specializāciju un ģenētiski determinētu pieauguma jutību, mazinot reģionālo sakarību ietekmi: tārad iespējām ar selekcijas metodēm mazināt koku jutību pret limitējošiem faktoriem.
3. Konstatētā nozīmīgā klimata pārmaiņu ietekme un citos pētījumos atspoguļotās sakarības par lokālo faktoru (meža tipu grupas – augsnes un mitruma) ietekmi uz saikni starp meteoroloģiju un pieaugumu liecina par nepieciešamību veikt līdzīgas analīzes audzēs uz auglīgām kūdras augsnēm, īpaši eglei un bērzam.

Rekomendācijas

1. Meteoroloģisko faktoru ietekme iekļaujama pieauguma prognozes modeļos, lai uzlabotu to precizitāti jau vidējā termiņā.
2. Meža selekcijā (īpaši eglei un bērzam) nepieciešams:
 - a) veikt analīzi par atšķirībām reakcijā uz identificētajiem kritiskajiem pieaugumu nosakošajiem faktoriem (pieauguma jutības un plastiskuma iedzimtības novērtējumu) Latvijas selekcijas populācijā. Ja variācija ir pietiekama un iedzimstoša: izstrādāt metodes un atlasīt pazīmju kopu efektīviem testiem pēcnācēju pārbaudēs un iekļaut šīs pazīmes selekcijas indeksā;
 - b) veikt selekcijas un meteoroloģisko faktoru kompleksas ietekmes analīzi, tajā ietverot materiālu (genotipus) no plašāka reģiona (īpaši – uz dienvidiem no Latvijas) un identificēt materiālu, kura izmantošana selekcijas populācijā (kontrolētos krustojumos) vai noteiktā Latvijas teritorijas daļā varētu būt lietderīga augstāku stādīto audžu ražības nodrošināšanai nākotnē.

3.2. Radiālās augšanas gaitas modeļi priedei, eglei un bērzam

Pamatojums

Augšanas gaitas modeļi ir nozīmīgi stratēģisku lēmumu pieņemšanai, vērtējot plānoto darbību ilgtermiņa (vismaz viens aprites cikls) ietekmi uz dažādiem ar mežsaimniecību saistītiem aspektiem – kā oglekļa uzkrājuma dinamika, koksnes plūsma, noteiktu dimensiju koku klātbūtne meža masīvā u.c. Notiekot straujām klimata pārmaiņām – tādām, kur apstākļi nozīmīgi mainās ātrāk nekā koka dzīves laikā – būtiski ņemt vērā šo izmaiņu ietekmi uz koku pieaugumu, lai nezaudētu prognožu precizitāti.

Pētījuma mērķis izstrādāt koeficientus meteoroloģisko faktoru ietekmes raksturošanai caurmēra augšanas gaitas modeļos.

Šeit analizētas tikai radiālā pieauguma veidošanās sakarības un rezultāti nodoti pētījuma “Augšanas gaitas modeļu pilnveidošana” radošajai grupai. Kā liecina mūsu pētījumu rezultāti, vērtējot parasto priedi, augstuma pieaugumu limitējošo faktoru komplekss var būt atšķirīgs, nekā caurmērā pieauguma. Tādēļ pilna novērtējuma ieguvei nākamajā pētījuma periodā būtu veicama arī šo pieaugumu analīze, par ko arī zinātniskajā literatūrā ir ļoti maz datu.

Metodika

Radiālās augšanas gaitas modeļu izstrāde balstīta uz pētījuma laikā kā arī iepriekšējos periodos Latvijā ievāktā empīriskā materiāla. Īsumā, dažādās Latvijas mežaudzēs, kas raksturīgas konkrētai pētītajai sugai, no I un II Krafta klase kokiem 1.3m augstumā ievākti divi koksnes paraugi (urbumi). Atlasītas audzes ar maksimālu vecumu, lai raksturotu pieauguma mainību koka dzīves laikā (mainoties bioloģiskajam vecumam). Paraugoti vizuāli veseli koki. Laboratorijā urbumi fiksēti, to virsma slīpēta ar dažāda raupjuma slīppapīru. Gadskārtu platums mērīts uz paraugu virsmas. Urbumu mērījumu kvalitāte pārbaudīta (sērijas šķērsdatētas) un aprēķinātas koku vidējās sērijas.

No pieejamajām sērijām atlasītas tās, kuras parādīja augstu savstarpējo saskanību (vidējā augšanas ritmu starpsēriju korelācija > 0.35), nodrošinot kopīga klimatiskā signāla klātbūtni. Analīzei atlasītas 121 priežu (no 22 parauglaukumiem sešās audzēs), 76 egļu (no 54 parauglaukumiem 28 audzēs) un 71 bērza (no 48 parauglaukumiem 18 audzēs) gadskārtu platuma laika rindas. Atlasītās laika rindas raksturoja radiālo pieaugumu, sākot ar pirmo krūšaugsstuma kambiālā vecuma gadu.

Lokālā meteoroloģiskā informācija (novērojumu stacijām < 30 km attālumā no pētītajām audzēm) iegūta no CRU 3.24 datu masīva (Harris et al., 2014). Balstoties uz radiālā papildpieauguma mainības analīzes rezultātiem, kā meteoroloģiskie faktori izmantotas mēnešu vidējās temperatūras un nokrišņu daudzums, kas iegūts no attiecīgā brīvpieejas repozitorija. Sausuma apstākļu raksturošanai izmantots standartizētais nokrišņu evapotranspirācijas indekss (SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010), kas aprēķināts baltoties uz mēneša vidējo temperatūru, nokrišņu daudzumu un evapotranspirāciju. Meteoroloģiskie faktori apkopoti ietekmes periodā no iepriekšējā jūnija (pirms gadskārtas veidošanās) līdz oktobrim gadskārtas veidošanās gadā, ņemot vērā vides ietekmes pēctecību.

Pētījumā novērtēta no klimatiskajiem faktoriem atkarīgu koeficientu izmantošanas lietderība radiālās augšanas gaitas modeļos to precizitātes paaugstināšanai. Gadskārtu

platumu laika rindas ar kumulatīvo transformāciju pārveidotas par stumbra koksnes daļas diametra izmaiņām atkarībā no krūšaugstuma kambiālā vecuma. Radiālā pieauguma modelēšanā izmantota vispārinātās algebriskās diferences pieeja (*generalized algebraic difference approach*; Sharma et al., 2015). Koku diametra izmaiņu laikā raksturošanai par pamatu ņemts Hossfeld IV modelis (saukts arī par McDill-Amateis augšanas modeli) (Sharma et al. 2015), kas izmantots arī citos LVMI Silava augšanas gaitas pētījumos:

$$D_1 = \frac{b_0}{1 - \left(1 - \frac{b_0}{D_0}\right) \left(\frac{t_0}{t_1}\right)^{b_3}},$$

kur D_1 ir koka diametrs konkrētajā gadā, D_0 - koka diametrs iepriekšējā gadā, t_0 koka kambiālais vecums iepriekšējā gadā, t_1 - koka kambiālais vecums konkrētajā gadā. Analīze veikta katrai sugai atsevišķi. Lai arī datiem novērota hierarhiska struktūra, jaukta tipa modeļi, kas šādā formā neatbilst pieauguma analīzei (Cieszewsk, Strub, 2018), nav izmantoti. GADA modeļos atkarības datus noīsinātas substitūcijas procesa gaitā. Ņemot vērā, ka modeļu atlikuma vērtības uzrādīja augstu autokorelāciju, veidoti arī modeļi, kas ņem vērā autokorelācijas struktūru (AR1 un ARMA).

Analīzē izmantotas četras modeļu saimes. Pirmā saime iekļāva oriģinālo Hossfeld, papildus iekļaujot modeli ar autokorelāciju struktūras. Otrajā saimē iekļāva modeļus ar divu meteoroloģisko faktoru ietekmi tikai uz koeficientu b_0 (ar un bez autokorelācijas struktūras).

$$D_1 = \frac{b_0 + b_1 * klim_1 + b_2 * klim_2}{1 - \left(1 - \frac{b_0 + b_1 * klim_1 + b_2 * klim_2}{D_0}\right) \left(\frac{t_0}{t_1}\right)^{b_3}},$$

kur $klim_1$ un $klim_2$ meteoroloģiskie mainīgie un b_1 , b_2 , b_4 un b_5 ar meteoroloģiskajiem mainīgajiem saistītie koeficienti (parametri). Trešajā saimē iekļāva modeļus ar meteoroloģisko faktoru ietekmi uz koeficientu b_3 (ar un bez autokorelācijas struktūras).

$$D_1 = \frac{b_0}{1 - \left(1 - \frac{b_0 + b_1 * klim_1 + b_2 * klim_2}{D_0}\right) \left(\frac{t_0}{t_1}\right)^{b_3 + b_4 * klim_1 + b_5 * klim_2}}$$

Ceturtajā saimē iekļāva modeļus ar meteoroloģisko faktoru ietekmi gan uz koeficientu b_0 , gan arī uz b_3 (ar un bez autokorelācijas struktūras).

$$D_1 = \frac{b_0 + b_1 * klim_1 + b_2 * klim_2}{1 - \left(1 - \frac{b_0 + b_1 * klim_1 + b_2 * klim_2}{D_0}\right) \left(\frac{t_0}{t_1}\right)^{b_3 + b_4 * klim_1 + b_5 * klim_2}}$$

