



PĀRSKATS
PAR PĒTĪJUMA 2021. GADA REZULTĀTIEM

PĒTĪJUMA NOSAUKUMS: **Klimata pārmaiņu ietekme uz mežsaimniecību
un tās riskiem**

IZPILDĪTĀJS: Latvijas Valsts mežzinātnes institūts „Silava”

PASŪTĪTĀJS: AKCIJU SABIEDRĪBA “LATVIJAS valsts meži”
Līguma Nr. 5-5.9.1_007p_101_21_78

PĒTĪJUMA ZINĀTNISKAIS VADĪTĀJS:
Dr. Āris Jansons, LVMI Silava vadošais pētnieks

Salaspils, 2021

Kopsavilkums

1. Zināšanu uzkrāšana par Latvijā reti sastopamu vietējo un introducēto koku sugu atjaunošanu un audzēšanu.

Veikta plānotā ilgtermiņa pētījumu objektu cieto lapu koku audzēs (10) atkārtota uzmērīšana (kokaudze un veģetācija), kā arī jaunaudzēs izveidoto 20 zinātnisko objektu uzraudzība valsts zinātniskās izpētes mežos Meža pētīšanas stacijā (MPS). Nodrošināta 6 vēsturisko eksperimentālo stādījumu MPS Auces un Šķēdes meža novados (MN) uzmērīšana, kopšanas sagatavošana, uzraudzība, kā arī 4 jaunaudžu kopšanas objektu kopšana.

2. Vētru un uguns bojājumu ietekme un tās izmaiņas nākotnes klimatā.

Ievākti dati par bērza vēja noturību (34 koki). Ierīkoti parauglaukumi un ievākti dati vēja bojājumus ietekmējošo faktoru analīzei: transekti augsnes sasaluma novērtējumam mežaudzēs atkarībā no gaisa temperatūras un audzes parametriem (3), ievākti koksnes blīvumu raksturojošie rādītāji 100 pluskoku brīvapputes pēcnācēju ģimenēm un identificēti vēsturiskie stādījumi, kur augsne tikusi sagatavota pacilās. Ievākti dati par vēja bojājumu sekundāro ietekmi, analizējot egles, kam izraisīta primārā lūšana (3 objekti). Pētījuma objektos (27) ievākti dati par ugunsbīstamību raksturojošo rādītāju izmaiņām un lokālajiem meteoroloģiskajiem rādītājiem. Sagatavota viena publikācija.

Konstatēts, ka veģetācijas indeksi (GNDVI, MACI, CI, NDRE), kas aprēķināmi no multispektrāliem attēliem, būtiski atšķiras ietekmētām (liektas līdz primārās lūšanas punktam, imitējot vēja iedarbību) un nebojātām eglēm. Tātad, izmantojot šo metodi, bojāto koku identificēšana ir iespējama, vēl pirms bojājumu sekas novērojamas vizuāli, un to var izdarīt ievērojamās platībās.

Lai novērtētu koku pieauguma izmaiņas ugunsgrēka radīta bojājuma dēļ, ievākti pieauguma urbumi 26 objektos (742 koki) vismaz 5 gadus pēc ugunsgrēka. Noskaidrots, ka izdzīvojušajām 40-60 gadus vecām priedēm pieaugums ir mazāks (negatīvs kumulatīvais papildus pieaugums) nekā kontroles kokiem, tomēr izteiktāks pieauguma samazinājums ir vecākām priedēm (100-121 gads) gadījumos, kad stumbra apdeguma augstums pārsniedz 3 m vai ir zemāk par 1 m.

3. Biotisko faktoru ietekmes pārmaiņas nākotnes klimatā.

Publicēts viens zinātniskais raksts par dendrofāgajiem kukaiņiem klimata pārmaiņu kontekstā un sagatavoti 2 manuskripti.

4. Koku augšanas gaitas izmaiņas nākotnes klimatā.

Veikta augstuma pieauguma rekonstrukcija eglei (35 koki). Novērotās augstuma pieauguma ikgadējās mainības rādītāji un pieauguma un meteoroloģisko faktoru saistības norāda uz egles izteikto jutību pret sausumu, kā arī pavasara temperatūru, liecinot par kompleksiem pieauguma kontroles mehānismiem. Augstuma un radiālo pieaugumu ietekmējošie meteoroloģiski apstākļi ir salīdzināmi. Izteiktā pieauguma jutība pret meteoroloģiskajiem apstākļiem norāda uz augošiem klimatiskajiem riskiem, un līdz ar to uz nepieciešamību pēc adaptīvas mežsaimniecības. Novērotās pieauguma ikgadējās mainības atšķirības starp kokiem norāda uz vides un genotipa mijiedarbību uz pieauguma jutību, kas savukārt liecina par selekcijas potenciālu mazināt lokālo populāciju klimatiskos riskus (sausuma un salnu ietekmes intensificēšanās), veicot mērķētu mazāk uzņēmīgo genotipu atlasī.

5. Modeļteritorija kompleksiem ilgtermiņa novērojumiem par mežkopības ietekmi uz meža un ar to saistītajām ekosistēmām ar auglīgām kūdras augsniem.

Veikta infrastruktūras – gruntsūdens aku – ierīkošana, regulāra paraugu ievākšana, nodrošinot informāciju par meliorācijas sistēmas renovācijas ietekmi un sākotnējā stāvokļa raksturojumu platībās, kurās plānota siltumnīcas efekta gāzu mērīšana. Sagatavots metodikas apraksts.

Summary

1. Increasing the knowledge on regeneration and growth of rare and introduced tree species in Latvia.

Planned re-measurements of stand and ground vegetation in long term sample plots in noble broadleaved trees stand (10) as well as maintenance of young stands in Research forest station, (20) had been completed. Measurements, planning and thinning of long-term sample plots in noble broadleaved tree stands (6) in Research forest station Auce and Skede districts had been carried out as well as thinning in precommercial thinning experiments (4).

2. Effect of wind storms and forest fire and its changes in the predicted climate.

Planned wind-resistance tests of birch carried out. Sample plots had been established and data collected for assessment of specific aspects, linked to tree wind stability. It includes transects for monitoring of soil temperature change (and frost depth) in relation to stand parameters and meteorological conditions (3) and sample plots, where wood density of growing trees from 100 open pollinated families had been measured. Also data on the secondary influence of wind damages had been collected while monitoring the stands (3) with trees, that have been pulled till primary failure point and then released (remained standing). Data on ground parameters, linked to fire danger, had been periodically collected in 27 sites, simultaneously with monitoring of local meteorological conditions. One publication had been published.

Vegetation indices (GNDVI, MACI, CI, NDRE), calculated from the multi-spectral images, reveal significant differences between damaged (pulled until primary failure to mimic the influence of storm) and undamaged trees. Thus the method can be used to identify affected trees before damages can be evaluated visually and/or in large areas.

Forest fire has a negative effect on increment of survived pines, that is more pronounced for older trees (100-121 years) with fire scars higher than 3 m or up to 1 m, than for younger pines (40-60 years), as demonstrated by analysis in 26 sites (increment cores from 742 trees).

3. Changes in biotic factors due to climate change.

One publication on changes of outbreaks of dendrophagous insects due to climate change had been published and two manuscripts prepared.

4. Effect of climate change on increment of trees.

Height reconstruction of Norway spruce had been carried out as planned (35 trees). Height and radial increment had been affected by a complex of similar meteorological factors, including winter/spring temperature and summer drought. Pronounced climate-sensitivity underlines the potential risk for productivity of Norway spruce stands due to effects of climate change, thus the need for climate-smart forestry solution. Selection of less sensitive genotypes in tree breeding and planting can be part of such solution.

5. Case study area on organic soils for complex, long-term, large scale assessment of influence of forest management measures on forest and related ecosystems.

Infrastructure for ground water measurements had been established and periodic monitoring (sample collection) to evaluate water quality carried out to ensure information on the influence of drainage system renovation as well as establish the data basis of the parameters in the case study area before the planned management measures and initiation of forest landscape scale greenhouse gas measurements. Description of study design prepared.

Saturs

Kopsavilkums	2
Summary.....	3
Attēlu un tabulu saraksts	5
2021. gada darba uzdevumi un to izpildes statuss.....	8
1. Zināšanu uzkrāšana par Latvijā reti sastopamu vietējo un introducēto koku sugu mežaudžu atjaunošanu un audzēšanu.	13
2. Vētru un uguns bojājumu ietekme un tās izmaiņas nākotnes klimatā.....	22
3. Biotisko faktoru ietekmes pārmaiņas nākotnes klimatā.	37
4. Koku augšanas gaitas izmaiņas nākotnes klimatā	46
5. Modeļteritorija kompleksiem ilgtermiņa novērojumiem par mežkopības ietekmi uz meža un ar to saistītajām ekosistēmām mežos ar auglīgām kūdras augsnēm.....	54
Izmantotā literatūra.....	66

Attēlu un tabulu saraksts

Attēls/tabula	Lpp.
1.1. attēls. Dižskābarža, ozola, liepas, kļavas un sarkanā ozola mežaudžu kopšanas eksperimenta shēma MPS Auces MN 11. kvartālā	10
1.1. tabula. Dižskābarža, ozola, liepas, kļavas un sarkanā ozola kopšanas eksperimenta MPS Auces MN 11. kvartālā taksācijas rādītāji	11
1.2. tabula. Apsektie pētījuma objekti Meža pētīšanas stacijā	11
1.2. attēls. Pētījuma parauglaukums	13
1.3. tabula. Vīksnas un gobas mežaudžu pētījumu objektu koordinātes	14
1.3. attēls. Vīksnas un gobas ilglaicīgo pētījumu objektu izvietojums Latvijā	14
1.4. tabula. Vīksnas un gobas ilglaicīgo pētījumu objektu taksācijas rādītāji	14
1.4. attēls. Augu sugu skaits vīksnas un gobas parauglaukumos 2016. un 2021. gadā	16
1.5. attēls. Lakstaugu projektīvais segums (%) vīksnas un gobas parauglaukumos 2016. un 2021. gadā	17
1.6. attēls. Krūmu projektīvais segums (%) vīksnas un gobas parauglaukumos 2016. un 2021. gadā	17
1.7. attēls. Sūnu projektīvais segums (%) vīksnas un gobas parauglaukumos 2016. un 2021. gadā	18
2.1. attēls Lieces momenti stumbra pamatnē (\pm ticamības intervāls) bērziem pie primārās un sekundārās lūšanas	20
2.2. attēls. Pētījumu objektu (transektu) novietojums MPS Kalsnavas MN	21
2.3. attēls. Pētījumu objektu novietojums MPS Kalsnavas MN 152., 176., 290. kvartālā	22
2.4. attēls. Analizētā attēla piemērs: egles, kas bojātas līdz primārajai lūšanai (vainagi apzīmēti ar sarkanu līniju), un ne bojātas egles (vainagi apzīmēti ar zaļu līniju)	23
2.5. attēls Paraugkoku relatīvās slodzes noturības (lieces momenta stumbra pamatnē un stumbra tilpuma attiecības) atšķirības trijās vērtētajās mežaudzēs	24
2.6. attēls. Veģetācijas indeksu vērtību sadalījums starp “aizlauztiem” un “kontroles” kokiem (\pm standartkļūda)	24
2.1. tabula. Iedzimstamības koeficienti (H^2 un h^2), kā arī proveniences/ģenētiskās aditīvās variācijas koeficienti koka augstumam un vasas masas punkta relatīvajam un absolūtajam augstumam priedes vietējo provenienci un diallēlās hibridizācijas stādījumos Kalsnavā un Zvirgzdē	29
2.2. tabula. Mežaudzes SIA ”Rīgas Meži” teritorijā Daugavas mežniecībā, kurās koki stādīti uz pacilām	30
2.7. attēls Audzes, kurās augsne sagatavota pacilās	31
2.3. tabula. Mežaudzes, kurās ievākti dati par degmateriāla mitruma izmaiņu dinamiku	31

2.8. attēls. Piecu gadu perioda caurmēra kumulatīvais papildus pieaugums (Zdkp) atkarībā no kokaudzes vecuma grupas	32
2.9. attēls. Radiālā pieauguma izmaiņas kontroles un ugunsgrēka ietekmētajiem kokiem	33
3.1. attēls. Egļu astoņzobu mizgrauža (<i>Ips typographus</i> L.) lidošanas sākuma monitoringa parauglaukumu izvietojums no 2017. gada līdz 2021. gadam	35
3.2. attēls. Pirmās vaboles izlidošanas datums (vidēji no 5 parauglaukumiem)	35
3.3. attēls. Mizgraužu izlidošanas sākums atkarībā no maksimālās diennakts gaisa temperatūras (meteoroloģiskie dati ņemti no Zosēnu meteoroloģiskās stacijas)	36
3.4. attēls. Egļu astoņzobu mizgrauža (<i>Ips typographus</i> L.) lidošanas sākums rietumu-austrumu virzienā izvietotos parauglaukumos	36
3.5. attēls. Sakarība starp egļu astoņzobu mizgrauža lidošanas sākumu un kopējo vidēji vienā slazdā noķerto vaboļu daudzumu sezonā	37
3.6. attēls. Masveida savairošanās ietekmētā platība (A) un sarpgadu variācija (B) un platība atkarībā no gaisa temperatūras novirzes (C) laika posmā no 1950. līdz 2010. gadam	39
3.7. attēls. Populācijas un temperatūras ietekme uz dzīvo, mirušo un izšķīlušos kāpuru īpatsvaru. Dzīvo, mirušo un izšķīlušos skaits ir attiecināts relatīvi pret dējumu (subpopulāciju)	41
3.8. attēls. Kāpuru masas pieaugums uz daļēji un pilnībā plaukušām parastā ozola un āra bērza lapām	42
4.1. tabula. Paraugošanai atlasīto koku un visu stādījumā esošo koku dimensijas	43
4.1. attēls. Egles serdes izmaiņas, kas indicē augstuma pieauguma noslēgumu	44
4.2. attēls. Egles paraugkoku augstuma pieaugumu sērijas	45
4.3. attēls. Egles paraugkoku augstuma pieauguma atlikuma hronoloģija un replikācija (katru gadu reprezentējošo koku skaits). Hronoloģija izveidota laika posmam, kas neietver juvenīlo augšanu	46
4.4. attēls. Būtiskās korelācijas (būtstrapoti Pīrsona korelācijas koeficienti) starp meteoroloģiskajiem mainīgajiem un egles augstuma pieauguma atlikuma hronoloģiju. Nogriežņi parāda korelācijas koeficientu 95% ticamības intervālu. SPEI – sausuma indekss	46
4.5. attēls. Analīzei laboratorijā sagatavotais bērza paraugs (a) un tā attēls mikroskopā pēc iekrāsošanas (b)	48
4.6. attēls. Atsegta bērza serde ar redzamu galotnes pumpuru, kas indicē augstuma pieauguma noslēguma vietu.	49
5.1. attēls. Vesetnieku modeļteritorija	52
5.2. attēls. Kandavu lauku modeļteritorija	53
5.3. attēls. Heterotrofās elpošanas parauglaukumu ierīkošana	54
5.4. attēls. Vaisala CO ₂ gāzu analizators ar tumšo kambari	55
5.5. attēls. Picarro CO ₂ , CH ₄ gāzu analizators ar tumšo kambari	56
5.6. attēls. Gruntsūdens akas	56

5.7. attēls. Nobiru uztvērējs	57
5.8. attēls. Zemsedzes biomasas paraugu ievākšana	58
5.9. attēls. Sīko sakņu biomasas paraugu ievākšana	58
5.10. attēls. Lapu laukuma indeksa noteikšana	59
5.11. attēls. Sīko sakņu paraugu apstrāde laboratorijā	60
5.12. attēls. Siltumnīcefekta gāzu mērījumiem ar <i>Eddy-covariance</i> sistēmu paredzētā torņa un iekārtu izvietojums MPS Kalsnavas MN: fragments no projekta	62

2021. gada darba uzdevumi un to izpildes statuss

Pētījums, uzdevums	Darbs, nodevumi	Rezultāts
1.1. Veikt ierīkoto liepas un kļavas (t.sk. dižskābarža, ozola) jaunaudzū kopšanas objektu uzturēšanu, uzmērīšanu.	<p>Darbu nolūks: Veikt ierīkoto liepas, kļavas, dižskābarža un ozola jaunaudzū kopšanas objektu uzturēšanu, uzmērīšanu.</p> <p>Lauka darbu laikā: Liepas, kļavas dižskābarža, sarkanā ozola objekti – 4 vēsturiskie stādījumi MPS Auces MN – uzmērīšana, kopšanas izzīmēšana, uzraudzība, novērtējums.</p> <p>Liepas, kļavas jaunaudzū objekti – 4 objekti – uzmērīšana un kopšana.</p> <p>Kamerālo darbu laikā: Šajā etapā detalizēta ievākto datu analīze nav plānota.</p> <p>Datu apkopojums un aprēķini par atkārtoti pārmērītajiem objektiem līdz stadijai, kas izmantojami publikācijas sagatavošanai.</p> <p>Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.</p>	Veikta 6 vēsturisko stādījumu MPS Auces un Šķēdes MN uzmērīšana, kopšanas sagatavošana un uzmērīti 4 liepas jaunaudzū kopšanas objekti LVM Izpildīts viss plānotais
1.2. Veikt ierīkoto dižskābarža, sarkanā ozola, hibrīdās lapegles stādījumu un kopšanas objektu uzturēšanu, uzmērīšanu	<p>Darbu nolūks: Veikt ierīkoto dižskābarža, sarkanā ozola, hibrīdās lapegles stādījumu un kopšanas objektu uzturēšanu, uzmērīšanu.</p> <p>Lauka darbu laikā: Veikta jauno stādījumu apsekošana, kur nepieciešams, marķējumu atjaunošana, kopšanas kontrole (20 objekti, MPS Auces, Kalsnavas, Jelgavas, Šķēdes MN). Veikti bojājumus raksturojoši mērījumi tajos gadījumos, ja šādi bojājumi tika konstatēti, lai raksturotu iespējamās adaptācijas problēmas.</p> <p>Kamerālo darbu laikā: Šajā etapā detalizēta ievākto datu analīze nav plānota.</p> <p>Sagatavots vispārīgs apkopojums.</p> <p>Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.</p>	Veikta jauno stādījumu apsekošana, kur nepieciešams, marķējumu atjaunošana, kopšanas kontrole (20 objekti, MPS Auces, Kalsnavas, Jelgavas, Šķēdes MN). Nozīmīgi bojājumi nav konstatēti. Izpildīts viss plānotais.
1.3. Sagatavot platlapju piemistrojuma audzēšanas iespēju novērtējumu.	<p>Darbu nolūks: Sagatavot platlapju piemistrojuma audzēšanas iespēju novērtējumu.</p> <p>Lauka darbu laikā: Platlapju piemistrojums – 12 ilgtermiņa pētījumu objektu uzmērīšana.</p> <p>Kamerālo darbu laikā: Šajā etapā detalizēta ievākto datu analīze nav plānota.</p> <p>Sagatavots vispārīgs datu apkopojums un veikti sākotnējie aprēķini.</p> <p>Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.</p>	Veikta 10 ilgtermiņa pētījumu objektu atkārtota uzmērīšana (kokaudze un veģetācija), jo divos objektos gobu skaits bija tik neliels, ka pētījuma turpināšana tajos nebija lietderīga (saskaņots pārskata starpziņojumā).
2.1. Aprēķināt vēja noturību raksturojošos koeficientus modeļa pielāgošanai vēja bojājumu mazināšanai	<p>Darbu nolūks: Aprēķināt vēja noturību raksturojošos koeficientus, modeļa pielāgošanai vēja bojājumu vērtēšanai Latvijā un rekomendāciju izstrāde vēja bojājumu mazināšanai.</p> <p>Lauka darbu laikā:</p>	Veiktas visas plānotas vēja noturības pārbaudes. Tā ka augsne pētījuma etapa laikā nebija sasalusi, tad, saskaņā ar uzdevumu, darbi veikti posmā ar paaugstinātam augsnes

vērtēšanai Latvijā un rekomendāciju izstrādei vēja bojājumu mazināšanai.	Veiks vēja noturības pārbaudes 34 kokiem. Plānota koku apsekošana dabā, parauglaukumu ierīkošana, lauka darbu izpilde. Papildus plānota biomasa un augsnes paraugu ievākšana. Darbu izpilde plānota MPS Kalsnavas MN. Kamerālo darbu laikā: Datu pēcapstrāde. Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.	mitrumu. Izpildīts viss plānotais.
2.2. Izstrādāt modeļus augsnes sasaluma novērtējumam mežaudzēs atkarībā no gaisa temperatūras un audzes parametriem.	Darbu nolūks: Izstrādāt modeļus augsnes sasaluma novērtējumam mežaudzēs atkarībā no gaisa temperatūras un audzes parametriem. Lauka darbu laikā: Ierīkos MPS 3 transektus, katrā 5 novērojumu punkti. Dati par temperatūru tiks iegūti automātiski, paredzot, ka punkti tiek apsekoti tikai gadījumā, ja ir kādas problēmas ar informācijas ielasīšanu. Apsekojumi nepieciešami sniega periodā, jo datus par sniega segas biezumu un konsistenci nav iespējams iegūt automātiski. Apsekojumi paredzēti vidēji reiz 2 nedēļās vai pēc nozīmīgām vidējās gaisa temperatūras maiņām. Vienu novērojumu transektu paredzēts ierīkot arī LVM Ziemeļkurzemes reģionā. Kamerālo darbu laikā: Analizēti pieejamie modeļi augsnes sasaluma novērtējumam mežaudzēs (kā SCLISS un citi) atkarībā no gaisa temperatūras, sniega segas un audzes parametriem, kā arī apzināti un analizēti pieejamie vēsturiskie dati iespējamai šo modeļu kalibrācijai un/vai papildināšanai. Ievāko datu apkopošana, analīze. Literatūras analīze. Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.	Ierīkoti 3 transekti MPS Kalsnavas MN, katrā 7 novērojumu punkti, ievākti plānotie mērījumu dati. Pētījuma etapā bija plānota vēsturisko novērojumu datu analīze, bet starpziņojuma sagatavošanā konstatēts, ka to apjoms bija nepietiekams un neizdevās atrast modeli, kas izskaidrotu to saikni ar gaisa temperatūras un audžu datiem. Tādēļ plānotie cilvēkresursi ieguldīti papildus darbā 3.3. uzdevuma izpildē, sagatavojot vēl vienu publikāciju (manuskripts).
2.3. Novērtēt vēja bojājumu sekundāro ietekmi uz egļu astoņzobu mizgrauža savairošanos izdzīvojušajos kokos, bojājumu apjomu, to nosakošiem faktoriem.	Darbu nolūks: Novērtēt vēja bojājumu sekundāro ietekmi uz egļu astoņzobu mizgrauža savairošanos izdzīvojušajos kokos, bojājumu apjomu, to nosakošiem faktoriem. Lauka darbu laikā: 3 objektu (trīs egles audzes) ierīkošana MPS Kalsnavas MN. Katrā objektā izvēlēti 10 paraugkoki, kam tiek veikts mehāniskās noturības tests līdz primārās lūšanas stāvoklim, pēc tam tālāku laušanu pārtraucot, un 10 kontroles koki. Kamerālo darbu laikā: Sagatavots vienas sezonas rezultāts un pētījuma turpinājuma plāns. Izstrādātas rekomendācijas. Telpisko datu pēcapstrāde Agisoft vai līdzvērtīgā programmā plānotajiem poligoniem, lai nodrošinātu paraugkoka līmeņa informāciju. Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.	Ierīkoti plānotie pētījuma objekti, veikta primārā laušana, ievākti un analizēti attālās izpētes dati. Izpildīts viss plānotais.
2.4. Noskaidrot selekcijas un atjaunošanas ietekmi uz vēja bojājumu varbūtību.	Darbu nolūks: Noskaidrot selekcijas un atjaunošanas ietekmi uz vēja bojājumu varbūtību. Lauka darbu laikā: Koksnes blīvumu raksturojošo rādītāju ievākšana no 100 brīvapputes pēcnācēju ģimenēm vai klonu rametu kopām, izmantojot vienkāršotas uzmērīšanas metodes.	Ievākti koksnes blīvuma dati, veikta ģenētikas ietekmes uz koku masas centra augstumu analīze. Apzināti vēsturiskie stādījumi, kur augsne sagatavota pacilās, lai nodrošinātu nākamo etapu darbu norisi.

	<p>Vēsturisko stādījumu vietu apzināšana, kur augsne sagatavota pacilās vai augstās vagās t.i. ar tādu metodi, kas varētu ietekmēt sakņu sistēmas vēlāko attīstību.</p> <p>Kamerālo darbu laikā: Analizē iekļaus paraugkokus no ne mazāk kā 400 brīvapputes un kontrolēto krustojumu ģimenēm vecākajos stādījumos, vērtējot koku masas centra augstumu. Papildus plānots analizēt koksnes blīvumu (ne mazāk kā 100 ģimenes). Analizē papildus var tikt ietverti arī citi parametri, ja sākotnējais (literatūras) vērtējums liecinās par šādu nepieciešamību.</p> <p>Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.</p>	Izpildīts viss plānotais.
2.5. Precizēt ugunsbīstamības izmaiņu un ugunsgrēku seku modeļus.	<p>Darbu nolūks: Precizēt ugunsbīstamības izmaiņas un ugunsgrēku seku modeļus.</p> <p>Lauka darbu laikā: Sadalījušos nobiru, augsnes (dažādos dziļumos) un citu degmateriālu mitruma mērījumi un paraugu ievākšana 24 pētījuma objektos, vienlaikus iegūstot datus par temperatūru un nokrišņiem iespējami tuvu šiem objektiem (kur būs iespējams izvietot infrastruktūru – tieši objektos). Datu ievākšana plānota katru nedēļu. Pirmie dati tika iegūti līdz ar sniega nokušanu, lai raksturotu sākotnējo augsne mitrumu – šis darbs veikts pirms pētījuma uzsākšanas.</p> <p>Kamerālo darbu laikā: Veiks uguns ietekmēto koku atbildes reakcijas – pieauguma izmaiņu – datu ieguvei – pieauguma urbumu apstrādi (līmēšana, slīpēšana, uzmērīšana) un iegūto datu apstrādi (šķērsdatēšana, papildpieauguma aprēķini), nodrošinās sākotnējo informācijas bāzi un definēs darba uzdevumus papildpieauguma raksturošanai ilgākā laika periodā vajadzīgo datu ieguvei, kas plānota nākamajā pētījuma etapā.</p> <p>Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.</p>	<p>Ugunsbīstamību raksturojošo modeļu precizēšanai veikti augsnes (dažādos dziļumos) mitruma mērījumi un paraugu ievākšana 27 pētījuma objektos (3 vairāk, nekā plānots). Veikta plānotā piecu gadu perioda caurmēra kumulatīvā papildus pieauguma analīze, sagatavots kopsavilkums konferencei. Par pētījuma jomu nodrošināta starptautiska sadarbība un pārskata periodā publicēts raksts.</p> <p>Izpildīts viss plānotais.</p>
3.1. Sagatavot dendrofāgo kukaiņu (kaitēkļu) masveida savairošanās draudu raksturojumu.	<p>Darbu nolūks: Sagatavot dendrofāgo kukaiņu (kaitēkļu) masveida savairošanās draudu raksturojumu.</p> <p>Lauka darbu laikā: Lauka darbi nav plānoti.</p> <p>Kamerālo darbu laikā: Kamerālie darbi ietvers esošās informācijas analīzi. Novērtēs tīklapsenes savairošanās patieso sākumu (attālā izpēte), attīstību: veiks datu apkopošanu, analīzi, sagatavos publikāciju. Izmantojot tīklapseni kā modeļorganismu, sagatavos plānu citu dendrofāgu sugu analīzei.</p> <p>Literatūras studijas.</p> <p>Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.</p>	Pētījuma ietvaros plānoti un veikti tikai kamerālie darbi, nodrošinot esošās informācijas analīzi, kopsavilkums ietverts pārskatā, papildus informācija sagatavojama pēc pasūtītāja ieskatiem.
3.2. Uzsākt darbu pie klimata pārmaiņu ietekmes uz egļu astoņzobu mizgrauzi	<p>Darbu nolūks: Sagatavot novērtējumu par klimata pārmaiņu ietekmi uz egļu astoņzobu mizgrauža attīstību.</p> <p>Lauka darbu laikā: Lauka darbi nav plānoti.</p> <p>Kamerālo darbu laikā:</p>	Nodrošināts mizgrauža izlidošanas monitoringa turpinājums, lai nepārtrūktu novērojumu rinda, tam patērējot lielāko daļu laika

novērtējuma sagatavošanas.	<p>Paredzēts sagatavojot metodiku mizgrauža attīstības cikla saistībā ar klimata pārmaiņu ietekmi vērtēšanai. Metodika ietvers detalizētu pētījumu dizainu, t.sk. darba izpildes plānoto laiku, lai plānotos nākamā etapa lauku darbus varētu savlaicīgi saskaņot ar pasūtītāju.</p> <p>Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.</p>	(rezultātu kopsavilkums pārskatā). Metodiskie risinājumi šīs pētījuma komponentes attīstīšanā saistīti ar testiem klimata kamerās un tiks saskaņoti ar pasūtītāju vienlaikus ar darba uzdevumiem nākamajam etapam. Tomēr nozīmīgākais darba apjoms nākamajos etapos plānots citu mizgraužu sugu analīzei.
3.3. Veikt dendrofāgo kukaiņu un to saimniekorganismu dzīves cikla sinhronitātes izmaiņu novērtējumu.	<p>Darbu nolūks: Veikt dendrofāgo kukaiņu un to saimniekorganismu dzīves cikla sinhronitātes izmaiņu novērtējumu.</p> <p>Lauka darbu laikā: Lauka darbi nav plānoti.</p> <p>Kamerālo darbu laikā: Izstrādās metodiku cirsmu ietekmes efekta un pieguļošo audžu ietekmes novērtēšanai uz mizgrauža dabisko ienaidnieku piesaisti, ietverot tajā arī pētījumu dizainu aprakstu, t.sk. darba izpildes plānoto laiku, lai plānotos nākamā etapa lauku darbus varētu saskaņot ar pasūtītāju. Tāpat plānota papildus datu analīze un publikācijas sagatavošana par iepriekš iegūtiem rezultātiem par klimata pārmaiņu ietekmi uz dedrofāgajiem kukaiņiem un to eventuālo bojājumu apjomu, nodrošinot references pētījumu virziena attīstībai.</p> <p>Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.</p>	Sagatavota plānotā publikācija, kā arī papildus publikācijas manuskripts. Izpildīts viss plānotais.
4.1. Sagatavot klimata komponentes augstuma pieauguma modeļiem.	<p>Darbu nolūks: Sagatavot klimata komponentes augstuma pieauguma modeļiem.</p> <p>Lauka darbu laikā: Paredzēts veikt paraugkoku nozāģēšanu, precīzu uzmērīšanu, sagarumošanu, nogriežņu marķēšanu un transportu, centrālo dēļu izzāģēšanu uz lentzāģa un marķēšanu, frēzēšanu precīzi līdz serdei, mērījumu veikšanu.</p> <p>Kamerālo darbu laikā: Plānots darbs Dendrochronoloģijas laboratorijā. Veiks augstuma pieauguma un meteoroloģisko faktoru saiknes analīzi.</p> <p>Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.</p>	Veikta visa plānotā egles materiāla ievākšana un analīze, raksturojot augstuma pieauguma un meteoroloģisko faktoru saikni. Veikta plānotā metodikas aprobācijas bērsa augstuma pieauguma rekonstrukcijai. Izpildīts viss plānotais.
5.1. Sagatavot meliorācijas sistēmu renovācijas ietekmes uz augsnes mitruma režīma izmaiņām detalizētu novērtējumu.	<p>Darbu nolūks: Sagatavot meliorācijas sistēmu renovācijas ietekmes uz augsnes mitruma režīma izmaiņām detalizētu novērtējumu.</p> <p>Lauka darbu laikā: Plānots ierīkot sistēmas 3 pētījuma objektos MPS Kalsnavas MN, ciktāl tas iespējams atbilstoši infrastruktūras iepirkumiem institūtā. Infrastruktūras ierīkošana paredzēta tajās platībās, kur nākotnē plānota gāzu analizatoru uzstādīšana, lai vienlaikus nodrošinātu iespējami detalizētus datus par siltumnīcefekta gāzu emisijas ietekmējošo parametru stāvokli pirms šo analizatoru uzstādīšanas, kā arī, turpinot monitoringu – pēc uzstādīšanas un pēc veiktās saimnieciskās darbības. Lauku darbi</p>	Veikti visi plānotie lauka darbi 3 pētījuma objektos MPS. Izpildīts viss plānotais.

