



**Latvijas Lauku attīstības programmas 2014. - 2020.gadam pasākuma 16 "Sadarbība"
16.12 apakšpasākuma: "Atbalsts EIP lauksaimniecības ražīguma un ilgtspējas darba
grupu projekta īstenošanai"**

projekts

**“AUTOMATIZĒTA KOKAUDZĒTAVU STĀDU ATTĪSTĪBAS, VESELĪBAS,
AIZZĒLUMA KONTROLES SISTĒMAS IZVEIDOŠANA”**

LAD projekta numurs 23-00-A01612-000002

Pārskatu sagatavoja: RTU vadošais pētnieks Dr. sc. ing. Andrejs Zujevs,
Andrejs.Zujevs@rtu.lv

Projekta koordinators: RTU vadošais pētnieks Dr. sc. ing. Andrejs Zujevs,
Andrejs.Zujevs@rtu.lv

Sadarbības partneri: Rīgas Tehniskā universitāte, Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte, SIA “Rīgas meži”, zemnieku saimniecība “Pasakas”, biedrība “Mežvidu lauksaimniecības un tehnoloģiju parks”, SIA “Energouzraugs”

Projekta īstenošanas periods: 01.07.2023. – 30.06.2025.

Kopējās projekta izmaksas: 464 360.00 EUR

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
EIROPA INVESTĒ LAUKU APVIDOS
Eiropas Lauksaimniecības fonds
lauku attīstībai

Atbalsta Zemkopības ministrija un Lauku atbalsta dienests

SATURA RĀDĪTĀJS

1.	Ievads	5
2.	Projekta mērķis	7
3.	Izmantotie termini	8
4.	Darbības un projekta kopsavilkums	9
4.1.	Kokaudzētavas siltumnīca un tās infrastruktūra	9
4.2.	Sensoru bloks	12
4.3.	Sējeņu vizuālo datu ieguve	19
4.4.	Vizuālo datu anotēšana un datu kopas izveide	23
4.5.	Risinājuma programmatūras attīstība	32
4.6.	Risinājuma lietotāja saskarne	34
5.	Kopsavilkums	37
6.	Pieceja programmatūrai, projektējumiem, datu kopām un DM modeļiem	38

ATTĒLU SARAKSTS

Attēls 1. Tipiska kokaudzētavas siltumnīca.....	5
Attēls 2. SIA Rīgas meži siltumnīca ar laistīšanas iekārtu darbībā	9
Attēls 3. Koku sējeņu kasetes organizētas gultās jeb galdos.....	10
Attēls 4. Priežu sējeņi kasetēs	10
Attēls 5. Egles sējeņi kasetēs.....	11
Attēls 6. Bērza sējeņi kasetēs	11
Attēls 7. Melnalkšņa sējeņi kasetēs	12
Attēls 8. Priežu sējeņi kasetēs. Pa labi to skats no augšas jeb skats no RGB kameras perspektīvas.....	12
Attēls 9. Ar termo kameras uzņemtais attēls, kur katram pikselim iespējams noteikt tā temperatūru	13
Attēls 10. Ar daudzspektrālo kameru uzņemtā attēla piemērs	14
Attēls 11. Sensoru bloka 3D modelis	15
Attēls 12. Sensoru bloka 3D modelis ar tā komponentēm	15
Attēls 13. Sensora bloka gaisa sliežu 3D modelis	15
Attēls 14. Koku sējeņu virsmas skenēšanas princips siltumnīcā.....	16
Attēls 15. Sensoru bloka izmēģinājumi RTU laboratorijā.....	17
Attēls 16. Sensoru bloks ar gaisa sliedēm integrēts siltumnīcas infrastruktūrā	17
Attēls 17. Sensoru bloks pietuvinājumā	18
Attēls 18. RGB kamera ar <i>NVIDIA Jetson</i> iegulto datoru SIA Rīgas meži siltumnīcā (2023.g.)	19
Attēls 19. Sējeņu vizuālo datu ieguve SIA Rīgas meži siltumnīcā (2023.g.).....	19
Attēls 20. Sējeņu vizuālo datu ieguve SIA Rīgas meži siltumnīcā (2024.g.) ar RTU pētniekiem	20
Attēls 21. Vizuālo datu ierakstu žurnāls par 2024.g. (koku sējeņu morfoloģija)	20
Attēls 22. Vizuālo datu ierakstu žurnāls par 2024.g. (koku sējeņu morfoloģija)	21
Attēls 23. Vizuālo datu ierakstu žurnāls par 2024.g. (koku sējeņu morfoloģija)	21
Attēls 24. Vizuālo datu ierakstu žurnāls par 2024.g. (koku sējeņu morfoloģija)	22
Attēls 25. Vizuālo datu ierakstu žurnāls par 2024.g. (koku sējeņu morfoloģija)	22
Attēls 26. Vizuālo datu ierakstu žurnāls par 2024.g. (koku sējeņu morfoloģija).....	23
Attēls 27. Kasešu raksturiezīmju anotēšanas process.....	23
Attēls 28. Priedes sējeņu anotēšanas process	24

Attēls 29. Priedes sējeņu un nezāļu anotēšanas process.....	25
Attēls 30. Priedes sējeņu un nezāļu anotēšanas process.....	26
Attēls 31. Priedes sējeņu un nezāļu anotēšanas process.....	27
Attēls 32. Bērza sējeņu anotēšanas process.....	28
Attēls 33. Bērza sējeņu un nezāļu anotēšanas process	29
Attēls 34. Kasešu raksturierzīmju anotēšanas process (automātiski)	30
Attēls 35. Kasešu raksturierzīmju anotēšanas process (automātiski)	30
Attēls 36. Monitoringa sistēmas programmatūras attīstības diagramma.....	33
Attēls 37. Monitoringa sistēmas blokshēma.....	34
Attēls 38. Monitoringa sistēmas logs ar RGB kameras attēlu analīzes rezultātiem	35
Attēls 39. Monitoringa sistēmas logs ar RGB kameras redzeslauku un tajā detektētiem vizuālajiem objektiem (tukšas šūnas, nezāles un koku sējeņi) vienai no sensoru bloka pozīcijām siltumnīcā.....	35
Attēls 40. Monitoringa sistēmas logs ar termo kameras redzeslauku un tajā detektētiem vizuālajiem objektiem (tukšas šūnas, nezāles un koku sējeņi) vienai no sensoru bloka pozīcijām siltumnīcā.....	36
Attēls 41. Monitoringa sistēmas logs ar termo kameras datu vizuālo interpretāciju.....	36
Attēls 42. Monitoringa sistēmas logs ar daudzspektrālās kameras datu vizuālo interpretāciju	37

1. Ievads

Šobrīd kokaudzētavās (vidējā siltumnīcu platība ir ~1000 m²), kur uzskaiti par stādu ravēšanu, barošanu, laistīšanu un apstrādi ar augu aizsardzības līdzekļiem veic manuāli, izmantojot lielu cilvēkresursu (sk. att. 1.).



Attēls 1. Tipiska kokaudzētavas siltumnīca

2012. gadā ar ANO Ģenerālās Asamblejas rezolūciju dibināta Starptautiskā Meža diena. Tās mērķis – palielināt vispārējo informētību par mežu nozīmību un iespējām, ko tas var sniegt tagadnes un nākotnes paaudžu vajadzībām. Šī gada meža dienas tēma - Mežs un ilgtspējīga ražošana un patēriņš. Būtiska ir starptautiskā pieredze un tās apmaiņa, kas ir virzības faktors uz ilgtspējīgu attīstību. Latvijas kokaudzētavas mērķēti virzās uz nozares digitalizāciju, automatizāciju un gudru resursu pārvaldību. Pasaules tirgū nav pieejama gatava tehnoloģija kokaudzētavu (citu sektoru) stādu attīstības, veselības, aizzēluma kontrolei. Kokaudzētavas inventarizācijai, veselības monitoringam pasaulē izmanto dronu tehnoloģijas, kas telpiski var fiksēt koku bojājumus. Jaunā tehnoloģija ir rādīta izmantojot valsts intelektuālo potenciālu, kur

Rīgas Tehniskā universitāte, Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte kopā ar SIA “Rīgas meži” iegulda savas zināšanas un pieredzi tehnoloģijas radīšanā.