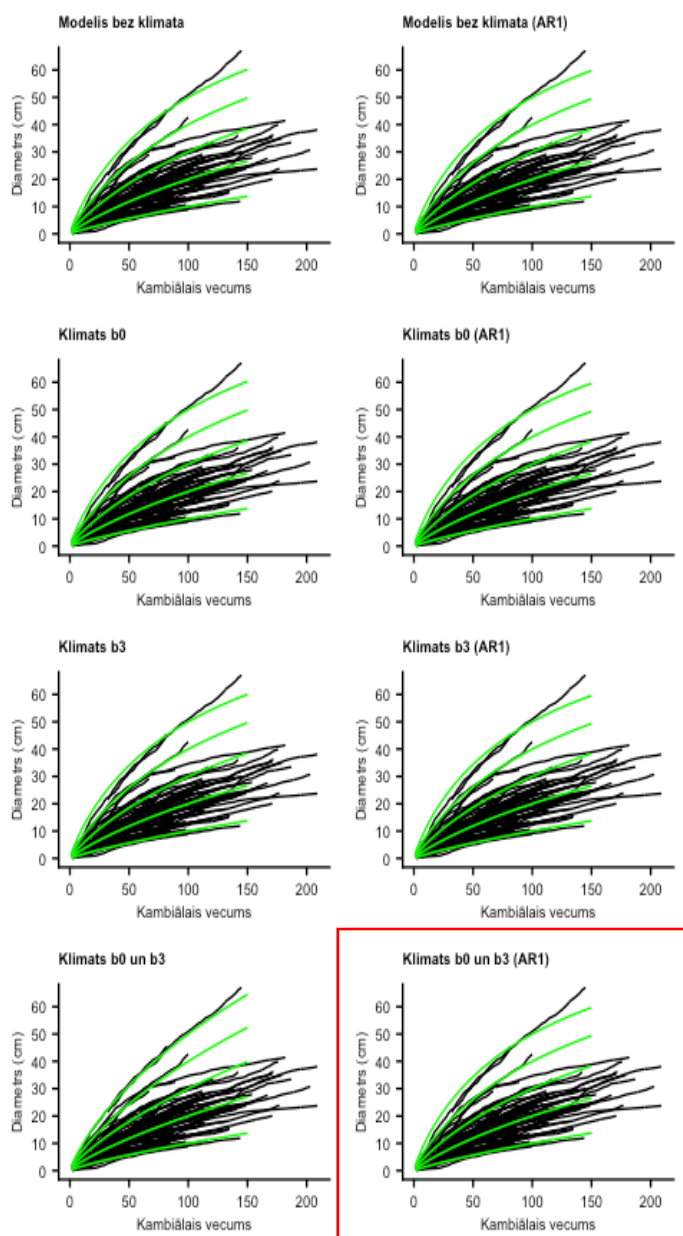
Testētas visas pieejamo meteoroloģisko faktoru kombinācijas, tās reducējot ar arbitrārās atlasēs pieeju (balstoties uz radiālā papildpieauguma mainības analīzes rezultātiem). Analīze balstīta uz individuālu koku laika rindām. Labāko modeļu atlasīti veica, balstoties uz AIC vērtībām, kā arī vērtējot prognozēto vērtību statistisko un bioloģisko reālismu. Modeļu verifikācija veikta balstoties uz kalibrācijas procesā neizmantotu datu kopu daļām (ca. 10% no novērojumiem). Aprēķini veikti programmā R 4.0.2. (R Core Team 2020) izmantojot “nlme” paketi (Pinheiro et al.2017).

Rezultāti

Katrai no vērtētajām sugām izveidoti septiņi līdz astoņi radiālā pieauguma modeļi, kuros visi mainīgie bija būtiski. Šajos modeļos (kur attiecināms) kā informatīvākie meteoroloģiskie mainīgie priecē iekļauti pieauguma veidošanās gada februāra vidējā gaisa temperatūru un aprīļa sausuma indeksa (SPEI) vērtības, savukārt eglei un bērzam marta

temperatūra un nokrišņu daudzums jūnijā, norādot uz pieauguma jutību pret miera perioda temperatūru un ūdens deficītu vasarā, kā konstatēts arī relatīvā papildpieauguma analīzē.

Visās modeļu saimēs pamatmodeļu atlikumu vērtības uzrādīja ļoti augstu autokorelāciju (virs 0,7 pirmajam gadam), tāpēc modeļi ar iekļautu pirmās pakāpes (AR1) vai otrās pakāpes (ARMA) autokorelācijas struktūru bija ievērojami labāki. AIC vērtības liecina, ka priedei un eglei vislabākais (precīzākais) modelis ir tāds, kurā klimata ietekme ir modelēta uz abiem koeficientiem (bērzam – tikai uz b_0), kā arī modelī iekļauta AR1 autokorelācijas struktūra (piemērs eglei 3.4. attēls).



3.4. attēls. Modeļu prognozētais diametru pieaugums eglei situācijā, kad 100 gadu vecumā sasniegts diametrs attiecīgi 10, 20, 30, 40 vai 50 cm. Melnās līnijas parāda modeļu kalibrācijā izmantotās stumbra koksnes daļas diametra izmaiņu laika rindas. Apvilktais – diametra pieaugumu precīzāk raksturojošais modelis.

Prognozes adekvātuma pārbaudei izmantoti paraugkoku dati un katram kokam ar katru no trim izvēlētiem labākajiem modeļiem aprēķināta vidējā kvadrātiskā kļūda. Šīm vērtībām ir ļoti plaša variācija gan viena modeļa ietvaros, gan arī attiecībā pret individuālu

kokus, liecinot par nozīmīgu caurmēra pieauguma mainību citu faktoru (lokālā audzes biezuma izmaiņas, ģenētikas ietekme, vēja ietekme u.c.) ietekmē. Tas norāda, ka koeficienti izmantojami kā papildinājums esošai augšanas gaitas modelēšanas sistēmai, kas arī bija to izstrādes mērķis, bet neviens no modeļi nav tieši izmantojams individuālu koku caurmēra vērtību prognozēšanai.

Secinājums

1. Kritiskie meteoroloģiskie faktori caurmēra augšanas gaitas modeļos priecai, eglei un bērzam apliecina no citas datu kopas iegūto rezultātu (3.1. nodaļa), uzsverot sausuma kā faktora ietekmi pieauguma limitēšanā, un nepieciešamību paaugstināt audžu noturību pret to ar mežsaimniecības un meža selekcijas metodēm.

Rekomendācijas

1. Izstrādātie koeficienti izmantojami augšanas gaitas modelēšanā, jo, ietverot tikai divus vai vienu nozīmīgāko meteoroloģiskos faktoru, samazina modeļa kļūdu par 13 – 18%. Tie ir papildinājums esošiem augšanas gaitas modeļiem, kuros ņemta vērā vecuma, biezuma u.c. faktoru ietekme uz radiālo pieaugumu.
2. Selekcijā veicināma tādu genotipu atlase, kurus mazāk ietekmē norādītie meteoroloģiskie faktori (priecai februāra vidējā gaisa temperatūru un aprīļa sausuma indekss, savukārt eglei un bērzam marta temperatūra un nokrišņu daudzums jūnijā), jo to nozīmība fiksēta kā šajā analizē, tā arī ar citām metodēm, vērtējot citu datu kopu (1. nodaļa).
3. Ņemot vērā klimata komponentes būtiskumu, kā arī augstuma pieauguma saistību arī meteoroloģiskajiem faktoriem, būtiski turpināt analīzi, izstrādājot koeficientus arī augstuma pieauguma modelēšanai, kā arī raksturot mežos ar kūdras augsnēm augošos kokus, veidojot atsevišķus modeļus vai papildinot esošos ar augsnes mainīgajiem.

4. Koku sugu mistrojums un noturība

Pamatojums

Dažādu koku sugu mistraudžu veidošana, kā arī tīraudžu pārveidošana par mistraudzēm vairākos pētījumos tiek rekomendēta kā nozīmīgs risinājums audžu noturības paaugstināšanai pret dažādu nelabvēlīgu faktoru – dendrofāgo kukaiņu, slimību, vēja, sausuma, uguns u.c. – radītajiem koku bojājumiem un reizē ar to – finansiāliem zaudējumiem. Šādu ieteikumu pamatā galvenokārt ir uzskats, ka mistraudzēs traucējumi notiek retāk, ar zemāku intensitāti un audzes atjaunošanās pēc traucējuma ir straujāka nekā tīraudzēs, uzsverot arī mistraudžu labāku pašregulēšanās un pielāgošanās spēju klimata pārmaiņu kontekstā. Tomēr jāatzīmē, ka šādas rekomendācijas parasti ir vispārīgas, tāpēc nav iespējams novērtēt to pamatotību, kā arī piemērot tās izmantošanai meža apsaimniekošanai Latvijā. Bieži publikācijās trūkst precīzu mistrojumu raksturojošu datu: sugu īpatsvars, analizētās paraugkopas apjoms, koku dimensijas, dažādu sugu koku savstarpējais izvietojums. Vairāki autori uzsver, ka ir vieni no pirmajiem, kas veikuši empīriskos pētījumus, novērtējot mistraudžu noturību pret dendrofāgajiem kukaiņiem (Jactel et al., 2002; Kaitaniemi et al., 2007; Vehviläinen et al., 2006) un slimībām (Hantsch et al., 2013, 2014). Atsevišķos analizētajos gadījumos konstatēts, ka mistrojumam var būt pozitīva ietekme, paaugstinot kokaudzes noturību pret konkrētu faktoru, tomēr tā nav absolūta: faktoram (vēja ātrumam, dendrofāgu skaitam ionvāzijas brīdī u.tml.) pārsniedzot noteiktu robežvērtību, mistrojuma pozitīvais efekts neizpaužas. Tāpat mistrojuma efekts atkarīgs no sugu specifikas; noteiktā mistrojumā noturība pret vienu riska faktoru var palielināties, tajā pašā laikā pret kādu citu – samazināties.

Pētījuma mērķis raksturot mistrojuma ietekmi uz audzes noturību un bojājumu varbūtību raksturojošiem parametriem.

Plašāk informācijas, ietverot zinātniskās literatūras analīzi, pētījuma 2015.-2018. gada pārskatos.

Metodika

Mistrojums audzes ietvaros

Salīdzinot vēja, sniega, briežveidīgo dzīvnieku, slimību un kaitēkļu izraisītu bojājumu sastopamību mistraudzēs un tīraudzēs (valdošā suga 8-10 sastāva vienības), kopumā analizēti 1125 mistraudžu un 2031 tīraudžu Meža statistiskās inventarizācijas parauglaukumu dati.

Mistrojums meža masīvā

Ietekmes analīzei kā modeļorganisms izvēlēta egļu bruņuts (*Physokermes piceae*), jo tās bojājumi ir labi dokumentēti (VMD dati), koncentrēti laikā (2010.-2011.gads) un šis kaitēklis Latvijā ir monofāgs. Pētījums izstrādāts vairākos no egles bruņuts 2010. gadā vissmagāk ietekmētajiem meža masīviem Latvijas dienvidaustrumu daļā, Daugavpils un Jēkabpils novados un salīdzinājumam (modeļa verificēšanai) izmantoti meža masīvi Latvijas centrālajā daļā, Olaines novadā.