	<p>ietver objektu apsekošanu, gruntsūdens aku ierīkošanu, regulāru (reizi 3 nedēļās) paraugu ievākšanu.</p> <p>Kamerālo darbu laikā: Plānots sagatavot metodiku turpmāko pētījumu veikšanai un arī papildus objektu ierīkošanai nākamajos pētījuma etapos.</p> <p>Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.</p>	
5.2. Sagatavot liela mēroga saimnieciskās darbības ietekmes uz mežu ar meliorētām augsnēm ekosistēmu raksturojumu.	<p>Darbu nolūks: Sagatavot liela mēroga saimnieciskās darbības ietekmes uz mežu ar meliorētām augsnēm ekosistēmu raksturojumu.</p> <p>Lauka darbu laikā: Plānota attālās izpētes datu ieguve detalizētai teritorijas un koku vitalitātes tajā raksturošanai.</p> <p>Kamerālo darbu laikā: Plānots izstrādāt pētījumu metodiku, lai raksturotu liela mēroga saimnieciskās darbības ietekmes uz meža ekosistēmu ar meliorētām augsnēm, kas tiks realizēta monitoringa objektā MPS Kalsnavas MN. Tiks ņemti vērā jau notiekošu vai plānotu pētījumu mērķi, pieejamie tehniskie risinājumi. Plānota attālās izpētes datu ieguve detalizētai teritorijas un tajā esošo koku vitalitātes raksturošanai.</p> <p>Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.</p>	<p>Veikta metodikas izstrāde, kompleksi vērtējot gan meliorācijas rekonstrukcijas, gan ainavas mēroga izmaiņu ietekmes uz SEG analīzi (ietverot aspektus no 5.1. un 5.3. uzdevumiem).</p> <p>Izpildīts viss plānotais.</p>
5.3. Sagatavots meža masīva mēroga SEG gāzu apmaiņas raksturojums.	<p>Darbu nolūks: Sagatavot meža masīva mēroga SEG gāzu apmaiņas raksturojumu.</p> <p>Lauka darbu laikā: Metodiskā atbalsta sniegšana MPS personālam.</p> <p>Kamerālo darbu laikā: Detalizēta mežsaimniecisko darbu plānošana vienā teritorijā – emisiju uzskaites teritorijās un pieguļošajās platībās, kā arī saskaņošana ar MPS, lai nodrošinātu piemērotu situāciju uz to brīdi, kad gāzu analizatori tiks uzstādīti.</p> <p>Gada noslēgumā sagatavots pārskats par 2021. gada pētījumu rezultātiem.</p>	<p>Nodrošināts metodiskais atbalsts <i>Eddy covariance</i> infrastruktūras komplektēšanā.</p> <p>Izpildīts viss plānotais.</p>

1. Zināšanu uzkrāšana par Latvijā reti sastopamu vietējo un introducēto koku sugu mežaudžu atjaunošanu un audzēšanu.

Saskaņā ar plānu šajā pētījuma etapā paredzēta objektu izveide, uzturēšana un uzmērīšana. Analīze tiks veikta pētījuma noslēguma etapā, apkopojot tā ietvaros iegūto informāciju.

1.1. Ierīkoto kopšanas objektu uzturēšana un uzmērīšana

Pētījuma etapā uzmērīti 4 liepas jaunaudžu kopšanas objekti akciju sabiedrības “Latvijas valsts meži” (LVM) mežos, kā arī nodrošināta informācijas apmaiņa ar LVM atbildīgajiem darbiniekiem un atsevišķu objektu robežu atkārtota iezīmēšana kontekstā ar blakus plānoto saimniecisko darbību.

MPS Auces MN 11. kvartālā (1.1.attēls) identificēti ozola, sarkanā ozola, liepas, kļavas un dižskābarža dažādu mistrojumu stādījumi, par kuriem nav zināma ierīkošanas un iepriekšējās apsaimniekošanas informācija. Veikta šo stādījumu uzmērīšana, novērtēšana un iezīmēšana kopšanai, kopšanas uzraudzība un uzmērīšana pēc tās, ar mērķi nodrošināt, ka eksperimenti saglabājas ilgstošai analīzei un demonstrācijai (1.1. tabula).



1.1. attēls. Dižskābarža, ozola, liepas, kļavas un sarkanā ozola mežaudžu kopšanas eksperimenta shēma MPS Auces MN 11. kvartālā

Līdzīgi organizēta un nodrošināta uzmērīšana un kopšana divās audzēs MPS Šķēdes MN. Liepas audzē saglabāta tikai pamatsuga, kopējā krāja pirms kopšanas $281\text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, pēc kopšanas $176\text{ m}^3\text{ha}^{-1}$. Pirms kopšanas vidējais koku caurmērs 20,3 cm, vidējais augstums 19,1 m, pēc kopšanas attiecīgi 28,5 cm un 21,2 m. Kopšanas rezultātā audzes šķērslaukums samazinājās no $38,4\text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ līdz $24\text{ m}^2\text{ha}^{-1}$.

Zirgkastaņas audze sadalīta deviņās parcelēs un izkopta ar mērķi saglabāt pamatsugu. Kopējā krāja pirms kopšanas $271\text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, pēc kopšanas $97\text{ m}^3\text{ha}^{-1}$. Pirms kopšanas vidējais koku caurmērs 17,8 cm un augstums 18,1m, pēc kopšanas attiecīgi 19,0 cm un 15,3 m. Pēc kopšanas uzmērīti tikai pamatsugas koki, jo saglabātie citu sugu koki nerada tiešu ietekmi uz to augšanu.

1.1. tabula. Dižskābarža, ozola, liepas, kļavas un sarkanā ozola kopšanas eksperimenta MPS Auces MN 11. kvartālā taksācijas rādītāji

Pirms kopšanas						
Objekts- stādītā koku suga	D vid cm	H vid m	G m ²	Krāja m ³	G m ² ha ⁻¹	Krāja m ³ ha ⁻¹
I-dižskābardis, liepa, kļava	20,6	19,4	16,45	168,43	44,5	455,2
II-liepa, kļava	20,7	19,5	3,45	34,00	43,1	425,0
III-ozols	25,1	20,9	18,86	203,60	32,0	345,1
IV-liepa, kļava	18,2	17,7	45,16	469,65	41,4	430,9
V-ozols, kļava	20,1	19,3	10,56	108,07	33,0	337,7
Pēc kopšanas						
Objekts- stādītā koku suga	D vid cm	H vid m	G m ²	Krāja m ³	G m ² ha ⁻¹	Krāja m ³ ha ⁻¹
I-dižskābardis, liepa, kļava	25,2	21,0	12,21	128,13	33,0	346,3
II-liepa, kļava	20,1	19,3	2,10	20,07	26,3	250,9
III-ozols	25,1	20,9	12,84	139,31	21,8	236,1
IV-liepa, kļava	23,0	21,0	22,66	229,79	20,8	210,8
V-ozols, kļava	22,8	20,7	4,93	48,68	15,4	152,1

Dvid – vidējais caurmērs; Hvid – vidējais augstums; G - šķērslaukums

1.2. Ierīkoto dižskābarža, sarkanā ozola, hibrīdās lapegles stādījumu un kopšanas objektu uzturēšana

Veikta iepriekšējos gados ierīkoto pētījuma objektu apsekošana un sadarbībā ar MPS organizēti šo objektu uzturēšanai svarīgie darbi (žogu uzturēšana, kopšana, marķējuma atjaunošana u.tml.).

1.2. tabula. Apsektie pētījuma objekti Meža pētīšanas stacijā

Reģions	Kv.	Nog.	Koku sugas	Ierīkošanas gads	Apsekošana
Auce	19	1,1	Dsk, E	2016	2021.g pavasārī
Auce	36	8;10	Le, E, L, B, Soz, Dsk	2017	2021.g pavasārī

Auce	36	18;21	Soz, Le, Dsk, Oz	2017	2021.g pavasari
Auce	36	24	Soz, Dsk, E	2017	2021.g vasara (2x)
Auce	114	14	Soz	2019	2021.g vasara (2x)
Auce	47	30	Le, E	2018	2021.g pavasari
Auce	75	5	B	2018	2021.g vasara (2x)
Auce	84	18	B, E	2018	2021.g vasara
Auce	107	16	Le, Soz, E	2018	2021.g pavasari
Auce	85	4	Soz, E, Le	2019	2021.g vasara
Auce	85	8;9	Soz, E	2019	2021.g vasara
Auce	85	3	Soz, E	2019	2021.g vasara
Auce	30	12,1	Be	2018	2021.g pavasari
Jelgava	66	16	Le, E	2018	2021.g pavasari
Jelgava	44	23	Dsk	2020	2021.g pavasari
Jelgava	63	38	Le, E	2019	2021.g vasara (2x)
Jelgava	1	17	Ma, E	2020	2021.g vasara (2x)
Jelgava	33	10	Ma, E	2020	2021.g vasara (2x)
Kalsnava	163	47,48	Le, Soz, E	2018/2020	2021.g pavasari
Kalsnava	223	1;6	Soz, E	2018	2021.g pavasari
Kalsnava	198	27,3	L, E	2020	2021.g pavasari
Kalsnava	292	9,15,21	Pcont, Soz, L, E	2020	2021.g pavasari
Kalsnava	184	14;15,1;16	Soz, E	2018	2021.g pavasari
Mežole	193	32	Soz, E	2019	2021.g vasara
Mežole	72	23,24	E sel	2020	2021.g pavasari

Šķēde	56	16	Soz, E	2018	2021.g vasarā
Šķēde	9	13	Soz, E	2018	2021.g pavasarī
Šķēde	22	14,17,20,21,30	Soz, E	2019	2021.g vasarā
Šķēde	7	19,20,22	Soz, E	2020	2021.g vasarā
Šķēde	3	7,15	E	2020	2021.g pavasarī
Kalsnava	158	6;7	Dsk	2017/2018	2021.g pavasarī Papildus darbības nav nepieciešamas
Šķēde	21	16,30,38,42	Dsk	2019/2020	2021.g pavasarī

Papildus apsekojumiem 2021. gadā ierīkots dižskābarža stādījums MPS Jelgavas MN, kurā iestādīti viengadīgi dižskābarža ietvarstādi, viengadīgi kailsakņu stādi un līdzīgu dimensiju meženi no MPS Šķēdes MN atlasītajām dižskābarža audzēm. Šī darba uzdevuma izpilde pabeigta.

1.3. Platlapju piemistrojuma audzēšanas iespēju novērtējums

Turpināts Latvijas Valsts mežzinātnes institūta “Silava” (LVMI Silava) vadošā pētnieka Māra Laiviņa vadībā iepriekš uzsāktais monitorings cieto lapu koku audzēs, veicot pārmērījumus pētījumu objektos, kur dominējošā suga ir vīksna *Ulmus laevis* vai goba *Ulmus glabra* (1.3. tabula, 1.2. un 1.3. attēls): kopumā 10 no sākotnēji plānotajiem 12, jo divos objektos gobu skaits bija tik neliels, ka pētījuma turpināšana tajos nebija lietderīga.

Visos objektos atjaunots koku numuru krāsojums, kā arī marķēti papildus koki, kas sasnieguši atbilstošus parametrus katrā no aplveida parauglaukumiem ar rādiusu 15 m. Visiem kokiem nomērīts caurmērs un augstums, kā arī pārbaudīts azimuts un attālums no centra.

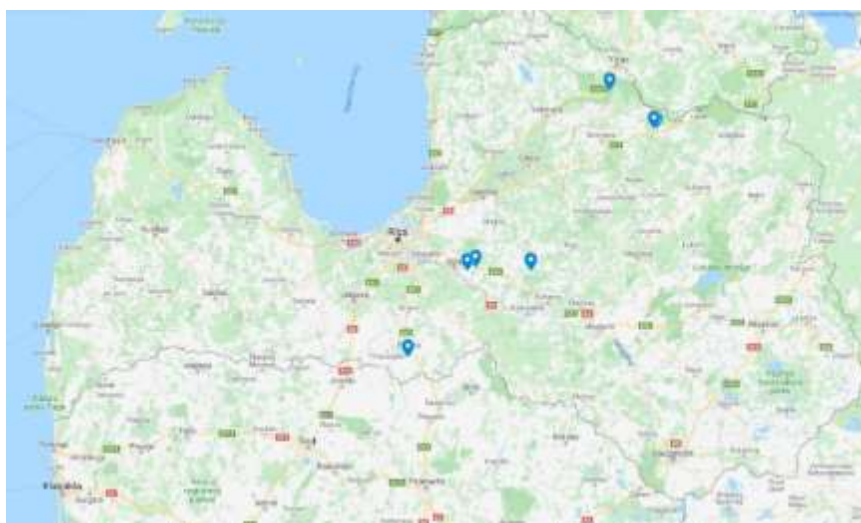
Ar Brauna-Blankē metodi transektēs uzmērīta veģetācija kā procentuāls sugu klājums koku stāvā (E3), krūmu stāvā (E2), lakstaugu stāvā (E1) un sūnu stāvā (E0) (Braun-Blanquet 1964; Dierschke 1994). Kokaudzes rādītāji 2021. gada ziemā (ieskaitot 2021. gada pieaugumu) apkopoti 1.4. tabulā.



1.2. attēls. Pētījuma parauglaukums

1.3. tabula. Vīksnas un gobas mežaudžu pētījumu objektu koordinātes

Nr.	Vieta	LKS-92	
		Y	X
1	Mazpēči	543529	6295070
2	Indrāni	547935	6296780
3	Vērene_Paliene	577515	6295599
4	Vērene_Grava	577510	6295597
5	Vērene_Skačers	577725	6295513
6	Saule	617751	6392574
7	Lejassmidži	641633	6373027
8	Kalnasmidži	641645	6373065
9	Rītausmas	511610	6247872
10	Smidži	642757	6372712



1.3. attēls. Vīksnas un gobas ilglaicīgo pētījumu objektu izvietojums Latvijā

1.4. tabula. vīksnas un gobas ilglaicīgo pētījumu objektu taksācijas rādītāji

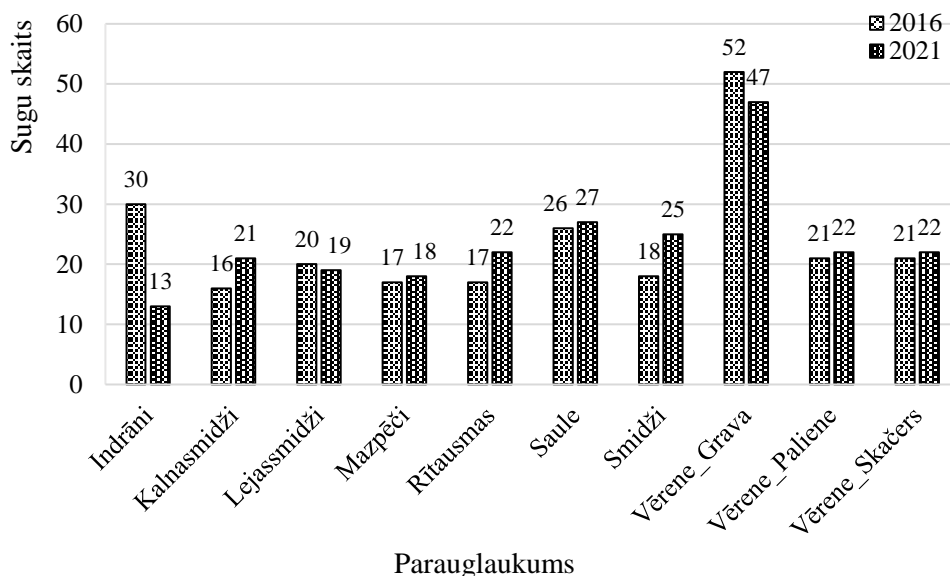
Objekts	Stāvs	Audzes sastāva formula	D vid	H vid	N gab ha ⁻¹	G m ² ha ⁻¹	M m ³ ha ⁻¹
Indrāni	1	6V3Os1Vī	50,1	27,6	141	27,9	365,1
	2	7V2G1K	16,5	11,7	184	3,9	29,3
	3	5V4G1L	8,0	6,3	127	0,6	2,4
	kopā				453	32,5	396,8
Kalnasmidži	1	8P2V + B	38,4	29,5	325	37,8	506,7
	2	10V	15,3	15,9	523	9,7	82,6

	3	8V1G1Ie	7,0	8,2	382	1,5	7,5
	kopā				1231	48,9	596,8
Lejassmidži	1	8V2P	41,8	27,3	269	36,9	486,8
	2	4Ie3V2G1E	8,7	8,8	255	1,5	8,3
	3	10Ie	3,8	5,7	198	0,2	0,8
	kopā				722	38,6	495,9
Mazpeči	1	10V	47,7	26,4	212	37,9	473,0
	2	7V2G1Ie	13,5	12,1	184	2,7	18,2
	3	10Ie	9,0	6,2	42	0,3	1,0
	kopā				439	40,8	492,2
Rītausma	1	9V1Os	45,0	26,3	283	45,0	556,3
	2	10V + Ie	16,9	11,9	241	5,4	37,3
	3	8V2Ie	7,6	6,2	113	0,5	1,9
	kopā				637	50,9	595,5
Saule	1	10V + Os	31,5	24,9	325	25,4	305,6
	2	7Ba3V	19,0	13,2	99	2,8	19,7
	3	10V	10,2	7,9	113	0,9	4,4
	kopā				538	29,1	329,7
Smidži	1	10V	38,7	25,3	354	41,7	504,2
	2	7V1Ie1L1Ba + G	13,2	11,3	368	5,0	32,8
	3	9Ie1G	4,9	5,5	198	0,4	1,1
	kopā				920	47,1	538,1
Vērene-Grava	1	5V3Os2E1G + Ba,K	35,7	22,1	325	32,5	388,3
	2	7G3K	9,2	10,3	255	1,7	10,5
	3	6G3K1E	5,8	6,4	212	0,6	2,2
	kopā				792	34,8	401,0
Vērene-Paliene	1	6V3Os1B	35,1	24,6	241	23,2	274,9
	2	5V3Os2K	14,4	14,1	156	2,5	19,2
	3	10V	6,3	5,1	28	0,1	0,3
	kopā				424	25,9	294,4
Vērene-Skacers	1	9V1A + G,K	55,0	25,8	156	36,9	484,5
	2	6G3K1V + Pl	11,1	11,2	382	3,7	23,7
	3	7G2K1E+ Ie	5,0	6,9	283	0,6	2,4
	kopā				821	41,1	510,7

Parauglaukumā inventarizētas visas koku stāvā (E3), krūmu stāvā (E2), lakstaugu stāvā (E1) un sūnu stāvā (E0) augošās sugas. Pēc acumēra procentos novērtēts katras sugas vidējais projektīvais segums 706,5 m² lielā riņķveida laukumā (Braun-Blanquet 1964; Dierschke 1994).

Pavisam vīksnu/gobu mežaudzēs 2016. gadā uzskaitītas 63 lakstaugu, 14 krūmu un 10 sūnu sugas. 2021. gadā vīksnu/gobu mežaudzēs tika uzskaitītas 48 lakstaugu, 13 krūmu un 7 sūnu sugas.

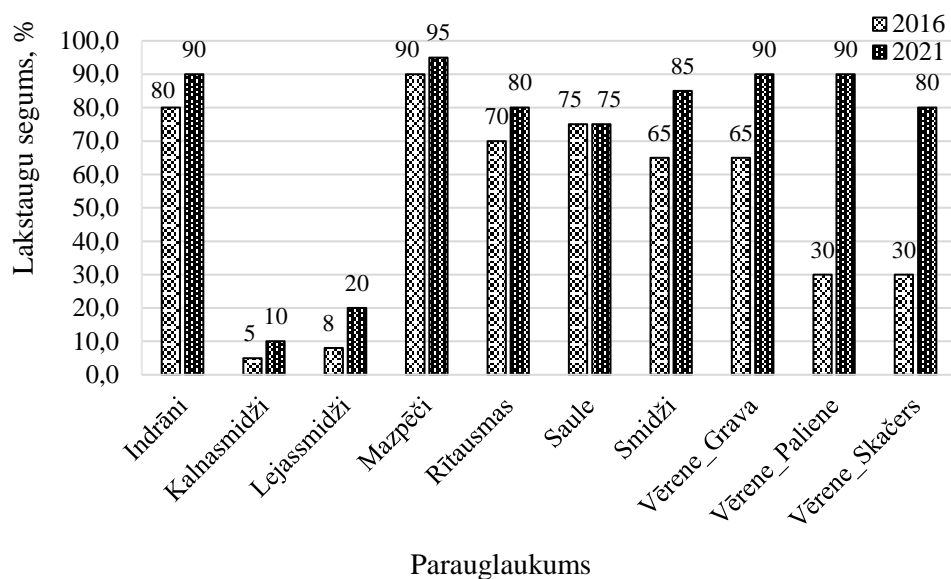
Kopš 2016. gada gobu/vīksnu parauglaukumos novērotais augu sugu skaits ir samazinājies Indrānu, Lejassmidžu un Vērenes-gravas parauglaukumos (1.4. attēls). Vērene-grava parauglaukumā joprojām ir konstatēta vislielākā augu sugu dažādība salīdzinājumā ar pārējiem pētījuma parauglaukumiem. Daudzas augu sugas ir izzudušas Indrānu parauglaukumā, kur sākotnējo mērījumu veikšanas laikā 2016. gadā tika novērota otrā lielākā augu sugu dažādība vīksnu/gobu paraugvietās. 2021. gadā veiktajos novērojumos Indrānu parauglaukumā lakstaugu stāvā vairs netika konstatētas tādas sugas kā plankumainā panātre *Lamium maculatum*, meža zeltstarīte *Gagea lutea*, daudzgadīgā mēnesene *Lunaria rediviva* un Kasūbijas gundega *Ranunculus cassubicus*.



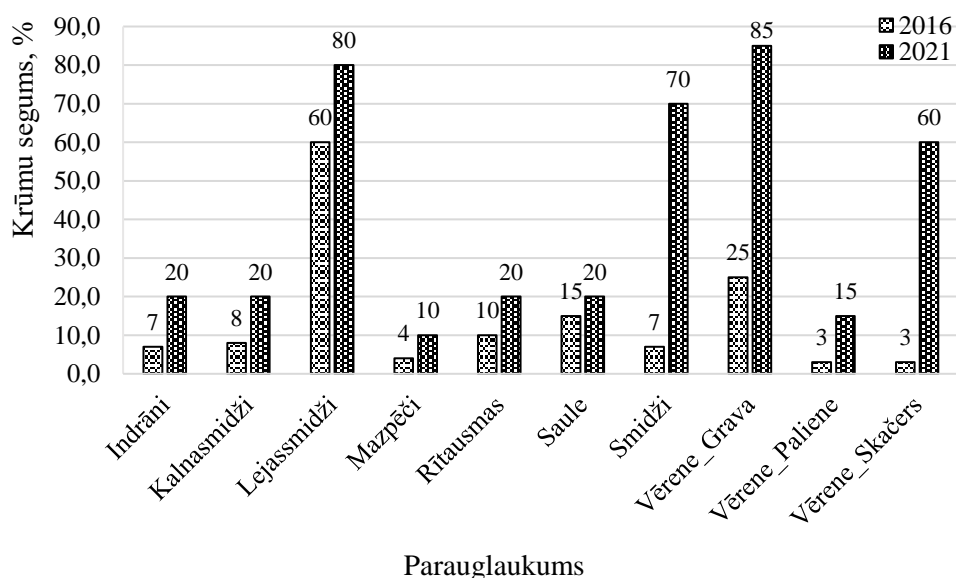
1.4. attēls. Augu sugu skaits vīksnas un gobas parauglaukumos 2016. un 2021. gadā

Visos pētītajos gobu/vīksnu parauglaukumos kopš 2016. gada ir palielinājies lakstaugu projektīvais segums (1.5. attēls). Vislielākais lakstaugu seguma pieaugums novērots Vērenes parauglaukumos. Paliē esošajā parauglaukumā Vērenē lakstaugu aizņemtā platība ir palielinājusies trīs reizes. Lakstaugu projektīvā seguma palielināšanās Vērenes parauglaukumos ir skaidrojama ar podagras gārsas *Aegopodium podagraria* straujo izplatību mežaudzēs.

Visos pētītajos parauglaukumos kopš 2016. gada ir palielinājies arī krūmu projektīvais segums (1.6. attēls). Vislielākais krūmu seguma pieaugums konstatēts Smidžu un Vērene-Skačers parauglaukumos. Vērenes parauglaukumā kopš 2016. gada ir palielinājies lazdas *Corylus avellana*, ievas *Padus avium* un sausserža *Lonicera xylosteum* segums krūmu stāvā. Arī Smidžu parauglaukumā krūmu stāvā ir intensīvi izplatījusies ieva. Projektīvais segums krūmu un lakstaugu stāvā ir palielinājies, neraugoties uz to, ka lakstaugu un krūmu sugu daudzveidība vīksnu un gobu parauglaukumos ir samazinājusies.

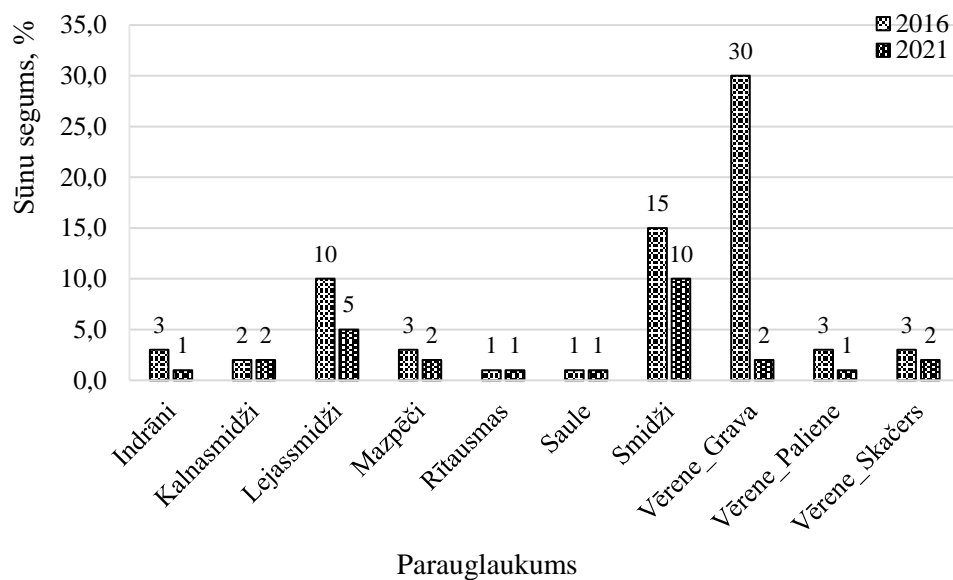


1.5.attēls. Lakstaugu projektīvais segums (%) vīksnas un gobas parauglaukumos 2016. un 2021. gadā



1.6. attēls. Krūmu projektīvais segums (%) vīksnas un gobas parauglaukumos 2016. un 2021. gadā

Visās pētījumā iekļautajās gobu/vīksnu mežaudzēs ir samazinājies sūnu stāva segums (1.7. attēls). Tas skaidrojams ar plašo krūmu un lakstaugu izplatību. Vislielākais projektīvā seguma samazinājums sūnu stāvā konstatēts gravā esošajā Vērenes parauglaukumā, kurā tika novērots arī salīdzinoši liels projektīvā seguma pieaugums krūmu un lakstaugu stāvā. Salīdzinājumā ar 2016. gadā veiktajiem novērojumiem, 2021. gadā veiktajos novērojumos vīksnu un gobu mežaudzēs vairs netika konstatētas tādas sūnu sugas kā viļņainā lācīte *Atrichum undulatum*, platlapu knābīte *Eurhynchium angustirete* un smailā skrajlapa *Plagiomnium cuspidatum*.



1.7. attēls. Sūnu projektīvais segums (%) vīksnas un gobas parauglaukumos 2016. un 2021. gadā

Gobu un vīksnu audzēs notiek krūmu un lakstaugu seguma pakāpeniska palielināšanās, kā arī sūnu seguma samazināšanās. Detalizēta mērījumu rezultātu analīze salīdzinājumā ar iepriekšējo monitoringa posmu datiem plānota pētījuma noslēdzošajā etapā.

2. Vētru un uguns bojājumu ietekme un tās izmaiņas nākotnes klimatā

2.1. Datu ievākšana koku vēja noturības raksturošanai.

Vēja izraisītie bojājumi ir nozīmīgākais dabiskais traucējums Eiropas un arī Latvijas mežos (Schuck, Schelhaas, 2013). Eiropā pēdējo 20 gadu laikā nozīmīgāko ciklonu darbības ietekmē ir radušies mežaudžu bojājumi, kas pārsniedza 340 miljonus m³ (Gregow et al., 2017). Kopumā šajā laika periodā ir reģistrēti ap 89 tūkst. mežaudžu bojājumu gadījumu, kuru kopplatība sastāda aptuveni vienu miljonu hektāru (Gregow et al., 2017; Nabuurs et al., 2013). Vētrās bojātās koksnes apjoms palielinās līdz ar kopējo krāju Eiropas mežos, tomēr ir konstatēta statistiski būtiska tendence palielināties arī bojātās krājas īpatsvaram (Gregow et al., 2017). Sagaidāms, ka vētru radītie finansiālie zaudējumi pieaugs ne tikai to biežuma dēļ, bet arī bojājumu veida izmaiņu dēļ: lielāki vēja ātrumi palielina koku lūšanas varbūtību (Laapas et al., 2019), samazinot vērtīgāko sortimentu īpatsvaru, kāds saražojams sanitārajās cirtēs (Gregow et al., 2017; Usbeck et al., 2010). Lai arī bērza mežaudzes ir uzskatāmas par noturīgākām pret vēja izraisīto slodzi, salīdzinot ar, piemēram, egles vai apses mežaudzēm, tomēr arī tajās ir novērota bojājumu apjoma palielināšanās. Pēc Latvijas meža statistiskās inventarizācijas (MSI) datiem Latvijā laika periodā no 2004. līdz 2020. gadam (salīdzinot pirmo un trešo novērojumu ciklu) vēja bojājumu apjoms bērza mežaudzēs palielinājies par 1,52 milj. m³ (29,7 %), bet bojājumu skartās platības – par 131,8 tūkst. ha (33,4 %) (MSI, 2019).