Meža nozares misija ir veidot sakoptu, neatkarīgu un pārtikušu Latviju. Tas ir Latvijas zaļais zelts. Meža nozare nodarbina ap 40 tūkstošiem cilvēku, bet netieši vēl ~ 30 tūkstošu darbinieku saistītajās nozarēs – transports, zinātne, izglītība, enerģētika. Valsts budžetā un algās katru gadu tiek samaksāti ~645 miljoni EUR, kā arī cilvēki gūst nekoksnes vērtības (sēnes, ogas, medības) ~90 miljonu EUR vērtībā. Vienlaikus mežs nodrošina daudzas citas būtiskas funkcijas – balansē ūdens apriti, novērš erozijas riskus, nodrošina bioloģisko daudzveidību, ražo O₂ un piesaista CO₂, tādējādi mazinot klimata izmaiņu riskus. Meža nozares produkciju Latvija 2022. gada septiņos mēnešos eksportēja 2,54 miljardu EUR vērtībā, kas ir par 27,8% vairāk nekā 2021. gada attiecīgajā periodā. Tostarp koksne un tās izstrādājumi 2022. gada septiņos mēnešos eksportēti 2,24 miljardu EUR. 2021. gadā meža atjaunošanai vai ieaudzēšanai izaudzēti 63,7 miljoni, t. sk. 51,9 miljoni ģenētiski augstvērtīgo kategoriju meža koku sējiņu un stādu. No tiem Latvijā izmantoti 50,8 miljoni, no tiem eksportēti – 12,9 miljonu. Latvijas selekcionēto stādu pieprasījums pieaug gan vietējā tirgū, gan ārvalstīs. Izrietoši pieaug saistīto nozares pakalpojumu pieprasījums. Lai apmierinātu pieprasījumu ir jāpalielina piedāvājums. To var panākt, kāpinot kokaudzētavu jaudu, kā arī piedāvājot augstākas kvalitātes stādmateriālu.

Meži ir vērtīgas ekosistēmas, kas ir nozīmīgs valsts resurss gan Latvijā, gan Eiropā. Meži ir būtisks sabiedrotais cīņā pret klimata pārmaiņām un bioloģiskās daudzveidības zudumu. ES meža stratēģijas 2030. gadam mērķis ir uzlabot meža ilgtspējīgas apsaimniekošanas koncepciju attiecībā uz klimata un bioloģiskajai daudzveidības aspektiem, tā veicina klimatam un bioloģiskajai daudzveidībai vislabvēlīgākās meža apsaimniekošanas prakses. Stratēģija sakņojas Eiropas zaļajā kursā un ES Biodaudzveidības stratēģijā 2030. gadam, kurā ir atzīta mežu svarīgā, daudzfunkcionālā loma, mežsaimnieku un visas meža resursu vērtības ķēdes devums ilgtspējīgas un klimatneitrālas ekonomikas izveidē līdz 2050. gadam. Vienlaicīgi tiecoties nodrošināt, ka visas ekosistēmas ir atjaunotas, izturēspējīgas un pienācīgi aizsargātas. Viens no uzdevumiem ir nodrošināt meža atjaunošanu un uzlabot ilgtspējīgu meža apsaimniekošanu, kas nāk par labu klimatadaptācijai un meža izturēspējai, kā arī atkārtota un pirmreizēja apmežošana, kuras mērķis ir biodaudzveidīgi meži. Stratēģija paredz līdz 2030. gadam ES iestādīt vēl vismaz 3 milj. koku. Projekta jaunradītā tehnoloģija varētu interesēt arī vides organizācijas, kas attiecas uz resursu patēriņa samazināšanu un ilgtspējīgas mežsaimniecības prakses veicināšanu, palīdzot veicināt un izplatīt izpratni par projekta rezultātiem un ieguvumiem, kas, iespējams, novedīs pie līdzīgu tehnoloģiju un prakses

plašākas ieviešanas. Meža nozarē darbojoties, tiecoties uz ilgtspējīgāku un klimatam draudzīgāku praksi, var rasties iespējas, ka projekta tehnoloģiju pārņems nozares piegādātāji un pakalpojumu sniedzēji. Piemēram, uzņēmumi, kas nodrošina aprīkojumu vai pakalpojumus kokaudzētavām vai mežu apsaimniekotājiem, varētu izmantot jaunradīto tehnoloģiju, lai uzlabotu piedāvājumus un labāk apkalpotu savus klientus. Ieguvēji noteikti būtu pētnieki un novatori: projekta fokuss uz jaunu tehnoloģiju un procesu izstrādi ilgtspējīgai mežsaimniecībai varētu interesēt citus pētniekus un novatorus, kas strādā šajā vai līdzīgā jomā. Dalties ar rezultātiem un sadarbojoties, palīdzētu uzlabot jaunākos sasniegumus un veicinātu plašākus centienus risināt klimata pārmaiņu un bioloģiskās daudzveidības samazināšanās problēmas. Projekta tiešā mērķa grupa ir kokaudzētavas, kas iegūtu jaunradīto tehnoloģiju, kas veicinās resursu ietaupījumu, palielinās produktivitāti un stādu lietderīgo iznākumu. Izrietoši netiešā mērķa grupa ir meža atjaunošanas sektors, meža nozares apsaimniekotāji.

Pašreiz stādāmā materiāla lietderīgais iznākums ir mazāks par 85%. Lai sasniegtu augstāku lietderīgo iznākumu ir vitāli svarīgi stādiem nodrošināt pareizā daudzumā mitrumu, laicīgi pamanīt un noteikt kaitēkļu bojājumus un slimību pazīmes. Stādu kokaudzētavās stādāmā materiāla kontrole un apstrāde notiek manuālas apsekošanas veidā, izmantojot lielu cilvēkresursu. Tā nenotiek pietiekami detalizētā līmenī. Stādu apsekošana, plānošana, konkrētu uzdevumu noteikšana un došana ir laikietilpīgs process, kuru lietderīgi varētu izmantot stādu apstrādei. Paralēls process ir stādu veselības novērtēšana, kas šobrīd kokaudzētavās norit subjektīvi vizuāli. Tas izslēdz iespēju laicīgi fiksēt veģetācijas stresa līmeni, iesaistīties ar precīzi mērķētu laistīšanu un augu aizsardzības līdzekļu lietošanu. Projekta ietvaros, sadarbojoties mežsaimniecības nozares un dažādu jomu ekspertiem un zinātniekiem, ir plānots izstrādāt automatizētu kokaudzētavu stādu attīstības, veselības, aizzēluma kontroles sistēmu, kas ļaus digitāli un savlaicīgi apkopo un noteikt datus par stādu veselības stāvokli, kaitēkļu bojājumiem, un kontrolēt stādījumu platību mitrumu. Projekta ideja tieši sasaucas ar ES meža stratēģiju 2030.gadam.

2. Projekta mērķis

Mērķis - izstrādāt automatizētu sistēmu (prototips), kas nodrošinās kvalitatīvu kokaudzētavu stādu attīstības, veselības un aizzēluma kontroli.

Mērķis iekļauj aparatūras projektēšanu un izstrādi, sensoru datu apstrādes un analīzes programmatūras izstrādi un integrēšanu kokaudzētavas ĢIS sistēmā.