Mistrojums audzes ietvaros

Nebojāto koku īpatsvars priedes, egles, bērza un melnalkšņa audzēs nedaudz lielāks bija tīraudzēs salīdzinājumā ar mistraudzēm: priedei attiecīgi $95,0 \pm 0,7\%$ un $94,8 \pm 1,6\%$, eglei $89,3 \pm 1,5\%$ un $87,2 \pm 1,9\%$, bērzam $97,4 \pm 0,5\%$ un $96,7 \pm 0,7\%$, melnalksnim $97,1 \pm 2,0\%$ un $96,5 \pm 1,6\%$; tomēr šīs atšķirības nebija statistiski būtiskas. Apsei ($83,3 \pm 5,2\%$ un $84,0 \pm 5,5\%$) un baltalksnim ($93,8 \pm 7,7\%$ un $94,5 \pm 2,6\%$) situācija bija pretēja, tomēr arī šīm sugām atšķirības nebija būtiskas. Kaut arī bojāto koku īpatsvars atsevišķās vecumklasēs atsevišķām sugām bija neliels (pat mazāks par 1%), tomēr atsevišķos gadījumos statistiski būtiskas. Priedei būtiski atšķīrās 6. vecumklasē (attiecīgi mistraudzē $98 \pm 1,7\%$ un tīraudzē $91 \pm 3,1\%$). Eglei 1. stāva koku skaita, mistraudzēs konstatēts būtiski lielāks vēja un/vai sniega bojāto koku īpatsvars nekā tīraudzēs vecumklasē "41-60": attiecīgi $2,3 \pm 1,5\%$ un $0,4 \pm 0,4\%$.

Novērtējot bojāto koku īpatsvaru mistraudzēs, katrai valdošajai sugai tika salīdzinātas divas mistraudžu grupas: 1) mistraudzes, kurās bez norādītās valdošās sugas ir vēl vienas sugas piemistrojums, un 2) kurās ir vēl divu sugu piemistrojums, katra vismaz 2 sastāva vienības. Audzēs ar priedi kā valdošo sugu nebojāto koku īpatsvars 3. vecumklasē būtiski augstāks bija priedes mistrojumā ar divām sugām ($99,3 \pm 1,4\%$) nekā mistrojumā ar vienu sugu ($92,5 \pm 4,5\%$); Analizējot konkrētus bojājumu veidus, konstatēts, ka šajā vecumklasē priežu audzēs ar divu sugu piemistrojumu konstatēts būtiski mazāks briežveidīgo dzīvnieku bojāto koku īpatsvars. Trešās – piektās vecumklases priedes audzēs mistrojumā ar vienu sugu konstatēts būtiski augstāks kaitēkļu bojāto koku īpatsvars (pēc koku skaita) - attiecīgi $2,7 \pm 2,0\%$; $3,6 \pm 2,4\%$ un $2,1 \pm 2,0\%$ - nekā mistrojumā ar divām sugām, kur kaitēkļu bojāti koki šajās vecumklasēs netika konstatēti. Mistraudzēs ar valdošo sugu egli un vienas sugas piemistrojumu 4. vecumklasē konstatēts būtiski lielāks vēja un/vai sniega bojāto koku īpatsvars gan pēc šķērslaukuma ($0,9 \pm 0,8\%$), gan pēc koku skaita, kamēr divu sugu piemistrojumā vēja un/vai sniega bojāti koki netika konstatēti. Savukārt, mistraudzēs ar bērzu kā valdošo sugu 6. vecumklasē būtiski lielāks vēja un/vai sniega bojātu koku īpatsvars pēc šķērslaukuma ($1,8 \pm 1,6\%$) un arī pēc koku skaita konstatēts mistrojumā ar divām sugām, bet vienas sugas piemistrojuma gadījumā šādi bojājumi bērzu audzēs netika konstatēti.

Analizējot tikai tās sugas, desmitgades un meža tipu kombinācijas, kur pietiekams mistraudžu un tīraudžu parauglaukumu skaits, konstatēts, ka 65% kopējā krāja bija tīraudzēs (vērtēto tikai 1. stāva krāju – 60% gadījumu).

Koku noturību (H/D attiecību) ietekmē valdošā suga, vecums un šķērslaukums. Mistraudzēs vidēji H/D attiecības vērtības bija statistiski būtiski, bet praktiski nenozīmīgi (par 0,03) lielākas nekā tīraudzēs. Meža tipos, kur mistraudžu ierīkošana varētu tikt praktizēta (Dm, Ks, Kp), H/D attiecība mistraudzēs un tīraudzēs būtiski neatšķīrās.

Analizējot vēja bojājumu ietekmējošos faktorus konstatēts, ka būtiskie ir: mežaudzes dominējošā koku suga, egles piemistrojums valdaudzē (nevis vienkārši mistraudze vai tīraudze), vidējais valdaudzes augstums, audzes biežība, periods kopš pēdējās retināšanas, vēja pusē blakus esošais nogabals un vēja brāzmu stiprums. Egles piemistrojums valdaudzē ($\geq 15\%$ no krājas) būtiski palielināja bojājumu apjomu – ar piemistrojumu vidējā marginālā vērtība bija $9,0 \pm 1,3\%$, bez egles piemistrojuma – $5,3 \pm 0,6\%$.

Mistrojums meža masīva ietvaros

Analizēti meža masīvu raksturojoši rādītāji (ainavas telpiskie parametri) blakus esošiem vairāk un mazāk ietekmētām (bruņuts bojājumi) teritorijām. Konstatēts, ka neietekmētajos masīvos kopumā ir augstāks priedes tīraudžu īpatsvars. Kā zināms, priede ir saimniekaugs bruņuts dabiskajam ienaidniekam plasmecerim *Anthribus nebulosus*.

Meža masīvos "Ietekmēts 1", "Ietekmēts 2" un "Ietekmēts 4" egļu bruņuts bojātajās audzēs veidoja izteiktas agregācijas, t.i., starp šīm audzēm novērotas izteiktas grupēšanās pazīmes, bet meža masīvā "Ietekmēts 3" bruņuts bojātajām audzēm novērots nejaušs telpiskais izvietojums ainavā. Tas saskan ar citos pētījumos konstatēto, ka izteikta bruņuts izplatīšanās uz blakus audzēm notiek 1-2 gadus (Kunkel, 1997; Turguter, Ülgentürk, 2006). Tomēr, vērtējot tāda paša vecuma un sastāva nebojātās egļu audzes gan ietekmētajos, gan neietekmētajos (kontroles) meža masīvos, konstatēts, ka arī tās telpiski izvietotas grupveidā. Tas liecina, ka kukaiņu izplatība bojātajās egļu audzēs, kas izraisījusi šo audžu bojāeju, visticamāk, ir saistīta ar citiem faktoriem, nevis audžu savstarpējo tuvumu. Kopumā konstatētas būtiskas atšķirības (χ^2 tests, $p < 0,001$) starp meža masīviem zemes seguma/lietojuma grupu sadalījumā, analizē iekļaujot šādas visvairāk pārstāvētās zemes seguma/lietojuma grupas.

Lielākai tuvāko (līdz 500m no konkrētās audzes) audžu daudzveidībai meža masīva līmenī konstatēta pozitīva ietekme, samazinot bruņuts invāzijai atbilstošu egļu audžu bojājumu iespējamību, tomēr sarežģītāka meža masīva kompozīcija pilnībā neizslēdz šī dendrofāga radīto bojājumu varbūtību.

Izvēlētajos Olaines meža masīvos iegūtas bojājumu sastopamības varbūtības bojātajām egļu audzēm un egļu mērķa audzēm, balstoties uz izstrādātā modeļa vienādojuma koeficientiem. Šim nolūkam izvēlētajos Olaines meža masīvos katram nogabalam aprēķināti Šenona daudzveidības indeksi divām dažādām bufera distancēm, 100m un 1000m. Iegūtie rezultāti vizualizēti, izmantojot *Spline with Barriers* interpolēšanas rīku *Arcgis* programmā. Konstatēts, ka bruņuts faktiski bojātajām audzēm prognozētā (modelētā) bojājuma varbūtība ir būtiski ($p < 0.05$) augstāka, nekā nebojātajām audzēm.

Secinājums

Koku sugu mistrojumam audzes līmenī tikai atsevišķos gadījumos konstatēta būtiskas ietekme uz bojājumu sastopamību vai ar tiem saistītiem parametriem. Turklāt šī ietekme ir variējoša – atsevišķos gadījumos mistraudzēs bojājumi ir biežāk sastopami (vai apjomīgāki), citos – mazāk. Mistraudžu veidošana nav izmantojama kā universāla pieeja dažādu faktoru izraisītu bojājumu mazināšanai mežaudzēs.

Rekomendācijas

1. Vērtēt koku mehānisko stabilitāti priedes-egles, bērza-egles u.c. biežāk sastopamajās mistraudzēs, detalizētāk analizējot un raksturojot koku mijiedarbības mehānismu tajās vēja noturības kontekstā un iespējas šo noturību kāpināt ar mērķtiecīgu mistrojuma izveidi.
2. Vērtēt koku mehānisko stabilitāti saliktās audzēs ar nozīmīgāko mežsaimniecisko perspektīvu un audzēs dažādā laikā pēc pakāpeniskajām cirtēm, kur par iespējamu vēja noturības mazināšanos liecina atsevišķas norādes zinātniskajā literatūrā, taču trūkst kontrolētu eksperimentu vai pēc-vētru novērtējumu datu, lai šo ietekmi kvantificētu.

3. Pēc eksperimentālās datu bāzes par koku mehānisko stabilitāti nosakošajiem faktoriem papildināšanas, modelēt dažādu mežkopības pieeju ietekmi uz kopējo vēja bojājumu risku meža masīva līmenī ilgtermiņā un, ņemot vērā bojājumu ietekmi uz dažādiem ekosistēmas pakalpojumiem – izstrādāt rekomendācijas mežsaimniecības un meža politikas lēmumiem.
4. Papildināt informāciju par mistrojuma audzes līmenī ietekmi uz nozīmīgāko dendrofāgo kukaiņu bojājumu varbūtību un apjomu, izmantojot monitoringa datus, kā arī veicot atkārtotu jaunāko pētījumu citās valstīs analīzi, jo šī brīža informācija nav pietiekama pamatotu secinājumu par šādu ietekmi izdarīšanai. Veikt pētījumus un notiekošu pētījumu datu papildus analīzi, raksturojot mistrojuma meža masīva līmenī ietekmi uz izplatītāko dendrofāgo kukaiņu (kā egļu astoņzobu, sešzobu mizgrauzis u.c.) bojājumu varbūtību un apjomu, jo veiktie pētījumi par egļu bruņuti liecina par šādas pieejas efektivitāti.
5. Izmantojot briežveidīgo dzīvnieku bojājumu monitoringa un citus pieejamos datus, papildināt zināšanas par audzes sastāva ietekmi skujkoku bojājumu varbūtību un apjomu.
6. Praksē mistrojumu meža masīva vai audzes līmenī izmantot tikai noteiktu, zināmu bojājumu mazināšanai gadījumos, kuros ir pietiekama informācija par šādas pieejas efektu.