Bojājumu apjomu nākotnē ietekmēs arī ziemas klimats, augsnēm mežā biežāk esot nesasalušām un piesātinātām ar ūdeni, kādēļ samazināsies koku sakņu sasaiste ar augsni (Grime, 2001; Mickovski, 2002; Peltola et al., 2013). Šādi apstākļi ciklonisko vētru darbības aktīvākajā periodā potenciāli varētu palielināt audžu bojājumus (Laapas et al., 2019; Gardiner 2021). Tāpēc turpmākajos pētījumos ir nepieciešams:

- novērtēt koku noturību pret vēja slodzi nesasalušā augsnē, īpaši lapu kokiem;
- raksturot koku noturību pret vēja slodzi sasalušā augsnē, jo šāda informācija Eiropā pieejama tikai salīdzinoši nelielu dimensiju kokiem, turklāt novērojumu skaits ir nepietiekams;
- raksturot mīstraudžu noturību pret vēja izraisītajiem bojājumiem;
- raksturot vēja bojājumu risku nekailciršu mežsaimniecībā;
- modelēt dažādu mežsaimniecisko pieeju ietekmi uz vēja izraisīto bojājumu mazināšanu meža ainavas līmenī, ietverot analizē arī ietekmi uz klimatneitralitātes un bioloģiskās daudzveidības rādītājiem. Līdz šim šāda atsevišķu aspektu kompleksa analīze ir veikta tikai Centrāleiropā, bet tajā ir tikuši ietverti tikai daži bioloģiskās daudzveidības indikatori (Zimová, et al., 2020), un rezultāti var nozīmīgi atšķirties citādā vēja klimatā.

Koku mehānisko noturību ir iespējams novērtēt statistiskās vilkšanas testos, pēc kuriem nosaka lieces momentu stumbra pamatnē (kNm) pie primārās un sekundārās lūšanas. Primārā lūšana notiek brīdī, kad, kokam liecoties, veidojas neatgriezeniska koksnes audu deformācija (saspiešanās) un koka atbildes reakcija vairs nav proporcionāla pieliktā spēka palielinājumam (Detter et al., 2015), savukārt sekundārā lūšana ir pilnīga koka nolūšana vai izgāšanās ar saknēm (Detter, Rust, 2013).

Statiskās vilkšanas testu veikšanai tika ierīkoti aplūveida parauglaukumi ap testam izvēlēto koku 12,62 m rādiusā, kurā uzmērīja kokaudzi raksturojošos parametrus paraugkoka augšanas apstākļu raksturošanai. Pirms statistiskās vilkšanas testa izpildes izvēlētajam paraugkokam tika nozāģēta galotne apmēram 1 m virs spēka pielikšanas punkta, lai novērstu tā galotnes svāri un arī vēja ietekmi uz vilkšanas spēka, stumbra slīpuma un koksnes deformācijas mērījumiem. Vilkšana tikai veikta ar 1,6 t trošu vinču (Haklift Oy, Somija) un 20 m garu 11 mm diametra tērauda trosi, kas piestiprināta pie eknurkoka pamatnes. Izmantojot TreeQnetic sistēmu (Argus

Electronic gmbh, Vācija), tika mērīts vilkšanas spēks, koka stumbra saliekuma leņķis un koksnes deformācija.

No iegūtajiem mērījumiem katram paraugkokam tā stumbra pamatnē tika aprēķināts lieces moments (BBM, kNm) pēc Krišāns (2020):

$$BBM = F \cdot h_{EP1} \cdot \cos(Me_a),$$

kur:

F – vilkšanas spēks (kNm);

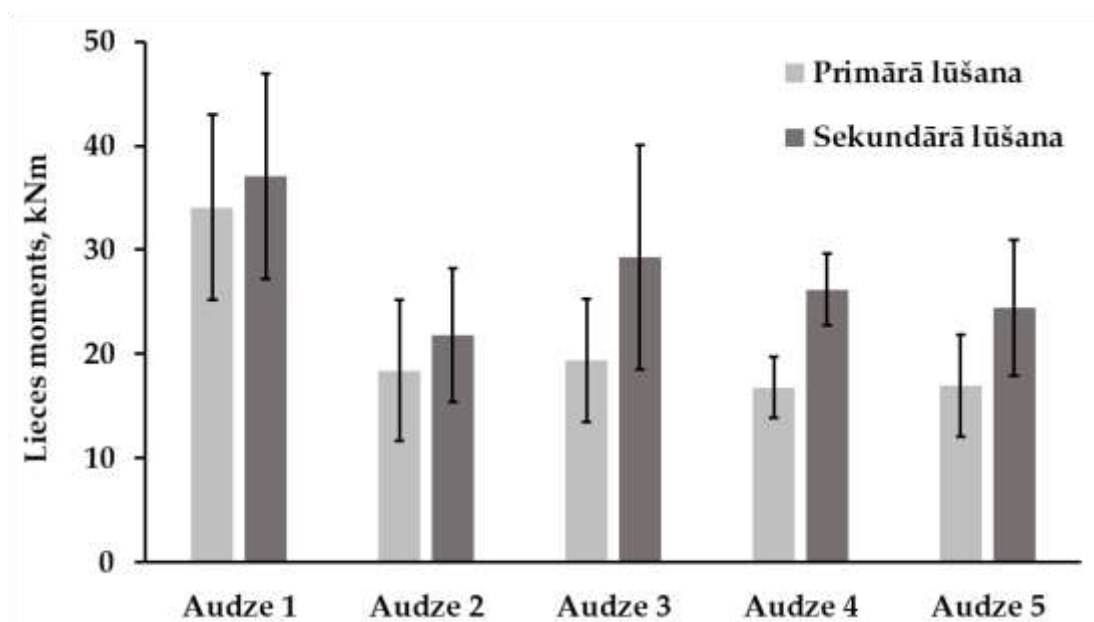
h_{EP1} – puse no paraugkoka sākotnējā augstuma (vilkšanas līnijas piestiprinājuma augstums) (m);

Me_a – vilkšanas un gaisa līnijas starp enkurokoku un paraugkoku leņķa mediāna (°).

Paraugkoka stumbra saliekums, kas nepieciešams primārās lūšanas noteikšanai, tika aprēķināts kā starpība (N_{Δ} , °) no inklinometru mērījumiem pie stumbra pamatnes (N_0) un 5 m augstumā (N_{5m}): $N_{\Delta} = N_{5m} - N_0$

Vilkšanas testos izmantotajiem paraugkokiem tika noteikta to virszemes daļu biomasa, lai novērtētu tās ietekmi uz mehānisko noturību. Tāpat tika veikti sakņu morfometriskie mērījumi. Pie katra paraugkoka tika iegūti augsnes mitruma un blīvuma paraugi ar 100 ml tilpuma cilindru no 0-10, 10-20, 20-40 un 40-80 cm dziļumiem. Ievāktajiem dabiski mitriem paraugiem laboratorijā tika noteikts blīvums (kg m^{-3}) un gravimetriskā ūdens saturs (%) pēc 48 h žāvēšanas 105 °C temperatūrā.

Iegūtās koku noturības vērtības (2.1. attēls), saskaņā ar pētījuma plānu, tiks izmantotas, lai uzlabotu vētru bojājumu riska modeļa precizitāti. Salīdzinot šo testu rezultātus ar citos pētījumos ievāktiem datiem, konstatēts, ka paaugstinātam augsnes mitrumam ir būtiska negatīva ietekme uz bērza mežaudžu vēja noturību. Tāpat šādās augsnēs ir mazāka starpība starp primāro un sekundāro lūšanu, kas liecina par augstāku koku bojāejas varbūtību pie relatīvi mazākiem vēja ātrumiem brāzmās.



2.1. attēls Lieces momentī stumbra pamatnē (\pm ticamības intervāls) bērziem pie primārās un sekundārās lūšanas

2.2. Modelis augšnes sasaluma novērtējumam mežaudzēs atkarībā no gaisa temperatūras un audzes parametriem.

Augšnes temperatūras novērtējumam saskaņā ar pētījuma plānu MPS Kalsnavas MN izvietoti 3 transekti, katrā 7 novērojumu punkti (2.2. attēls). Nākamajā pētījuma etapā novērojumu punktu skaits tiks palielināts. Plānots šos novērojumu punktus iekļaut kopējā modeļteritorijas attīstības plānā, veicot tā īstenošanu sadarbībā ar MPS. Ūdens paraugu ķīmiskā analīze turpinās un tiks iekļauta pētījuma nākamā etapu pārskatos līdz ar citu rādītāju analīzi.



2.2. attēls. Pētījumu objektu (transektu) novietojums MPS Kalsnavas MN

Pētījuma etapā bija plānota sākotnējā novērtējuma sagatavošana par sasaluma dziļumu, izmantojot MPS Kalsnavas MN veikto vēsturisko novērojumu datus. Tomēr šo datu apjoms bija nepietiekams un neizdevās atrast modeli, kas izskaidrotu to saikni ar gaisa temperatūras datiem, kā papildus faktoros izmantojot datus par valdošo koku sugu un šķērslaukumu, kā arī sniega segas biezumu. Ņemot vērā prognozi, ka šī darba uzdevuma rezultātu 2021. gadā nebūs iespējams sasniegt, plānotie cilvēkresursi ieguldīti papildus darbā 3.3. uzdevuma izpildē, sagatavojot vēl vienu publikāciju. Tādējādi veicināta Latvijā iegūto pētījumu rezultātu atpazīstamība, kā arī papildināts references materiāls rīcībpolitiku izstrādei adaptācijas pasākumiem kā Latvijas, tā plašāka reģiona mērogā.

2.3. Vēja bojājumu sekundārā ietekme uz egļu astonzobu mizgrauža savairošanos izdzīvojušajos kokos, bojājumu apjomu un to ietekmējošiem faktoriem.

Spēcīga vēja iedarbībā kokiem veidojas šķiedru saspiešanās saknēs un/vai pie sakņu kakla, izraisot traheīdu nosprostošanos (Detter et al., 2015; Pallardy, 2008; Stokes, 1999). Šādi bojājumi ir cēlonis samazinātam koku pieaugumam nākamo 5-10 gadu periodā (Panayotov et al., 2011). Bojātajam kokam šajā laika periodā mehāniskā noturība un vitalitāte būs samazināta (Ieviņš, 2016), kādēļ tam būs paaugstināta papildus vēja izraisīto bojājumu izveidošanās iespējamība (Detter et al., 2019). Nozīmīgāk tas ir vecākās audzēs, kur atkārtotu dabisko traucējumu ietekmes varbūtība ir augstāka (Jakuš et al., 2011; Marini et al., 2017).

Vējā bojātiem kokiem samazinās aizsardzības spējas pret dendrofāgo kukaiņu invāzijām, un vējā bojātās egles mežaudzes īpaši apdraud egļu astonzobu mizgrauzis *Ips typographus* (L.) (Wichmann, Ravn, 2001). Klimata pārmaiņu rezultātā sagaidāmā gaisa temperatūras paaugstināšanās (Avotniece u.c., 2017), kā arī sausuma periodu atkārtotības biežuma

pieaugums būtiski paaugstinaās egļu astoņzobu mizgrauža savairošanās risku (Mezei et al., 2017; Temperli et al., 2013). Tā kā egļu astoņzobu mizgrauzis īpaši apdraud vecākus kokus, pieaugošā vidējā Eiropas mežaudžu vecuma (Schuck, Schelhaas, 2013) un vienlaicīgi vidējā vēja ātruma brāzmās palielināšanās (Laapas et al., 2019) veicinās šū dendrofāga izraisīto bojājumu apjoma pieaugumu (Jakuš et al., 2011; Marini et al., 2017).

Lai detalizēti analizētu šīs ietekmes, kā arī attīstītu metodes, kā šādus kokus identificēt, pirms tie nokaltuši vai kļuvuši par dendrofāgo kukaiņu masu savairošanās perēkli, izvēlētas trīs egles audzes MPS Kalsnavas MN (2.3. attēls). Katrā objektā izvēlēti 10 eksperimenta paraugkoki, kuriem veikti mehāniskās noturības testi (turpmāk tekstā apzīmēti kā “Aizlauzti”) un 10 tādu pašu dimensiju netālu esoši, neietekmēti koki (turpmāk tekstā apzīmēti kā “Kontroles”). Eksperimenta koki tika statistiski vilkti līdz maksimālās slodzes noturības sasniegšanai, kad vilkšanas spēks sāka samazināties. Tas nozīmē, ka koki sasniedza sekundāro lūšanu, un, lai arī bija ļoti saliekti, tomēr joprojām bija vertikālā stāvoklī - tos noturēja pilnībā nepārplīsušās saknes. Šajā brīdī vilkšana tika pārtraukta, lai tālākā pētījuma gaitā vērtētu koku vitalitātes izmaiņas.

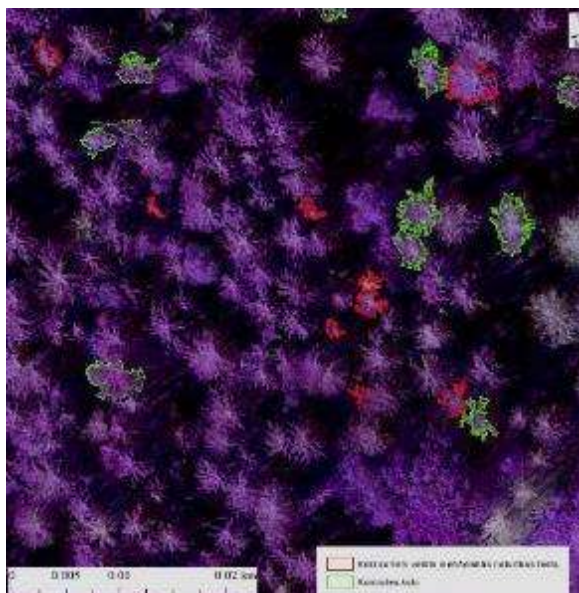


2.3. attēls. Pētījumu objektu novietojums MPS Kalsnavas MN 152., 176., 290.kvartālā

2021. gada vasarā uzņemti multispektrālie attēli ar bezpilota lidaparātu sistēmas DJI Matrice 210 dronu, kas aprīkots ar SlantRange 3PX multispektrālo sensoru. Sensors spēj uztvert starojumu ar viļņa garumu “zaļajā” (550 nm, joslas platums 40 nm), “sarkanajā” (650 nm, 40 nm), “sarkanās malas” (710 nm, 20 nm) un “tuvajā infrasarkanajā” (850 nm, 100 nm) spektra joslā. Lidojuma augstums tika iestatīts 50 m virs zemes (jeb 150 m virs jūras līmeņa), lidojuma ātrums $4,0 \pm 1 \text{ m s}^{-1}$ ātrumu. Lai nodrošinātu attēlu pārklāšanos, tika iestatīts 70 % sānu pārklājums un 80 % priekšējais pārklājums. Izšķirtspēja katram pikselim bija 2,25 cm. Pirms lidojuma pētījuma zonā tika izvietoti t.s. zemes kontroles punkti (GCP) un ar GNSS uztvērēju Leica GS16 uzmērītas augstas precizitātes (ar reāllaika kinemātisko korekciju) GPS koordinātas. Atmosfēras un apgaismojuma apstākļi tika pielāgoti katram kadram, pamatojoties uz izmērīto gaismas intensitāti, izmantojot sensorā iebūvēto apkārtējā apgaismojuma sensoru. Kopumā katrā objektā tika uzņemti vismaz 330 attēli, kas vēlāk apstrādāti, izmantojot SlantView programmatūru (v.2.15.0.2509). Ņemot vērā kopējo darba apjomu, modificēta pētījuma metodika, lai iegūtu informāciju arī citu LVMI Silava realizētu pētījumu vajadzībām, nodrošinot izpildei vajadzīgos resursus. Vizuāli pārbaudīti visi attēli, no tālākās apstrādes dzēšot izplūdušus attēlus. Pēc attēlu kalibrēšanas tie eksportēti programmā Agisoft Metashape Professional (1.6.4. Versija), lai izveidotu ģeoreferencētas aerofoto mozaīkas. Ortofoto veidošanas pamatā ir fotogrammetriskā metode “struktūra no kustības” (angl. *structure from motion*) (Westoby et al., 2012). Kā noklusējuma josla tika izmantots zaļais spektrs, lai izlīdzinātu fotoattēlus, izveidotu blīvu mākonu un ģenerētu

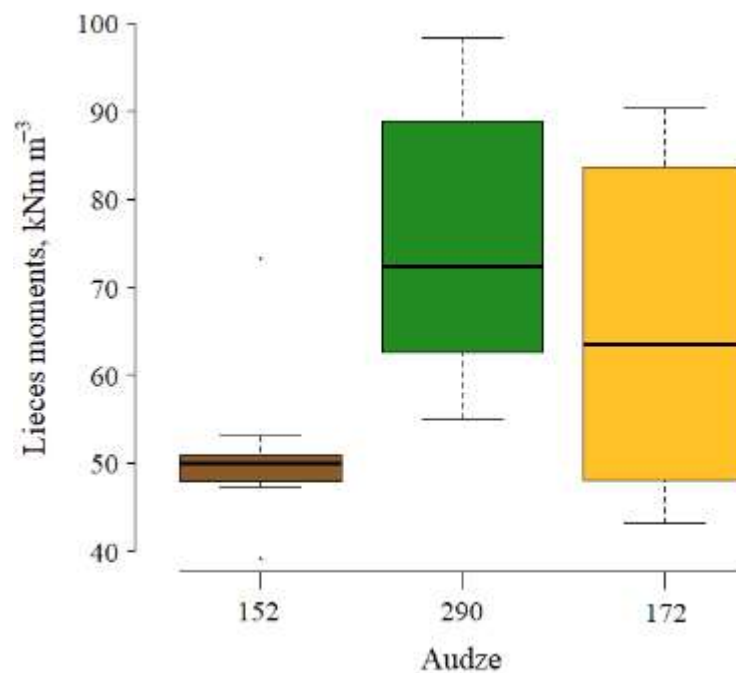
digitālās virsmas modeli (DSM) ar interpolāciju un ortomozaīku. GCP tika izmantoti, lai pārveidotu attēla orientāciju ģeodēzisko koordinātu sistēmā LKS 92 (EPSG 3059). Tika izveidots 4 joslu multispektrāls attēls, ArcMap 10.5. programmā izdalot koku vainagus (2.4. attēls).

Iegūtajiem attēliem aprēķināti koku veselību vai stresu (piemēram, sausuma ietekmi) raksturojošie veģetācijas indeksi (piemēram, *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Green-Red Vegetation Index* (GRVI), *Green Normalized Difference Vegetation Index* (GNDVI), *Anthocyanin Reflectance Index* (ARI), *Chlorophyll Index* (CI), *Anthocyanin Content Index* (ACI), *Normalized Difference Red-edge Index* (NDRE) un citi) un vērtētas to sakarības ar koku fizioloģisko stāvokli. Veikta iegūto datu apstrāde un analīze, katram kokam nosakot spektrālo paraugu katrai spektra joslai atsevišķi, kā arī veģetācijas indeksus. Katram veģetācijas indeksam iegūts jaukta efekta loģistikas regresijas modelis, kurā individuāls koks ietverts kā nejauši variējošs (*random*) faktors, bet koku vitalitātes grupa - kā ietekmējošais faktors. Vainagu spektrālās atšķirības starp “aizlauztu” un “Kontroles” koku grupām pārbaudītas ar lineāru jaukta efekta regresijas analīzi (*mixed model regression analysis*). Kopumā atlasīti četri labākie modeļi, balstoties uz *Akaike* informācijas kritērija vērtībām un pārbaudot indeksu savstarpējo multikolinearitāti.



2.4. attēls. Analizētā attēla piemērs: egles, kas bojātas līdz primārajai lūšanai (vainagi apzīmēti ar sarkanu līniju), un nebojātas egles (vainagi apzīmēti ar zaļu līniju)

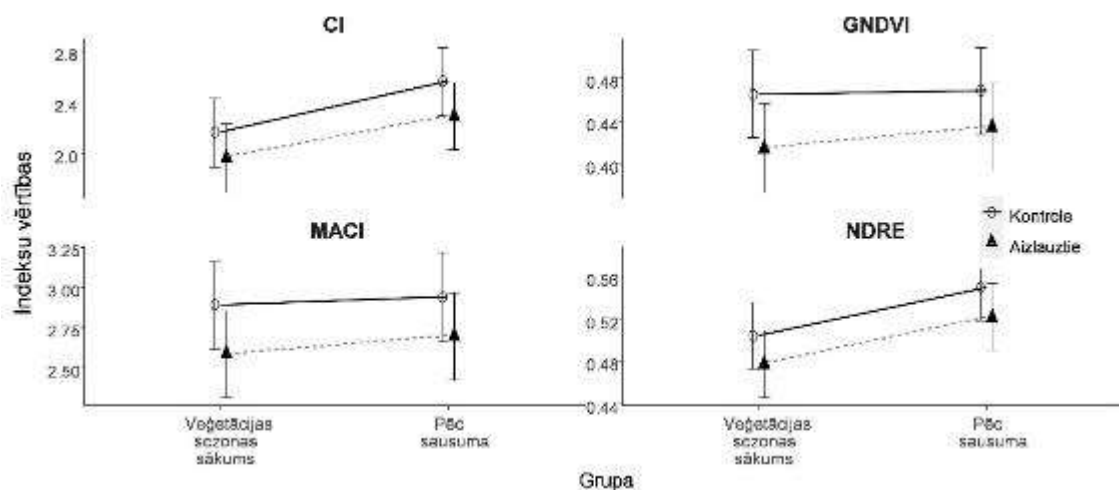
Nozīmīgi bojājumi (primārā lūšana) eglēm izveidojas pie ievērojami mazāka pieliktā spēka nekā sekundārā lūšana (Krišāns, 2020). Tāpat konstatēts, ka egles noturība pret statisko liekšanu ir būtiski zemāka mežaudzē ar augstāku augsnes mitrumu – objektā 152. kv. (2.5. attēls), ko apliecina nozīmīgi (vidēji par 27%) un statistiski būtiski zemāka attiecība starp lieces momentu stumbra pamatnē un stumbra tilpumu. Starp koku noturību un veģetācijas indeksu netika konstatēta būtiska sakarība.



2.5. attēls Paraugoku relatīvās slodzes noturības (lieces momenta stumbra pamatnē un stumbra tilpuma attiecības) atšķirības trijās vērtētajās mežaudzēs

Iegūtie empīriskie dati par egles noturību turpmākos pētījuma etapos tiks izmantoti vēja bojājumu riska modeļa pilnveidošanai.

Spektrālo datu statistiskā analīzē atlasīti četri veģetācijas indeksi, kas uzrādīja p vērtības, zemākas par 0,05 – GNDVI, MACI, CI, NDRE (2.6. attēls).



2.6. attēls. Veģetācijas indeksu vērtību sadalījums starp “aizlauztiem” un “kontroles” kokiem (\pm standartklūda)

GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*), pēc kura var spriest par fotosintētisko aktivitāti, uzrādīja par 7% augstākas vērtības “kontroles” grupai salīdzinājumā ar “aizlauzto” koku grupu gan pirms veģetācijas sezonas sākuma, gan vasaras vidū pēc ilgstoša

sausuma perioda. Turklāt šīs atšķirības bija statistiski būtiskas ($p < 0,05$). Atšķirība starp “kontroles” un “aizlauzto” koku grupām var būt tiešs rezultāts sakņu mehāniskajiem bojājumiem, ietekmējot ūdens uzsūkšanas spēju un līdz ar to - pazeminot fotosintētisko aktivitāti (Reubens et al., 2009). Ietekmes atšķirības uz fotosintēzi veģetācijas perioda sākumā un pēc sausuma perioda nav būtiskas, liecinot, ka šajā laika periodā koki kaut daļēji spējuši kompensēt radītos sakņu bojājumus.

Bojājumu ietekme pilnībā nav novērsta, ko apstiprina indeksu analīze, kas balstīta uz antociānīna pigmenta klātbūtni skujās. Antociānīns ir pigments, kurš augos visbiežāk sāk veidoties līdz ar dažādu stresoru (piemēram, sausuma, kaitēkļu) klātbūtni (Neill un Gould, 1999, Landi et al., 2015), un tam raksturīgs absorbcijas maksimums ir no 520 līdz 560 nm (Merken & Beecher, 2000). Aprēķinot gaismas atstarošanās attiecību tuvajā infrasarkanajā spektra joslā (850 nm) un zaļajā spektra joslā (550 nm) jeb modificēto antociānīna satura indeksu (MACI) (Steele et al., 2009), mūsu rezultāti uzrādīja par 7% augstāku indeksa vērtību “kontroles” kokiem, salīdzinot ar “aizlauztajiem”. Veselie koki absorbē vairāk gaismas redzamajā spektra joslā, kamēr tuvajā infrasarkanajā spektra joslā tā vairāk tiek atstarota. Stresa ietekmētajiem kokiem raksturīga samazināta gaismas absorbcija redzamajā spektra joslā, bet palielināta tuvajā infrasarkanajā spektra joslā.

Hlorofila saturu raksturojošais indekss (CI) no veģetācijas perioda sākuma pakāpeniski pieaug, kas atbilst vispārējai likumsakarībai: hlorofila saturs augos ir zemāks veģetācijas sezonas sākumā, pieaugot apmēram līdz sezonas vidum un turpmāk saglabājoties relatīvi nemainīgam (Demarez et al., 1999). CI pieaugums konstatēts kā “kontroles”, tā “aizlauztajiem” kokiem, taču nebojātajiem kokiem izmaiņas ir izteiktākas, palielinot starpību starp šīm divām grupām. Koku grupu atšķirības apliecina arī otrs ar hlorofila satura izmaiņām saistītais indekss – Normalizētais differences tuvās malas indekss (NDRE). Tas “aizlauztajiem” kokiem bija būtiski zemāks nekā “kontroles” kokiem, turklāt būtiskas atšķirības novērotas arī starp veģetācijas perioda sākumu un vidu. Abi analizētie indeksi (CI un NDRE) ir saistīti ar starojumu ar viļņa garumu sarkanās malas (710 nm) un tuvajā infrasarkanajā (850 nm) spektra joslā, kas arī citos pētījumos raksturota kā piemērots intervāls koku fizioloģisko traucējumu identificēšanā (Masaitis et al., 2013).

Vitalitāti raksturojošo rādītāju novērojumi ir veikti veģetācijas sezonas gaitā tiem kokiem, kuri iepriekšējā ziemas sezonā ir bijuši pakļauti mehāniskiem bojājumiem. Gan liekšanas eksperimenta laikā, gan arī periodā pēc tā līdz veģetācijas sezonas sākumam pētītajās mežaudzēs saglabājās augsts augsnes mitrums. Šādiem apstākļiem varētu būt bijusi pozitīva ietekme uz koku fizioloģisko procesu saglabāšanos pēc strukturālu stumbra un sakņu koksnes bojājumu izveidošanās. Liekšanas testa rezultātā tiek bojāta sakņu projekcijas daļa spiedes deformācijas pusē jeb virzienā, uz kuru koks tiek liekts. Savukārt pretējās puses saknes stiepes deformācijas daļā ir daudz noturīgākas, un tās ilgstoši var saglabāties veselas (Stokes, Mattheck, 1996). Tādējādi izveidojas situācija, ka dažādām sakņu projekcijas daļām ir atšķirīgas augsnes ūdens uzņemšanas spējas. Ar veselajām koka saknēm uzņemtais augsnes ūdens tiek pārdalīts vienmērīgi pa visu sakņu projekciju, nodrošinot sulas plūsmas apjomu stumbrā un vainagā (Nadezhkina et al., 2006). Tomēr šāds mehānisms nespēj pilnībā aizstāt bojātās sakņu daļas darbību, tādēļ ir novērotas būtiskas atšķirības veģetācijas indeksu vērtībās starp “aizlauztajiem” un “kontroles” kokiem.

Turpmākajos pētījumos skaitliski jāraksturo saikne starp novēroto koku stresa līmeni un mizgraužu bojājumiem, kā arī koku nokalšanas varbūtību. Detalizētāk jānovērtē koku atbildes reakcija uz bojājumu, eksperimentam izvēloties audzes vairāk sausuma apdraudētās vietās, mazāku dimensiju kokus, kā arī jāveic augsnes mitruma un sulas plūsmas mērījumi saknēm (vērtējot mitruma pārnesei starp sakņu sistēmas daļām) un stumbram ar elektriskās pretestības jeb rezistences tomogrāfiju (*electrical resistivity tomography* - ERT). Liekšanas testiem jāizvēlas mazāku dimensiju koki, kuriem koksnes strukturālie bojājumi skartu lielāku stumbru vai sakņu šķērslaukuma daļu. Tiem pirms liekšanas eksperimenta veikšanas nepieciešama

balstsakņu izvietojuma izpēte. Attālās izpētes datu ieguvei izmantojami hiperspektrālie sensori, kas rada iespēju detalizētāk analizēt spektra joslas un potenciāli precīzāk noteikt koku stresa signālu.

Secinājumi

Veģetācijas indeksi (GNDVI, MACI, CI, NDRE), kas aprēķināmi no multispektrāliem attēliem, būtiski atšķiras ietekmētām (liektas līdz primārās lūšanas punktam, imitējot vēja iedarbību) un nebojātām eglēm. Tātad, ar dronu uzņemot un analizējot šādus interesējošās teritorijas attēlus, ir iespējama bojāto koku identificēšana arī tad, ja to nav iespējams izdarīt, audzes novērtējot vizuāli. Metodes plašākai praktiskai pielietošanai būtiski testēt hiperspektrālo attēlu izmantošanas iespējas un kvantificēt sakarību starp stresa faktora ietekmi un koka nokalšanas (ar vai bez mizgrauža invāzijas) varbūtību.

Rezultāti liecina, ka vēja ietekme, kas vizuāli nav konstatējama, saglabājas vismaz vienu veģetācijas periodu un izraisa eglēm nozīmīgu fizioloģisko stresu.

2.4. Meža selekcijas un atjaunošanas veida ietekme uz vēja bojājumu varbūtību.

Starp meža dabiskajiem traucējumiem Eiropā vislielākā sociālekonomiskā un ekoloģiskā nozīme ir vējam, kura darbības rezultātā rodas vairāk nekā puse no visiem mežaudžu bojājumiem (Gardiner, 2021; Schuck, Schelhaas, 2013). Klimata pārmaiņu ietekmē sagaidāmi biežāki spēcīga vēja un vētru gadījumi (Suvanto et al., 2016; Sulik, Kejna, 2020), un līdz ar to lielāka nozīme būs koku noturībai pret vēja ietekmi.