3. Izmantotie termini

Mašīnmācīšanās bibliotēka – programmatūras bibliotēka, kas ļauj apmācīt dažāda tipa matemātiskos modeļus, kuri risina klasifikācijas vai regresijas uzdevumu. Apmācības laikā modeļu ieejā tiek padoti nevis jēldati, bet to raksturiežīmes.

Dziļās mašīnmācīšanās bibliotēka – programmatūras bibliotēka, ļauj apmācīt dažādus dziļos mākslīgo neironu tīklus klasifikācijas, regresijas, objektu detektēšanas, teksta ģenerēšanas u. c. uzdevumu risināšanai. Dziļajos neironu tīklos datu raksturiežīmes tiek noteiktas automātiski (hiperparametru līmenī) tīkla apmācības laikā, kas šādus matemātiskos modeļus arī atšķir no klasiskajām mašīnmācīšanās metodēm.

Dziļās mašīnmācīšanās modelis (DM modelis) – apmācīts mākslīgo neironu tīkls, kas sastāv no vairākiem specializētiem neironu tīklu slāņiem ar savām hiperparametru vērtībām (kuras noteiktas tīkla apmācības laikā). Neironu tīkls domāts atsevišķa uzdevuma risināšanai. Projekta ietvaros apmācīts modelis domāts koku detektēšanai attēlos.

YOLO – populāra atklāta koda dziļo neironu tīklu programmatūras bibliotēka, kura ļauj apmācīt, validēt un testēt *YOLO* neironu tīkla arhitektūras modeļus. Projekta ietvaros tiek izmantota *YOLO* v5.0. bibliotēkas versija.

Anotēšana – attēlu apstrādes procedūra, kuru pilda cilvēks vai tas notiek automātiski. Attēlos vizuāli tiek iezīmēti objekti (projekta ietvaros koku sējeņi, nezāles un kasešu tukšas šūnas), apvelkot tos ar robežlodziņu (*bounding box*) un piešķirot objekta klasi, piemēram, “nezāke” vai “tukša šūna”.

Datu kopa – specifiski sagatavoti dati (t. sk. vizuālie), kuri mašīnmācīšanās laikā tiek izmantoti DM modeļa apmācībai, tā validācijai un testēšanai.

Testēšanas datu kopa – datu apakškopa, kura tiek izmantota DM modeļa testēšanai un nekad netiek izmantota DM modeļa apmācībai.

Kasete – koku sējeņu ietvars, kur katrs sējenis tiek audzēts savā šūnā.

Gulta – koku sējeņu kasešu ietvars, ko ērti pārvietot uz siltumnīcu un izvest no tās.

Sējenis – no sēklas bez pārstādīšanas izaudzēts jauns koks.

Sensoru bloks – projekta ietvaros izveidota iekārta, kurā ir integrēta RGB kamera, termokaamera un daudzspektrālā kamera. Iekārta ir aprīkota ar motoriem un to vadības elektroniku bloka kustībai pa gaisa sliedēm, kā arī iekārta ir aprīkota ar LED gaismām.

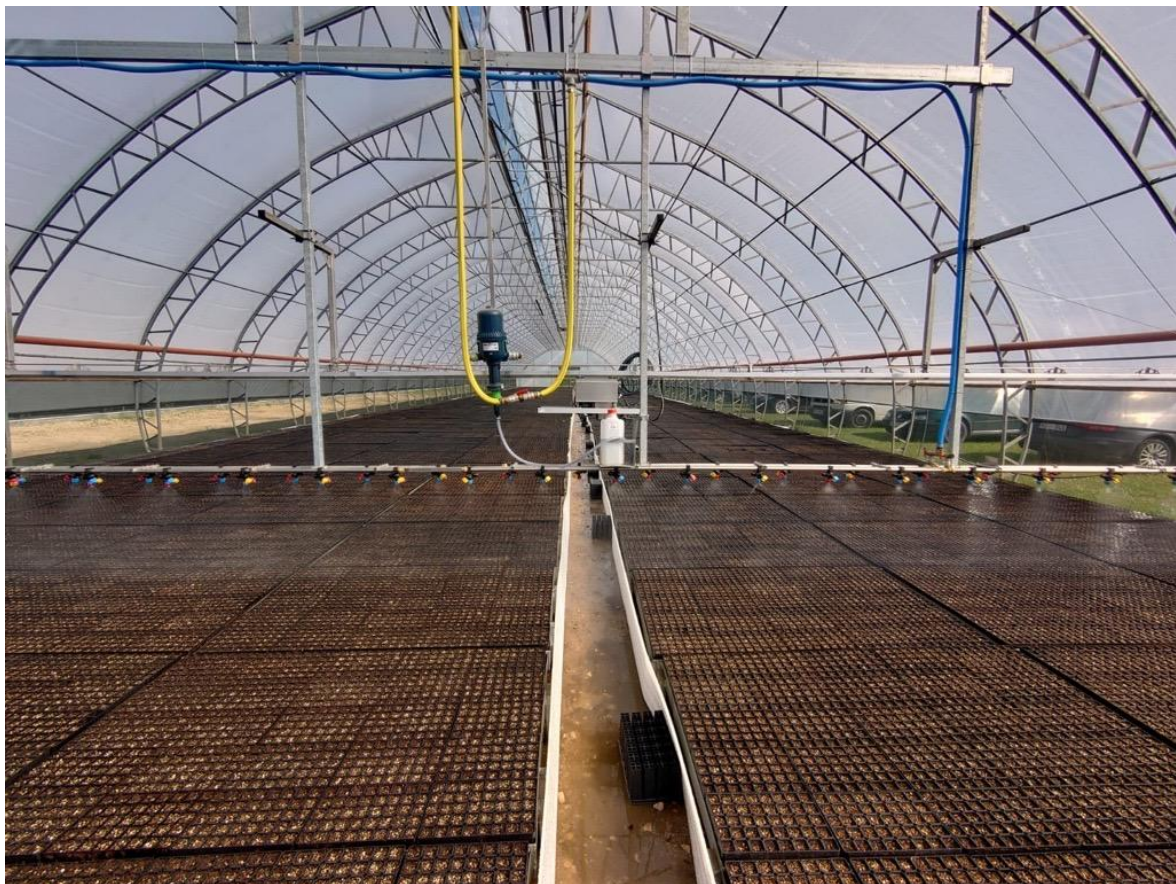
NDVI indekss – veģetācijas atšķirību indekss (ang.val. - *Normalized Difference Vegetation Index*).

4. Darbības un projekta kopsavilkums

Sadaļā minētas projekta galvenās darbības un to ietvaros sasniegtie rezultāti. Visas aprakstītās darbības ir dotas projekta īstenošanas secībā.