5. Egles astoņzobu un sešzobu mizgraužu attīstība

Pamatojums

Temperatūra ir galvenais faktors, kas nosaka kukaiņu vielmaiņu, barošanās intensitāti, kopulācijas sekmes un pēcnācēju skaitu (Seidl et al., 2011; Jansons, 2015), un, temperatūrai palielinoties līdz sugas specifiskajam optimumam, pieaug iepriekšminētie rādītāji. Klimata pārmaiņas ir cieši saistītas ar lielāku dendrofāgo kaitēkļu bojājuma riska pieaugumu, to migrāciju, dzīves cikla un parazītoīda aktivitātes izmaiņām.

Viens no galvenajiem mizgraužu ietekmējošajiem faktoriem Latvijā ir siltais un agrais pavasaris, kas veicina gan egļu astoņzobu (*Ips typographus*), gan egļu sešzobu mizgrauža (*Pityogenes chalcographus*) ātrāku attīstību, un līdz ar to arī straujāku populācijas pieaugumu. Tāpat garāka veģetācijas sezona nodrošina mizgraužiem iespēju veidot vairākas paaudzes vienā gadā, papildus palielinot bojājumu risku egles audzēs. Mizgrauži parasti savairojas vēja gāztās vai novājinātās eglēs, vai nemizotos baļķos ar caurmēru virs 12 cm, savukārt pēc ekoloģiskās kapacitātes sasniegšanas vaboles uzsāk barošanos arī ar augošām, nenovājinātām eglēm, kas vecākas par 40 gadiem. Abu šo mizgraužu masu uzliesmojumi notiek sinhroni, taču, pretēji astoņzobu mizgraužim, sešzobu mizgrauzis barojas un attīstās zem plānākas mizas – egles galotnēs vai zaros. Plaša šo abu mizgraužu sugu savairošanās parasti notiek pēc vētrām vai ilgstošiem sausuma periodiem, kas novājina egles un mazina to spēju ražot sveķus, cīnoties pret dendrofāgiem. Tāpat nozīmīga ietekme var būt nepārdomātiem mežsaimnieciskajiem lēmumiem, neievērojot nosacījums par mežistrādes un cirsmas satīrīšanas laiku (t.sk. izvest materiālus no krautuvēm siltā laikā egles audžu tuvumā). Klimata pārmaiņu rezultātā gan vētru biežums, gan ilgstoši sausuma periodi kļūst biežāki, veicinot mizgraužu populācijas pieaugumu. Tie savukārt, rada arvien lielākus izaicinājumus meža nozarē.

Pētījuma mērķis bija novērtēt paaugstinātas temperatūras ietekmi uz egļu astoņzobu un egļu sešzobu mizgrauža attīstību, lai prognozētu klimata pārmaiņu ietekmi uz šo kaitēkļu masu uzliesmojuma risku egles audzēs.

Metodika

Egļu astoņzobu mizgrauža izlidošanas sākuma laika raksturošanai ierīkoti parauglaukumi piecos Latvijas reģionos (5.1. attēls), izvietojot slazdus ar *I. typographus* agregācijas feromona dispenseru nesēn ierīkotās skuju koku cirmās. Periodā no 15. marta slazdi pārbaudīti reizi dienā, un noteikts datums, kad slazdā konstatēta pirmā egļu astoņzobu mizgrauža vabole. Šis datums uzskatāms par mizgraužu lidošanas sākumu konkrētajā reģionā attiecīgajā gadā. Konstatējot mizgraužu lidošanas sākumu, izvēlētajās vietās nozāģēja dzīvotspējīgas egles, lai tās izmantotu par paraugkokiem, sagaidīja, kamēr tos invadē, sagarumoja nogriežņos, ievietoja plastplēves maisos un nogādāja klimata kamerā.



5.1. att. Egļu astoņzobu mizgrauža lidošanas sākuma monitoringa parauglaukumu izvietojums no 2017. līdz 2020. gadam.

Paaugstinātas temperatūras ietekme uz mizgraužu attīstību vērtēta trīs klimata kamerās. Tajās ievietoti 54 mizgraužu invadēti egles nogriežņi (paraugbaļķi), kuriem zem mizas attīstās pirmā mizgraužu paaudze. Katrs nogrieznis ievietots atsevišķā plēves maisā un analīzes vajadzībām iedalīts vienā no trim grupām atkarībā no to caurmēra: 1) no 14 līdz 19,5 cm; 2) no 20 līdz 26 cm; un 3) no 26,5 līdz 30 cm. Eksperimenta laiks bija 45 dienas, kuru laikā visās trīs kamerās uzturēts 65% gaisa mitrums, bet atšķirīga gaisa temperatūra: 1) temperatūras simulācija (15,5 °C jeb kontrole), kas atbilst Latvijas veģetācijas perioda vidējai temperatūrai; 2) nākotnes veģetācijas perioda vidējās temperatūras simulācija ar 17,8 °C; un 3) nākotnes veģetācijas perioda vidējās temperatūras simulācija ar 20,0 °C.

Eksperimenta periodā katru nedēļu veikta viena uzskaitē, kuras laikā no katra parauga (nogriežņa) izgriezts 25 × 25 cm liels mizas fragments. Iegūtie mizas fragmenti izplāksnoti, žāvēti un veikta egļu astoņzobu un egļu sešzobu mizgraužu eju uzskaitē. Tajās noteikts mātes eju garums, kāpureju garums un skaits, uzskaitītas dzīvās vaboles, kā arī noteikts mizgraužu skaits pa attīstības stadijām. Uzskaitītas izlidojušās vaboles.

Egļu astoņzobu mizgrauža ieviešanās raksturošanai svaigā, neinvadētā egles koksne (ko indicē ieskreju, mātes eju neesamība), preimago mirstības un attīstības sekmju vērtēšanai dažādos klimatiskos apstākļos veikta šīs dendrofāgo kaitēkļu sugas kukaiņu un to parazītoīdu uzskaitē sešos pētījuma objektos Latvijā, kā arī papildus analīze klimata kamerās pie jau aprakstītajiem temperatūras režīmiem.

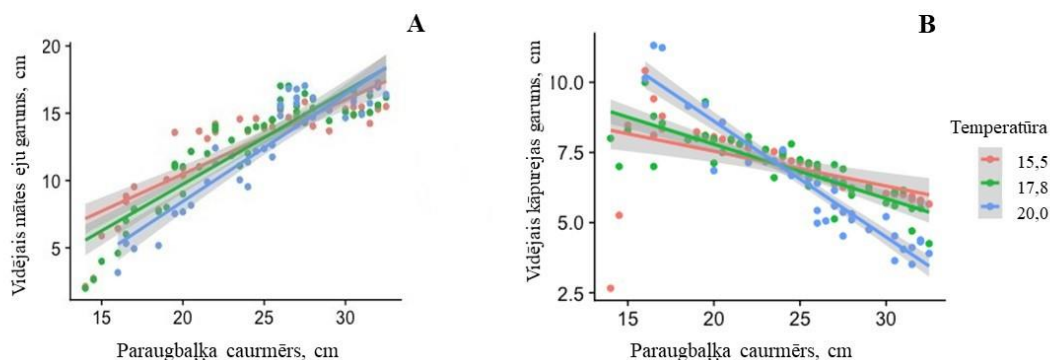
Rezultāti

Pirmo egļu astoņzobu mizgrauži izlidošanu būtiski ietekmē kā novērojumu vieta, tā arī novērojumu gads. Vidēji pa gadiem pirmā izlidošana konstatēta no 19. līdz 26. aprīlim, tomēr individuālos novērojumu punktos bijusi ievērojami plašāka amplitūda. Visagrākā izlidošana novērota Skrundas apkārtnē 9. aprīlī, bet vēlākā pirmā izlidošana novērota

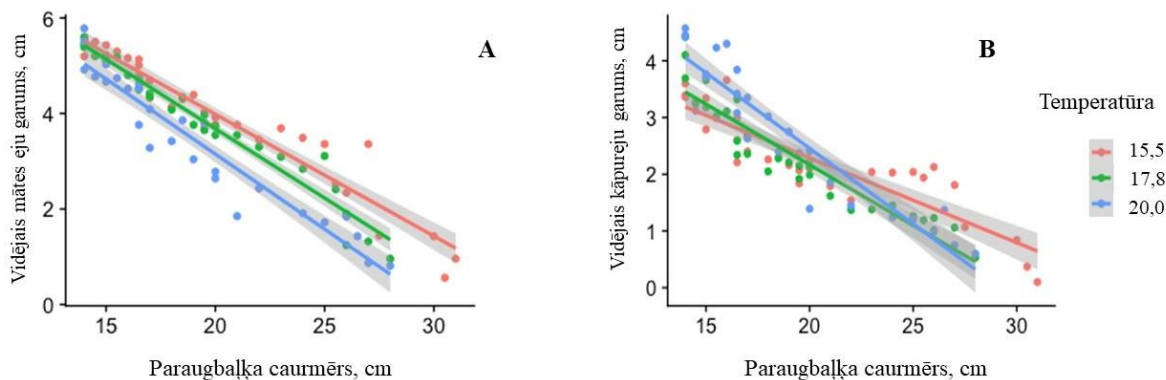
Ventspils apkārtnē – 11. maijā. 2020. gada pavasarī netika novērota atšķirība egļu mizgraužu pirmās izlidošanas laikam starp rietumu un austrumu reģioniem, taču citos novērojumu gados vaboles visagrāk izlidoja Latvijas rietumos. Šobrīd ievākto datu apjoms neļauj izdarīt drošus secinājumus, bet pastāv tendence, ka reģionos, kuros mizgraužu izlidošana sākas agrāk, kopējais mizgraužu populācijas blīvums visā sezonā (ko indicē slazdā noķertais vaboļu skaits) ir augstāks. Ja šī tendence turpmākos novērojumos apstiprināsies, klimata pārmaiņu ietekmē sagaidāma agrāka šī dendrofāga izlidošana un lielāki postījumi.