Gan genotipiskā, gan fenotipiskā līmenī ir novērota koku adaptācija vēja klimatam (Ishizuka et al., 2019), un abu šo variāciju (gan ģenētiskās, gan fenotipiskās) izpēte un efektīva izmantošana audžu noturības kāpināšanā ir nozīmīga daļa no klimata viedās mežsaimniecības (*climate-smart forestry*) pieejas (Nabuurs et al., 2013). Primāri ir jāizvērtē provenienču ģenētiskā specializācija un fenotipiskais plastiskums, kas nosaka koka saglabāšanās un konkurences spējas kādos noteiktos apstākļos (Martín et al., 2010; Chauvin et al., 2019). Vēja noturību ietekmē augsnes-sakņu sasaiste (mežsaimniecībā, iespējams, ietekmējama ar atjaunošanas veidu un augsnes sagatavošanu), koksnes mehāniskās īpašības un virszemes daļas (stumbra un vainaga) parametri (mežsaimniecībā ietekmējami ar stādījuma biežumu, kopšanas režīmu, stādmateriālu – daļa no pazīmēm ir lielā mērā ģenētiski determinētas).

Sagaidāms, ka Ziemeļeiropā mazināsies augsnes sasalums tieši rudens-ziemas ciklonu sezonās (Kellomäki et al., 2010), kādēļ būs samazināta sakņu-augsnes sasaiste pastiprināta vēja apstākļos. Tā kā koku mehāniskās noturības adaptācija augsnes apstākļu izmaiņām notiek ar sakņu sistēmas pielāgošanu (Nicoll, Ray, 1996), ir būtiski novērtēt augsnes sagatavošanas veida un ģenētikas ilgtermiņa ietekmi uz sakņu izvietojumu un koku vēja noturību (Gardiner, 2021). Kokiem purvainos un slapjainos ir raksturīgs mazs sakņu-augsnes kamola dziļums, kas būtiski palielina to izgāšanās risku (Gardiner, 2021; Nicoll, Ray, 1996). Ir novērotas arī koku aklimatizācijas spējas atkarībā no vēja klimata, kas sevī ietver arī augstuma (un līdz ar to smaguma centra augstuma) un koksnes mehānisko īpašību pielāgošanu pastāvīgas liekšanas slodzes ietekmē (Nicoll et al., 2008; Ståhl, 1998; Krišāns et al., 2020). Individīdiem ar zemāku noturību pret vēja slodzēm ir raksturīga mazāk izturīga koksne, augsts smaguma centrs un liela vainaga masa (Gardiner, 2021; Peltola et al., 2013). Savukārt noturīgākiem individiem ar blīvāku koksni, rauktāku stumbru, zemāku smaguma centru un mazāku vainaga masu (Gardiner, 2021; Peltola et al., 2013) mēdz būt mazāka ātraudzība. Svarīgi meklēt risinājumus, kā vienlaikus nodrošināt gan produktivitāti, gan noturību pret vēja ietekmi.

Šī pētījuma etapa ietvaros detalizēti vērtēta vienas vēja noturību raksturojošās pazīmes – masas punkta augstuma – ģenētiskā determinācija priedei.

Materiāls ievākts diallēlās hibridizācijas eksperimentā MPS Kalsnavas MN. Papildus materiāls ievākts vietējo provenienču izmēģinājumu stādījumos Kalsnavā un Zvirgzdē. Visi stādījumi izveidoti mētrājā un lānā, stādot viengadīgus sējeņus. Stādījumu dizains veidots kā randomizētas parces (4–6 atkārtojumos), stādīšanas attālums 1×2 m. Diallēlās hibridizācijas eksperiments ierīkots 1975. gadā. Stādmateriāls iegūts, kontrolēti krustojot pluskoku klonus no Latvijas rietumu (10 pluskoki) un austrumu (10 pluskoki) izcelsmes apgabaliem. Vietējo provenienču stādījums Kalsnavā un Zvirgzdē ierīkots attiecīgi 1975. un 1985. gadā. Stādmateriāls iegūts Latvijas rietumu un austrumu izcelsmes reģionos augošās priedes plusaudzēs (15–25 koki no audzes).

Masas punkta augstuma un tā ģenētiskās kontroles raksturošanai izmantota paraugkoku metode. Katrā stādījumā paraugkoki atlasīti, balstoties uz inventarizāciju. Atlase veikta, lai reprezentētu gan stādījuma, gan krustojuma/provenienču caurmēra un augstuma sadalījumu. Atlasītie paraugkoki nogāzti (zāģējot maksimāli zemu) un atzaroti, dzīvie un nokaltušie zari nosvērti atsevišķi. Atzarotais stumbrs sadalīts metru garos nogriežņos, kas nosvērti. Paraugkoki pēc nogāšanas nomērīts stumbra garums un zemākā dzīvā zara augstums. Diallēlās hibridizācijas stādījumā Kalsnavā paraugoti 77 koki, kas reprezentē 11 krustojumus. Vietējo provenienču stādījumā Kalsnavā paraugoti 55 koki (15 provenienču), bet Zvirgzdē – 135 koki (9 provenienču).

Katram kokam vasas (virzsmes daļas) masas punkta augstums aprēķināts kā vidējais svērtais stumbra nogriežņu un dzīvā vainaga vidējais svērtais augstums, masu izmantojot kā svāra mainīgo:

$$Hmp_i = \frac{\sum(m_{ij}h_{ij})}{\sum m_{ij}},$$

kur Hmp_i – koka vasas masas punkts, m_{ij} – katra koka stumbra nogriežņu/ dzīvā vainaga masa, h_{ij} – katra koka stumbra nogriežņu/ dzīvā vainaga viduspunkta augstums.

Ņemot vērā, ka koka vasas masas punkta augstums ir atkarīgs no koka augstuma, ko ietekmē lokālie (audzes) apstākļi, aprēķināts relatīvais vasas masas punkta augstums:

$$rHmp_i = \frac{Hmp_i}{H_i},$$

kur H_i – koka augstums.

Lai raksturotu ģenētisko faktoru ietekmi uz koka vasas masas punkta augstumu, aprēķināti iedzimstamības un ģenētiskās aditīvās/provenienču variācijas koeficienti, par pamatu ņemot kvantitatīvās ģenētikas pieeju (Falconer and MacKay, 1996). Atšķirīgs koeficientu aprēķins izmantots diallēlās hibridizācijas (zināmi vecāku koki) un vietējo provenienču (nav zināma ģimeņu struktūra) stādījumu mērījumiem. Vietējo provenienču koku vasas absolūtā un relatīvā masas punkta augstumam aprēķināts iedzimstamības *sensu lato* koeficients H^2 un provenienču variācijas koeficients PCV, vērtējot abus stādījumus kopā. Koeficientu aprēķinam koku vasas masas punkta augstuma variācijas komponentes atdalītas, izmantojot jaukta tipa lineāru matemātisko modeli:

$$y_{ijkl} = \mu + S_i + B_j + P_k + \varepsilon_{ijkl},$$

kur S_i un B_j ir stādījuma un atkārtojuma (parces) fiksētie efekti, P_k – provenienču randomais efekts.

$$H^2 = \frac{\hat{\sigma}_{prov}^2}{\hat{\sigma}_{prov}^2 + \hat{\sigma}_{\varepsilon}^2},$$

kur $\hat{\sigma}_{prov}^2$ ir proveniencas dispersija un $\hat{\sigma}_e^2$ ir vides (atlikuma) dispersija. Proveniencas variācijas koeficients PCV aprēķināts kā:

$$PCV = \sqrt{\hat{\sigma}_{prov}^2} \cdot \frac{100}{\bar{x}},$$

kur \bar{x} ir eksperimenta vidējais rādītājs.

Koka vasas masas punkta augstuma iedzimstamības rādītāju aprēķinam, balstoties uz diallēlās hibridizācijas eksperimenta mērījumiem (zināmi vecāki), variācijas komponentes atdalītas ar lineāru jaukta tipa modeli:

$$y_{ijkl} = \mu + B_i + G_j + G_k + S_{jk} + \varepsilon_{ijkl},$$

kur B_i ir atkārtojuma fiksētais efekts; G_j vai G_k – mātes un tēva koku randomie efekti; S_{jk} specifiskās vecāku rekombinācijas randomais efekts.

Iedzimstamības koeficients h_a^2 *sensu stricto* aprēķināts kā:

$$h^2 = \frac{\hat{\sigma}_A^2}{\hat{\sigma}_P^2},$$

kur $\hat{\sigma}_A^2$ ir aditīvā ģenētiskā efekta dispersija un $\hat{\sigma}_P^2$ ir fenotipiskā dispersija. Ģenētiskās aditīvās variācijas koeficients CV_a aprēķināts kā:

$$CV_a = \sqrt{\hat{\sigma}_A^2} \cdot \frac{100}{\bar{x}},$$

kur \bar{x} ir eksperimenta vidējais rādītājs.

Salīdzinājumam iedzimstamības rādītāji aprēķināti arī koku augstumam. Saistības starp koka un vasas masas punkta absolūto un relatīvo augstumu raksturotas ar Pīrsona korelācijas analīzi stādījuma līmenī. Ģenētiskās korelācijas netika rēķinātas ierobežotā datu apjoma dēļ. Datu analīze veikta, izmantojot programmas R v. 4.1.1 (R Core Team, 2021) pakotni “sommer” (Covarrubias-Pazaran, 2016).

Rezultāti

Diallēlās hibridizācijas stādījumā Kalsnavā paraugoto koku vidējais (\pm standartnovirze) augstums bija $15,4 \pm 1,8$ m, bet vietējo provenienču stādījumos Kalsnavā un Zvirgzdē tas bija zemāks – attiecīgi $14,7 \pm 1,3$ un $10,3 \pm 1,3$. Koka vasas masas punkta augstums uzrādīja līdzīgas tendences: diallēlās hibridizācijas stādījumā tas bija $5,8 \pm 0,8$ m, bet vietējo provenienču stādījumos attiecīgi $5,7 \pm 0,5$ un $4,1 \pm 0,6$ m. Koka vasas masas punkta relatīvais augstums (pret koka augstumu) bija līdzīgs visos stādījumos, kā arī uzrādīja ievērojami zemāku dispersiju visos stādījumos. Tā vidējās vērtības (\pm standartnovirze) bija $38,2 \pm 1,4\%$, $38,6 \pm 1,2\%$ un $39,6 \pm 1,6\%$ attiecīgi diallēlās hibridizācijas stādījumā Kalsnavā un provenienču stādījumos Kalsnavā un Zvirgzdē. Koka vasas masas punkta augstumam bija cieša korelācija ar koka augstumu ($r > 0,94$) neatkarīgi no stādījuma, bet koka vasas masas punkta relatīvais augstums nekorelēja ar koka augstumu provenienču stādījumā Zvirgzdē ($r = 0,03$), uzrādīja vāju negatīvu korelāciju provenienču stādījumā Kalsnavā ($r = -0,27$), kā arī vāju pozitīvu korelāciju diallēlās hibridizācijas stādījumā ($r = 0,36$), norādot uz ekoloģiskā fona ietekmi.

Aprēķinātie iedzimstamības rādītāji bija viduvēji vai zemi (2.1. tabula). Augstākais iedzimstamības koeficients aprēķināts koka augstumam un koka vasas masas punkta augstumam, kas ir korelētas pazīmes. Šie rezultāti sakrīt ar iepriekš novēroto. Tomēr šo pazīmju ģenētiski noteiktā mainība, uz ko norāda variācijas koeficienti, bija zema, it īpaši vietējo provenienču gadījumā. Iedzimstamības rādītāji koka vasas masas punkta relatīvajam augstumam, kas ir neatkarīgs no koka augstuma, bija niecīgi, norādot, ka šī pazīme ir atkarīga

no vietējiem (audze) apstākļiem, t.i., to eventuāli varētu vairāk ietekmēt ar mežsaimniecisko darbību (kopšanas režīmu) nekā selekciju. Šādas saistības norāda uz izteiktu koka vasas arhitektūras vides apstākļu limitāciju neatkarīgi no populācijas.

2.1. tabula. Iedzimstamības koeficienti (H^2 un h^2), kā arī proveniences/ģenētiskās aditīvās variācijas koeficienti koka augstumam un vasas masas punkta relatīvajam un absolūtajam augstumam priedes vietējo provenienču un diallētās hibridizācijas stādījumos Kalsnavā un Zvirgzdē

	Koka augstums		Koka vasas masas punkta augstums		Koka vasas masas punkta relatīvais augstums	
	$h^2 \pm SE$	CVa	$h^2 \pm SE$	CVa	$h^2 \pm SE$	CVa
Diallētās hibridizācijas pēcnācēju izmēģinājumu stādījums Kalsnavas MPS	0,48±0,32	9,9%	0,44±0,29	10,8%	0,05±0,49	0,90%
	$H^2 \pm SE$	PCV	$H^2 \pm SE$	PCV	$H^2 \pm SE$	PCV
Vietējo provenienču izmēģinājuma stādījumi Kalsnavas MPS un Zvirgzdē	0,12±0,07	3,68%	0,06±0,05	2,66%	0,01±0,03	0,23%

Zinātniskās tēmas attīstības turpinājumā lietderīgi izstrādāt risinājumus citu ar vēja noturību saistīto pazīmju (piemēram, vainaga platums un forma) efektīvai noteikšanai lielam koku skaitam pēcnācēju pārbaužu stādījumos, vienlaikus raksturojot selekcijas un mežsaimniecības ietekmi uz tām un iespējamo vēja noturības izmaiņu amplitūdu. Šo darbu gan nebūs iespējams īstenot esošās pētījumu programmas finansējuma ietvaros.

Pētījuma šajā etapā veikta paredzētā datu ievākšana un objektu identificēšana:

- 1) koksnes blīvumu raksturojošo rādītāju ievākšana no 100 brīvapputes pēcnācēju ģimenēm, lai turpinātu vērtēt iespējamo selekcijas pozitīvo ietekmi uz vēja noturību;
- 2) vēsturisko stādījumu uz pacilām identificēšana, lai varētu vērtēt šī augsnes sagatavošanas paņēmiena ietekmi uz koku vēja noturību.

Audzes, par kurām tika iegūta vēsturiskā informācija par augsnes sagatavošanu pacilās pirms stādījumu ierīkošanas, atrodas SIA "Rīgas meži" mežos Daugavas mežniecībā. Valdošā koku suga priede, taču ir arī atsevišķas egles, t.sk. uz pacilām, kuras veidotas lielas, kādēļ to klātbūtni var konstatēt arī šobrīd (2.7. attēls). Pacilas, iespējams, ietekmējušas koka balstsakņu veidošanos un izvietojumu. Audzēs pēc krājas kopšanas cirtēm nav fiksēti vēja izgāzti koki.

2.2. tabula. Mežaudzes SIA "Rīgas Meži" teritorijā Daugavas mežniecībā, kurās koki stādīti uz pacilām

Kvartāls, nogabals	Meža tips	Platība, ha	Nesena saimnieciskā darbība
121-6	As	8,26	KKC 2019
121-10	As	1,59	KKC 2019
121-3	As	3,13	KKC 2019
114-12	Dm	1,52	-
108-20*	Ln	1,85	KKC 2018

*piemērota nogabala dienvidu daļa; KKC – krājas kopšanas cirte



2.7. attēls Audzes, kurās augsne sagatavota pacilās

Šobrīd ar mežu apsaimniekotāja pārstāvi ir panākta mutiska vienošanās par iespēju veikt atsevišķu paraugkoku vēja noturības testus zinātniskam nolūkam, tā vēl formalizējama sadarbībā institūciju vadību līmenī. Tāpat turpināma šādu platību meklēšana mežos ar kūdras augsni.

Secinājumi

Pētījuma etapā veiktā analīze apliecina, ka parastās priedes vasas masas punkta relatīvais augstums, kas ir viens no koku mehāniskās stabilitātes raksturlielumiem, vidēja vecuma audzēs ir atkarīgs no lokālajiem apstākļiem, bet ģenētiski determinētas metapopulāciju un to rekombinantu atšķirības nav novērojamas. Tādējādi koka virszemes daļas masas punkta relatīvajam augstumam raksturīgs izteikti augsts fenotipiskais plastiskums, kas nav pakļauts lokālai ģenētiskai adaptācijai. Novērotās saistības neliecina par iespējamu potenciālu šīs pazīmes uzlabot selekcijas ceļā.

2.5. Ugunsbīstamības izmaiņu un ugunsgrēku seku modeļu precizēšana

Ugunsbīstamību raksturojošo modeļu precizēšanai veikti augsnes (dažādos dziļumos) mitruma mērījumi un paraugu ievākšana 27 pētījuma objektos (2.3. tabula), vienlaikus iegūstot

datus par temperatūru un nokrišņiem iespējami tuvu šiem objektiem. Datu ievākšana uzsākta līdz ar sniega nokušanu un turpināta līdz veģetācijas perioda noslēgumam. Datu analīze plānota pēc vairāku uzmērījuma sezonu informācijas ieguves.

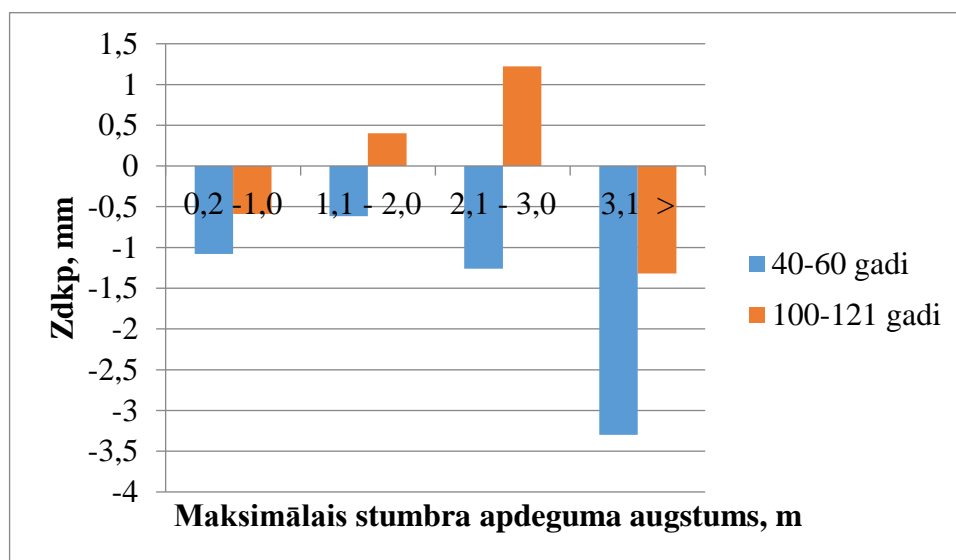
2.3. tabula. Mežaudzes, kurās ievākti dati par degmateriāla mitruma izmaiņu dinamiku

Nr.	kv_apg	kv	nog	apnog	S10	MT	vec.kl	bonit	m ³ ha ⁻¹
1	705	237	22		P	Dms	5	II	138
2	705	247	16		P	Sl	9	IV	268
3	705	249	5		P	Mr	2	III	24
4	705	249	8		P	Ln	3	II	56
5	705	254	3	1	E	Dm	2	II	14
6	705	255	19(18)		P	Sl	5	II	115
7	705	263	15		P	Ln	10	II	393
8	705	263	16		P	Dms	12	III	325
9	705	263	3		E	Dm	1	II	3
10	705	265	1		P	Mr	4	II	97
11	705	275	12		P	As	2	II	15
13	705	277	22		P	Mrs	13	IV	316
14	705	277	27		B	Nd	1	IV	9
15	705	278	6		P	Km	13	IV	219
16	705	287	2		P	Mrs	3	IV	32
17	705	303	12		P	Dm	4	I	164
18	705	303	3		P	Mr	12	IV	242
19	705	304	16		P	Am	1	III	4
20	705	305	20		B	As	2	II	24
21	705	305	32		P	As	5	II	207
22	705	305	44		P	As	2	II	18
23	705	309	2(1)		P	Mrs	5	II	132
24	705	312	18		P	Mr	2	III	10
25	705	312	37(29)		E	Ks	6	I	376
26	705	312	5		P	Mr	3	II	32
27	705	313	8		E	Vr	6	Ia	263

Ugunsgrēka ietekmes uz izdzīvojušo priežu pieaugumu raksturošanai analizēti pieauguma urbumi no 26 pētījuma objektiem (742 kokiem). Katram kokam noteikts vecums un uguns liesmu augstums ugunsgrēkā, uzmērot augstāko to skartā punktu augstumu (pārogļojušos mizas virsējo daļu). Šajos objektos pēc ugunsgrēka pagājuši vismaz 5 gadi. Salīdzinājumam izmantoti pieaugumu dati no līdzīgos apstākļos augošiem, ugunsgrēka neskartiem kokiem.

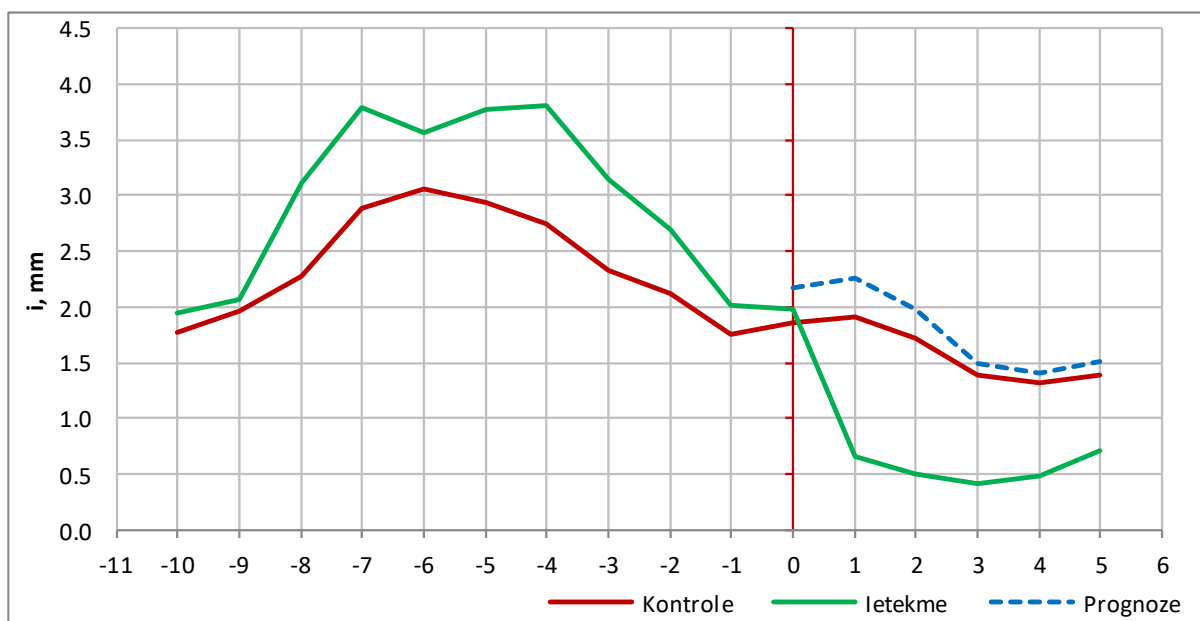
Gadskārtu platuma noteikšanai izmantota iekārta LINTAB IV ar Leica MS5 mikroskopu un datorprogramma TSAPWin Scientific (Time Series Analysis). Gadskārtu platums fiksēts ar precizitāti 0,01 mm. Gadskārtu šķērsdatēšana veikta, izmantojot datorprogrammu COFECHA. Savstarpēji salīdzinot šķērsdatēto datu rindas vienam kokam vai salīdzinot tās ar referento gadskārtu datu rindu kopumu, nepieciešamības gadījumā veikta atkārtota paraugu pārmērīšana.

Koku stumbru koksnes pieaugums novērtēts, izmantojot modificētu I. Liepas (Liepa, 1996) izstrādāto papildus pieauguma novērtēšanas metodiku. Ikgadējais un kumulatīvais pieaugums noteikts individuāliem kokiem, salīdzinot to augšanas gaitu ar kontroles kokiem. Piemēroto kontroles koku meklēšanā izmantots kritērijs, ka kontroles koku gadskārtu platums retrospekcijas periodā nedrīkst atšķirties vairāk kā par 1 cm vai 1/3 no vērtējamā koka gadskārtas platuma. Katram vērtējamajam kokam atlasīti kontroles koki pēc divu pakāpju sistēmas. No sākuma par kontroles kokiem atlasīti tie, kuru radiālais pieaugums retrospekcijas periodā uzrādīja statistiski būtisku korelāciju $r_{10;0,05} = 0,6319$ (Pīrsona koeficienta kritiskā vērtība pie $n=10$ un $\alpha=0,05$) pret vērtējamā koka radiālo pieaugumu. Ja atlasīto koku skaits ir vismaz 10, tad turpmāka koku atlase nav turpināta un izmantoti atlasītie koki. Bet, ja atlasīto koku skaits mazāks par 10, tad pie iepriekš atlasītajiem kokiem pievienoti tie kontroles koki, kuru radiālajam pieaugumam ar vērtējamo audžu radiālo pieaugumu ir statistiski būtiska korelācija pie rezultātu būtiskuma līmeņa $\alpha=0,1$. Retrospekcijas periods 10 gadi.



2.8. attēls. Piecu gadu perioda caurmēra kumulatīvais papildus pieaugums (Zdkp) atkarībā no kokaudzes vecuma grupas

Kopumā 40-60 gadus vecām priedēm, kuras izdzīvojušas pēc ugunsgrēka, pieaugums ir mazāks (negatīvs kumulatīvais papildus pieaugums) nekā kontroles kokiem. Savukārt kokiem, kuru vecums pārsniedz 100 gadus, negatīvs kumulatīvais papildus pieaugums ir gadījumos, kad stumbra apdeguma augstums pārsniedz 3 m vai zemāk par 1 m. Izdzīvojušajām jaunākām priedēm (40-60 g.v.) pieauguma samazinājums (negatīvs kumulatīvais papildus pieaugums) ir lielāks nekā vecākiem kokiem. Savukārt, ja apdeguma augstums ir starp 1 m un 3 m, izdzīvojušajiem kokiem, kuru vecums pārsniedz 100 gadus, var pat veidoties pozitīvs papildus pieaugums. Tas varētu būt skaidrojams ar faktu, ka priedēm ir relatīvi bieža miza, kas aizsargā no tiešas ugunsgrēka radītā karstuma ietekmes, tajā pašā laikā koki var izmantot degšanas procesā atbrīvotās barības vielas.



2.9. attēls. Radiālā pieauguma izmaiņas kontroles un ugunsgrēka ietekmētajiem kokiem

Nākamajā pētījuma etapā nozīmīgi empīriskā materiāla ievākšanu un analīzi turpināt, vērtējot garāku periodu pēc ugunsgrēka.

Par pētījuma jomu nodrošināta starptautiska sadarbība un pārskata periodā publicēts raksts:

Drobyshev I., Ryzhkova N., Eden J., **Kitenberga M.**, Pinto G., Lindberg H., Krikken F., Yermokhin M., Bergeron Y., Kryshen A. (2021) Trends and patterns in annually burned forest areas and fire weather across the European boreal zone in the 20th and early 21st centuries. *Agricultural and Forest Meteorology*, 306, 108467. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108467>

Iesniegts kopsavilkums konferencei Third International Conference on Fire Behaviour and Risk (ICFBR2022): Donis J., Zdors L., Šņepsts G., Treimane A., Kitenberga M., Jansons A. (2021) Trees as a legacies of forest fires in Scots pine dominated stands: case study in Latvia.

3. Biotisko faktoru ietekmes pārmaiņas nākotnes klimatā.

3.1. Dendrofāgo kukaiņu (kaitēkļu) masveida savairošanās draudu raksturojums

Pētījuma ietvaros plānoti un veikti tikai kamerālie darbi, veicot esošās informācijas analīzi. Sagatavots manuskripts par tīklapsenes savairošanās patieso sākumu (attālā izpēte) un attīstību.

Analīze apstiprina, ka priežu audžu tīklapsenes savairošanās var būt ilgstoša, bet lokāla: tās centrālajā daļā ietekmētie koki nokalst. Ieteicamo pasākumu kopums atkarīgs no savairošanās intensitātes. Ja jūnijā uz priežu stumbriem tiek pamanītas pieaugušas tīklapsenes, jāveic audžu provizoriska apsekošana. Šāda apsekošana noteikti veicama, ja novērojama vizuāla priežu defoliācija, kas pārsniedz 50%. Vienkāršākais veids, kā prognozēt tīklapsenes klātbūtni un novērtēt savairošanās risku, ir veikt ziemojošo kāpuru uzskaiti paraugbedrēs. Īpaša uzmanība jāpievērš Austrumlatgalei, kur notikusi līdz šim vienīgā tīklapsenes savairošanās Latvijā. Konstatējot neliela apjoma savairošanos, to var mazināt, apdraudētajās mežaudzēs izvietojot putnu būrus dobumperētāju putnu piesaistīšanai. Lai mazinātu nozīmīgu savairošanos, novājinātās priedes tās epicentrā jāizvāc sanitārajā cirtē. Cirti veic vasarā (jūnijā, jūlijā), nodrošinot, ka kokos esošie attīstību nepabeigušie kāpuri iet bojā, būtiski samazinot tīklapsenes populāciju. Pēc cirtes rudenī audzes apseko atkārtoti, lai novērtētu papildus cirtes nepieciešamību. Šajā apsekojumā īpaša uzmanība jāpievērš koku vainagiem, lai novērtētu papildus ietekmi, ko izraisa galotņu sešzobu mizgrauža savairošanās.

3.2. Klimata pārmaiņu ietekme uz egļu astoņzobu mizgrauža izplatību

Metodiskie risinājumi šīs pētījuma komponentes attīstīšanā tādā mērā, cik iespējams kopējā darba apjoma ietvaros, saistīti ar testiem klimata kamerās un tiks saskaņoti ar pasūtītāju vienlaikus ar darba uzdevumiem nākamajam etapam. Nozīmīgāka vērība nākamajos etapos veltāma citām dendrofāgu sugām. Lietderīgi turpināt egļu astoņzobu mizgrauža lidošanas sākuma monitoringu.