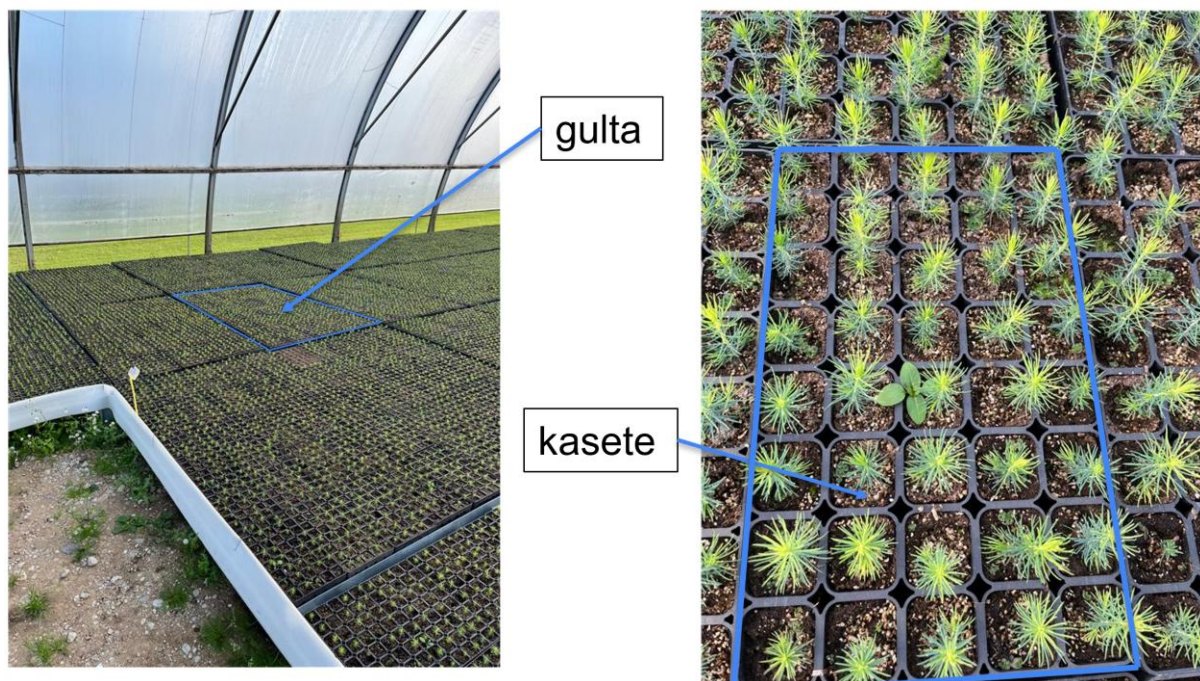
4.1. Kokaudzētavas siltumnīca un tās infrastruktūra

Kokaudzētavas koku sējeņus vispirms audzē siltumnīcā, kas nodrošina to dīgšanai labvēlīgus apstākļus un klimatu. Sasniedzot noteiktu vecumu, sējeņi tiek izvesti uz lauka, tālākai to attīstībai. Katra siltumnīca ir aprīkota ar laistīšanas iekārtu, ar kuras palīdzību sējeņu substrāts tiek mitrināts vai piesātināts ar papildu barošanas vielām (sk. att. **Attēls 2.**)



Attēls 2. SIA Rīgas meži siltumnīca ar laistīšanas iekārtu darbībā

Koku sējeņu sēklas vispirms tiek iestādītas kasetēs, izmantojot sēklu stādīšanas mašīnu. Kasetes tiek saliktas gultās/galdos, kurus ar traktortehnikas palīdzību novieto siltumnīcā (sk. att. **Attēls 3.**).



Attēls 3. Koku sējeņu kasetes organizētas gultās jeb galdos

Dažādām koku sugām ir sava morfoloģija un fizioloģija. Zemāk attēlos ir doti piemēri priedei (att. **Attēls 4.**), eglei (att. **Attēls 5.**), bērzam (att. **Attēls 6.**) un melnalksnim (sk. att. 7.).



Attēls 4. Priežu sējeņi kasetēs



Attēls 5. Egles sējeņi kasetēs



Attēls 6. Bērza sējeņi kasetēs



Attēls 7. Melnalkšņa sējeņi kasetēs

4.2. Sensoru bloks

Jaunās tehnoloģijas izstrādei tika izvēlēti vizuālie sensori siltumnīcas virsmas monitoringam. *Krāsu digitālā kamera* (RGB - red, green, blue), ar kuras palīdzību ir iespējams uzņemt virsmas attēlus, un izmantojot DM modeļus, atpazīt koku sējeņus, tukšas kasēšu šūnas un nezāles (sk. att. Attēls 8.).

Kasetes ar sējeņiem (priedes)

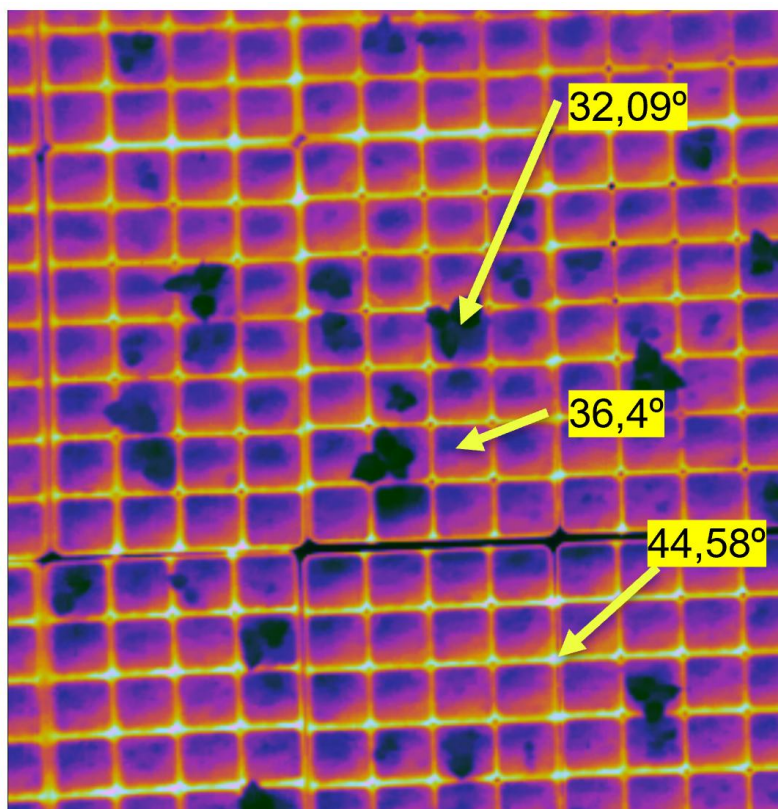


Kameras
redzes lauks



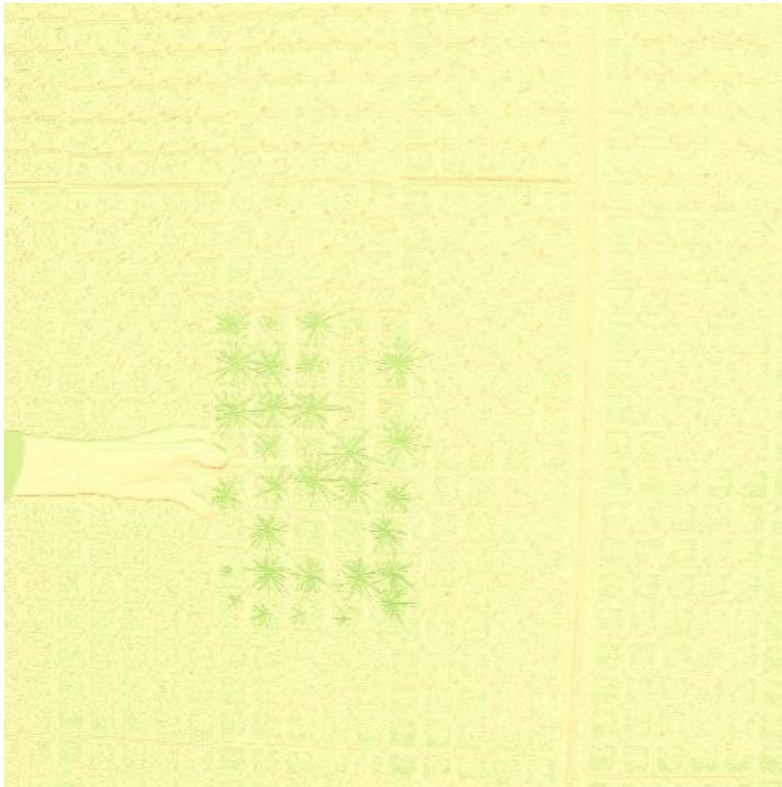
Attēls 8. Priežu sējeņi kasetēs. Pa labi to skats no augšas jeb skats no RGB kameras perspektīvas

Termo kamera. Ļauj noteikt temperatūru katram pikselim atsevišķi, mērot temperatūru kasešu virsmai no augšas (sk. att. 9.). Ar tās palīdzību iespējams noteikt laistīšanas režīma efektivitāti vizuāli un kvantitatīvi, novērot kasešu substrāta virsmas žūšanas procesus, noteikt sējeņu virsmas un substrāta relatīvo mitrumu.