Eksperimentā klimata kamerās konstatēts, ka mizgraužu eju garums bija tieši un būtiski atkarīgs no egles nogriežņa (paraugbaļķa) dimensijām. Lielākos paraugbaļķos egļu astoņzobu mizgraužu mātes ejas bija garākas, savukārt sešzobu – īsākas (5.2. un 5.3. att.). Tas saistīts ar pielāgošanos starpsugu konkurences mazināšanai, jo sešzobu mizgrauzis spēj dzīvot zem plānākas mizas, t.i., stumbra tievgalī vai resnos zaros (Fora et al., 2011; Faccoli and Bernardinelli, 2011). Augstākā vides temperatūrā mātes ejas vidēji ir garākas (sakarības izteiktāka sešzobu mizgrauzim). Mizgraužu mātes ejas garums cieši saistīts ar izdēto olu skaitu un secīgi arī kāpuru skaitu, norādot uz klimata pārmaiņu labvēlīgo ietekmi uz mizgraužu vairošanos.

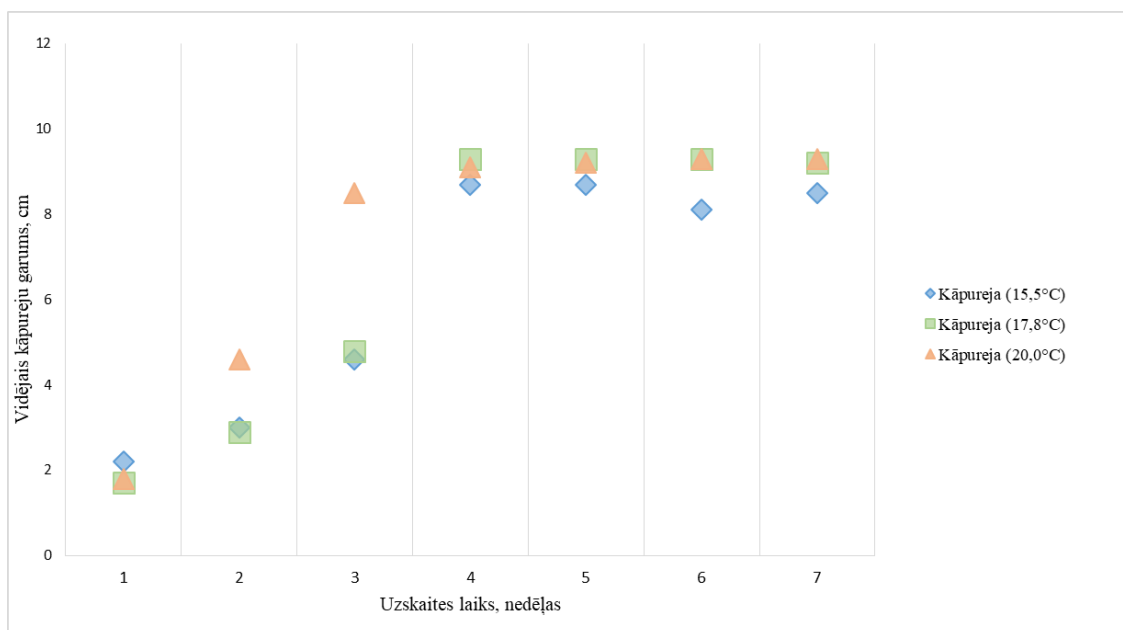
Vidējais kāpurejas garums abām mizgraužu sugām bija mazāks lielākos paraugbaļķos. Jo lielāks kāpuru skaits platībā, jo lielāka to savstarpējā konkurence, turklāt tā palielinās, pieaugot gan temperatūrai, gan paraugbaļķa caurmēram. Sakarību starp baļķu caurmēru un kāpureju skaitu (līknes slīpumu un sakarības ciešumu) ietekmē temperatūra, turklāt šī ietekme varētu būt saistīta ne tika ar lielāku kāpureju skaitu, bet arī ar atšķirībām kāpuru attīstības tempā. Konstatēts, ka paaugstināta temperatūra paātrina mizgraužu attīstību. Augstākā temperatūrā masu iekūņošanās sākums (kāpuri pārstāj pagarināt ejas: 5.4. attēls) astoņzobu mizgrauzim novērots jau trešajā nedēļā, kamēr pārējos režīmos – ceturtajā.



5.2. att. Egļu astoņzobu mizgrauža vidējais mātes eju (A) un kāpureju (B) garums (\pm 95% ticamības intervāls) koksnes paraugos atkarībā no paraugbaļķa diametra.



5.3. att. Egļu sešzobu vidējais mātes eju (A) un kāpureju (B) garums ($\pm 95\%$ ticamības intervāls) koksnes paraugos atkarībā no paraugbaļķa diametra.



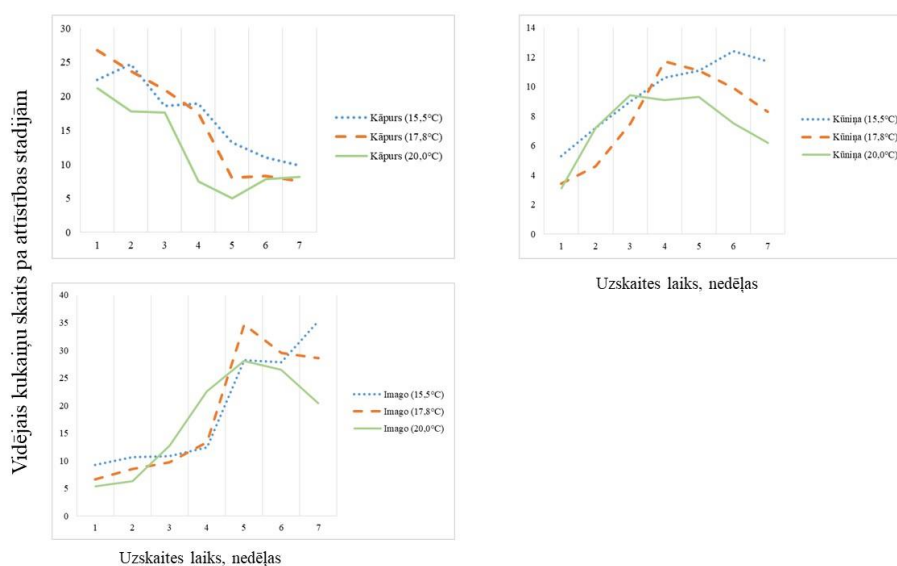
5.4. att. Vidējais egļu astoņzobu mizgraužu kāpureju garums analizētajos koksnes paraugos atkarībā no temperatūras režīma.

Mātes eju veidošanu gan egļu sešzobu mizgrauži, gan astoņzobu mizgrauži turpināja līdz ceturtajai eksperimenta nedēļai. Savukārt sešzobu mizgraužu kāpuri visos trīs temperatūras režīmos sasniedz vidēji 3,2 reizes mazāku kāpureju garumu nekā astoņzobu mizgraužu kāpuri. Pie temperatūras 15,5 un 17,8 °C sešzobu mizgraužu kāpuru attīstība turpinājās līdz sestajai eksperimenta nedēļai, bet pie 20,0 °C temperatūras režīma maksimālais kāpureju garums tika sasniegts jau ceturtajā nedēļā, liecinot par ātrāku iekūņošanu. Tātad pie augstākas temperatūras pastāv lielāka varbūtība, ka egļu mizgrauži agrāk izlido, ātrāk iekūņojas un līdz ar to vienā sezonā veidosies vairākas mizgraužu paaudzes, nozīmīgi palielinot mežaudžu bojājumu risku.

Konstatēta temperatūras un paraugbaļķa caurmēra ietekme uz mātīšu produktivitāti (kāpureju skaits uz vienu mātes eju). Uzskaitītas un mērītas tās kāpurejas, kurās novēroti dzīvi kāpuri vai izskrejas. Lielāka caurmēra paraugiem izdzīvojušo olu skaits bija lielāks

nekā mazāka caurmēra paraugiem, bet paaugstinātās temperatūras režīmos (17,8 un 20,0 °C) bija būtiski lielāks kāpureju skaits uz vienu mātes eju ($p < 0,05$), salīdzinot ar mūsdienu temperatūras režīmu. Līdzīga sakarība novērota uzskaitot dzīvās pieaugušās mizgraužu vaboles. Būtiskas atšķirības starp temperatūras scenārijiem nav konstatētas, bet vērojama tendence pie augstākas temperatūras (20,0 °C) vabolēm apdzīvot lielāku dimensiju kokus.

Egļu mizgraužu kāpuru, kūniņu un pieaugušo vaboļu (imago) vidējais skaits konkrētā uzskaites nedēļā paraugos samazinājās līdz ar temperatūras pieaugumu (5.5.att.). Piemēram, astoņzobu mizgrauža kāpuru skaits ceturtajā nedēļā (salīdzinājumā ar pirmo nedēļu) kontroles režīmā samazinājās divas reizes, bet paaugstinātā temperatūrā līdz pat četrām reizēm. Pieaugušo vaboļu skaits ceturtajā nedēļā visos temperatūras režīmos bija trīs līdz četras reizes lielāks, salīdzinot ar pirmo nedēļu. Savukārt izlidojušo vaboļu skaita dinamika starp temperatūras režīmiem būtiski neatšķīrās nevienai no mizgraužu sugām. Klimata pārmaiņas iekūņošanās noslēgumu un imago maksimālā skaita zem mizas sasniegšanas laiks paātrinās apmēram par vienu nedēļu. Salīdzinot ar novērojumiem ārvidē, paaugstinātā temperatūrā astoņzobu mizgrauzis iekūņošanos noslēdz nedēļu ātrāk, bet sešzobu mizgrauzis pat mēnesi ātrāk. Agrāka pirmās paaudzes iekūņošanās atstāj pietiekamu laiku jaunas (otras) paaudzes izlidošanai tajā pašā sezonā sešzobu mizgrauzim, tāpat, kā vairāku paaudžu veidošanai (kas siltākos gados konstatēta jau šobrīd) – astoņzobu mizgrauzim.



5.5.att. Vidējais egļu astoņzobu mizgraužu skaits pa attīstības stadijām (kāpurs, kūniņa un imago) analizētajos koksnes paraugos.