Monitoringa metodes

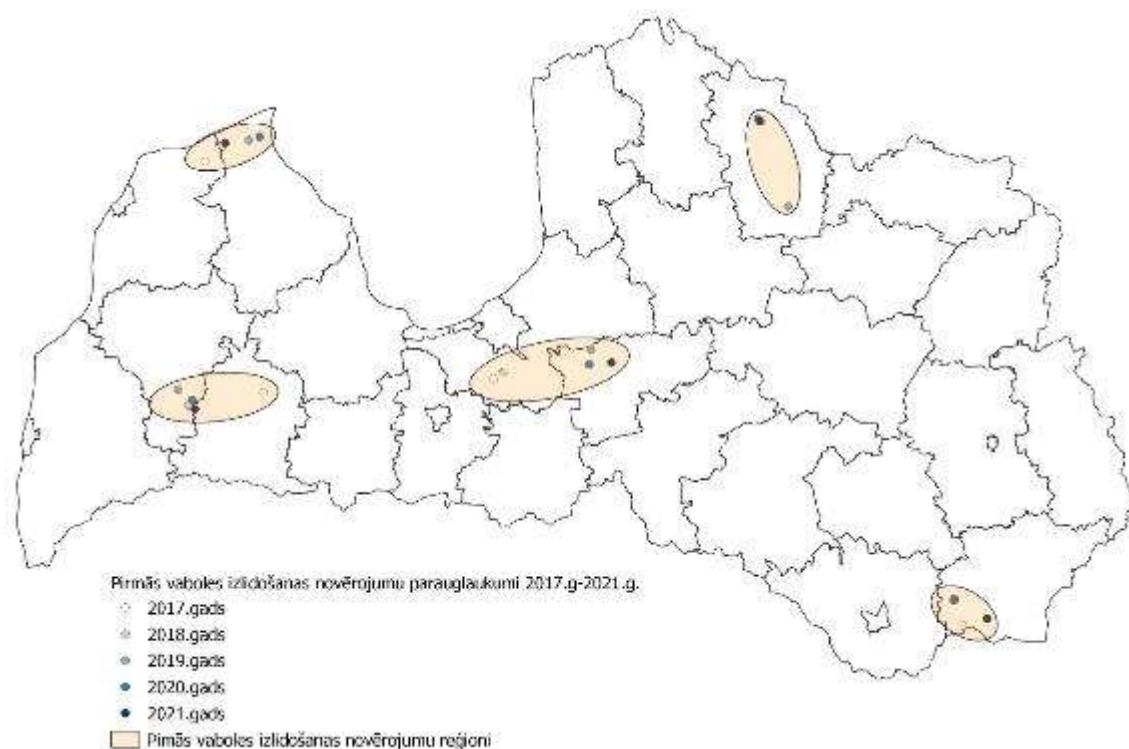
Egļu astoņzobu mizgrauža lidošanas monitoringam katru gadu tiek ierīkoti parauglaukumi piecos Latvijas reģionos (3.1. attēls), kur iepriekšējās ziemas skuju koku cirmās tiek ievietoti trīs slazdi ar *I. typographus* agregācijas feromona dispenseru. Slazdi tiek pārbaudīti reizi dienā, sākot no 15.marta, un tiek noteikts datums, kad slazdā konstatēta pirmā egļu astoņzobu mizgrauža vabole. Šo datumu uzskata par mizgraužu lidošanas sākumu konkrētajā reģionā attiecīgajā gadā.

Rezultāti

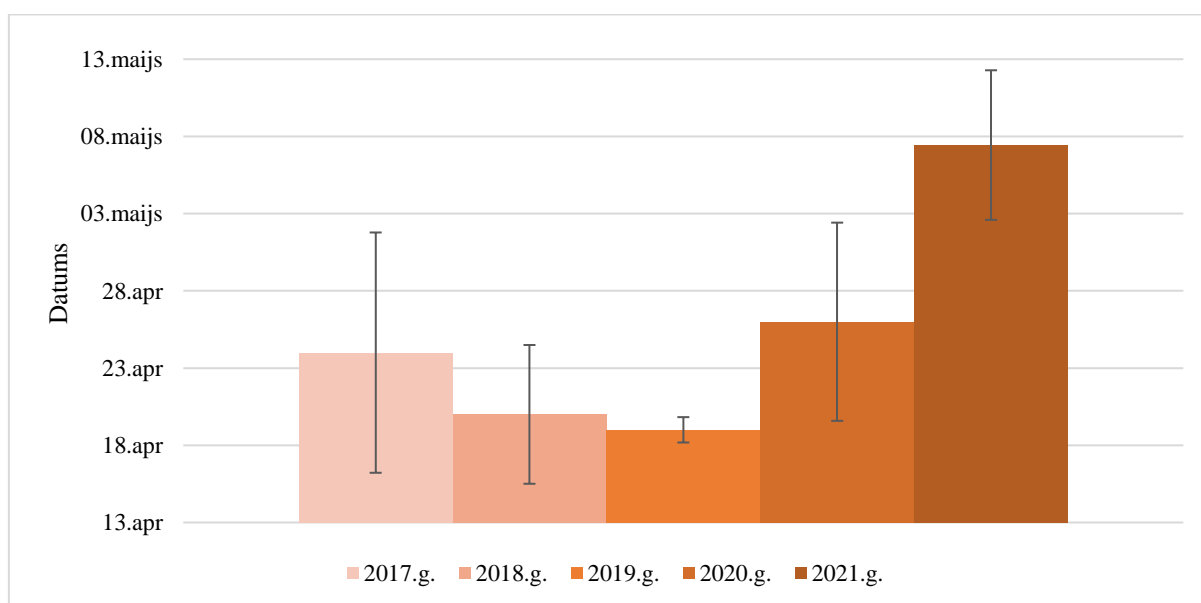
2021. gadā egļu astoņzobu mizgraužu lidošana sākums būtiski aizkavējās (3.2.attēls) un bija vēlākais kopš lidošanas sākuma novērojumu uzsākšanas. Tas skaidrojams ar neparasti zemo temperatūru aprīļa beigās- maija sākumā. Latvijas centrālajā daļā (Valkā, Ogrē) dažas mizgraužu vaboles paspēja izlidot 21. aprīlī pirms vēsā laika iestāšanās, bet pārējā valsts teritorijā mizgraužu lidošana sākās tikai 9., 10. maijā (3.3.attēls).

2021.gada pavasarī netika novērota egļu mizgraužu izlidošanas laika atšķirība starp rietumu un austrumu reģioniem (3.4. attēls). Gan 2017. gadā, gan 2018. gadā mizgrauža vaboles visagrāk izlidoja Latvijas rietumos - Ventspils rajonā, kas, iespējams, saistīts ar jūras ietekmi. Latvijā mizgraužu masveida izlidošana parasti novērojama maija pirmajā dekādē (Ozols, 1985)

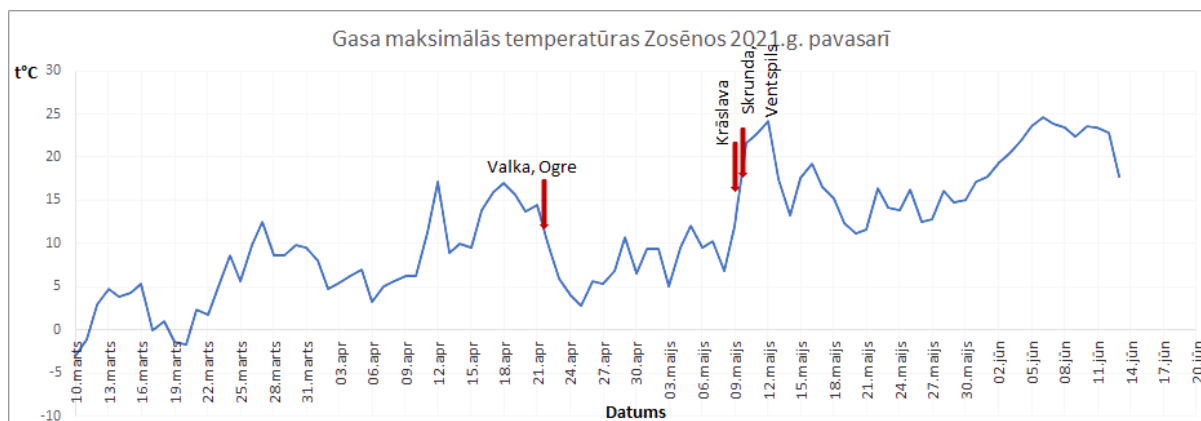
un ir tieši saistīta ar temperatūras paaugstināšanos. Masveida lidošana novērojama, kad gaiss dienā uzsilst virs 18°C (Harding & Ravn, 1985).



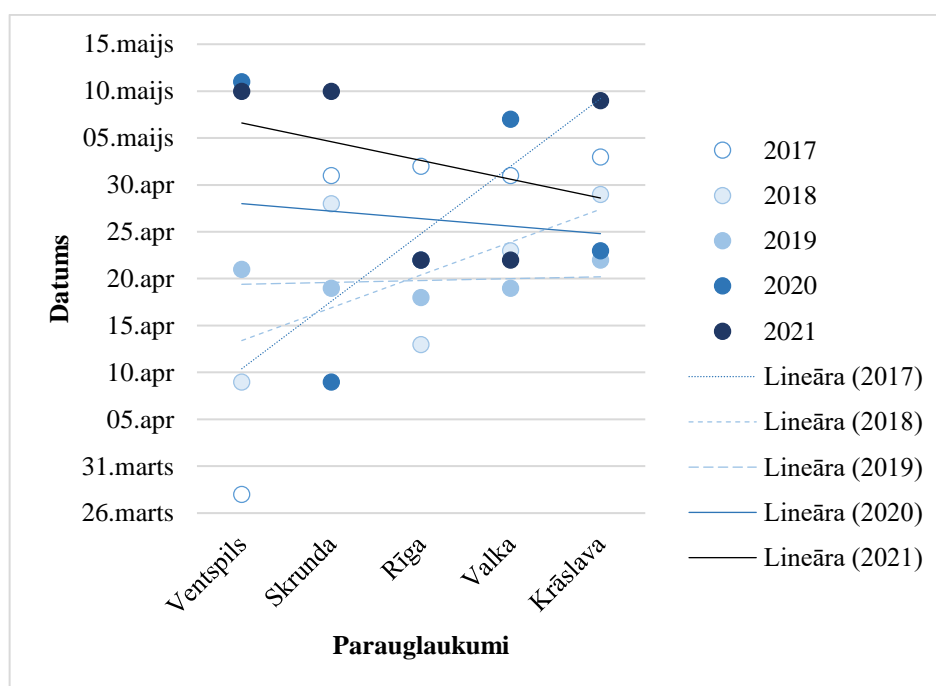
3.1. attēls. Egļu astoņzobu mizgrauža (*Ips typographus* L.) lidošanas sākuma monitoringa parauglaukumu izvietojums no 2017. gada līdz 2021. gadam



3.2. attēls. Pirmās vaboles izlidošanas datums (vidēji no 5 parauglaukumiem)

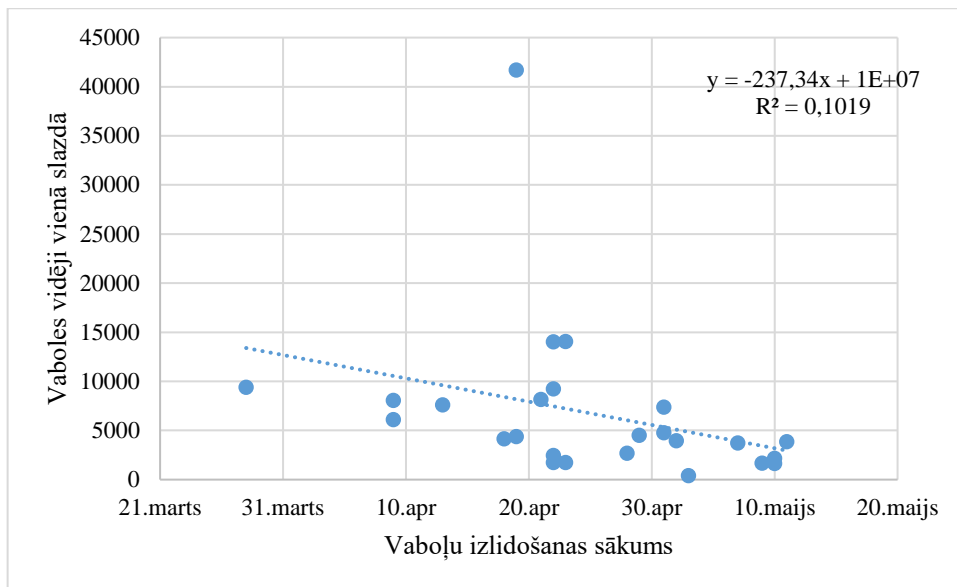


3.3. attēls. Mizgraužu izlidošanas sākums atkarībā no maksimālās diennakts gaisa temperatūras (meteoroloģiskie dati ņemti no Zosēnu meteoroloģiskās stacijas)



3.4.attēls. Egļu astoņzobu mizgrauža (*Ips typographus* L.) lidošanas sākums rietumu-austumu virzienā izvietotos parauglaukumos

3.5. attēlā atainots, cik lielā mērā agrāka izlidošana saistīta ar kopējo lidošanas intensitāti. Šobrīd ievākto datu apjoms neļauj izdarīt drošus secinājumus, bet pastāv tendence, ka reģionos, kuros mizgraužu izlidošana sākas agrāk, kopējā lidošanas aktivitāte visā sezonā ir augstāka.



3.5.attēls. Sakarība starp egļu astoņzobu mizgrauža lidošanas sākumu un kopējo vidēji vienā slazdā noķerto vaboļu daudzumu sezonā

Secinājumi

1. 2021.gada pavasarī egļu astoņzobu mizgrauža izlidošana, salīdzinot ar iepriekšējo gadu, aizkavējās par 13 dienām. Tas skaidrojams ar zemo gaisa temperatūru aprīļa beigās un maija sākumā.
2. Novērojama tendence, ka agrāka vaboļu izlidošana rezultējas ar augstāku lidošanas intensitāti visas sezonas garumā.

3.3. Dendrofāgo kukaiņu un to saimniekorganismu dzīves cikla sinhronitātes izmaiņu novērtējums

Pētījuma etapa ievaros veikti kamerālie darbi, sagatavota viena publikācija un viens manuskripts.

Publikācija

Siliņš I., Kārklīņa A., Miezīte O., Jansons Ā. (2021) Trends in Outbreaks of Defoliating Insects Highlight Growing Threats for Central European Forests, and Implications for Eastern Baltic Region. *Forests* 2021, 12, 799. <https://doi.org/10.3390/f12060799>

Dabiskie traucējumi ir galvenie mežu ekosistēmu dinamiskie procesi, kas maina to struktūru telpiskā un laika mērogā (Thom et al., 2013). Tādējādi vētras, ugunsgrēki un kukaiņu masveida savairošanās ir mežu ekosistēmu neatņemama sastāvdaļa (Van Lierop et al., 2015). Notiekošās klimata pārmaiņas maina dabisko traucējumu biežumu un/vai ietekmes smagumu, kā arī meteoroloģisko parametru veidus un amplitūdu, tādējādi radot tiešu un netiešu ietekmi uz kukaiņiem un kokiem (Ramsfield et al., 2016; Senf et al., 2021). Klimata pārmaiņas, īpaši temperatūras paaugstināšanās, tieši ietekmē kukaiņu attīstību un izdzīvošanu (Bale et al., 2002). Tādēļ globālā sasilšana var veicināt kukaiņu masveida savairošanos. Nepārtraukta temperatūras paaugstināšanās var izraisīt diapauzes un pavasara attīstības traucējumus, samazinot kukaiņu masveida savairošanās potenciālu (Gely et al., 2019). Temperatūras paaugstināšanās netieši var

ietekmēt saimniekkoku izplatību un to piemērotību kukaiņiem (Gely et al., 2019; Anderegg et al., 2015).

Ir pētīta dažādu temperatūru ietekme uz kukaiņu populācijas lielumu un to izplatības areāliem (Wilson et al., 2005). Vairāki pētījumi liecina, ka temperatūras paaugstināšanās var sekmēt sugu izplatību augstāk virs jūras līmeņa un/vai platuma grādiem, veicinot sugu izmiršanu to pamatareālos (Wilson et al., 2005; Hill et al., 2002; Thomas et al., 2004). Daudzām sugām temperatūras izmaiņas var paplašināt to izplatības areālu (Wilson et al., 2005), palielinot attīstības, vairošanās un izdzīvošanas rādītājus (Volney et al., 2000; Pöyry et al., 2011). Globālā sasilšana var negatīvi ietekmēt kukaiņus, piemēram, pārsniedzot to termisko toleranci kombinācijā ar ekstrēmiem laikapstākļiem, izraisot populācijas samazināšanos (Lehmann et al., 2020).

Paredzams, ka paātrinātā sasilšana mērenajā un boreālajā zonā veicinās kukaiņu attīstību un masveida savairošanos, kas attiecīgi palielinās koku defoliāciju risku (Venäläinen et al., 2020; Netherer et al., 2010). Lai gan sniega segas samazināšanās un agrāka sniega kušana var samazināt kukaiņu izdzīvošanas potenciālu, tomēr agrāki un garāki veģetācijas periodi veicinās sugu attīstību agrāk pieejamu pārtikas krājumu un ilgāka augšanas perioda dēļ (Ayres et al., 2000; Roy et al., 2004). Tas īpaši attiecas uz tauriņu kārtas kukaiņiem, kam temperatūras paaugstināšanās un retāku aukstuma periodu dēļ (Venäläinen et al., 2020; Netherer et al., 2010) ievērojami uzlabojas pārziemošanas apstākļi (Venäläinen et al., 2020; Ayres et al., 2000; Roy et al., 2004). Piemēram, Somijā jau novērota *Operophtera brumata* masveida savairošanās kalnu bērza izplatības areāla augšējā robežā (Jepsen et al., 2008).

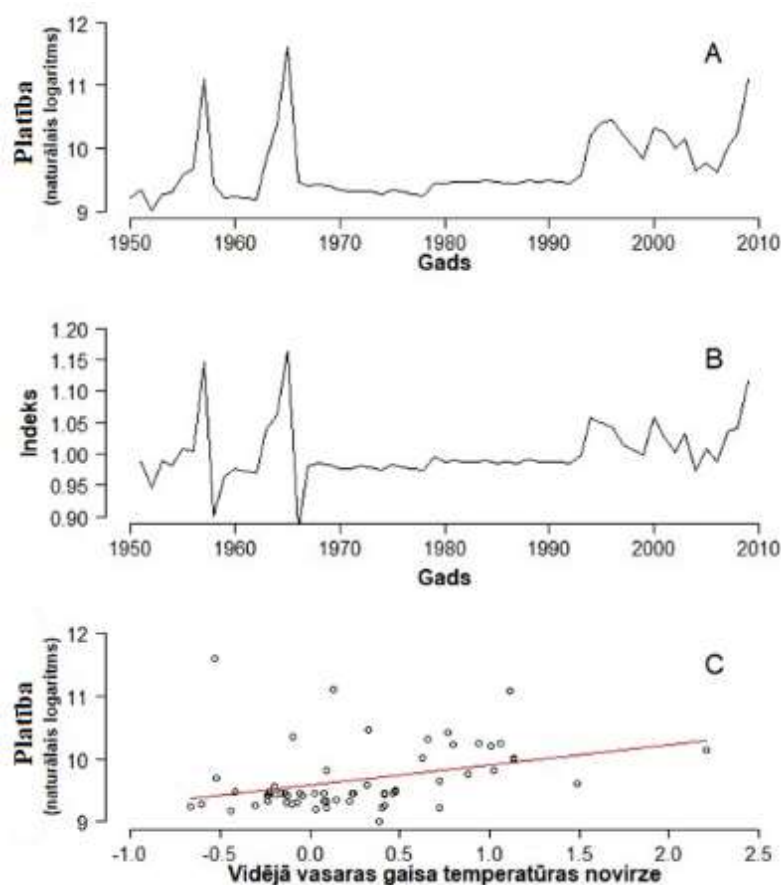
Tiek uzskatīts, ka sasilšana var izraisīt fenoloģisko asinhroniju starp kaitēkļiem un to parazītiem (Hance et al., 2007). Atšķirības starp kaitēkļu un parazītu siltuma limitiem var izraisīt izmaiņas to attīstībā, kas savukārt ietekmētu visu populācijas bioloģiju (Furlong et al., 2017), ietekmējot gan saimniekorganismu, gan parazītu sinhronizāciju (Furlong et al., 2017). Sausums un vētras var novājināt kokus, padarot tos uzņēmīgākus pret kukaiņu uzbrukumiem (Pureswaran et al., 2018). Šajā sakarā ieskatu par galvenajiem faktoriem, kas ietekmē kukaiņu masveida savairošanos, var sniegt retrospekcija, uzlabojot nākotnes prognožu precizitāti. Šīs pētījuma sadaļas mērķis bija novērtēt defoliatoru masveida savairošanās tendences Centrāleiropas mežos. Mēs izvirzījām hipotēzi, ka sasilšana palielina kukaiņu uzliesmojumu biežumu un apjomu.

Dati par masveida savairošanās vēsturi no piecām Centrāleiropas valstīm (Slovākijas, Čehijas, Austrijas, Ungārijas un Vācijas) tika iegūti no FAO (FAO, 2011). Turklāt literatūras apskatam izmantoja *European Forest Institute* (<https://www.efi.int/> (aplūkots 2019. gada 15. martā)), *Global Invasive Species Database* (<http://www.iucngisd.org/gisd/> (aplūkots 2019. gada 11. aprīlī)), *Fauna European Database* (<https://fauna-eu.org/> (aplūkots 2019. gada 1. aprīlī)) un *Google Scholar* (<https://scholar.google.com/> (aplūkots 2020. gada 21. maijā.)) datubāzes. No šīm datubāzēm tika iegūta informācija par katras sugas kopējo defoliācijas platību (km²) izvēlētajās valstīs. Tika atlasīti šādi tauriņu kārtas kukaiņi: *Lymantria dispar*, *Lymantria monacha*, *Bupalus piniarius*, *Panolis flammea* un *Operophtera brumata*. Šie kukaiņi ir plaši izplatīti gan Centrāleiropā, gan Ziemeļeiropā, tiem ir līdzīgi attīstības cikli, cikliska populācijas dinamika un bieži masveida savairošanās gadījumi. Izvēlētajās sugas rada būtiskus draudus ekonomiski nozīmīgām koku sugām, īpaši palielinot koku ievainojamību un mirstību. Klimatiskie parametri, ieskaitot mēnešu vidējās gaisa temperatūras, tika iegūtas no IPCC (IPCC, 2013).

Lai analizētu masveida savairošanās gadījumu vēsturi un to saistību ar temperatūras paaugstināšanos, tika izmantota laikrindas pieeja. Lai novērtētu autoregresivitāti, tika aprēķināti autokorelācijas koeficienti atlasītajiem masveida savairošanās datiem, attiecīgi aprēķinot masveida savairošanās ietekmi. Savukārt, nosakot standarta masveida gadījumu hronoloģiju, autokorelācija tika noņemta. Gada, ziemas un vasaras vidējo temperatūru novirzes

no vidējām vērtībām laika posmā no 1850. līdz 1900. gadam tika aprēķinātas kā reference sasilšanai izvēlētajās valstīs. Lai novērtētu saikni starp masveida savairošanās gadījumiem un sasilšanu, tika izmantota lineārā regresija. Turklāt, lai novērtētu temperatūras ietekmi uz savairošanās gadījumiem, tika izmantota iepriekšējā gada ziemas un vasaras temperatūra.

Centrāleiropā tika novēroti cikliski mežu defoliātoru uzliesmojumi. Pētāmā perioda laikā atlasītās sugas kopumā defoliēja 1 100 000 km² (4600 km² gadā) mežu. Izvēlēta perioda laikā notika seši nozīmīgi masveida uzliesmojuma gadījumi – 1957., 1965., 1996., 2001., 2003. un 2009. gadā (3.6.A attēls). 1957. gadā defoliācijas apjoms sasniedza 82 000 km², 1965. gadā palielinājās līdz 140 000 km² un no 1995. gada līdz 2010. gadam variēja no 10 500 līdz 38 200 km² (3.6.A attēls). Kukaiņu masveida uzliesmojumi kļuva biežāki analizēto periodu beigu daļā. Tomēr laika posmā no 1970. līdz 1990. gadam netika novēroti nozīmīgi masveida savairošanās gadījumi (3.6.A attēls), kas varētu būt saistīts ar pakāpenisku valdošo koku sugu dažādošanos – mistrojumu dažādā telpiskajā mērogā (Haynes et al., 2014), kas varētu būt bijis cēlonis defoliātoru uzvedības maiņai (Klapwijk et al., 2018). Kā liecina prognozes, līdz 21. gadsimta beigām Austrumbaltijas reģiona klimatiskajiem apstākļiem ir jāklūst salīdzināmiem ar pašreizējo Centrāleiropas klimatu (IPCC, 2013; Buras et al., 2019), un varētu būt sagaidāmas līdzīgas tendences arī defoliātoru uzvedībā. To apstiprina arī salīdzināmais mežaudžu sastāvs gan Centrāleiropā, gan Austrumbaltijas reģionā (Forest Europe, 2015). Tāpēc, ja temperatūra turpinās paaugstināties un mežsaimniecības prakse saglabāsies nemainīga, ir sagaidāms, ka defoliātoru uzliesmojumu smagums un biežums Austrumbaltijas reģionā palielināsies. Masveida savairošanās biežuma pieaugums notika tikai 20. gadsimta beigās, kas liecina par kopīgu tendenci gan klimata, gan mežu apstākļos (Haynes et al., 2014). Tomēr pēc katra masveida savairošanās cikla samazinās iespējamība uz atkārtotu uzliesmojumu (3.6.B attēls).



3.6.attēls. Masveida savairošanās ietekmētā platība (A) un sarp gadu variācija (B) un platība atkarībā no gaisa temperatūras novirzes (C) laika posmā no 1950. līdz 2010. gadam

Temperatūras novirzes no normas ietekmēja masveida uzliesmojumu. Vidējai gada ($p=0,03$), iepriekšējā gada vasaras temperatūrai ($p=0,02$) un vasaras temperatūrai ($p=0,007$) bija būtiska ietekme uz vidējo masveida savairošanās platību. Labākai ilustrācijai tika izmantotas vasaras temperatūras novirzes (3.6.C attēls). Tas liecina, ka temperatūras paaugstināšanās ir veicinājusi kukaiņu masveida savairošanos. Tomēr sausuma perioda ietekme uz defoliātoriem ir neskaidra (Haynes et al., 2014). Vairākos pētījumos kukaiņu izdzīvošana, populācijas blīvums un to radītā kaitējuma samazināšanās ir tieši proporcionāla sausuma perioda garumam un intensitātei (Gely et al., 2019; Jactel et al., 2012; Mcmillin et al., 1995; Gutbrodt et al., 2011). Turklāt pastāv saikne starp defoliātoru kāpuriem un lielo (*Parus major*) un zilo (*Parus caeruleus*) zīlīšu populāciju blīvumiem (Visser et al., 2003). Defoliātoru kāpuri ir zīlīšu barības avots, un kukaiņu populācijas blīvuma maksimumi sakrīt ar cāļu šķilšanos (Visser et al., 2003). Prognozes par defoliātoru masveida savairošanās dinamiku rada daudz neskaidrību, galvenokārt pretrunīgu pierādījumu dēļ (Gely et al., 2019). Tādējādi ir sarežģīti prognozēt defoliātoru dinamiku mainīgo laikapstākļu, ekstremālo klimatisko apstākļu un augu-kukaiņu-parazītoīdu mijiedarbības dēļ (Senf et al., 2021; Gely et al., 2019).

Secinājumi

Tika konstatēta saikne starp masveida savairošanās gadījumiem un temperatūras novirzēm, kas liecina, ka temperatūras paaugstināšanās veicinājusi kukaiņu masu savairošanos Centrāleiropā. Dažādu koku sugu audžu mistrojums ainavas līmenī mazinājis masu šo tendenci, liecinot, ka šāda mežsaimniecības prakse varētu būt efektīva defoliātoru bojājumu samazināšanai Austrumbaltijas reģionā.

Manuskripts

Siliņš I., Kārklīņa A., Miezīte O., Jansons Ā. Earlier hatching of *Lymantria dispar* is unlikely to contribute to outbreaks in the Eastern Baltic region.

Dendrofāgu un to saimniekorganismu dzīves cikla sinhronitāte ir viens no faktoriem, kas nosaka resursu pieejamību kukaiņiem un līdz ar to masveida savairošanās varbūtību (Ju et al., 2017). Atsevišķi kukaiņi-speciālisti var pielāgoties saimniekaugu fenoloģijas izmaiņām klimata pārmaiņu ietekmē, tādējādi gūstot papildus resursus no temperatūras paaugstināšanās (Ekholm et al., 2019). Pētījuma mērķis bija noskaidrot kā (1) trīs atšķirīgu klimata pārmaiņu scenāriju gadījumā reaģētu ozolu mūķenes kāpuri un (2) kā kavēta saimniekaugu fenoloģija ietekmētu šo kāpuru masas pieaugumu.

Materiāli un metodes

1.etaps

Eksperimentālajam pētījumam ievākti ozolu mūķenes (*Lymantria dispar*) dējumi no diviem Latvijas reģioniem – Bērziema (Populācija 1) un Liepājas (Populācija 2). Ievāktie dējumi salikti 30 Petrī platēs uz mitra filtrpapīra un ievietoti uz mēnesi ledusskapī 2-3°C temperatūrā. Pēc tam šīs Petrī plates ar olu dējumiem pārvietotas uz klimata kameru, kur tika audzēti trīs dažādos klimata scenārijos. Klimata kamerā katrai populācijai vienam scenārijam ievietotas 5 Petrī plates.

- 1) Scenārijs A (12°C dienā un 14h gaismas cikls, 9°C naktī un 10h tumsas cikls);
- 2) Scenārijs B (9°C dienā un 14h gaismas cikls, 6°C naktī un 10h tumsas cikls);
- 3) Kontrole (7°C dienā un 14h gaismas cikls, 4°C naktī un 10h tumsas cikls).

Klimata kamerā uzstādīts 65% gaisa mitrums, kas tika turēts nemainīgs visu eksperimenta laiku. Klimata kamerās sākotnēji uzstādītās temperatūras (gan dienas, gan nakts) ik pēc piecām dienām tika paaugstinātas par 3°C. Pirmā etapa eksperimenta ilgums bija 45 dienas, kura laikā katru dienu no Petrī platēm tika izvākti mirušie kāpuri, bet dzīvie tika pārnesti uz jaunām platēm. Izšķīlušies kāpuri Petrī traukos saņēma ūdeni pilienu veidā, attiecīgi tādā veidā simulējot bada apstākļus visu eksperimenta laiku.

2. etaps

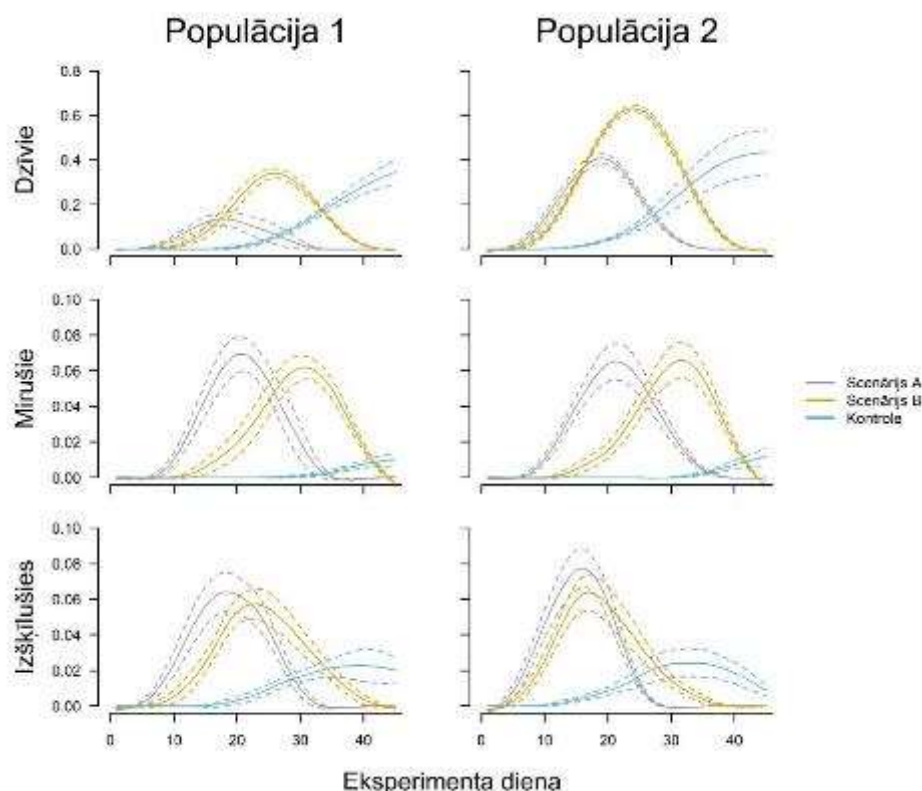
Uz eksperimenta otro etapu pārnēsa izdzīvojušos kāpurus, kas tika turēti paaugstinātā temperatūrā (attiecīgi dējumi no scenārija A un B). Visi pārnēstie kāpuri turēti insektārijos vienādos apstākļos: 20°C temperatūrā (dabisks gaismas cikls) un pie 60% gaisa mitruma. Otrajam etapam kopā tika izbūvēti 16 insektāriji, kur scenārija A izdzīvojušajiem kāpuriem vienmēr deva daļēji vai pilnībā izplaukušas parastā ozola (*Quercus robur* L) vai āra bērza (*Betula pendula* Roth) lapas. Katrā insektārijā atradās 20 kāpuri, kurus katru otro dienu svēra.