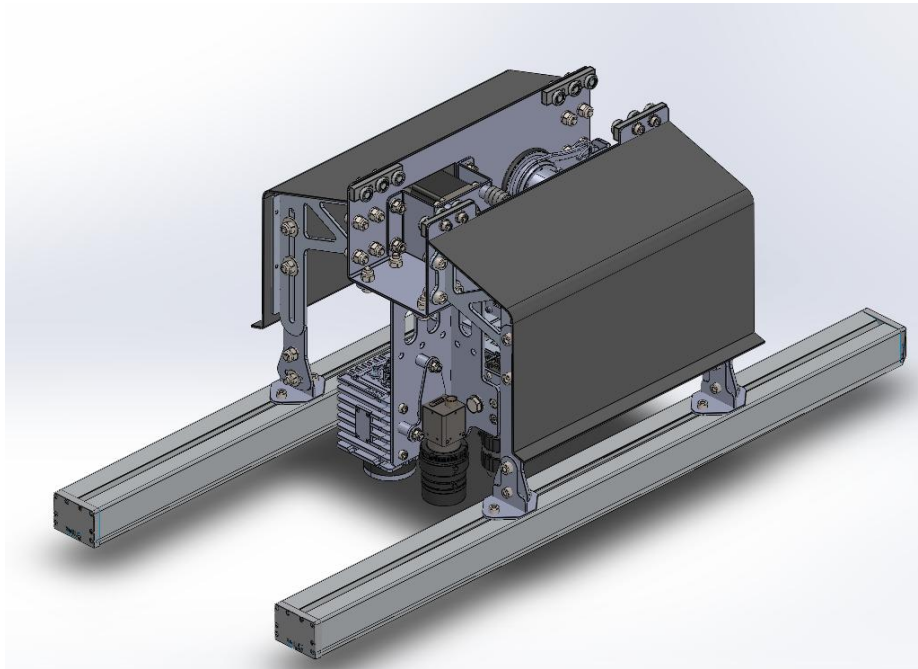
Attēls 9. Ar termo kameras uzņemtais attēls, kur katram pikselim iespējams noteikt tā temperatūru

Daudzspektrālā kamera. Pamatā tā tiek izmantota NDVI indeksa aprēķiniem sējeņu kasešu virmai (sk. att.**Attēls 10.**) . Ar tās palīdzību laicīgi iespējams noteikt koku sējeņu bojāeju, nezāļu blīvuma līmeni un nezāļu izplatības dinamiku, kā arī noteikt sējeņu dažādas anomālijas.

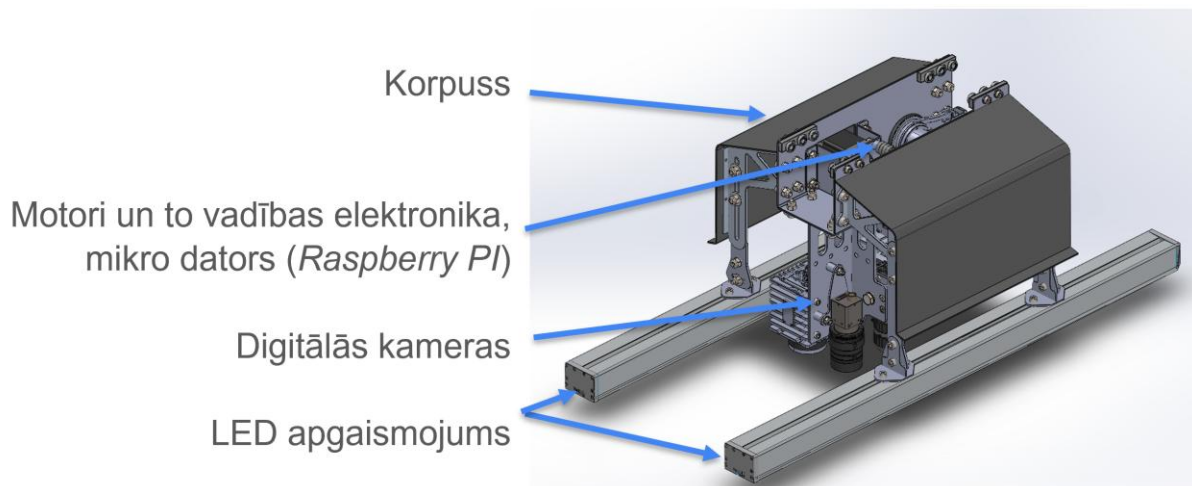


Attēls 10. Ar daudzspektrālo kameru uzņemtā attēla piemērs

Sensoru bloks sevī iekļauj visas iepriekšminētās kameras (sensorus), aizsargā tos, kā arī nodrošina sevis pārvietošanu pa gaisa sliedēm, kuras ir integrētas ar siltumnīcas laistīšanas iekārtu. Sensoru bloka 3D projektējuma modeļa attēli ir doti zemāk (sk. att. **Attēls 11.** un **Attēls 12.**).