Papildus novērojumos audzēs un klimata kamerā parazītoīdu ietekmei uz egļu astoņzobu mizgrauzi konstatēts izteikti lokāls raksturs un augstāka gaisa temperatūra (klimata pārmaiņas) šo ietekmi mazina. Tāpat konstatēts, ka klimatam kļūstot siltākam, egļu astoņzobu mizgrauži egli kolonizēs īsākā laikā, ar zemāku pēcnācēju mirstību. Šādos apstākļos mizgrauža ietekmi pastiprinās arī izteiktāka mātīšu tendence sevī saglabāt neizdētas olas vēlākai dēšanai. Tātad var sagaidīt lielāku skaitu lidojošo mizgraužu pēc pirmās paaudzes izlidošanas jeb tā saucamajā mūsu paaudzē, līdz ar to telpiski un individu sakaita ziņā apjomīgāku ietekmi.

Secinājums

1. Klimata pārmaiņu ietekmē sagaidāms būtiski paaugstināts šo dendrofāgo kukaiņu radīto bojājumu risks egles audzēs – gan agrākas izlidošanas un ātrākās to attīstības dēļ, gan zemākas mirstības (t.sk. mazākas parazītoīdu ietekmes rezultātā) un augstākas vairāku paaudžu (t.sk. māsu paaudžu) veidošanas varbūtības dēļ.

Rekomendācijas

1. Nozīmīgi strikti ievērot mizgraužu ietekmes mazināšanas pasākumus.
2. Nozīmīgi veicināt egles noturību pret dendrofāgiem – šo koku sugu izmantojot tikai platībās ar normālu vai noregulētu mitruma režīmu un izvēloties tādu mežsaimniecības stratēģiju, kas mazina vēja ietekmes varbūtību un laiku, kad audze pakļauta bojājumu riskam, t.sk. zemāku biežumu jaunaudzēs, mērķa caurmēru kā galvenās cirtes kritēriju, mazāku retināšanu skaitu un pietiekamu adaptācijas laiku (ap 5 gadi) pēc retināšanas, pirms blakus audzes nociršanas galvenajā cirtē.

6. Prognozēto un faktisko vētras postījumu salīdzinājums

Pamatojums

Vējš ir nozīmīgāks dabiskas traucējums Ziemeļeiropā. Vētru radīto bojājumu apjoma (milj.m^3 gadā) un koksnes krājas attiecība liecina, ka Eiropā pieaug vētru intensitāte un krass pieaugums vērojams pēdējos divdesmit gados. Tādēļ ir būtiski testēt, izstrādāt un papildināt modeļus vēja bojājumu varbūtības raksturošanai.

Šajā pētījumu posmā mērķis bija prognozēto (ForestGALEs) un faktisko vētras postījumu salīdzinājums.

Plašāk informācija par paveikto pētījuma 2015. gada pārskatā. Darbu sākums – pētījumu iepriekšējā posmā (2014.-2015. gadā).

Metodika

Prognozēto un faktisko vēja postījumu salīdzinošā analīze veikta divos pētījumu objektos: vērtējot vasaras perioda negaisa vētras ietekmi un ziemas perioda ciklonu vētras ietekmi.

Negaisa vētras ietekmes analīzei vēja dati iegūti no LVĢMC meteoroloģiskā radara, kas 125 km rādiusā no savas atrašanās vietas veic arī vēja novērojumus ik pēc 10 minūtēm, vēja mērījumu režģis ir 10×10 km, vēja ātruma precizitāte ir līdz $2,5 \text{ ms}^{-1}$, savukārt vēja virziena precizitāte līdz 5 grādiem. Ar to nav iespējams iegūt maksimālo vēja brāzmu ātrumu, tiek mērīts tikai vēja vidējais ātrums. Atbilstoši LVĢMA modeļu datiem 60×70 km teritorijā, kas ietver analizēto vētras ietekmēto meža masīvu lielākie vēja ātrumi un virzieni fiksēti 33 kartes kvadrātos. Katram punktam, kur radars bija veicis novērojumus, tika noteikts stundas maksimālais vēja ātrums un virziens šajā laikā. Audžu bojājumu dati pētījuma vajadzībām iegūta no Latvijas valsts meži (negaisa vētrai) un no LVMI Silava arhīva un satelīta attēliem (ciklona vētrai). Dotās vēja ātruma un virziena vērtības piesaistītas LKS koordinātu tīkla 5×5 km karšu lapām. Ciklona vētras vērtēšanai LVĢMC mājas lapā www.meteo.lv iegūta informācija par stundas vidējo vēja ātrumu un virzienu pētījumu objektam tuvākajās meteostacijās. Vēja ātrums un virziens starp kvadrātiem (vai stacijām) modelēts (interpolēts), izmantojot datorprogrammu WindNinja 2.5.4., pārrēķinot vēja ātrumu un virzienu katram 1×1 km kvadrātam. Reljefs ņemts atbilstoši 90 m globālajam tīklam World SRMT (90 m). Katram nogabalam visos 8 kardinālajos virzienos (no nogabala centra) noteikts tuvākā nogabala I stāva valdošās koku sugas augstums, blakusesoša nogabala platums un virziens, izmantojot ArcGIS rīku Calculate Adjacent Fields. Pēc tam aprēķināts katra nogabala platums attiecībā pret stundas spēcīgākā vēja virzienu, pieņemot, ka tā "platums" paralēli vēja virzienam nepārsniedz nogabala "garumu".

Kritiskais vēja ātrums aprēķināts priedes, egles un bērza audzēm izmantojot modeļus:

1) ForestGale 2.5. Research mode.

2) iepriekšējos pētījumos izstrādātos modeļus (skat. projekta iepriekšējā perioda (2011.–2015. gads) pārskatu).

Priedes, egles, bērzu audzēm kritiskais vēja ātrums (V_{krit}) noteikts pēc formulas:

$$V_{\text{krit}} = b_1 + b_2 * H^{10} + b_3 * (V_{\text{Vizcirt}})^2 + b_4 * h d^{-1},$$

kur

VA – vidējais vēja ātrums ms^{-1} ;
H10 – audzes augstums, m;
VVizcirt -izcirtums (0, ja izcirtums nav; 1, ja vēja pusē blakus audzei ir izcirtums);
 hd^{-1} – vidējā augstuma (m) un vidējā caurmēra (cm) attiecība;
b1, b2, b3, b4 – koeficienti (6.1. tabula).

6.1.tabula

Kritiskā vēja ātruma aprēķina modeļa koeficienti

Parametri	Koku suga		
	Priede	Egle	Bērzs
Konstante	49,822	44,910	45,060
H10	-,199	-,091	-,121
VVizcirt	-9,180	-10,824	-9,955
hd^{-1}	-16,550	-17,653	-14,476

Rezultāti

Konstatēts, ka negaisa laikā vidējais vēja ātrums 10 m augstumā virs zemes virsmas vidēji bija $7,97 \text{ ms}^{-1}$, mazākais $3,9 \text{ ms}^{-1}$, bet lielākais $17,5 \text{ ms}^{-1}$, kamēr citās (blakus esošās) teritorijās vēja ātrums sasniedza pat 30 ms^{-1} . Informācijas par maksimālajiem vēja ātrumiem nepilnības problemātiski raksturojamās negaisa vētrās ir galvenais faktors, kas izskaidro konstatēto zemo bojāto audžu prognozēšanas precizitāti: priedei saskaņā ar modeli kā bojātas atzītas tikai 21% no audzēm, kurās veikta (vai plānota) sanitārā cirte, eglei 15%, bērzam 10%.

Ciklona vētrā vēja ātrums sasniedza $18,7 \text{ ms}^{-1}$. Konstatēs, ka šajā gadījumā iespējams samērā labi prognozēt par 17 m augstāku egļu audžu bojājumu (vidējā precizitāte 73%) un par 13 m augstāku lapu koku audžu bojājumus (vidēji 55%), taču ne priežu audžu bojājumus un ne bojājumus audzēs ar kūdras augsnēm. Daļa neprecizitātes saistītas ar nepilnīgu informāciju par vētru, jo ļoti iespējams, ka vēja ātrums brāzmās lokāli bijis lielāks, nekā iespējams noteikt, izmantojot meteostaciju datus.

Rekomendācija

Relatīvi zemā iegūstamo rezultātu precizitāte liecina, ka rekomendējams attīstīt papildus pētījumus empīrisku datu ieguvei koku vēja noturības raksturošanai.

Šī projekta rekomendācijas ņemta vērā, sagatavojot un realizējot pieteikumus vēja bojājumu analīzes jomā.

7. Sasalstoša lietus ietekmes uz kokiem modelis: egle

Pamatojums

Klimats nosaka meža ekosistēmas produktivitāti, tomēr ar klimata pārmaiņām saistīti vairāki riski mežsaimniecībai, tai skaitā, pieaugoša klimatisko ekstrēmu ietekme. Viens no reti pētītiem traucējumiem mežā ir apledojuums koku vainagos, ko izraisa sasalstošs lietus (*freezing rain*) – nokrišņi ar pilienu temperatūru zem 0°C, kas sasalst saskarē ar cietu virsmu. Pēc Latvijas vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra datiem, laika periodā no 1940./1941. līdz 2009./2010. gadam, vidējais dienu skaits decembrī ar apledojumu lielāku par 5 mm bija viena diena Latvijas rietumu un piecas dienas austrumu daļā. Prognozes liecina par sagaidāmu apledojuma gadījumu skaita pieaugumu Eiropas ziemeļu un ziemeļaustrumu daļā (Kämäräinen et al., 2018).

Intensīva apledojuma veidošanās rada ievērojamus zaudējumus mežsaimniecībai. Bojājumu smagums, lielā mērā atkarīgs, no koku spējas izturēt pēkšņi radušos papildus slodzi. Apzinot saistību starp koka un audzes parametriem, kas ietekmē apledojuma radīto bojājumu risku, iespējams pielāgot noturību veicinošas mežsaimniecisko darbības.

Mērķis bija raksturot sasalstoša lietus radītos bojājumus egles audzēs, novērtēt audzes bojājumu risku atkarībā no audzes un individuālu koku parametriem, un noteikt tos parametrus, kas visprecīzāk ļauj prognozēt risku individuālam koka bojājumam visās audzēs un nesen koptās audzēs.