Lai analizētu temperatūras un populācijas ietekmi uz olu un kāpuru izdzīvošanu, mirstību, šķīšanās un masas pieaugumu, tika izmantoti jaukta efekta modeļi programmā R.

Rezultāti

1. etaps

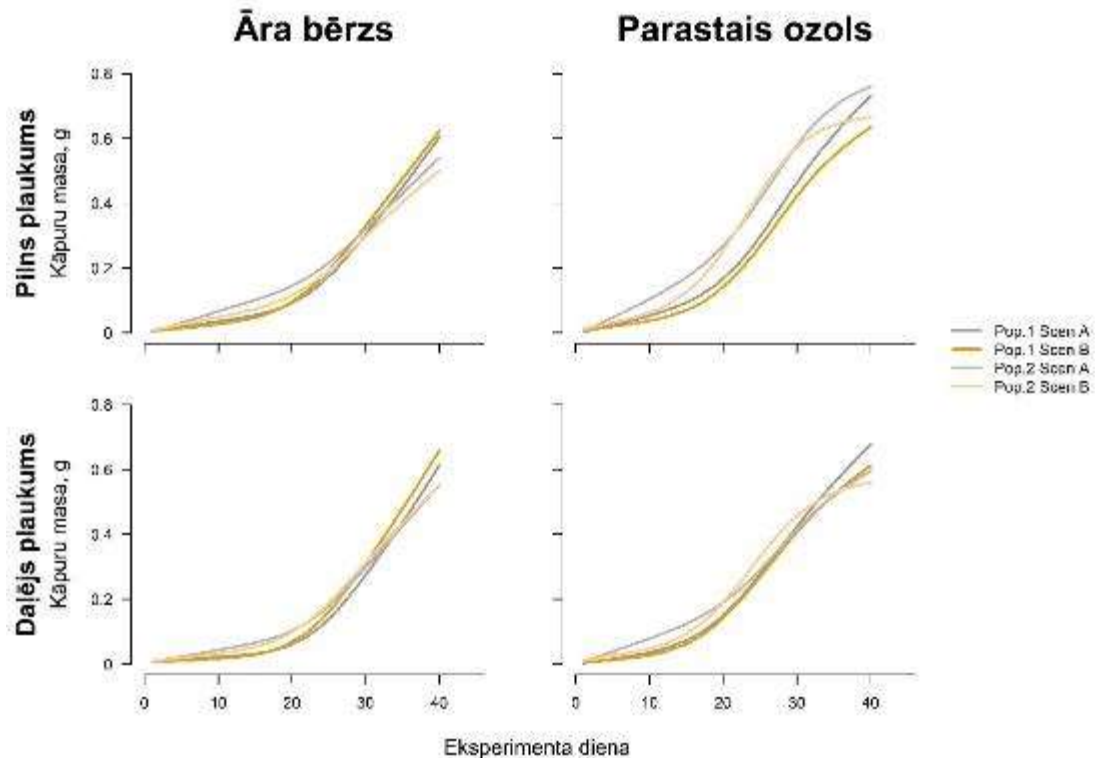
Dzīvo kāpuru īpatsvaru pret dējumu (subpopulāciju) būtiski ietekmē ($p < 0,001$) iknedēļas temperatūras pieaugums pie klimata scenārijiem A un B, kā arī temperatūras un subpopulācijas mijiedarbība ($p < 0,05$). Mirušo kāpuru īpatsvaru neietekmē ne temperatūras pieaugums, ne subpopulācija. Savukārt izšķīlušos kāpuru īpatsvaru būtiski ($p < 0,05$) ietekmē iknedēļas temperatūras pieaugums (3.7.attēls).



3.7. attēls. Populācijas un temperatūras ietekme uz dzīvo, mirušo un izšķīlušos kāpuru īpatsvaru. Dzīvo, mirušo un izšķīlušos skaits ir attiecināts relatīvi pret dējumu (subpopulāciju)

2. etaps

Pirmā etapa augšanas apstākļiem (pie scenārija A un B), lapu plaukuma stadijai (pilnīgs vai daļējs plaukums), koka sugai un dējumam (subpopulācijai), kā arī šo faktoru mijiedarbībām ir būtiska ($p < 0,001$) ietekme uz kāpuru masas pieaugumu (3.8. attēls).



3.8. attēls. Kāpuru masas pieaugums uz daļēji un pilnībā plaukušām parastā ozola un āra bērza lapām

Prognozētajām klimata pārmaiņām, īpaši pavasara temperatūras pieaugumam, varētu būt tieša ietekme uz ozolu mūķenes šķilšanās laiku un mirstību. Augstākā šī ietekme sagaidāma krasu pārmaiņu gadījumā, nozīmīgi pieaugot temperatūrai īsi pēc kāpuru šķilšanās. Piepildoties šādiem scenārijiem un pieaugot pavasara temperatūrai, var zust sinhronitāte starp kāpuru un tā saimniekaugu. Tomēr, ņemot vērā arī lokālo koku adaptāciju un insekta pielāgošanās kapacitāti, sagaidāms, ka ozolu mūķenes spējas veidot masveida savairošanās gadījumus hemiboreālajā reģionā pieaugs.

4. Koku augšanas gaitas izmaiņas nākotnes klimatā

4.1. Klimata komponentes augstuma pieauguma modeļiem

Klimata pārmaiņu rezultātā 21. gs. ekonomiski nozīmīgo koku sugu izplatībā Baltijas jūras reģiona austrumu daļā ir sagaidāmas ievērojamas pārmaiņas, kas galvenokārt saistītas ar skuju koku, it īpaši egles, īpatsvara mazināšanos (Frejaville et al., 2020; Buras and Menzel, 2019). Šajā kontekstā izmaiņu laicīgai apzināšanai un izprašanai ir būtiska loma veiksmīgā mežsaimniecības adaptācijā (Nabuurs et al., 2017). Ņemot vērā, ka primārā augšana ir galvenais kokaugu konkurenci ietekmējošais faktors (Bianchi et al., 2021; Cao et al., 2021), tās saistības apzināšana ar meteoroloģiskajiem un klimatiskajiem apstākļiem ir nozīmīga pieaugumu modeļu precizēšanai (Manso et al., 2021; Liu et al., 2020) un līdz ar to iespējai precīzāk prognozēt koku augšanu ilgtermiņā mainīga klimata apstākļos. Šiem mērķiem joprojām tiek attīstītas dažādas attālas izpētes metodes, kas spēj noteikt pieaugumu ar augstu precizitāti, tomēr tās nespēj sniegt pietiekami garas mērījumu sērijas meteoroloģisko apstākļu ietekmes retrospekcijai (Manso et al., 2021; Tyminska-Czabanska et al., 2021). Tādēļ joprojām augšanas jutības novērtēšanai un genotipu piemērotības novērtējumam ir nozīmīgas pieauguma tiešo mērījumu sērijas (Hayatgheibi et al., 2021; Xu et al., 2017; Jansons et al., 2015). Pētījuma mērķis ir apzināt parastās egles augstuma pieauguma jutību pret meteoroloģiskajiem faktoriem, lai raksturotu sugas ilgtspēju. Mērķa sasniegšanai izvirzīti divi uzdevumi: veikt pieauguma izmaiņu dinamikas rekonstrukciju ar gada izšķirtspēju un raksturot briestaudzes vecuma koku pieauguma ikgadējās mainības saistību ar meteoroloģiskajiem faktoriem. Ņemot vērā augstuma un radiālā pieauguma veidošanās asinhronitāti (Mäkinen et al., 2018), kā arī vides apstākļu pēctecības ietekmi uz augstuma pieaugumu (Jansons et al., 2015), izvirzīta hipotēze, ka augstuma pieaugumu ietekmējošo meteoroloģisko faktoru kopums ir atšķirīgs no caurmēra pieaugumu ietekmējošā.

Pētījuma etapā materiāls ievākts egles plantācijā MPS Kalsnavas MN, kur gada vidējā gaisa temperatūra stādījumā ir 6,4 °C un gada nokrišņu summa - 700 mm (pēc Harris et al., 2020). Plantācija izveidota 1964. gadā vērī ar mālsmilts cilmieža automorfu mezotrofisku augsni. Paraugkoku atlase veikta, balstoties uz inventarizācijā uzmērīto koku stumbra caurmēru, lai reprezentētu tā variāciju. Paraugkopas un stādījuma koku dimensijas bija līdzīgas (4.1. tabula).

4.1. tabula. Paraugošanai atlasīto koku un visu stādījumā esošo koku dimensijas

		Koku augstums, m	Stumbra diametrs, cm
Stādījumā	Vidējais	25,1	36,5
	standartnovirze	2,2	5,9
Izlasē	Vidējais	24,8	36,7
	standartnovirze	2,2	5,8

Atlasītie 35 paraugkoki nozāģēti, un to stumbri pēc atzarošanas sagarināti 2–3 m garos balķos. Balķi nogādāti lentzāģa gaterī, kur no tiem izzāģēti 5 cm biezi vidus dēļi. Izzāģēšanas laikā nodrošināts, ka vidus dēlis satur serdi. Dēļi izkaltēti līdz gaissausam mitrumam. Katrs dēlis marķēts, lai nodrošinātu tā piederības atpazīšanu.

Augstuma pieaugumu mērīšanai laboratorijā paraugiem visā to garumā ar rokas frēzi atsegta serde, pakāpeniski noņemot koksni. Serde galotnes daļā ($D < 6$ cm) atsegta, izmantojot rokas lentes slīpmašīnu. Mieturi izmantoti pieaugumu robežu identificēšanai. Augstuma pieauguma robežas uz serdes bija viegli identificējamas pēc serdes krāsas un biezuma (4.1.attēls). Šīs īpašības bija galvenais kritērijs gadījumos, kad augstuma pieaugumu robeža sakrita ar zāģa ceļu garenzāģēšanas laikā un fiziski nebija atrodama.



4.1. attēls. Egles serdes izmaiņas, kas indicē augstuma pieauguma noslēgumu

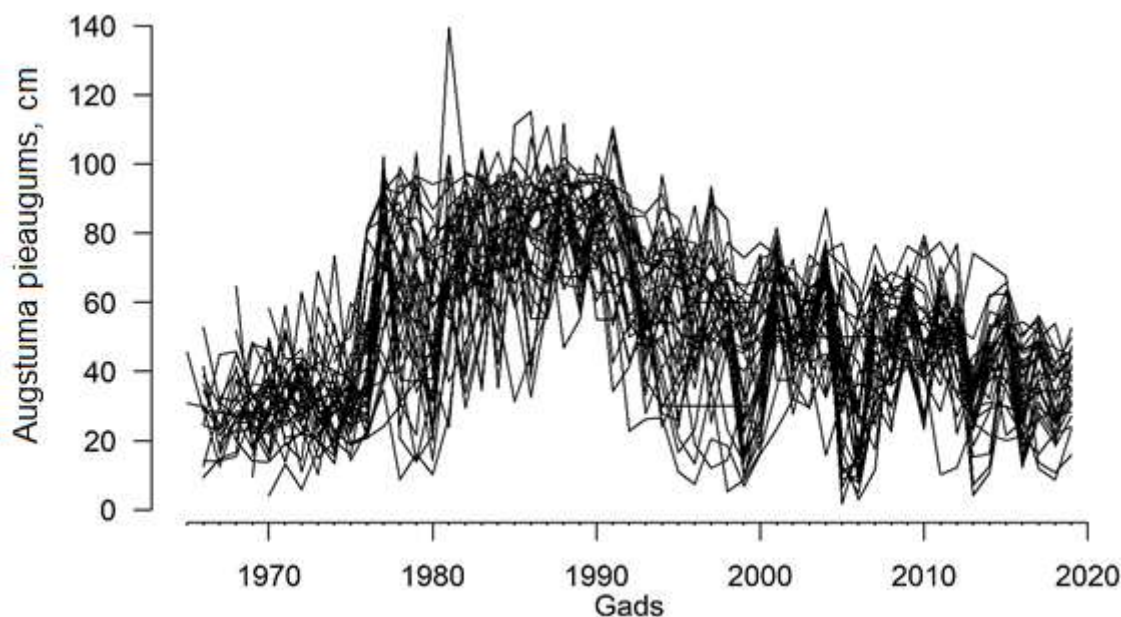
Augstumu pieaugums mērīts ar mērlenti, ar milimetra precizitāti. Lai nodrošinātu korektu augstuma pieaugumu mērījumu datējumu, katra dēļa tievgalis un resgalis datēts, balstoties uz gadskārtu skaitu. Precīzai gadskārtu skaita noteikšanai dēļu gali slīpēti, izmantojot slīppapīru ar raupjumu no 80 līdz 400 graudiem uz collu. Gadskārtas skaitītas, izmantojot rokas palielināmo stiklu ($15\times$ palielinājums).

Augstuma pieauguma sēriju datējuma kvalitātes nodrošināšanai veikta grafiska (ar uzsvaru uz pieauguma kritumu) un statistiska (izmantojot programmu COFECHA; Holmes, 1983) šķērsdatēšana. Sēriju datu kopas informativitāte raksturota ar vispārpieņemtajiem dendrohronoloģijas koeficientiem, kas aprēķināti detrendētām vērībām (Wigley et al., 1984; Bunn, 2008). Lai raksturotu augstuma pieauguma jutību pret meteoroloģiskajiem apstākļiem, izmantojot dubulto detrendēšanu ar negatīvi eksponenciālo un trešās kārtas polinomiālo līkni (viļņa garums 25 gadi), kā arī autokorelācijas noņemšanu, izveidota pieauguma atlikumu hronoloģija (Bunn, 2008). Individuālu koku detrendētās sērijas apvienotas ar *biweight robust mean* funkciju. Šāda atlikumu hronoloģija reprezentē tiešo ikgadējo relatīvo papildpieaugumu, kas mainās meteoroloģisko apstākļu ietekmē (Cook et al., 1987).

Individuāls lineārs meteoroloģisko apstākļu efekts noteikts ar būtstrapotu (1000 iterācijās) Pīrsona korelācijas koeficientu (Zang and Biondi, 2015). Kā ietekmējošie

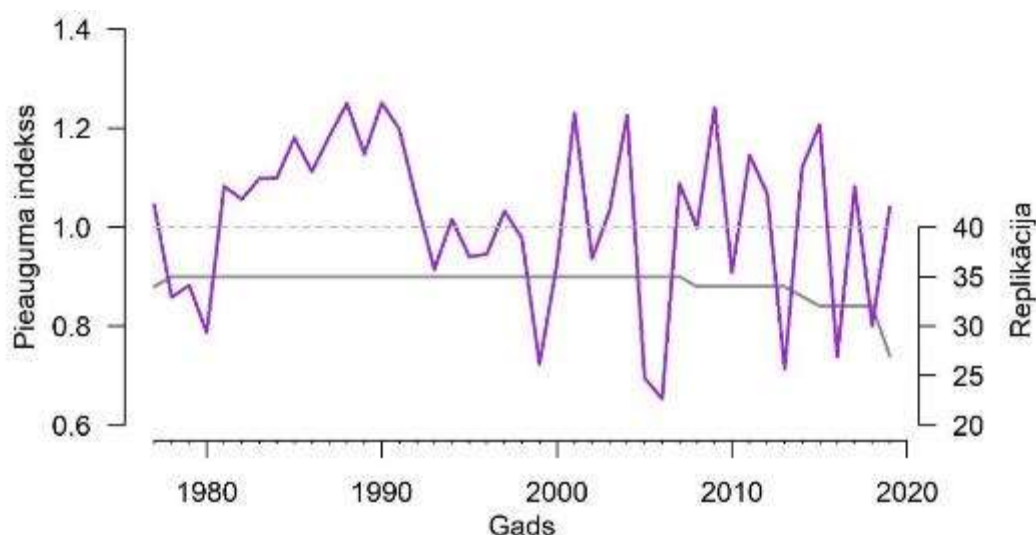
meteoroloģiskie mainīgie izmantoti mēnešu vidējā temperatūra, nokrišņu summa un sausuma indekss (SPEI, Vicente-Serrano et al., 2010). Lai uzlabotu vides signāla atspoguļojumu, juvenīlās augšanas periods, t.i., pirmie 10 dzīves gadi, nav analizēts. Ņemot vērā meteoroloģisko apstākļu izteikto ilgtermiņa pēctecības ietekmi uz koku augstuma pieaugumu (Jansons et al., 2015; Lanner, 1976), meteoroloģiskie mainīgie grupēti ietekmes periodā no maija divus gadus pirms pieauguma veidošanās līdz septembrim pieauguma veidošanās gadā. Šāds periods izmantots, lai ietvertu ietekmes efektus, kas izriet no augstuma pieauguma pēctecības, kā arī apstākļus, kas var ietekmēt augsta dzinumu veidošanos (Katrevis et al., 2018). Meteoroloģiskie dati ņemti no CRU repozitorija (Harris et al., 2020).

Vidējais (\pm standartnovirze) egles augstuma pieaugums bija $56,5 \pm 22,1$ cm gadā, bet mediāna bija 56,1, norādot uz simetrisku datu sadalījumu. Augstuma pieauguma sērijas uzrādīja labu saskanību un tika veiksmīgi šķērsdatētas, liecinot par kopīgu vides faktoru ietekmi uz egles primāro augšanu. Visiem kokiem novērots līdzīgs augstuma pieauguma trends, kas norāda uz pieauguma kulminēšanu 20–30 gadu vecumā. Tomēr jāatzīmē, ka augstumu pieaugumu sērijās vērojamas individuālas tendences (4.2. attēls), norādot uz klona un/vai vietas ietekmi uz pieauguma jutību, par ko liecināja arī viduvēja starpsesiju korelācija ($r_{\text{bar}} = 0,27$). Visas sērijas uzrādīja izteiktu juvenīlās augšanas periodu (pirmie 10–12 gadi), kam raksturīgs zems pieaugums un neizteiktas kopīgās iezīmes. Vides faktoru kopīgu ietekmi uz augstuma pieauguma veidošanos apliecina vides signālu klātbūtne. Sēriju kopas EPS (Wigley et al., 1984) vērtība bija 0,928, kas pārsniedz 0.85 sliekšni, kā arī signāla stiprums (attiecība pret vides troksni) bija 12,9. Sēriju vidējā jutība (*mean sensitivity*; cf. Bunn, 2008) bija 0,33, norādot uz izteiktu ikgadējo pieauguma mainību. Pieauguma sēriju autokorelācija, kas norāda uz iepriekšējas augšanas ietekmi, bija mērena (0,54).



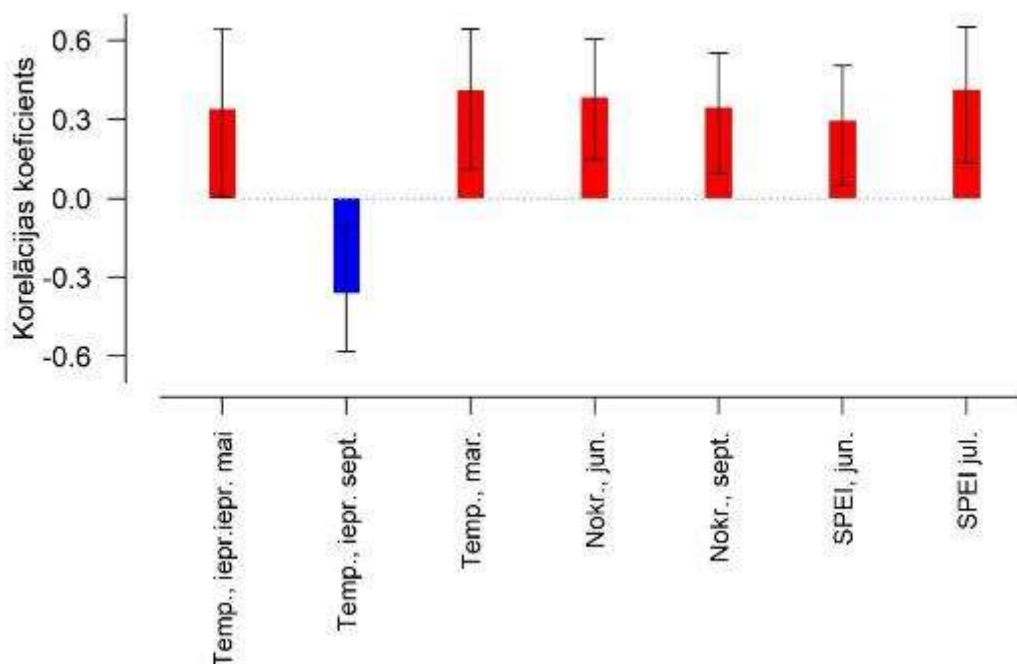
4.2. attēls. Egles paraugkoku augstuma pieaugumu sērijas

Augstuma pieauguma datu kopas replikācija analizētā perioda garumā savārtījās no 27 līdz 35, kas ir pietiekami pieauguma jutības retrospekcijai. Izveidotā atlikumu hronoloģija (4.3. attēls) parādīja, ka augstuma pieauguma ikgadējajai mainībai ir tendence pastiprināties ar vecumu. Jāatzīmē, ka laika posms no 1980. līdz 1990. gadam raksturojas ar pozitīvu ikgadējo papildpieaugumu veidošanos, kam seko izteiktas mainības periods ar nelielu vidējā papildpieauguma kritumu, kas norāda uz pieauguma limitēšanas izmaiņām. Diemžēl analizēto sēriju garums un koku vecuma spektrs šāda efekta novērtēšanai ir nepietiekams.



4.3. attēls. Egles paraugkoku augstuma pieauguma atlikuma hronoloģija un replikācija (katru gadu reprezentējošo koku skaits). Hronoloģija izveidota laika posmam, kas neietver juvenilo augšanu

Parastās egles augstuma pieauguma ikgadējā mainība parādīja jutību pret meteoroloģiskajiem apstākļiem. No 88 meteoroloģiskajiem mainīgajiem, kam pārbaudīta saikne ar pieaugumu, septiņiem tā bija būtiska (4.4. attēls), pie tam sešas no tām bija pozitīvas. Būtiskās korelācijas norādīja, ka egles augstuma pieaugums ir jutīgs pret apstākļiem augšanas sezonas laikā, kā arī to, ka apstākļiem pirms augšanas sezonas ir vērojama pēctecības ietekme. Korelācijas koeficientu vērtības bija vidējas, norādot uz neizteiktu individuālu meteoroloģisko mainīgo limitējošu ietekmi uz pieaugumu. Visciešāk augstuma pieauguma ikgadējās mainības korelēja ar temperatūru martā un sausuma indeksu (SPEI) jūlijā. Mērena korelācija novērota arī ar nokrišņu daudzumu jūnijā un septembrī. Iepriekšējā gada septembra temperatūra parādīja negatīvu saikni ar augstuma pieaugumu, bet temperatūrai maijā divus gadus pirms pieauguma veidošanās novērota margināla korelācija.



4.4. attēls. Būtiskās korelācijas (būtstrapoti Pīrsona korelācijas koeficienti) starp meteoroloģiskajiem mainīgajiem un egles augstuma pieauguma atlikuma hronoloģiju. Nogriežņi parāda korelācijas koeficientu 95% ticamības intervālu. SPEI – sausuma indekss

Augstuma pieaugumu sēriju dendrohronoloģiskie rādītāji parādīja, ka analizētā datu kopa ir reprezentabla augstuma pieauguma ikgadējas mainības analīzei (Wigley et al., 1984). Lai arī augstuma pieauguma veidošanos ietekmē pēctecības efekti (Jansons et al., 2015; Lanner, 1976), tā autokorelācija bija mērena, bet vidējā jutība relatīvi augsta, norādot uz izteiktu jutību pret meteoroloģiskajiem apstākļiem (Jansons et al., 2015). Salīdzinot ar radiālo pieaugumu (Matisons et al., 2021), augstuma pieaugums, kas ir primārais produktivitātes indikators (Burton, 2012), ir jutīgāks pret vides mainību, norādot uz egles augšanas uzņemību pret vides mainību un tās pastiprināšanos klimata pārmaiņu kontekstā (Vitali et al., 2017). Līdz ar to augstuma pieauguma analīze ir komplementārs informācijas avots, kas var uzlabot pieauguma prognozes mainīga klimata apstākļos (Tyminska-Czabanska et al., 2021; Xu et al., 2019).

Pieauguma mainības korelācijas ar meteoroloģiskajiem mainīgajiem (4.4. attēls) norādīja, ka pieaugumu ietekmē apstākļu komplekss, līdzīgi, kā tas novērots radiālajam pieaugumam (Matisons et al., 2021; Harvey et al., 2020). Vairums no korelācijām saistītas ar meteoroloģiskajiem mainīgajiem, kas raksturo ūdens pieejamību vasarā, tādējādi uzsverot analizēto egļu augstuma pieauguma izteikto jutību pret sausumu (Tyminska-Czabanska et al., 2021; Matisons et al., 2021; Vitali et al., 2011), kas sekmē sugas areāla nobīdi ziemeļu virzienā, norādot uz dabisku sugas īpatsvara samazinājumu Baltijas jūras reģiona austrumu daļā (Buras and Menzel, 2019; Klisz et al., 2019). Līdz ar to adaptīvā mežsaimniecība ir priekšnoteikums egles klātbūtnei un audžu ilgtspējai reģionā. Pozitīvā korelācija ar nokrišņu daudzumu septembrī var tikt skaidrota ar augusta dzimumu augšanu un tās nodrošināto papildus augstuma pieaugumu gados ar novēlotu vai ilgāku augšanas/veģetācijas periodu (Katrevis et al., 2018).

Nemot vērā, ka pētītā mežaudze auga mērenā klimata apstākļos ar aukstu ziemu (Kottek et al., 2006), pieauguma korelācija (pozitīva) ar temperatūra martā (4.4. attēls) ir skaidrojama ar sala bojājumiem (Pearce, 2001) vai ar sakņu attīstību, kas ir atkarīga no augsnes temperatūras un nosaka ūdens uzņemšanu augšanas sezonas sākumā (Tierney et al., 2001). Tādējādi ziemas temperatūrai ir sagaidāma modulējoša ietekme uz egles jutību pret sausumu. Temperatūra augšanas sezonas beigās ietekmē veģetatīvo/ģeneratīvo aizmetņu/pumpuru veidošanos, kas savukārt ietekmē auga resursu pārdali pieauguma un sēklu veidošanai, kas ir īpaši raksturīgi sugām ar izteiktiem sēklu ražas gadiem (Hacket-Pain, et al., 2018; Lanner, 1976).

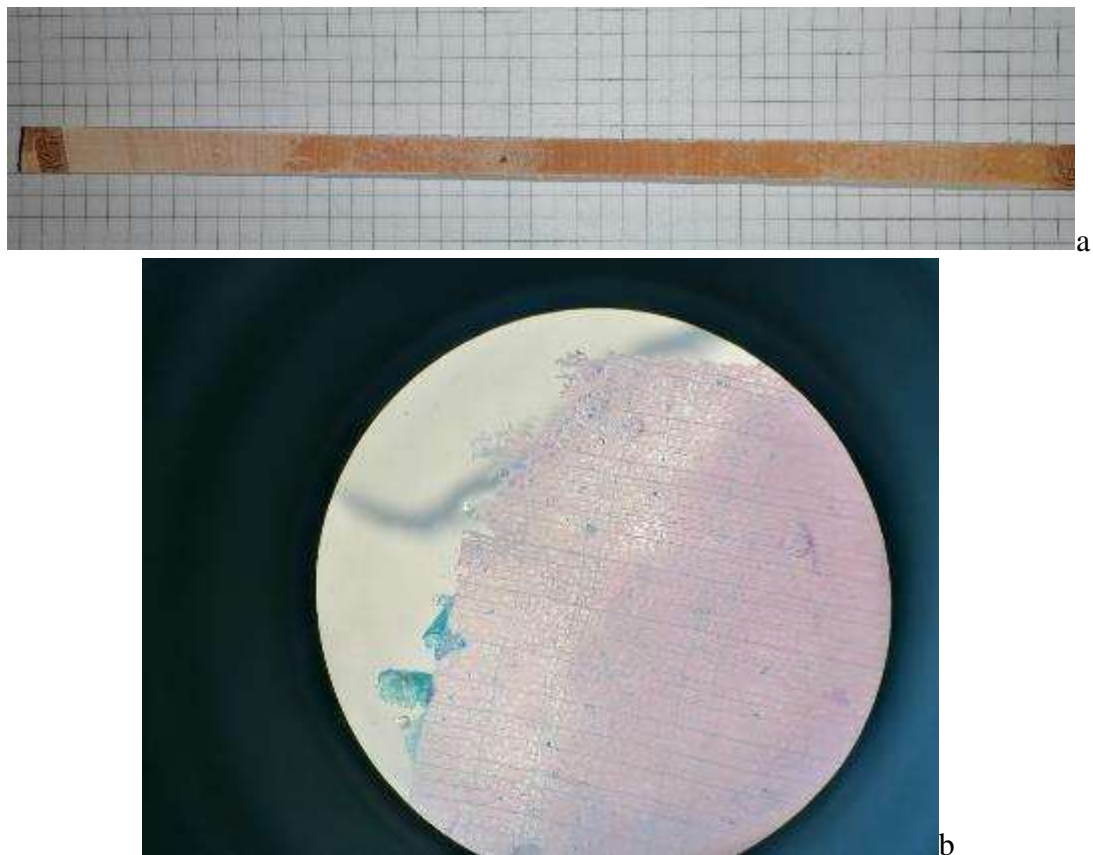
Paaugstināta temperatūra augšanas sezonas beigās sekmē ģeneratīvo aizmetņu veidošanos, veicinot sēklu, nevis pieauguma, veidošanos (Hacket-Pain et al., 2018), kas izskaidro negatīvo korelāciju ar iepriekšējā septembra temperatūru (4.4. attēls). Margināli būtisko korelāciju ar temperatūru maijā divus gadus pirms pieauguma veidošanās iespējams saistīt ar agrīnā pieauguma veidošanās dinamikas saikni ar augšanas aizmetņu attīstību un tā pēctecības efektiem (Jansons et al., 2016; Lanner, 1976).