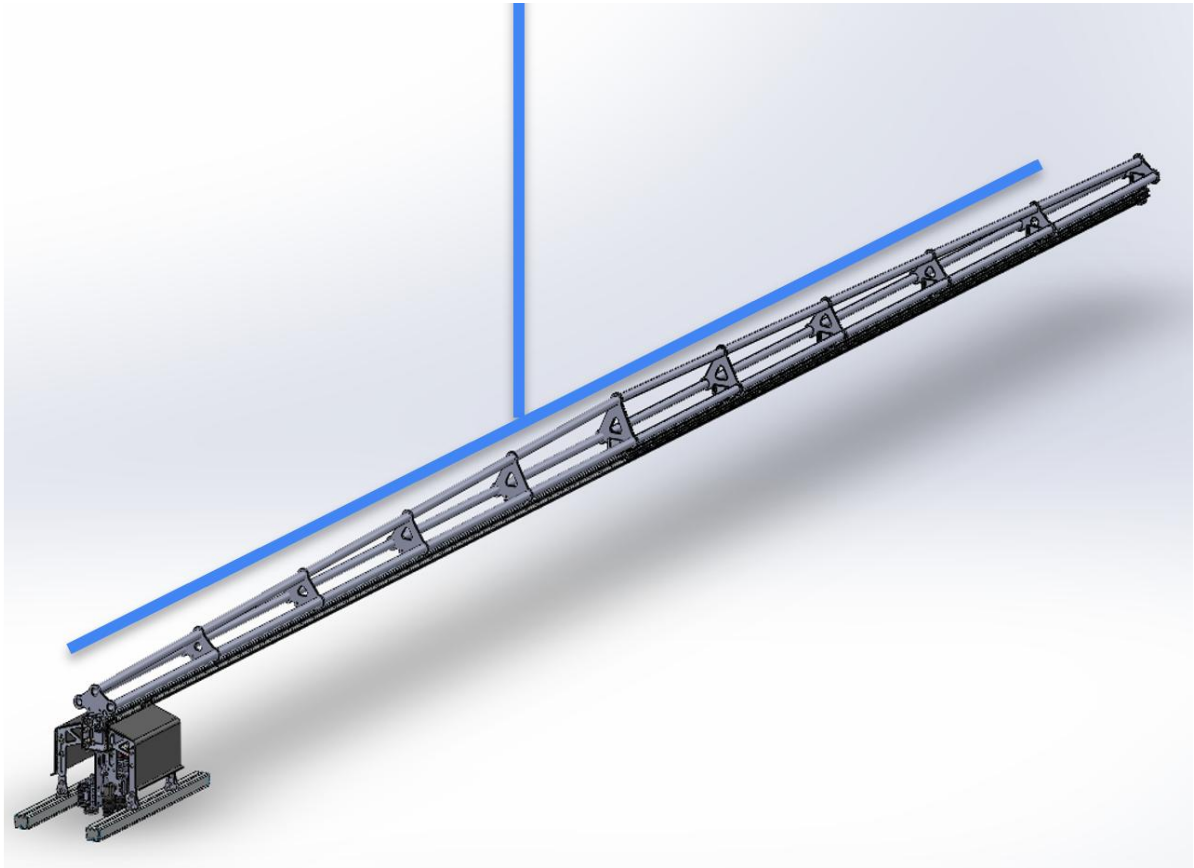


Attēls 11. Sensoru bloka 3D modelis



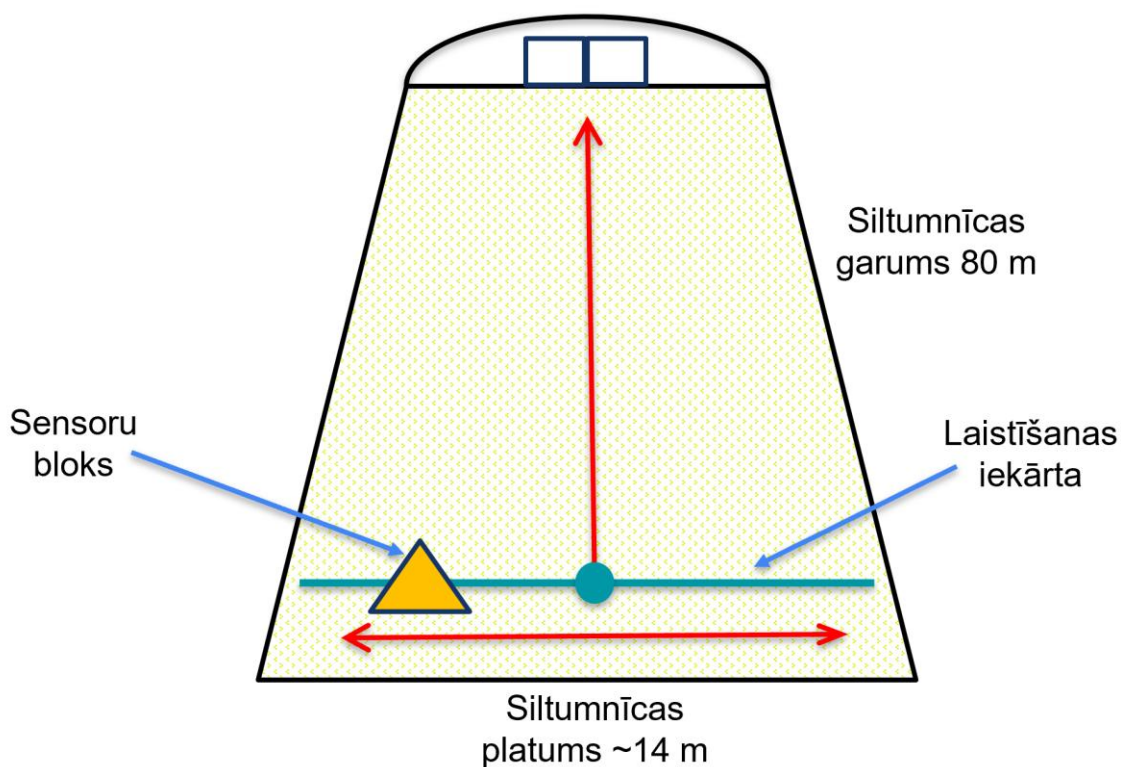
Attēls 12. Sensoru bloka 3D modelis ar tā komponentēm

Sensoru bloks tiek integrēts ar siltumnīcas laistīšanas iekārtu, kurai papildus tiek piestiprinātas sensoru bloka gaisa sliedes (sk. att.**Attēls 13.**).



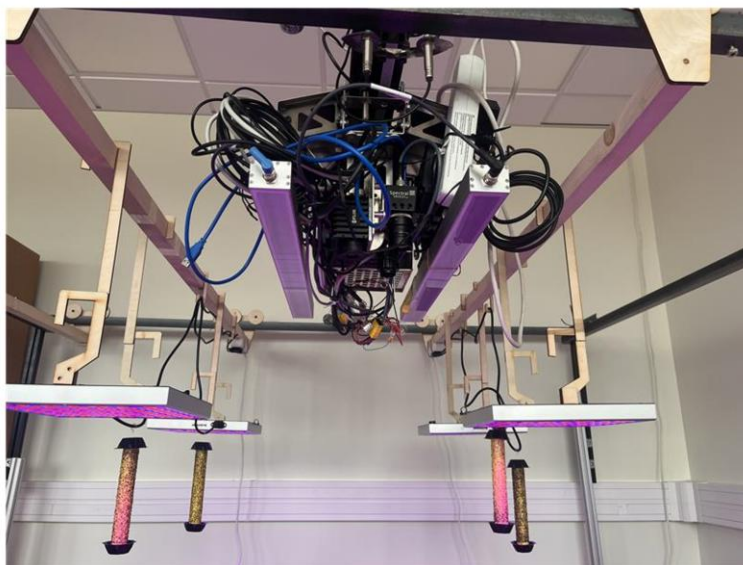
Attēls 13. Sensora bloka gaisa sliežu 3D modelis

Monitoringa sistēma skenē siltumnīcas sējeņu un kasešu virsmu pēc CNC mašīnas darbības principa. Sensoru bloks pārvietojas gar laistīšanas iekārtas galveno stieni no kreisās puses uz labo, tas laistīšanas iekārta pārvietojas uz priekšu un sensoru bloks pārvietojas atpakaļvirzienā (sk. att. **Attēls 14.**)



Attēls 14. Koku sējeņu virsmas skenēšanas princips siltumnīcā

Sensora bloka pirmie izmēģinājumi notika RTU laboratorijā (sk. att.**Attēls 15.**), kur arī tika izaudzētas ap 2000 priežu sējeņi. Izmēģinājumi ļāva turpināt izstrādāt nepieciešamo sensoru bloka vadības programmatūru (sensoru konfigurēšana, sensoru vadība, sensoru datu lasīšana un apstrāde, sensoru bloka motoru vadība u.c.) ārpus koku sējeņu audzēšanas sezonas. Šie izmēģinājumi palīdzēja korekti pārbaudīt RGB kameras optisko sistēmu kopumā un integrēt to ar papildu LED gaismu apgaismojumu. Visbeidzot, sensoru bloks tika uzstādīts SIA Rīgas meži kokaudzētavas “Norupe” vienā no siltumnīcām un integrēts gan fiziski, gan vadības līmenī ar siltumnīcas laistīšanas iekārtu (sk. att.**Attēls 16.** un **Attēls 17.**).