Metodika

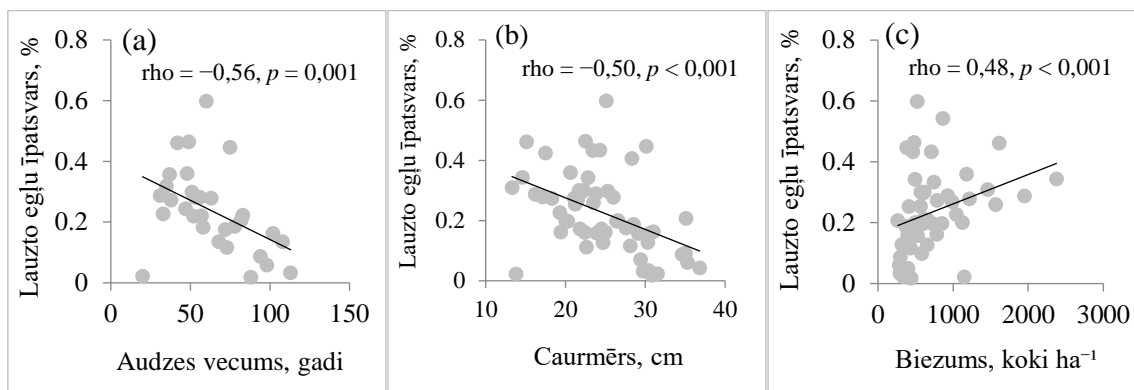
Apledojuma radītie bojājumi nenasalušas augsnes apstākļos vērtēti pēc sasalstoša lietus 2012. gada decembrī 61 egles audzē (vecums 20 līdz 113 gadi) Latvijas austrumu daļā (Rēzeknes, Baltinavas, Balvu un Kārsavas novadi). Visiem kokiem ar caurmēru $\geq 2,1$ cm noteikta piederība audzes stāvam un bojājumu veids (lauzts, nebojāts, cits). Pirmā stāva eglēm mērīts augstums, caurmērs un dzīvā vainaga augstums. Aprēķināts koka relatīvais caurmērs, vainaga īpatsvars un augstuma-caurmēra attiecība, audžu biezums, vidējais caurmērs un augstums, audzes iedalītas pēc to piederības meža edafiskajai rindai un kopšanas cirtes laika (kopšana veikta nesen vai cits).

Koka un audzes parametri ar klāsteru dendrogrammu iedalīti piecās grupās pēc to līdzības. Katram datu masīvam (visas audzes un nesen koptās audzes) izveidoti 125 modeļi ar visām iespējamajām parametru kombinācijām, atlasīti trīs bojājuma varbūtību visprecīzāk raksturojošie modeļi.

Rezultāti

Bojāto eglu īpatsvars audzēs bija no 1,8% līdz 60,9%. Pirmā stāva egles bija bojātas būtiski (vidēji 23,5%, $p < 0,001$) biežāk nekā otrā stāva un paaugas egles (attiecīgi 14,7% un 3,2%). Vairums bojāto eglu (vidēji 98,5%) bija lauztas.

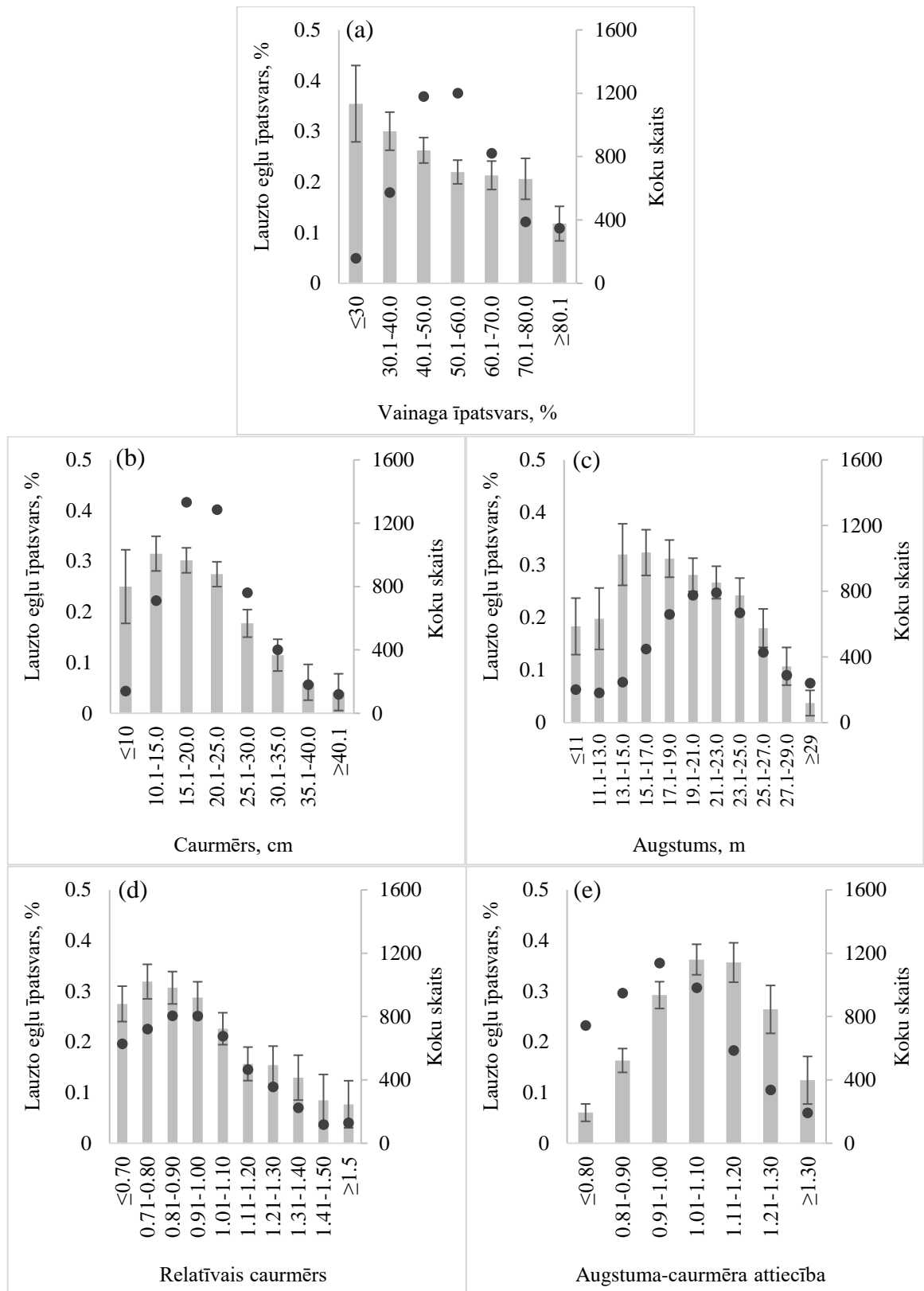
Visi analizētie audzes parametri (izņemot audzes augstumu) būtiski ietekmēja lūzuma varbūtību pirmā stāva eglēm. Nesen koptās audzēs (27,8%, $p < 0,001$) bojāto pirmā stāva eglu īpatsvars bija būtiski lielāks nekā citās audzēs (20,4%), un tas bija nedaudz zemāks slapjainos (20,3%, $p < 0,05$), nekā sausienos un kūdreņos (24,4% un 25,5%). Lauzto eglu īpatsvars bija būtiski zemāks vecākās audzēs ($\rho = -0,56$, $p < 0,01$) un audzēs ar lielāku vidējo caurmēru ($\rho = -0,50$, $p < 0,001$), bet tas pieauga līdz ar audzes biezumu ($\rho = 0,48$, $p < 0,001$; 7.1. att.).



7.1. att. Lauzto pirmā stāva egļu īpatsvars atkarībā no (a) audzes vecuma, (b) vidējā caurmēra un (c) audzes biezuma.

Arī visi analizētie individuāla koka parametri (caurmērs, augstums, vainaga īpatsvars, relatīvais caurmērs un augstuma-caurmēra attiecība) būtiski ($p < 0,001$) ietekmēja lūzuma varbūtību. Eglēm ar vainaga īpatsvaru mazāku par 30% bija visaugstākais bojāto koku īpatsvars (35,4%), un tas būtiski ($p < 0,01$) pārsniedza bojāto koku īpatsvaru kokiem ar vainaga īpatsvaru lielāku par 40% (7.2.a att.). Savukārt koki ar vainaga īpatsvaru vismaz 80% bija bojāti būtiski retāk (11,8%) nekā koki ar mazāku vainaga īpatsvaru. Eglēm ar caurmēru 10–15 cm un augstumu 15–17 m bija visaugstākais laužto koku īpatsvars (attiecīgi 31,5% un 32,4%), un tas pakāpeniski samazinājās eglēm ar lielākām dimensijām (7.2.b un 7.2.c att.). Novirzes no lineāras sakarības (zems laužto koku īpatsvars kokiem ar caurmēru ≤ 10 cm un augstumu ≤ 13 m) izraisīja divas audzes (vecums 20 un 31 gads) ar relatīvi zemu laužto koku īpatsvaru. Laužto koku īpatsvaru ietekmēja arī koka sociālais stāvoklis audzē. Visvairāk bojātas slaidākas egles (augstuma-caurmēra attiecība 1.01–1.20, bojāto koku īpatsvars 35,7%–36,3%; 7.2.d att.), kas bija tievākas par audzes vidējo caurmēru (relatīvais caurmērs 0,71 līdz 1, bojāto koku īpatsvars 28,7%–31,9%; 7.2.e att.).

Regresijas analīzē kombinēta šo atsevišķo faktoru un to mijiedarbības ietekme uz koka lūzuma varbūtību (7.1. tab.). Visās audzēs lūzuma varbūtību visprecīzāk raksturoja modelis, kas iever meža edafisko rindu, vidējo caurmēru (audzes parametri), koka augstumu, relatīvo caurmēru un vainaga īpatsvaru (individuāla koka parametri). Otrs labākais modelis iekļāva šos pašus parametrus, izņemot koka augstumu, savukārt trešais labākais modelis iekļāva tikai koka caurmēru un vainaga īpatsvaru. Nesen koptās audzēs labākais modelis iekļāva četrus no pieciem parametriem, kas bija visu audžu labākajā modelī (bez audzes vidējā caurmēra, ar audzes biezumu).



7.2. att. Lauzto pirmā stāva egļu īpatsvars (stabīni, ± 95% ticamības intervāls) atkarībā no individuāla koka parametriem: (a) vainaga īpatsvara, (b) caurmēra, (c) augstuma, (d) relatīvā caurmēra un (e) augstuma-caurmēra attiecības. Punkti norāda koku skaitu.