Meteoroloģiskie faktori, kas uzrādīja būtiskas korelācijas ar egles augstuma pieaugumu (4.4. attēls) un radiālo pieaugumu (Matisons et al., 2021), kopumā ir līdzīgi. Tomēr augstuma pieauguma jutība ir augstāka, un tas parādīja izteiktāku pavasara temperatūras un vasaras sausuma ietekmi, norādot uz egles augšanas (produktivitātes) uzņemību pret sagaidāmajām klimata pārmaiņām (Hartmann et al., 2013) un apliecinot sagaidāmo izplatības samazinājumu reģionā (Buran and Menzel, 2019).

Pētījuma etapā veikta bērza augstuma pieauguma rekonstrukcijas iespēju testēšana un patērētā laika analīze šādām darbībām:

- 1) paraugdēļa novērtēšana, atrodod iespējamās pumpuru vietas;
- 2) gadskārtu skaitīšana:
 - a. gan tievgalī, gan resgalī ar rokas zāģi nozāģējot 15 mm platus šķērsriezuma paraugus (klucīšus);
 - b. iegūtos paraugus zāģējot un slīpējot – sagatavojot izmantošanai laboratorijā (4.5. attēls);
 - c. laboratorijā veicot parauga iekrāsošanu un gadskārtu skaitīšanu;

- 3) frēzēšana:
 - a. kontrolurbumu veikšana, lai noskaidrotu serdes dziļumu dēlī;
 - b. frēzēšanas rāmja uzstādīšana un frēzēšanas veikšana;
- 4) pieaugumu datēšana un uzmērīšana.



4.5. attēls. Analīzei laboratorijā sagatavotais bērza paraugs (a) un tā attēls mikroskopā pēc iekrāsošanas (b)

Pētījumā konstatēts

1. Bērza augstuma pieaugumu rekonstrukcija ir tehniski izpildāma, tai patērētais laiks aptuveni divas reizes ilgāks nekā eglei.
2. Bērza serdei ir izteikta krāsa – to var atšķirt no pārējās koksnes. Bērza serdes diametrs, salīdzinājumā ar egles serdi, ir izteikti mazāks, kā arī mainīgs.
3. Bērza serdei, salīdzinājumā ar egles serdi, ir izteikta līkumainība, līdz ar to jāmaina frēzēšanas dziļums. Lielākā līkumainība ir pirms un pēc pumpuru vietām, kur ir sācies nākamā gada pieaugums (4.6. attēls).
4. Par vietu, kur sākas nākamā gada pieaugums, tiek pieņemta zaru žakļu vieta. Atšķirībā no egles serdes, bērza serdei nav iespējams pieauguma noslēgumu noteikt pēc krāsas.
5. Rekomendējamās dimensijas ērtākai un efektīvākai paraugdēļu apstrādei ir: biezumā 70 mm un garumā 2500 mm.



4.6. attēls. Atsegta bērza serde ar redzamu galotnes pumpuru, kas indicē augstuma pieauguma noslēguma vietu.

Turpmākās pētījuma perspektīvas

Pētījuma turpinājumā egles augstuma pieauguma klimatisko risku pilnīgākai apzināšanai un mazināšanas iespēju izvērtējamam būtu vēlama jutības-produktivitātes saiknes raksturošana. Kā pakārtots uzdevums ir minama ģenētisko un vides faktoru ietekmes raksturošana uz pieauguma jutību. Lai arī primārā augšana un līdz ar to arī augstuma pieaugums ir salīdzinoši (ar radiālo pieaugumu) atkarīgs no audzes biezības/biezuma, esošais pētījuma materiāls, kas audzis ekstremāli zemas biezības audzē, var pilnībā nereprezentēt egles augstuma pieauguma jutību saimnieciskās audzēs. Tādēļ būtu vēlama pieauguma jutības raksturošana eglēm, kas augušas audzēs ar lielāku sākotnējo biezumu. Izveidotā pieauguma hronoloģija parādīja, ka jutība mainījās laikā, līdz ar to vecāku koku pieauguma rekonstrukcija, tādējādi palielinot datu kopā iekļauto koku vecuma spektru, būtu vēlama, lai noteiktu jutības izmaiņas, kokiem novecojot. Ņemot vērā, ka juvenīlajai augšanai var būt pēctecības ietekme uz pieauguma jutību, kas ir grūti kontrolējama liela datu apjoma nepieciešamības dēļ, it īpaši attiecībā pret augstuma pieaugumu, vēlama pieauguma analīze stādījumā ar zināmu vēsturi. Ņemot vērā līdzīgo primārā un sekundārā pieauguma jutību, kā papildus perspektīva ir juvenīlās augšanas pēctecības efektu novērtējums uz radiālā pieauguma jutību. Pieauguma jutības pret sausumu dēļ, kūdras augsnes, kam raksturīga augstāka spēja saglabāt ūdens potenciālu, ir uzskatāmas par piemērotākām egles audzēšanai nākotnē, līdz ar to vēlams veikt līdzīgu novērtējumu arī egles audzēs mežos ar organiskajām augsnēm.

Balstoties uz novērtētajām saistībām, būtu iespējams uzlabot augšanas gaitas modeļus, iekļaujot tajos galvenās meteoroloģiskās ietekmes, tādējādi uzlabojot to ilgtermiņa precizitāti. Izteiktajiem priekšlikumiem ir potenciāls nozīmīgi uzlabot izpratni par egles sagaidāmo pieaugumu Latvijas mežos mainīga klimata apstākļos, uzlabojot prognozēšanas iespējas.

Šajā pētījuma etapā faktiskā darbietilpība par 37% pārsniedza prognozēto. To savlaicīgi konstatējot, tika pārplānots eksperimenta dizains un darbi veikti tā, lai iegūtu datus arī par egles kloniem cita LVMI Silava realizēta pētījuma vajadzībām. Sagaidāms, ka nākamo etapu darbietilpība būs vēl augstāka, jo rekonstruējamas garākas pieaugumu rindas.

Secinājumi

Novērotās augstuma pieauguma ikgadējās mainības rādītāji un pieauguma un meteoroloģisko faktoru saistības norāda uz egles izteikto jutību pret sausumu, kā arī pavasara temperatūru, norādot uz kompleksi pieauguma kontroles mehānismiem. Izvirzītā hipotēze ir noraidīta, jo augstuma un radiālo pieaugumu ietekmējošie meteoroloģiski apstākļi ir salīdzināmi, proti, pieaugumus kompleksi ietekmē ziemas/pavasara temperatūra un vasaras sausums. Izteiktā pieauguma jutība pret meteoroloģiskajiem apstākļiem norāda uz augošiem klimatiskajiem riskiem, un līdz ar to uz pieaugošu nepieciešamību pēc adaptīvas mežsaimniecības. Novērotās pieauguma ikgadējas mainības atšķirības starp kokiem norāda uz vides un genotipa mijiedarbības ietekmi uz tā jutību, kas savukārt liecina par selekcijas potenciālu mazināt lokālo populāciju klimatiskos riskus (sausuma un salnu ietekmes intensificēšanās), veicot mērķētu mazāk uzņēmīgo genotipu atlasī.

5. Modeļteritorija kompleksiem ilgtermiņa novērojumiem par mežkopības ietekmi uz meža un ar to saistītajām ekosistēmām mežos ar auglīgām kūdras augsnēm

Pētījuma sadaļas kopējais mērķis ir ierīkota modeļteritorija, iegūstot Eiropas mērogā unikālus datus par meža masīva līmeņa siltumnīcefekta gāzu emisijām, kā arī kvantitatīvu informāciju kompleksas mežsaimniecisko pasākumu kopas īstermiņa ietekmes uz vidi (kā abiotiskos faktorus raksturojošajiem rādītājiem, tā kokiem un citiem organismiem) raksturošanai un pamatu ilgtermiņa datu ieguvei.

5.1. Meliorācijas sistēmu renovācijas ietekmes vērtējums

Saskaņā ar plānu pētījuma etapā ierīkoti 3 pētījuma objekti, lai uzsāktu meliorācijas sistēmu renovācijas ietekmes uz augsnes mitruma režīma izmaiņām detalizētu novērtējumu: MPS Kalsnavas MN 148. un 167. kvartālā, kur veikta sistēmas renovācija, kā arī 148. kvartālam blakus esošā līdzīga sastāva audzē, kur nav veikta meliorācijas sistēmas atjaunošana. Katrā no tiem dažādā attālumā no grāvjiem ierīkoti gruntsūdens dziļuma noteikšanas punkti (5), kā arī periodiski reizi 3 nedēļās) veikta ūdens paraugu ievākšana. Infrastruktūras ierīkošana veikta tajās platībās, kur nākotnē plānota gāzu analizatoru uzstādīšana, lai vienlaikus nodrošinātu iespējami detalizētus datus par siltumnīcefekta gāzu emisiju ietekmējošo parametru stāvokli pirms šo analizatoru uzstādīšanas, kā arī, turpinot monitoringu – pēc uzstādīšanas un pēc veiktās saimnieciskās darbības. Ūdens paraugu ievākšana tiks turpināta arī nākamajā sezonā, pārējie lauku darbi noslēgti. Datu laboratoriskā apstrāde notiek un rezultāti, saskaņā ar plānu, tiks analizēti nākamajos pārskata periodos, kad būs iespējams salīdzināt vairākas novērojumu sezonas.

5.2. Liela mēroga saimnieciskās darbības ietekmes uz mežu ar meliorētām augsnēm ekosistēmu raksturojumu.

Sagatavota metodiskā pieeja plānotajiem darbiem modeļteritorijā liela mēroga saimnieciskās darbības ietekmes uz mežu ar meliorētām augsnēm ekosistēmas un meža masīva mēroga SEG gāzu apmaiņas kompleksai raksturošanai.

Organiskās augsnes ir nozīmīgs zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektora siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju avots mērenās klimata joslas reģionos Eiropā. Lai iegūtu precīzus datus par oglekļa bilanci par vecām audzēm mežos ar organiskajām augsnēm, nepieciešami dati ne tikai par laikā fiksētu oglekļa uzkrājumu, bet arī par augsnes oglekļa (SEG emisiju) bilanci no kūdras augsnēm, kas tiek uzskatīta par nozīmīgu SEG emisijas avotu (Lupiķis & Lazdiņš 2017; Bārdule et al. 2021a).

Audzēs kūdreņos ir ļoti ražīgas, tādēļ ir saimnieciski nozīmīgas. Meliorācijas sistēmas izveide Latvijā vairumā gadījumu veikta 1960.-1970. gados, audzes šo sistēmu ietekmētās teritorijās šobrīd ir sasniegušas vai drīzumā sasniegs galvenās cirtes vecumu – tiks veiktas atjaunošanas cirtes. Tāpat tiek veikta meliorācijas sistēmu rekonstrukcija. Minētie pasākumi noteikti ietekmēs meža platību kopējos siltumnīcefekta gāzu bilances rādītājus, kā arī pavērs iespējas, koku paaudžu nomaiņā veidot nākotnes klimatam piemērotākus saimnieciskos mežus. Tāpēc ir svarīgi novērtēt meliorācijas efekta ietekmi uz SEG emisijām no augsnes (t.sk. zemsedzes veģetācijas). Svarīgi noskaidrot, kā veicināt SEG piesaisti un mazināt emisijas ilgtermiņā ar mežsaimnieciskām darbībām, piemēram, meliorācijas sistēmu renovāciju vai aprītes cikla ilguma maiņu, lai iegūtu labāko iespējamo pozitīvo rezultātu. Plašākā mērogā pētījumu dati/rezultāti par šiem aspektiem nav publicēti, tāpēc LVMI Silava šobrīd tiek iegūti

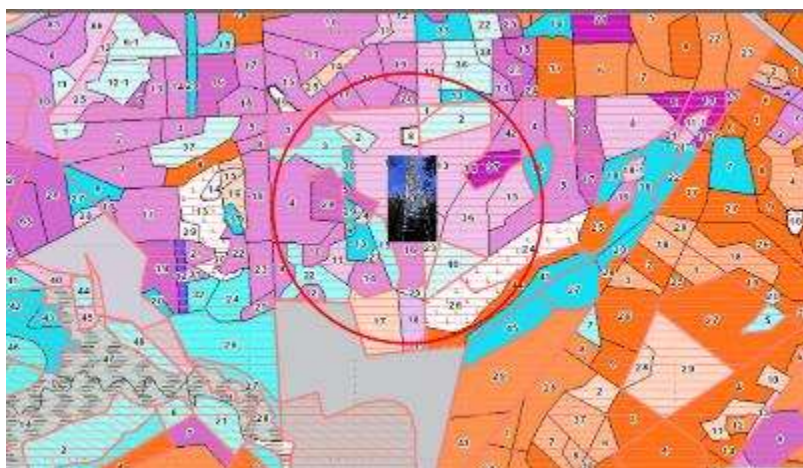
SEG dati vecās audzēs un iepriekš iegūti dati par SEG bilanci vidēja vecuma audzēs, taču mežaudžu sukcesijas sākuma posmā (jaunaudžu vecumā) datu trūkst.

Pētījumā MPS Kalsnavas meža novadā plānots izveidot modeļteritoriju. Teritorija sastāvēs no 2 līdzīgiem poligoniem, kur abos valdošā suga ir egle, un lielāko daļu platības aizņem šaurlapju kūdrenis:

- 1) kontroles – meliorācijas sistēma atjaunota 2016. gadā: Vesetnieki (5.1.att.);
- 2) ietekmes – meliorācijas sistēma rekonstruēta 2020. gada otrajā pusē; pēc *Eddy covariance* iekārtu uzstādīšanas un pēc kontroles (references) perioda tajā plānota vienlaidus atjaunošanas cirte lielā daļā platības un secīga mežaudzes atjaunošana, stādot egles klonus: Kandavu lauki (5.2. att.).

Papildus mērījumi tiks veikti blakus teritorijā ar nerekonstruētu meliorācijas sistēmu.

Modeļteritorijas izvietojums MPS Kalsnavas MN nodrošinās bāzi infrastruktūras izveidei un uzturēšanai, kā arī iespējas pētījuma vajadzībām plānot un pielāgot veicamos mežsaimnieciskos pasākumus. Konkrētā teritorija izvēlēta arī tādēļ, ka ir pieejama precīza informācija par meliorācijas sistēmas izveidi tajā, kā arī ilgtermiņa tās darbību raksturojoši dati (novērojumu sērijas) un atsevišķu ar konkrētiem meža koku augšanas aspektiem saistītu datu kopas, kas iegūtas tās ietvaros. Plānotais darbu izpildes grafiks modeļteritorijā atkarīgs no tehniskajām iespējām uzbūvēt torņus un izvietot *Eddy covariance* sistēmu. Tāpat plāna izmaiņas rada egles audžu sanitārais stāvoklis, kura dēļ daļā masīva sanitārās vienlaidus cirtes vajadzēja ieplānot jau 2022. gadā.



5.1. attēls. Vesetnieku modeļteritorija



5.2. attēls. Kandavu lauku modeļteritorija

Abu teritoriju centros paredzētas vides monitoringa stacijas, kas izvietotas uz vismaz 39m augstas pašstāvošas metāla konstrukcijas torņa. Katra monitoringa stacijā nepārtraukti mērījumus veiks ar šādiem sensoriem:

- ultraskaņas anemometrs, gaisa plūsmas virziena noteikšanai;
- gāzu analizators, kas vienlaicīgi mēra CO₂; H₂O; CH₄, mērīšanas ātrums $\geq 10\text{Hz}$, nodrošinot augstu precizitāti un atkārtotamību;
- meteostacija un nokrišņu mērītājs;
- neto radiometrs;
- PAR sensors;
- Saules radiācijas sensors;
- augsnes siltuma plūsmas sensori;
- augsnes mitruma sensors;
- datu uzkrāšanas sistēma ar paplašinājuma iespējām pieslēgt esošajai sistēmai papildus sensorus vai uzkrāt to mērījumus.

Papildus teritorijās tiks izvietot parauglaukumi (transekti) detalizētiem mērījumiem. Parauglaukumu (PL) dizains izstrādāts tā, lai iegūtie rezultāti būtu tieši salīdzināmi ar citos pētījumos, raksturojot atšķirīgas augsnes un/vai meža sukcesijas stadijas, iegūtajiem datiem, tādējādi radot iespējami lielāko zināšanu pieenesi.

SEG emisiju mērījumu vietas objektā plānots izvietot transektēs perpendikulāri meliorācijas grāvjiem dažādos attālumos no grāvja, pētot dažādu grāvju stāvokli (nerenovēts, renovēts pirms 6 gadiem, renovēts pirms gada) ietekmi uz SEG bilanci. Pētāmos objektus plānots ierīkot izcirtumā, kas atjaunots transektēs ar selekcionētiem egles kloniem un/vai parcelēs ar selekcionētiem bērza kloniem, un salīdzinājumā ar kontroles audzēm - egles un bērza audzes vidēji 40 gadu vecumā.

Mežaudzēs (kur tās tiks saglabātas) tiks ierīkoti parauglaukumi, kur uzmērīs kokaugli oglekļa (C) uzkrājuma noteikšanai, kā arī veiks augsnes SEG monitoringu – fiksējot kopējo CO₂, CH₄ un N₂O gāzu plūsmu no augsnes, kā arī heterotrofo (CO₂, CH₄) augsnes elpošanu. SEG monitoringa veikšana un rezultātu interpretācijai nepieciešams ievākt papildus vides parametrus – nobiru daudzumu (lapas, skuju, sīkie zari u.c.), fiksēt gruntsūdens līmeni, gruntsūdens pH un konduktivitāti, kā arī augsnes mitrumu un temperatūru dažādos dziļumos. Lai raksturotu augsnes temperatūras un gruntsūdens līmeņa svārstību ietekmi uz SEG plūsmām, jau ziemas sezonā un turpmāk visas veģetācijas sezonas garumā plānots veikt nepārtrauktu augsnes temperatūras monitoringu (10 un 40 cm dziļumā) un gruntsūdens līmeņa monitoringu. Veģetācijas sezonas kulminācijā (jūlijs, augusts) plānots ievākt lapu laukuma indeksa parametrus visos parauglaukumos. Vasarā plānots noteikt arī veģetācijas procentuālo segumu visos parauglaukumos.

Augsnes oglekļa uzkrājuma raksturošanai visos PL tiks ievākti augsnes paraugi 5 dziļumos (0-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-50 cm), tos nododot LVMI Silava Meža vides laboratorijā turpmākai apstrādei un analīzei. Lai raksturotu zemsedzes oglekļa uzkrājumu, veģetācijas sezonā plānots ievākt arī zemsedzes virszemes paraugus kopējai zemsedzes biomasas noteikšanai. Sūnu biomasas noteikšanai katrā PL pirms veģetācijas sezonas sākuma izvietoti 5 sūnu biomasas sieti.

Sīko sakņu biomasas noteikšanai no Igaunijas zinātniekiem iegūta informācija par sīko sakņu paraugu iegūšanu un tālāku apstrādi (Aun et al., 2021). Sīko sakņu augsnes paraugus (10 paraugi katrā PL no 10 – 40cm dziļumam) plānots ievākt pirms aktīvās veģetācijas sezonas (aprīlī, maijā), veģetācijas sezonas kulminācijā (augustā) un pēc aktīvās veģetācijas sezonas beigām (oktobrī). Kontroles paraugi tiks ievākti nākamajā pavasarī – maijā, lai konstatētu sadalīšanās dinamiku ziemas periodā un varētu novērtēt sīko sakņu produktivitāti. Iegūtie sīko sakņu paraugi laboratorijā tiks mazgāti, šķiroti, žāvēti un svērti, lai noteiktu to biomasu un oglekļa uzkrājumu.

Parauglaukumu ierīkošanas shēma un empīriskā materiāla ievākšana

Parauglaukumu transektes tiks izvietotas iespējami vienmērīgos apstākļos, perpendikulāri grāvjiem. Pirmais parauglaukums atrodas tieši pie meliorācijas grāvja, bet katrs nākamais parauglaukums izvietots vienādā attālumā no iepriekšējā tā, lai pēdējais parauglaukums atrodas audzes vidū.

5.1. Heterotrofā elpošana – CO_2 un CH_4

Katrā PL nodrošināti heterotrofi apstākļi: bez zemsedzes, ar zemsegu, apzāģētas saknes, ievietots ģeotekstils, lai ierobežotu sakņu augšanu. Sagatavotajās vietās augsnē ievieto 3 kolarus (caurules, kas paredzētas konkrētas uzmērāmās daļas nodalīšanai, lai tehniski būtu izpildāms emisiju uzmērīšanas darbs, $D=20$ cm) līdzīgos attālumos (~ 30 - 40 cm) vienu no otra (5.3. attēls). Kolarus noblīvē ar augsni gar malām, lai tie nekustas un nenotiek gāzu apmaiņa. Kopā objektā plānots izvietot 3PL - 9 kolarus.



5.3. attēls. Heterotrofās elpošanas parauglaukumu ierīkošana

Ar tumšajiem kambariem tiks mērīta CO_2 un CH_4 gāzu apmaiņa ar augsni - lai noteiktu, vai augsne siltumnīcefekta gāzes piesaista (*GHG sink*) vai emitē atmosfērā (*GHG source*) un cik lielā apjomā. Tumšo kambaru metode jau iepriekš tikusi izmantota CO_2 un CH_4 pētījumos par augsni (Zhu et al. 2020; Villa et al. 2020). CO_2 koncentrācija tiks noteikta, izmantojot *Vaisala Oyj* gāzu analizatoru (5.4. attēls), temperatūras un mitruma sensoru, kas savienots ar tumšo kambari un datu analizatoru (Zhu et al. 2020). Mērījuma ilgums 5 minūtes ar 5 sekunžu intervālu starp mērījumiem. CO_2/CH_4 mērījums tiks veikts, izmantojot pārnēsājamu gāzu analizatoru (spektroskopu) *Picarro* (5.6. att.), kas arī savienots ar tumšo kambari (Villa et al. 2020). Mērījuma ilgums 5 minūtes ar 2 sekunžu intervālu.



5.4. attēls. Vaisala CO₂ gāzu analizators ar tumšo kambari

5.2. Kopējā elpošana – CO₂, CH₄, N₂O

Netraumējot veģetāciju, augsnē tiks ievietoti kolari (D=20 cm) līdzīgos attālumos (~30-40 cm) vienu no otra. Kolari tiks noblīvēti ar augsni gar malām, lai tie nekustas, nenotiek gāzu apmaiņa. Katrā PL izvietos 3 kolarus – kopā objektā plānots izvietot 9 kolarus.

CO₂/CH₄ mērījums kopējās elpošanas noteikšanai tiks veikts, izmantojot pārnēsājamu gāzu analizatoru (spektroskopu) *Picarro* (Gas Scouter G4301, Picarro, Santa Clara, CA), kas savienots ar tumšu/necaurspīdīgu kambari (5.5. attēls) (Villa et al. 2020).

C (ogleklis) un N (slāpeklis) ir cieši saistīti savā starpā dažādos organiskos savienojumos un to var izteikt kā C:N attiecību, tāpēc, lai veicinātu C akumulāciju, ir nepieciešama N pieejamība un uzkrāšanās (Zhang et al., 2018). Augsnē slāpeklis visbiežāk atrodams gāzveida N₂O savienojumos, turklāt tā ir ļoti spēcīga siltumnīcefekta gāze, tāpēc pētījumā N₂O mērījumiem tiks izmantots gāzu hromatogrāfs, kur ievāktie paraugi tiks nogādāti LVMI Silava laboratorijā tālākai gāzu koncentrācijas analīzei.



5.5. attēls. Picarro CO₂, CH₄ gāzu analizators ar tumšo kambari

5.3. Gruntsūdens līmeņa noteikšana, paraugu ņemšana

Katrā parauglaukumā tiks ierīkotas 2 gruntsūdens akas – vienu paraugu ņemšanai, otru automātiskai līmeņa mērīšanai (5.6. attēls). Līmeņa akā plānots izvietot automātisku gruntsūdens līmeņa sensoru, lai spētu analizēt gruntsūdens svārstību ietekmi uz gāzu emisijām (*lag effect*). Kopā objektā plānots ierīkot 3 līmeņa un 3 paraugu ņemšanas akas.



5.6. attēls. Gruntsūdens akas

5.4. Augšnes temperatūras mērīšana

Augšnes temperatūras mērījumiem, katrā parauglaukumā augsnē tiks ievietoti augsnes temperatūras stieņi, uz kuriem izvietoti sensori divos dziļumos (10 un 40 cm). Papildus katru reizi, veicot mērījumus, tiks nolasīta augsnes temperatūra un augsnes mitrums. Kopā objektā plānots izvietot 3 temperatūras stieņus.

5.5. Nobiru uztvērēji

Katrā PL tiks uzstādīti 2 nobiru uztvērēji – kopā objektā 6 uztvērējus (5.7. attēls). Nobiru uztvērējus novietos vietās, kas nav tieši zem koku vainagiem vai klajumos. Uztvērējā visu veģētācijas sezonu tiks vāktas lapas, skuju, sīkie zariņi, mizas gabali un citas nobiras, kas nonāks uztvērējā. Katru reizi, kad tiks mērītas SEG, nobiru maisiņi tiks samainīti un nogādāti laboratorijā.

Gadījumos, kad koku augstums ($<1.3\text{m}$) nepieļauj efektīvu nobiru uztvērēju izmantošanu, tiks izveidoti zemie nobiru uztvērēji, kas novietoti uz zemes virsas



5.7. attēls. Nobiru uztvērējs

5.6. Sūnu biomasas rāmji

Lai fiksētu sūnu biomasas produktivitāti, katrā parauglaukumā tiks izvietoti 5 sūnu sieti. kuros nākamajā veģētācijas sezonā tiks mērīts biomasas pieaugums, lai noteiktu oglekļa bilanci sūnu biomasā. Izvietojot rāmjus, tiks meklētas daudzveidīgas sūnu sugas, lai raksturotu dažādu sūnu biomasas veidošanos. Katrā objektā plānots izvietot 15 sūnu rāmjus.

5.7. Zemsedzes biomasas

Lai noteiktu zemsedzes biomasu un oglekļu uzkrājumu, veģētācijas sezonas kulminācijā, tiks ievākti zemsedzes paraugi – gan virszemes, gan pazemes daļas (5.8. attēls). Laboratorijā plānots atdalīt pazemes biomasu (zemsedzes saknes) no koku saknēm un pēc tam noteikta biomasu. Katrā PL tiks iegūti 4 paraugi, objektā kopā plānots ievākt 12 paraugus.



5.8. attēls. Zemsedzes biomasas paraugu ievākšana

5.8. Sīko sakņu biomasa

Lai novērtētu sīko sakņu biomasu un tās produktivitātes aprēķināšanai, četras reizes plānots ievākt sīko sakņu paraugus – pirms aktīvas veģetācijas sezonas sākuma – aprīlis/maijs; veģetācijas sezonas vidū – jūlijs/augusts; veģetācijas sezonas beigās – oktobris un cikla noslēgšanai pirms nākamās veģetācijas sezonas sākuma – aprīlis/maijs nākamajā gadā. Katrā PL plānots ievākt 10 paraugus (katrs paraugs sadalīts četros dziļumos – 0-10; 10-20; 20-30; 30-40 cm). Kopā objektā plānots ievākt 30 paraugus četros dziļumos – kopā ap 120 biomasas paraugiem tālākai apstrādei laboratorijā (5.9. attēls).



5.9. attēls. Sīko sakņu biomasas paraugu ievākšana

5.9. Augsnes paraugi un zemsega

Paralēli gāzu monitoringam, veģetācijas sezonā plānots ievākt arī augsnes paraugus un zemsegas paraugus oglekļa uzkrājuma aprēķināšanai 5 dziļumos – 0-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-50 cm. Katrā PL plānots ievākt augsnes paraugus divos atkārtojumos, lai samazinātu kļūdu iespēju un palielinātu datu apjomu. Tāpat katrā augsnes paraugu ņemšanas vietā tiks ņemti zemsegas paraugi, kas tālāk LVMI Silava laboratorijā tiks izanalizēti, lai noteiktu oglekļa koncentrācijas un iegūtos datus varēs izmantot oglekļa uzkrājuma aprēķināšanā.

5.10. Lapu laukuma indekss

Lapu laukuma indekss ($\text{m}^2 \times \text{m}^{-2}$) ir augu asimilācijas virsmas laukuma attiecība pret kopējo veģetācijas noklāto laukuma vienību, kas netieši raksturo veģetācijas (šajā gadījumā koku) produktivitātes potenciālu un veselības stāvokli (Pokorný & Stojnič, 2012). Lai noteiktu fotosintētisko aktivitāti mežaudzē, tiks veikti lapu laukuma indeksa (LLI) mērījumi veģetācijas sezonas kulminācijā – jūlijā, augustā, izmantojot LI-COR mērierīci LAI-2200C (5.10. attēls). Katrā PL tiks ņemti 16 mērījuma punkti - 4 rindās 4 punkti, nokļājot visu PL platību. LAI mērījumi tiks veikti tikai kontroles audzēs (40 gadus vecas audzes), jo izcirtumā gaismas apstākļi būs 100%. Lai iegūtu objektīvus mērījumus, kontroles audzes mērījumi tiks veikti vienlaicīgi ar mērījumiem klajumā, lai salīdzinātu gaismas apstākļus.



5.10. attēls. Lapu laukuma indeksa noteikšana

Iegūtie mērījumi tiks integrēti FV2020 datorprogrammā un aprēķinātas LLI vidējās vērtības \pm standartkļūda katram parauglaukumam. Visas LLI vērtības pārrēķinātas, izslēdzot sensora ārējā gredzena mērījumus (53° un 68°), lai mazinātu kļūdas (lai nepārvērtētu LLI vērtības), kas varētu rasties blakusesošu izcirtumu, lielāku klajumu un stumbru dēļ (Pokorný & Stojnič, 2012).

5.11. Papildus mērījumi

Atsevišķos PL vai transektēs papildus datu ievākšanai, tiks izvietoti:

- sulu plūsmas sensori, tās izmaiņas un dinamika atkarībā no meteoroloģiskajiem un augsnes apstākļiem (t.sk. sasaluma) raksturošanai, indicējot koku vitalitāti, atbildes reakcijai uz vides izmaiņām (arī $G \times E$ kontekstā), saikni ar bojājumiem (sala, sausuma plaisas) ;

- dendrometri augšanas intensitātes sezonas ietvaros analīzei, lai raksturotu koka pieauguma veidošanās atkarību no vides parametriem; šādai pašai funkcijai papildus tiks izvietotas fenokameras;

- ūdens līmeņa monitoringa sensori gruntsūdens depresijas līknes (pirms / pēc lielas meliorācijas sistēmas rekonstrukcija, liela mēroga mežistrādes) datu ieguvei, papildus tiem, kas jau tiks ierīkoti iepriekš definēto parauglaukumu ietvaros;

- gaisa un augsnes temperatūras un mitruma sensori, augsnes elektrokonduktivitātes sensori, lokālu meteoroloģisku apstākļu fiksēšanai un augsnes sasalumu mežā ietekmējošo faktoru, evapotranspirāciju raksturojošo modeļu izstrādei un/vai pilnveidošanai;

- minirizotroni koku sakņu attīstības dinamikas, reakcija uz meteoroloģiskajiem apstākļiem, raksturošanai.