Attēls 15. Sensoru bloka izmēģinājumi RTU laboratorijā

**Sensoru bloks un tā
sliedes**

Laistīšanas iekārta



Attēls 16. Sensoru bloks ar gaisa sliedēm integrēts siltumnīcas infrastruktūrā

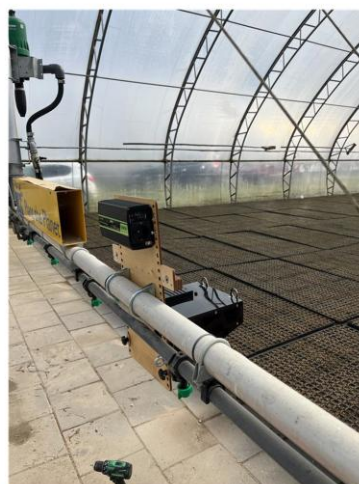


Attēls 17. Sensoru bloks pietuvinājumā

4.3. Sējeņu vizuālo datu ieguve

Projektā sējeņu vizuālo datu ieguve sākusies jau pirms projekta pieteikums tika iesniegts. Tas notika 2023.g. sākumā, kad sensoru bloks vēl nebija pieejams. Tā vietā tika izmantota cita RTU aparatūra, kas bija pieejama (sk. att. **Attēls 18.** un **Attēls 19.**).

2023.g. marts - maijs



Attēls 18. RGB kamera ar *NVIDIA Jetson* iegulto datoru SIA Rīgas meži siltumnīcā (2023.g.)

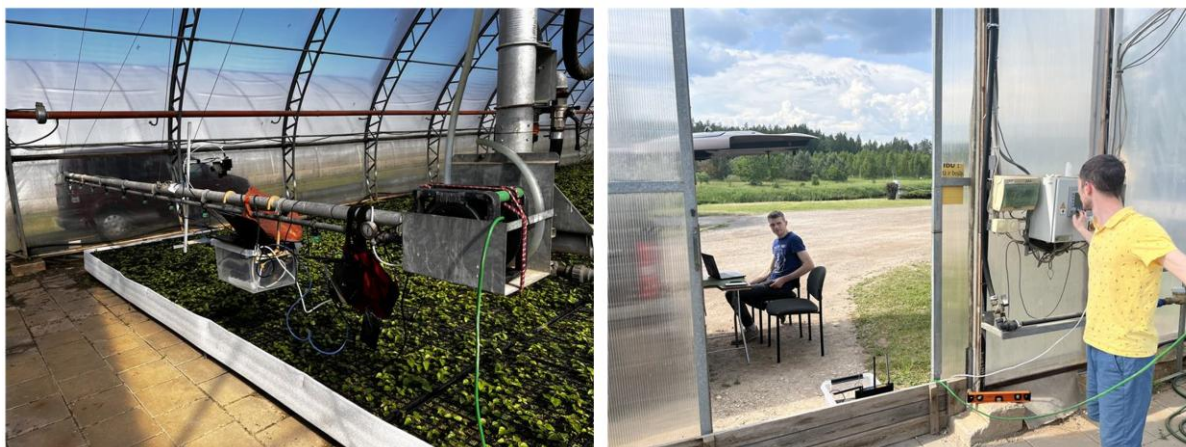


Attēls 19. Sējeņu vizuālo datu ieguve SIA Rīgas meži siltumnīcā (2023.g.)

Attīstot sensoru bloku un RGB kameras vadības programmatūru, vizuālo datu ieguve intensīvi turpinājās arī 2024.g. (sk. att. **Attēls 20.**).

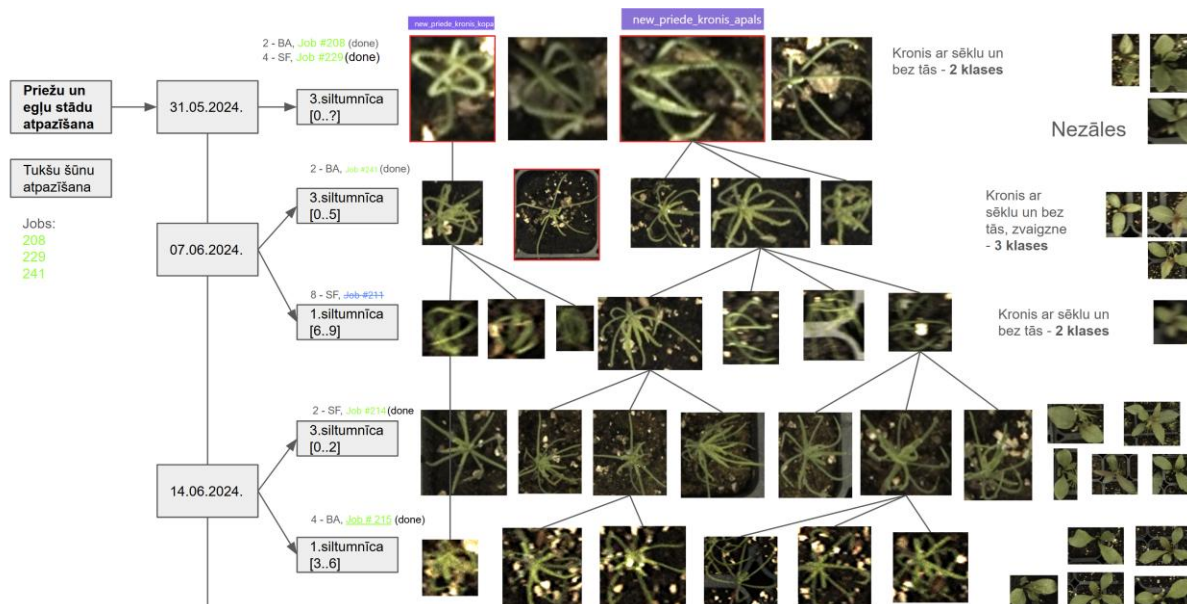
Kopumā projekta īstenošanas laikā tika iegūti vizuālie dati:

- par 2023.g. veikti vairāk kā 50 datu ieraksti (egle, priede, melnalksnis) - 5 izbraukumi;
- par 2024.g. veikti vairāk kā 150 datu ieraksti (priede, bērzs, egles) – 12 izbraukumi.

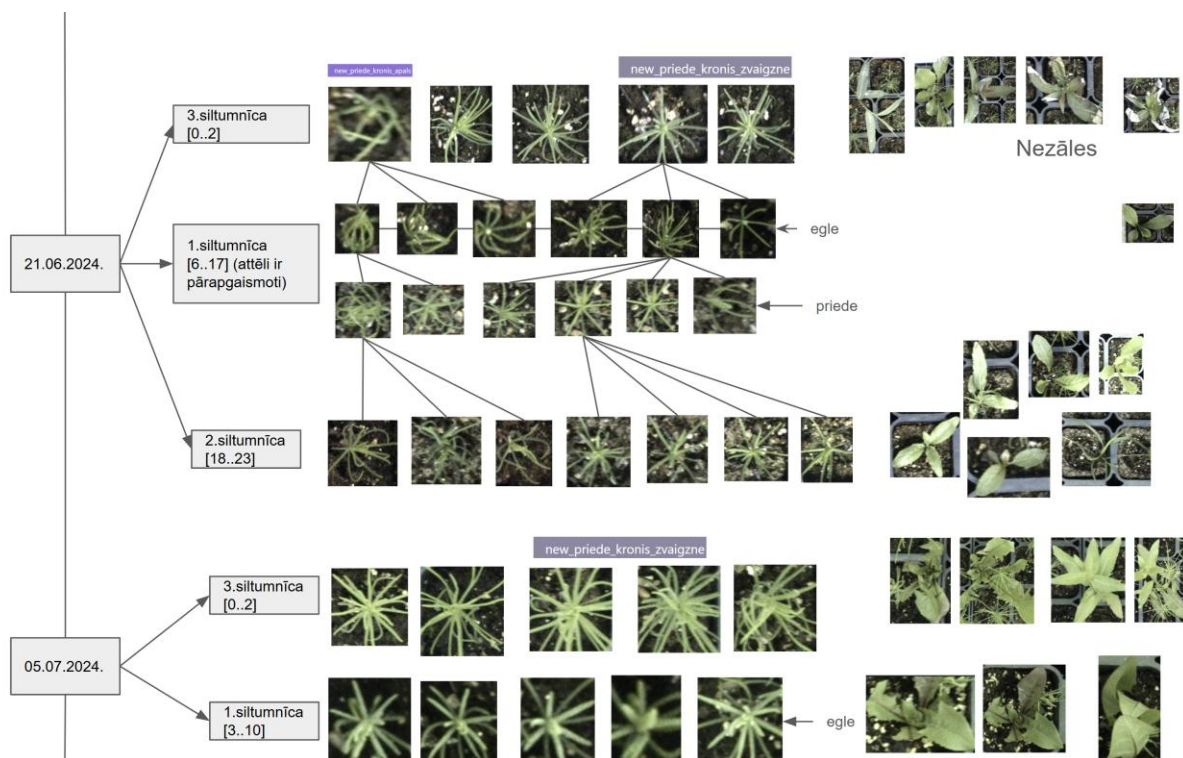


Attēls 20. Sējeņu vizuālo datu ieguve SIA Rīgas meži siltumnīcā (2024.g.) ar RTU pētniekiem