Trīs precīzākie modeļi koka lūzuma varbūtības noteikšanai pirmā stāva eglei visas audzēs (neatkarīgi no kopšanas)

Modelis	c		
	Sausieņi	Slapjaini	Kūdreņi
$0.037 \times H^* - 0.090 \times DBHst^{***} - 1.579 \times Drel^{***} + 0.013 \times PC^{***} + c^{**}$	1.067	0.661	0.994
$-0.063 \times DBHst^{***} - 1.233 \times Drel^{***} + 0.015 \times PC^{***} + c^{**}$	0.801	0.388	0.726
$-0.058 \times DBH^{***} + 0.016 \times PC^{***} - 0.685^{***}$	–	–	–

Būtiskuma līmenis norādīts ar zvaigznīti: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. Koeficienti norādīti kā logaritmētas vērtības. *H*: koka augstums, *DBHst*: audzes vidējais caurmērs, *Drel*: relatīvais caurmērs, *PC*: vainaga īpatsvars, *c*: meža edafiskā rinda, *DBH*: koka caurmērs. Modeļi sakārtoti secībā, sākot ar visprecīzāko.

Rekomendācijas

1. Kļūstot precīzākām prognozēm par sasalstoša lietus notikumu varbūtību klimata pārmaiņu kontekstā, lietderīgi pārvērtēt mežsaimniecisko darbu plānu egļu saudzēs aprites ciklā, ņemot vērā, ka bojāto pirmā stāva egļu īpatsvars ir būtiski lielāks neseno retinātā audzēs un audzes ar lielāku biezumu, taču būtiski zemāks audzēs ar lielāku vidējo caurmēru. Bojājumu riska mazināšanai rekomendējams audzes ierīkot ar zemāku sākotnējo biezumu un/vai veikt intensīvu jaunaudžu kopšanu, izmantot zemu retināšanu skaitu un mērķa caurmēru kā galvenās cirtes kritēriju.
2. Izmantot izgūtas sakarības kompleksā analīzes sistēmā pilnvērtīgākas izpratnes par mežsaimniecisko pasākumu risku mazināšanai ilgtermiņa nozīmi.
3. Papildināt datu kopu par kritisko salstošā lietus slāņa biezumu (masu), kas izraisa koka lūšanu un abiotisko faktoru (salstošs lietus un vējš) mijiedarbības ietekmi uz bojājuma varbūtību, kā arī atkārtoti uzmērīt bojātās, bet saglabājušās dažādu valdošo sugu (primāri – egles un bērza) audzes un kokus, raksturojot to turpmāko augšanu un līdz ar to bojājumu ilgtermiņa sekas.

8. Epiģenētiskais efekts

Pamatojums

Koku spēju pielāgoties klimata pārmaiņām nosaka dabiskā atlase, migrācija un fenotipiskā plasticitāte (Nicotra et al., 2010). Plasticitāti raksturo genotipa spēja pielāgoties apkārtējās vides izmaiņām. Daļu atbildes reakciju raksturo adaptīvā plasticitāte, kas nodrošina organisma priekšrocības noteiktos apstākļos, kamēr fizikāliem procesiem vai resursu trūkumiem (neadaptīvā plasticitāte) ir nenovēršama ietekme uz organismu. Gan adaptīvajai, gan neadaptīvajai plasticitātei ir būtiska ietekme, nosakot koku (konkrētai videi šobrīd un pagātnē piemērojušos populāciju) reakciju uz klimata pārmaiņām.

Notiekošās klimata pārmaiņas augiem rada nepieciešamību pielāgoties augstākai gaisa temperatūrai un mainīgajiem klimatiskajiem apstākļiem (IPCC, 2014). Kā atbildes reakcija uz gaisa temperatūras paaugstināšanos, boreālajā reģionā koku sugām jau ir novērotas izmaiņas fenoloģijā, piemēram, pavasaros notiek ātrāka pumpuru plaukšana un ir vērojams arī ilgāks augšanas periods (Aitken et al., 2008; Olsen and Lee, 2011). Viens no veidiem, kā augi var ātrāk pielāgoties klimata pārmaiņām, ir caur epiģenētisko mehānismu. Epiģenētika ir izmaiņas gēnu ekspresijā, kas nav saistītas ar mainītu DNS sekvenci, bet tās var ilgt visu organisma dzīvi un ir potenciāli pārmantojamas nākamajai paaudzei (Iwasaki and Paszkowski, 2014; Yakovlev et al., 2012). Epiģenētiskā variācija veicina fenotipisko plastiskumu un var būt svarīgs faktors, kas veicina organismu spēju pielāgoties mainīgajam klimatam. Tomēr šī epiģenētiskā efekta ietekme lielākoties pētīta parastajai eglei, it īpaši saistībā ar atšķirīgas temperatūras ietekmi un pēcnācēju augšanu, kamēr melnalkšnim šādu pētījumu trūkst.

Pētījuma mērķis raksturot epiģenētiskā efekta ietekmi uz melnalkšņa un egles augstumu.

Metodika

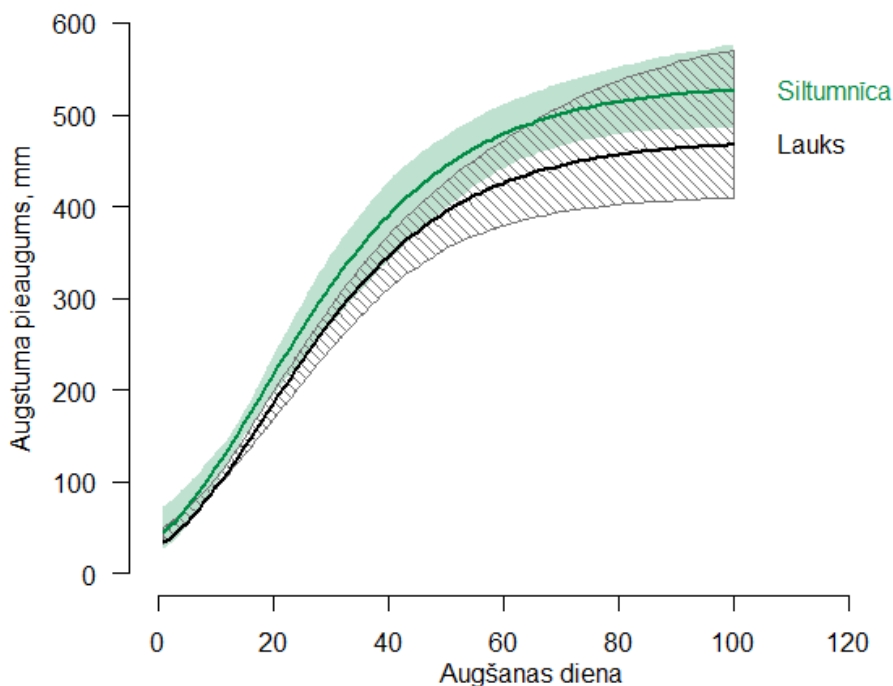
Epiģenētiskā efekta raksturošanai nepieciešami dati par meteoroloģiskajiem apstākļiem sēklu nogatavošanās laikā. Šai vajadzībai izmantoti melnalkšņa klonu RJ6 un Sa14 rameti, kas audzēti liela izmēra konteineros klimata kamerā (siltumnīcā), un trīs egļu rameti (Mad121/1, Mad147/1 un Mad116), kas izrakti no "Tirzas" sēklu plantācijas. Siltumnīcā uzturēta par 4 °C augstāka gaisa temperatūra, nekā ārvidē.

Kontroles (neizmainītas gaisa temperatūras) apstākļos augušo melnalkšņu sēklas ievāca no klonu rametiem RJ6/5, RJ6/9, RJ6/189, RJ6/241 un RJ6/249 Olaines sēklu plantācijā un egles sēklas no Mad123, Mad127, Sau29, Mad116/Tirza un Mad29 klonu rametiem "Tirzas" sēklu plantācijā. No ievāktajām sēklām melnalkšņa stādi audzēti divas, bet egles stādi vienu veģetācijas sezonu MPS kokaudzētavā un stādīti pavasarī. Veģetācijas sezonas laikā pēc iestādīšanas ar neregulāriem intervāliem mērīti šo stādu augstuma pieaugumi.

Rezultāti

Konstatēta neliela, tomēr statistiski būtiska ($p > 0,05$) sēklu nogatavošanas vietas ietekme uz melnalkšņa augstuma pieaugumu. Augstuma pieauguma veidošanās dinamika raksturota ar Gompertz vienādojumu (8.1. att.). Šī vienādojuma koeficientiem nav konstatētas statistiski būtiskas atšķirības starp kokiem, kas auguši no neizmainītos (lauka)

vai izmainītos (siltumnīcas) apstākļos iegūtām sēklām, galvenokārt rezultātu nozīmīgās izkliedes dēļ. Izkliedi lielā mērā ietekmē ļoti atšķirīgais stādu izmērs.



8.1.att. Melnalkšņa augstuma pieaugums stādiem, kas iegūti no dažādos apstākļos (siltumnīcā vai uz lauka) augušu rametu sēklām.

Salīdzinot egļu vidējos koku augstumus (t-test) netika konstatēta būtiska ($p = 0,66$) sēklu izcelsmes ietekme. Sēklu plantācijas rametu pēcnācēju vidējais augstums bija $49,9 \pm 2,1$ cm, bet siltumnīcas ramiem $54,9 \pm 13,9$ cm.

Pētījuma ietvaros fiksētā epigēnētiskā efekta ietekme uz koku pieauguma veidošanās sezonālo dinamiku un tā kopējo garumu, pirmajos koku augšanas gados, lai gan nav vērtējama kā nozīmīga, bija statistiski būtiska. Jāņem vērā, ka rezultātus pirmajos augšanas gados var būt ievērojami ietekmējis stādu izmērs un veģētācijas konkurence, kam vēlākos gados ietekme samazinās, kā arī konkrēto augšanas sezonu meteoroloģiskie apstākļi. Plašāku secinājumu iegūšanai nozīmīgi turpināt ierīkoto eksperimentu monitoringu vēl vismaz nākamos 5 gadus, kad koki ir izaugušies un būtiskai mazinās pārstādīšanas stresa un stādu izmēra ietekme uz rezultātu, tātad labāk konstatētajam ģenētiskās ietekmes.

Secinājums

Šajā pētījumā konstatēta neliela epigēnētiskā efekta ietekme uz melnalkšņa un egles augstumu.

Rekomendācija

Novērojumi turpināmi līdz juvenilā vecumā beigām, kad ģenētisko faktoru ietekmes raksturošana ir precīzāka.