Šo instrumentu izvietošana būs atkarīga no to pieejamības LVMI Silava. . Daļa no tiem ir iegādāti un uzstādīšana plānota jau 2022. gada veģetācijas sezonā (tajās platībās, kur nav paredzēta mežizstrāde vai kur tā būs jau pabeigta).

Ievāktu paraugu tālākā apstrāde

Ievāktu paraugu (nobiras, augsnes paraugi un ūdens paraugi) tālākā apstrāde notiek LVMI Silava Meža vides laboratorijā, kas ir akreditēta pēc ISO 17025:2017 standarta.

Augsnes paraugi sagatavoti un analizēti, vadoties pēc LVS ISO 10694 (2005) standarta.

Nobiru paraugi laboratorijas apstākļos tiks izžāvēti un nosvērti, lai novērtētu biomasas daudzumu. Kopējais oglekļa daudzums nobirās tiek analizēts ar LECO-CR-12 oglekļa analizatoru (LECO Corporation, 1987).

Ūdens paraugiem laboratorijā tiks noteikti pH, konduktivitāte un ķīmiskais sastāvs

Visi iegūtie sīko sakņu paraugi tiek nogādāti uz laboratoriju (5.11. attēls), kur plānots paraugus mazgāt, attīrot saknes no augsnes, un šķirot pa frakcijām (koku saknes – dzīvās un atmirušās, lakstaugi, krūmi) (Ostonen et al., 2005). Sašķirotie paraugi tiek žāvēti 70°C līdz konstantam svaram un nosvērti. No iegūtajiem rezultātiem tiks aprēķināta sīko sakņu biomasa un noteikts oglekļa daudzums sīkajās saknēs.



5.11. attēls. Sīko sakņu paraugu apstrāde laboratorijā

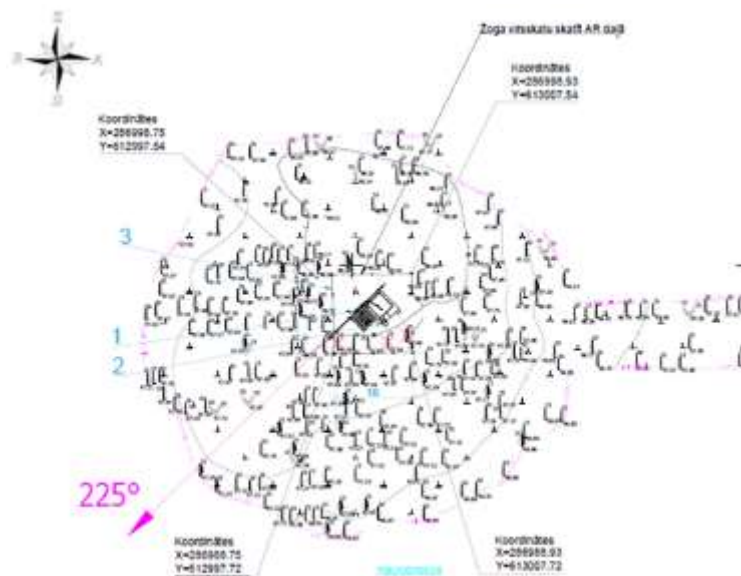
Pētījuma rezultātā iegūtie dati par organisko augšņu attīstību pēc hidrotehniskās meliorācijas sistēmas rekonstrukcijas un pēc mežsaimniecisko darbību veikšanas būs unikāli gan Latvijas, gan Eiropas mērogā, kā arī salīdzināmi ar citu valstu SEG mērījumiem plašākas izpratnes iegūšanai. Būtiski, ka tiks iegūti ilgtermiņa nepārtraukti dati par SEG bilanci saimnieciskos mežos ar organiskām augsnēm dažādu faktoru ietekmē, kā arī iespēja noteikt kopējo uzkrāto oglekļa apjomu mežaudzē un atsevišķās tās daļās (koku biomasā, zemsedzes biomasā, augsnē, sīko sakņu biomasā u.c.).

Pētījuma gaitā plānota datu sagatavošana ar mērķi integrēties starptautiskajās sistēmās – piemēram, SMEAR Network, PEEEX un AKTRIS, lai pilnvērtīgāk raksturotu SEG bilanci Eiropā. Šajās sistēmās līdz šim nav novērojumi, kas būtu iegūti no mežiem ar dziļām organiskām, meliorētām augsnēm. Papildus tas sniegtu iespēju iegūtos datus salīdzināt ar citām modeļteritorijām, piemēram, ar lielām atmežotām teritorijām pēc vējgāzes (Polija) vai ugunsgrēka (Polija). Tiks iegūta sākotnējā informācija par SEG bilanci to inventarizācijas vajadzībām, kā arī mežsaimniecības plānošanai (g.k. salīdzinot starp iecerētās modeļteritorijas poligoniem, kā arī ar sadarbības partneru rezultātiem), ierīkojot bāzi daudzpusīgāku rezultātu iegūšanai nākotnē.

Pētījumā plānots nodrošināt arī informācijas ieguvu par meža selekcijas programmas ietekmi, veicot klonu atlasī mežaudžu ražības kāpināšanai nākotnē, ņemot vērā nākotnes prognozes par liela mēroga traucējumu un mežaudžu jutību pret vides faktoriem klimata pārmaiņu rezultātā. Šāda bāze ir svarīga, lai analizētu klonu atšķirības kokaudžu reakcijā uz mitruma režīmu, meteoroloģiskajiem faktoriem – sakņu sistēmas attīstību un vitalitāti. Iegūtie dati, uzmērot daudzus vides parametrus, būs izmantojami, lai veiktu detalizētu analīzi par biotisko faktoru kompleksa radītiem bojājumiem, kas ietekmē koksnes pieaugumu un koku noturību, kā arī meža selekcijas un mežkopības iespējām šo faktoru ietekmi mazināt. Tāpat tiks iegūti dati par augsnes sasalumu un evoapotranspirāciju, kas nozīmīgi meža un mežsaimniecības adaptācijas kontekstā. Iegūto datu kopa būs nozīmīga, radot risinājumus klimata viedajai mežsaimniecībai.

5.3. Pētījuma objekti meža masīva mēroga SEG gāzu apmaiņas raksturojumam

Saskaņā ar plānoto šajā pētījuma etapā nodrošināts metodiskais atbalsts MPS, projektējot un plānojot nepieciešamo infrastruktūru (5.12. attēls), tās izvietojumu, kā arī apkārtējās mežaudzēs veicamos darbus, lai nodrošinātu vispārīgāmu un kvalitatīvu rezultātu iegūšanu nākotnē.



5.12. attēls. Siltumnīcefekta gāzu mērījumiem ar *Eddy-covariance* sistēmu paredzētā torņa un iekārtu izvietojums MPS Kasnavas MN: fragments no projekta

Izmantotā literatūra

1. Ayres, M.P., Lombardero, M.J. (2000). Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *Science of The Total Environment*, 262: 263–286.
2. Anderegg, W.R., Hicke, J.A., Fisher, R.A., et al. (2015). Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist*, 208: 674–683.
3. Aun, K., Kukumägi, M., Varik, M., Becker, H., Aosaar, J., Uri, M., Buth, M., Uri, V. (2021). Short-term effect of thinning on the carbon budget of young and middle-aged silver birch (*Betula pendula* Roth) stands. *Forest Ecology and Management*, 480: 118660 DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118660.
4. Avotniece, Z., Aņiskeviča, S., Maļinovskis, E. (2017) Klimata pārmaiņu scenāriji Latvijai. Rīga: VSIA “Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs”, 236 lpp.
5. Bale, J.S., Masters, G.J., Hodkinson, I.D., et al. (2002). Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8: 1-16.
6. Bārdule, A., Liepiņš, J., Liepiņš, K., Stola, J., Bulters, A., Lazdiņš, A. (2021b). Variation in carbon content among the major tree species in hemiboreal forests in Latvia. *Forests*, 12: 1292. DOI: 10.3390/f12091292.
7. Bārdule, A., Butlers, A., Lazdiņš, A., Līcīte, I., Zvirbulis, U., Putniņš, R., Jansons, A., Adamovičs, A., Razsma, Ģ. (2021a). Evaluation of soil organic layers thickness and soil organic carbon stock in hemiboreal forests in Latvia. *Forests*, 12: 840. DOI: 10.1111/sum.12734.
8. Bianchi, E., Bugmann, H., Bigler, C. (2021). Light availability predicts mortality probability of conifer saplings in Swiss mountain forests better than radial growth and tree size. *Forest Ecology and Management*, 479: 118607. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118607>.
9. Braun-Blanquet, J. (1964). *Pflanzensoziologie, Grundzüge der Vegetationskunde*. 3rd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 631.
10. Bunn, A.G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26: 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>.
11. Buras, A., Menzel, A. (2019). Projecting tree species composition changes of European forests for 2061–2090 under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. *Frontiers in Plant Science*, 9: N1986. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01986>.
12. Burton L. (2012). *Introduction to Forestry Science*, 3rd edition. Cengage Learning, New York. 554 p.
13. Cao, J., et al., (2021). High forest stand density exacerbates growth decline of conifers driven by warming but not broad-leaved trees in temperate mixed forest in northeast Asia. *Science of The Total Environment*, 795: 148875.
14. Chauvin, T., Cochard, H., Segura, V., Rozenberg, P. (2019). Native-source climate determines the Douglas-fir potential of adaptation to drought. *Forest Ecology and Management*, 444: 9-20.
15. Cook, E.R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47: 37-59.
16. Covarrubias-Pazaran, G. (2016). Genome-assisted prediction of quantitative traits using the R package sommer. *PloS one*, 11(6): e0156744.
17. Demarez, V. (1999). Seasonal variation of leaf chlorophyll content of a temperate forest. Inversion of the PROSPECT model. *International Journal of Remote Sensing*, 879-894.
18. Detter, A., Richter, K., Rust, C., Rust, S. (2015). Aktuelle Untersuchungen zum Primärversagen von grünem Holz—Current studies on primary failure in green wood. In: Dujesiefken, D. (ed.). *Jahrbuch der Baumpflege*. p. 156–167.

19. Detter, A., Rust, S. (2013). Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. In: Dujesiefken, D. (ed.). *Jahrbuch der Baumpflege*. p. 87-100.
20. Detter, A., van Wassenae P. J., Rust S. (2019). Stability Recovery in London Plane Trees Eight Years After Primary Anchorage Failure. *Arboriculture & Urban Forestry*, 45(6): 279–288.
21. Dierschke, H. (1994). *Pflanzensoziologie*. Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer, p. 683.
22. Ekholm, A., Tack, A. J., Pulkkinen, P., Roslin, T. (2019). Host plant phenology, insect outbreaks and herbivore communities – The importance of timing. *Journal of Animal Ecology*, 89: 829–841.
23. Falconer, D.S., Mackay, T.F.C. (1996). *Introduction to Quantitative Genetics*, 4th ed.; Longmans Green: Harlow, UK, p. 480.
24. FAO (2011). *Abiotic Disturbances and Their Influence on Forest Health*. By B. Moore and G. Allard. Forest Health and Biosecurity Working Paper FBS/35E. Rome, Italy.
25. FOREST EUROPE (2015). *State of Europe's forests*. 2015.
26. Frejaville, T., Vizcaíno-Palomar, N., Fady, B., Kremer, A., Benito Garzón, M. (2020). Range margin populations show high climate adaptation lags in European trees. *Global Change Biology*, 26(2): 484-495. <https://doi.org/10.1111/gcb.14881>
27. Furlong, M.J., Zalucki, M.P. (2017). Climate change and biological control: the consequences of increasing temperatures on host–parasitoid interactions. *Current Opinion in Insect Science*, 20: 39–44.
28. Gardiner, B. (2021). Wind damage to forests and trees: a review with an emphasis on planted and managed forests, *Journal of Forest Research*, 26(4): 248-266.
29. Gely, C., Laurance, S.G.W., Stork, N.E. (2019). How do herbivorous insects respond to drought stress in trees? *Biological Reviews*, 95: 434–448.
30. Gregow H., Laaksonen A., Alper M.E. (2017). Increasing large scale windstorm damage in Western, Central and Northern European forests, 1951–2010. *Scientific Reports*, 7: 46397.
31. Grime, J.P. (2001). *Plant strategies, vegetation processes and ecosystem properties*. Chichester: Wiley, p. 456.
32. Gutbrodt, B., Mody, K., Dorn, S. (2011). Drought changes plant chemistry and causes contrasting responses in lepidopteran herbivores. *Oikos*, 120: 1732–1740.
33. Hacket-Pain, A.J., et al., (2018). Climatically controlled reproduction drives interannual growth variability in a temperate tree species. *Ecology Letters*, 21: 1833–1844. <https://doi.org/10.1111/ele.13158>.
34. Hayatgheibi, H., Haapanen, M., Lundströmer, J., Berlin, M., Kärkkäinen, K., Helmersson, A. (2021). The Impact of Drought Stress on the Height Growth of Young Norway Spruce Full-Sib and Half-Sib Clonal Trials in Sweden and Finland. *Forests*, 12(4): 498. <https://doi.org/10.3390/f12040498>
35. Haynes, K.J., Allstadt, A.J., Klimetzek, D. (2014). Forest defoliator outbreaks under climate change: effects on the frequency and severity of outbreaks of five pine insect pests. *Global Change Biology*, 20: 2004–2018.
36. Hance, T., van Baaren, J., Vernon, P., Boivin, G. (2007). Impact of extreme temperatures on parasitoids in a climate change perspective. *Annual Review of Entomology*, 52: 107–126.
37. Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P., Lister, D., (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data* 7: 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.

38. Hartmann, D.L. et al. (2013). Observations: Atmosphere and surface. In *Climate Change the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2013; Volume 9781107057999, pp. 159–254, ISBN 9781107415324. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.008>.
39. Harvey, J., et al., (2020). Tree growth influenced by warming winter climate and summer moisture availability in northern temperate forests. *Global Change Biology*, 26: 2505–2518. <https://doi.org/10.1111/gcb.14966>.
40. Hill, J.K., Thomas, C.D., Fox, R., Telfer, M.G., Willis, S.G., Asher, J., Huntley, B. (2002). Responses of butterflies to twentieth century climate warming: implications for future ranges. *Proceedings: Biological Sciences*, 269: 2163–2171.
41. Holmes, R. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43: 69–78.
42. Huberty, F., Denno, R.F. (2004). Plant water stress and its consequences for herbivorous insects: A new synthesis. *Ecology*, 85: 1383–1398.
43. Ieviņš, Ģ. (2016). *Augu fizioloģija. Funkcijas un mijiedarbība ar vidi*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, 607 lpp.
44. IPCC (2013). *Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex V., Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
45. Ishizuka W., Kon H., Kita K. (2019). Inter-provenance variation of *Abies sachalinensis* in wind damage. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 101(2): 82–87.
46. Jactel, H., Petit, J., Desprez-Loustau, M-L., Delzon, S., Piou, D., Battisti, A., Koricheva, J. (2012). Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 18: 267–276.
47. Jakuš, R., Edwards-Jonášová, M., Cudlín, P., Blaženec, M., Ježík, M., Havlíček, F., Moravec, I. (2011). Characteristics of Norway spruce trees (*Picea abies*) surviving a spruce bark beetle (*Ips typographus* L.) outbreak. *Trees*, 25(6): 965-973.
48. Jansons, A., Matisons, R., Krisans, O., Puriņa, L., Džeriņa, B., Neimane, U. (2014). Height of the mass point and some properties of crown of 26-year-old Scots pine and lodgepole pine as potential parameters for wind damage in Zvirgzde, Latvia. *Baltic Forestry*, 20(1): 48-57.
49. Jansons, Ā., Matisons, R., Baumanis, I., Puriņa, L. (2013). Effect of climatic factors on height increment of Scots pine in experimental plantation in Kalsnava, Latvia. *Forest Ecology and Management*, 306: 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.039>.
50. Jansons, Ā., Matisons, R., Zadiņa, M., Sisenis, L., Jansons, J. (2015). The effect of climatic factors on height increment of Scots pine in sites differing by continentality in Latvia. *Silva Fennica*, 49(3): 14. <https://doi.org/10.14214/sf.1262>.
51. Jepsen, J.U., Hagen, S.B., Ims, R.A., Yoccoz, N.G. (2008). Climate change and outbreaks of the geometrids *Operophthera brumata* and *Epirrita autumnata* in subarctic birch forest: evidence of a recent outbreak range expansion. *Journal of Animal Ecology*, 77: 257–264.
52. Ju, R-T., Lei, G., Li, B. (2017). Spring warming increases the abundance of an invasive specialist insect: links to phenology and life history. *Scientific Reports*, 7: 14805.
53. Katrevis, J., Neimane, U., Dzerina, B., Kitenberga, M., Jansons, J., Jansons, A. (2018). Environmental factors affecting formation of lammas shoots in young stands of Norway

- spruce (*Picea abies* Karst.) in Latvia. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 11(6): 809. <https://doi.org/10.3832/for2539-011>.
54. Kellomäki, S., Maajärvi, M., Strandman, H., Kilpeläinen, A., Peltola, H. (2010). Model computations on the climate change effects on snow cover, soil moisture and soil frost in the boreal conditions over Finland. *Silva Fennica*, 44(2): 213-233.
 55. Klapwijk, M.J.; Björkman, C. (2018). Mixed forests to mitigate risk of insect outbreaks. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33: 772–780.
 56. Klisz, M., Buras, A., Sass-Klaassen, U., Puchałka, R., Koprowski, M., Ukalska, J. (2019). Limitations at the limit? Diminishing of genetic effects in Norway spruce provenance trials. *Frontiers in plant science*, 10: 306. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00306>.
 57. Köster, K., Metslaid, M., Engelhart, J., Köster, E. (2015). Dead wood basic density, and the concentration of carbon and nitrogen for main tree species in managed hemiboreal forests. *Forest Ecology and Management*, 354: 35–42. https://doi.org/10.15666/aer/1706_1394513959.
 58. Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3): 259-263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
 59. Krisans, O., Samariķs, V., Matisons, R., Jansons, A. (2020). Model of above-ground biomass distribution of Norway spruce (*Picea abies* L.(Karst.)). *BioResources*, 15(2): 4314-4322.
 60. Krišāns, O. (2020) Parastās egles (*Picea abies* (L.) H. Karst.) vēja noturības izmaiņas sakņu trupes un stumbra mizas bojājumu ietekmē: promocijas darbs. LVMI Silava, 121 lpp. <http://www.silava.lv/25/section.aspx/View/151>
 61. Krišāns, O., Matisons, R., Kitenberga, M., Donis, J., Rust, S., Elferts, D., Jansons, Ā. (2021). Wind resistance of Eastern Baltic silver birch (*Betula pendula* Roth.) suggests its suitability for periodically waterlogged sites. *Forests*, 12(1): 21.
 62. Ķēniņa, L., Mača, S., Jaunslaviete, I., Jansons, A. (2019b). Carbon pools in old-growth Scots pine stands on organic soils and its concentration in deadwood: case study in Latvia. In: *Proceedings of the 9th International Scientific Conference Rural Development 2019*, 284-288. doi: 10.15544/RD.2019.054.
 63. Laapas, M., Lehtonen, I., Venäläinen, A., Peltola, H.M. (2019). The 10-year return levels of maximum wind speeds under frozen and unfrozen soil forest conditions in Finland. *Climate*, 7(5): 62.
 64. Landi, M., Tattini, M., Gould, K.S. (2015). Multiple functional roles of anthocyanins in plant-environment interactions. *Environmental and Experimental Botany*, 119: 4–17.
 65. Lanner, R.M. (1976). Patterns of shoot development in *Pinus* and their relationship to growth potential. In: Cannell, M.G.R., Last, F.T. (eds.) *Tree physiology and yield improvement*. Academic press, London, p. 223–243.
 66. Lehmann, P., Ammunét, T., Barton, M., et al. (2020). Complex responses of global insect pests to climate warming. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18, 141–150.
 67. Liepiņš, J., Lazdiņš, A., Liepiņš, K. (2017). Equations for estimating above- and belowground biomass of Norway spruce, Scots pine, birch spp. and European aspen in Latvia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33: 58-70. doi: 10.1080/02827581.2017.1337923.
 68. Liu, Y., Trancoso, R., Ma, Q., Yue, C., Wei, X., & Blanco, J. A. (2020). Incorporating climate effects in *Larix gmelinii* improves stem taper models in the Greater Khingan Mountains of Inner Mongolia, northeast China. *Forest Ecology and Management*, 464: 118065. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118065>
 69. Lupikis, A., Lazdins, A. (2017). Soil carbon stock changes in transitional mire drained for forestry in Latvia: a case study. *For. Wood Proc.*, 1: 55–61. DOI:10.22616/rrd.23.2017.008.

70. Mäkinen, H., Jyske, T., Nöjd, P. (2018). Dynamics of diameter and height increment of Norway spruce and Scots pine in southern Finland. *Annals of forest science*, 75(1): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0710-1>
71. Manso, R., Davidson, R., McLean, J.P. (2021). Diameter, height and volume increment single tree models for improved Sitka spruce in Great Britain. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, cpab049, <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab049>.
72. Marini, L., Økland, B., Jönsson, A.M., Bentz, B., Carroll, A., Forster, B., Grégoire, J.C., Hurling, R., Nageleisen, L.M., Netherer, S., Weed, A., Schroeder, M., Ravn, H.P. (2017). Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography*, 40(12): 1426-1435.
73. Martín, J.A., Esteban, L.G., De Palacios, P., Fernandez, F.G. (2010). Variation in wood anatomical traits of *Pinus sylvestris* L. between Spanish regions of provenance. *Trees*, 24(6) 1017-1028.
74. Masaitis, G., Mozgeris, G., Augustaitis, A. (2013). Spectral reflectance properties of healthy and stressed coniferous trees. *iForest*, 6: 30-36. doi: 10.3832/for0709-006
75. Matisons, R., et al., (2021). Nonlinear weather–growth relationships suggest disproportional growth changes of Norway spruce in the eastern Baltic region. *Forests*, 12(6): N661. <https://doi.org/10.3390/f12060661>.
76. Mcmillin, J.D., Wagner, M.R. (1995). Season and intensity of water stress: host-plant effects on larval survival and fecundity of *Neodiprion gillettei* (Hymenoptera: Diprionidae). *Environmental Entomology*, 24: 1251–1257
77. Mezei, P., Blaženec, M., Grodzki, W., Škvarenina, J., Jakuš R. (2017). Influence of different forest protection strategies on spruce tree mortality during a bark beetle outbreak. *Annals of forest science*, 74 (4): 1-12.
78. Meža statistiskā inventarizācija (2019). Meža resursu monitoringa rezultāti. Pieejams: <http://www.silava.lv/petijumi/nacionlais-mea-monitorings.aspx>
79. Mickovski, S.B. (2002). Anchorage mechanics of different types of root systems. Manchester: University of Manchester, p. 149.
80. Nabuurs, G.J., Lindner, M., Verkerk, P.J., Gunia, K., Deda, P., Michalak, R., Grassi, G. (2013). First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change*, 3(9): 792-796.
81. Nabuurs, G.J., Delacote, P., Ellison, D., Hanewinkel, M., Hetemäki, L., Lindner, M. (2017). By 2050 the mitigation effects of EU forests could nearly double through climate smart forestry. *Forests*, 8(12): 484. <https://doi.org/10.3390/f8120484>.
82. Nadezhdina, N., Čermák, J., Gašpárek, J., Nadezhdin, V., Prax, A. (2006). Vertical and horizontal water redistribution in Norway spruce (*Picea abies*) roots in the Moravian Upland. *Tree Physiology*, 26(10): 1277-1288.
83. Neill, S., and K. Gould. (1999). Optical properties of leaves in relation to anthocyanin concentration and distribution. *Can. J. Bot.*, 77: 1777-1782.
84. Netherer, S., Schopf, A. (2010). Potential effects of climate change on insect herbivores in European forests—General aspects and the pine processionary moth as specific example. *Forest Ecology and Management*, 259: 831–838.
85. Nicoll, B.C., Gardiner, B.A., Peace, A.J. (2008) Improvements in anchorage provided by the acclimation of forest trees to wind stress. *Forestry*, 81(3): 389-398.
86. Nicoll, B.C., Ray, D. (1996). Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. *Tree Physiology*, 16(11–12): 891–898.
87. Ostonen, I., Lohmus, K., Pajuste K. (2005). Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: Comparison of soil core and ingrowth core methods. *Forest Ecology and Management*, 212: 264-277. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.064>.

88. Pallardy, S.G. (2008). *Physiology of Woody Plants*. Third Edition. London: Elsevier Inc., p. 454.
89. Panayotov, M., Kulakowski, D., Dos Santos, L L., Bebi, P. (2011). Wind disturbances shape old Norway spruce-dominated forest in Bulgaria. *Forest ecology and Management*, 262(3): 470-481.
90. Pearce, R.S. (2001). Plant freezing and damage. *Annals of botany*, 87(4): 417-424. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1352>.
91. Peltola, H., Gardiner, B., Nicoll, B. (2013). Susceptibility to Wind Damage-Mechanics of wind damage. In: Gardiner, B. (ed.). *Living with storm damage to forests*. Joensuu, European Forest Institute, p. 31-38.
92. Pöyry, J., Leinonen, R., Söderman, G., Nieminen, M., Heikkinen, R.K., Carter, T.R. (2011). Climate-induced increase of moth multivoltinism in boreal regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20: 289–298.
93. Pokorný, R., Stojnič, S. (2012). Leaf area index of Norway spruce stands in relation to age and defoliation. *Beskydy*, 5(2): 173-180. DOI: 10.11118/beskyd201205020173.
94. Pureswaran, D.S., Roques, A., Battisti, A. (2018). Forest insects and climate change. *Current Forestry Reports*, 4: 35–50.
95. R Core Team (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
96. Ramsfield, T.D., Bentz, B.J., Faccoli, M., Jactel, H., Brockerhoff, E.G. (2016). Forest health in a changing world: effects of globalization and climate change on forest insect and pathogen impacts. *Forestry*, 89: 245–252.
97. Roy, B.A., Güsewell, S., Harte, J. (2004). Response of plant pathogens and herbivores to a warming experiment. *Ecology*, 85: 2570–2581.
98. Sandström, F., Petersson, H., Kruys, N., Ståhl, G. (2007). Biomass conversion factors (density and carbon concentration) by decay classes for dead wood of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula* spp. in boreal forests of Sweden. *Forest Ecology and Management*, 243(1): 19-27.
99. Schuck, A., Schelhaas, M.J. (2013). Storm damage in Europe—an overview. In: Gardiner, B. (ed.). *Living with storm damage to forests*. Joensuu, European Forest Institute, p. 15-23.
100. Senf, C., Seidl, R. (2021). Mapping the forest disturbances regimes of Europe. *Nature Sustainability*, 4: 63–70.
101. Ståhl, E.G. (1998). Changes in wood and stem properties of *Pinus sylvestris* caused by provenance transfer. *Silva Fennica*, 32(2): 163–172.
102. Stokes, A. (1999). Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement. *Plant and Soil*, 217(1): 17-27.
103. Sulik, S., Kejna, M. (2020). The origin and course of severe thunderstorm outbreaks in Poland on 10 and 11 August, 2017. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*, 18(1): 25–39.
104. Suvanto, S., Henttonen, H.M., Nöjd, P., Mäkinen, H. (2016). Forest susceptibility to storm damage is affected by similar factors regardless of storm type: comparison of thunder storms and autumn extra-tropical cyclones in Finland. *Forest Ecology and Management*, 381: 17–28.
105. Temperli, C., Bugmann, H., Elkin, C. (2013) Cross-scale interactions among bark beetles, climate change, and wind disturbances: A landscape modeling approach. *Ecological Monographs*, 83(3): 383-402.

106. Thom, D., Seidl, R., Steyrer, G., Krehan, H., Formayer, H. (2013). Slow and fast drivers of the natural disturbance regime in Central European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 307: 293–302.
107. Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.; et al. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427: 145–148.
108. Tierney, G.L., Fahey, T.J., Groffman, P.M., Hardy, J.P., Fitzhugh, R.D., & Driscoll, C.T. (2001). Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 56(2): 175–190. <https://doi.org/10.1023/A:1013072519889>
109. Tyminska-Czabanska, L., Socha, J., Hawryło, P., Bałazy, R., Ciesielski, M., Grabska-Szwagrzyk, E., Netzel, P. (2021). Weather-sensitive height growth modelling of Norway spruce using repeated airborne laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 308: 108568. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108568>.
110. Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Pfister, C., Volz, R., Beniston, M., Dobbertin, M. (2010). Wind speed measurements and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 30(3): 347–358.
111. van Lierop, P., Lindquist, E., Sathyapala, S., Franceschini, G. (2015). Global forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events. *Forest Ecology and Management*, 352, 78–88.
112. Venäläinen, A., Lehtonen, I., Laapas, M., Ruosteenoja, K., Tikkanen, O-P., Viiri, H., Ikonen, P., Peltola, H. (2020). Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: A literature review. *Global Change Biology*, 26: 4178–4196.
113. Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., Lopez-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index – SPEI. *Journal of Climate*, 23: 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
114. Villa, J.A., Smith, G.J., Ju, Y. et al. (2020). Methane and nitrous oxide porewater concentrations and surface fluxes of a regulated river. *Science of the Total Environment*, 715: 136920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136920>.
115. Visser, M.E., Adriaansen, F., van Balen, J.H., Blondel, J., Dhondt, A.A., Van Dongen, S., Thomson, D.L. (2003). Variable responses to large-scale climate change in European *Parus* populations. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270: 367–372.
116. Vitali, V., Büntgen, U., Bauhus, J. (2017). Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Global Change Biology*, 23(12): 5108–5119. <https://doi.org/10.1111/gcb.13774>.
117. Volney, W.J.A., Fleming, R.A. (2000). Climate change and impacts of boreal forest insects. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82: 283–294.
118. Wichmann, L., Ravn, H.P. (2001). The spread of *Ips typographus* (L.) (Coleoptera, Scolytidae) attacks following heavy windthrow in Denmark, analysed using GIS. *Forest Ecology and Management*, 148(1-3): 31–39.
119. Wigley, T.M.L., Briffa, K.R., Jones, P.D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23, 201–213. <https://doi.org/10.1175/1520-0450>.
120. Wilson, R.J., Gutierrez, D., Gutierrez, J., Martinez, D., Agudo, R., Monserrat, V.J. (2005). Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. *Ecology letters*, 8: 1138–1146.

121. Xu, K., Wang, X., Liang, P., An, H., Sun, H., Han, W., Li, Q. (2017). Tree-ring widths are good proxies of annual variation in forest productivity in temperate forests. *Scientific Reports*, 7: 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02022-6>.
122. Zang, C., Biondi, F. (2015). treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38(4): 431-436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>.
123. Zhang, J., Zhao, N., Liu, C., Yang, H., Li, M., Yu, G., Wilcox, K., Yu, Q., He, N. (2018). C:N:P stoichiometry in China's forests: from organs to ecosystems. *Functional Ecology*, 32: 50–60.
124. Zhu, X., Zhu, T., Pumpanen, J. et al. (2020). Short-term effects of biochar on soil CO₂ efflux in boreal Scots pine forests. *Annals of Forest Science* 77: 59. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00960-2>.
125. Zimová, S., Dobor, L., Hlásny, T., Rammer, W., Seidl, R. (2020). Reducing rotation age to address increasing disturbances in Central Europe: Potential and limitations. *Forest Ecology and Management*, 475: 118408.