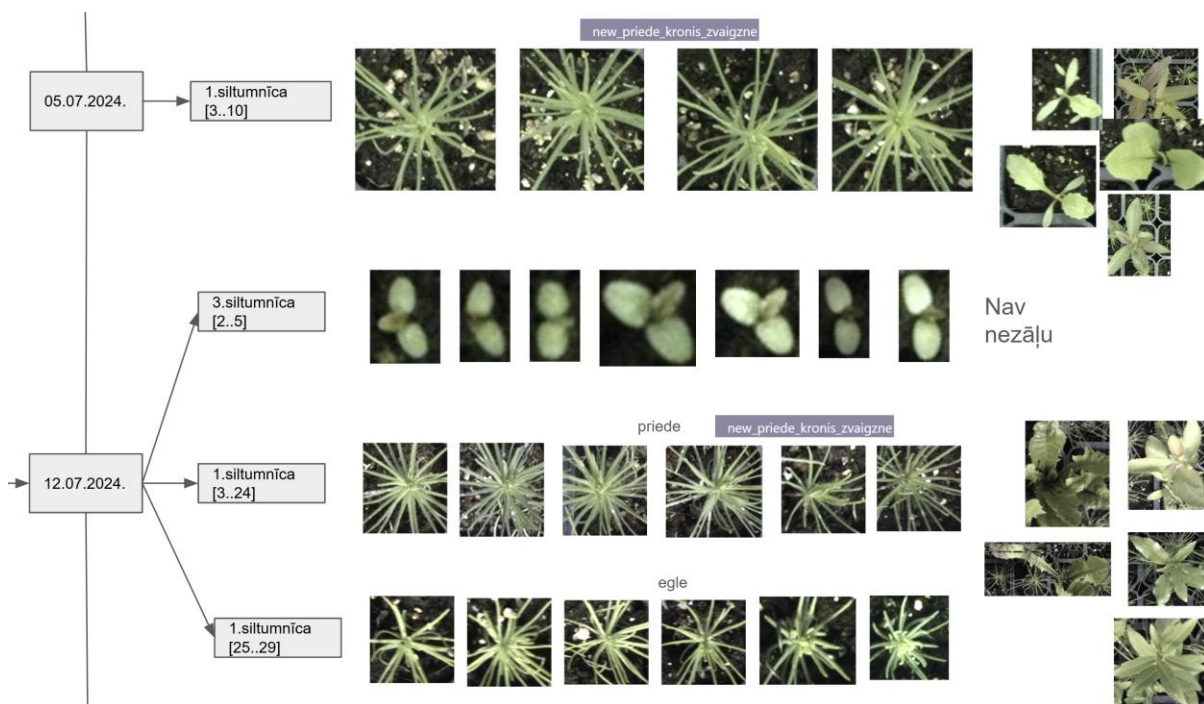
Vizuālo datu analīze parādīja, ka koku sējeņi attīstoties maina savu morfoloģiju un fizioloģiju. Attēlos zemāk ir parādīti sējeņu morfoloģijas izmaiņas atbilstoši to vecumam (sk. att. **Attēls 21.**, **Attēls 22.**, **Attēls 23.**, **Attēls 25.** un **Attēls 26.**).



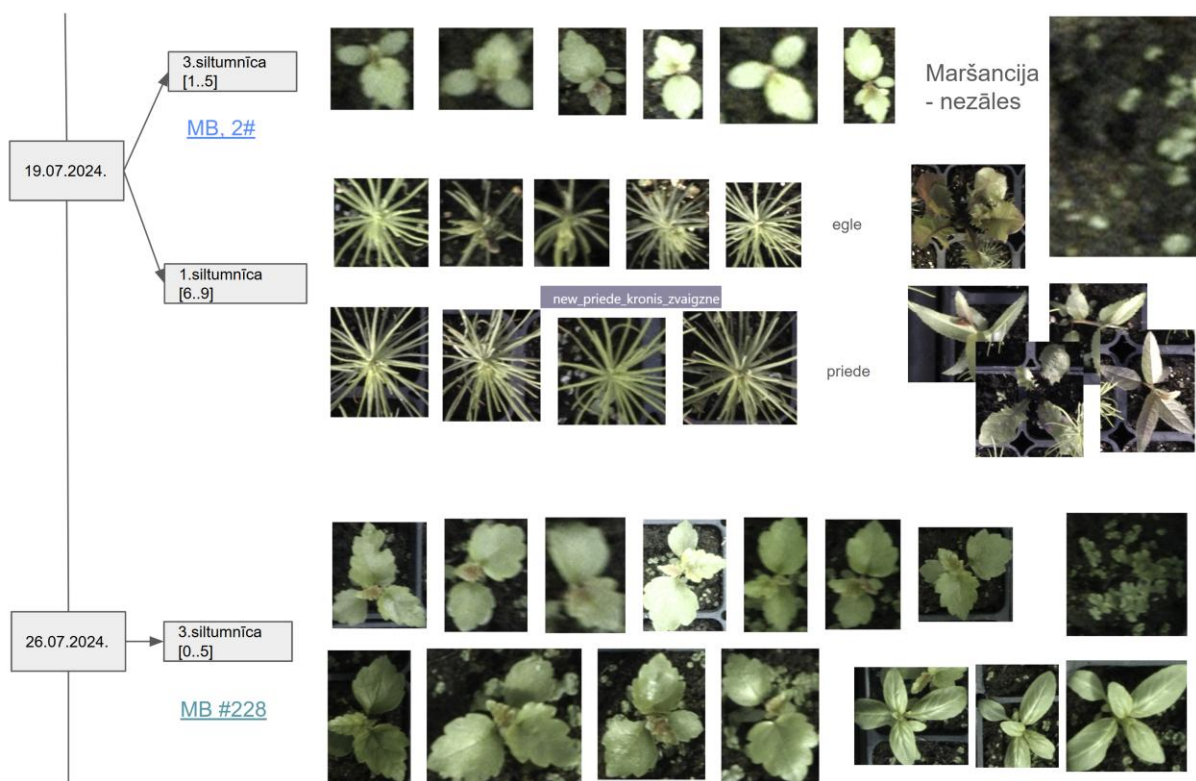
Attēls 21. Vizuālo datu ierakstu žurnāls par 2024.g. (koku sējeņu morfoloģija)



Attēls 22. Vizuālo datu ierakstu žurnāls par 2024.g. (koku sējeņu morfoloģija)



Attēls 23. Vizuālo datu ierakstu žurnāls par 2024.g. (koku sējeņu morfoloģija)



Attēls 24. Vizuālo datu ierakstu žurnāls par 2024.g. (koku sējeņu morfoloģija)



Attēls 25. Vizuālo datu ierakstu žurnāls par 2024.g. (koku sējeņu morfoloģija)

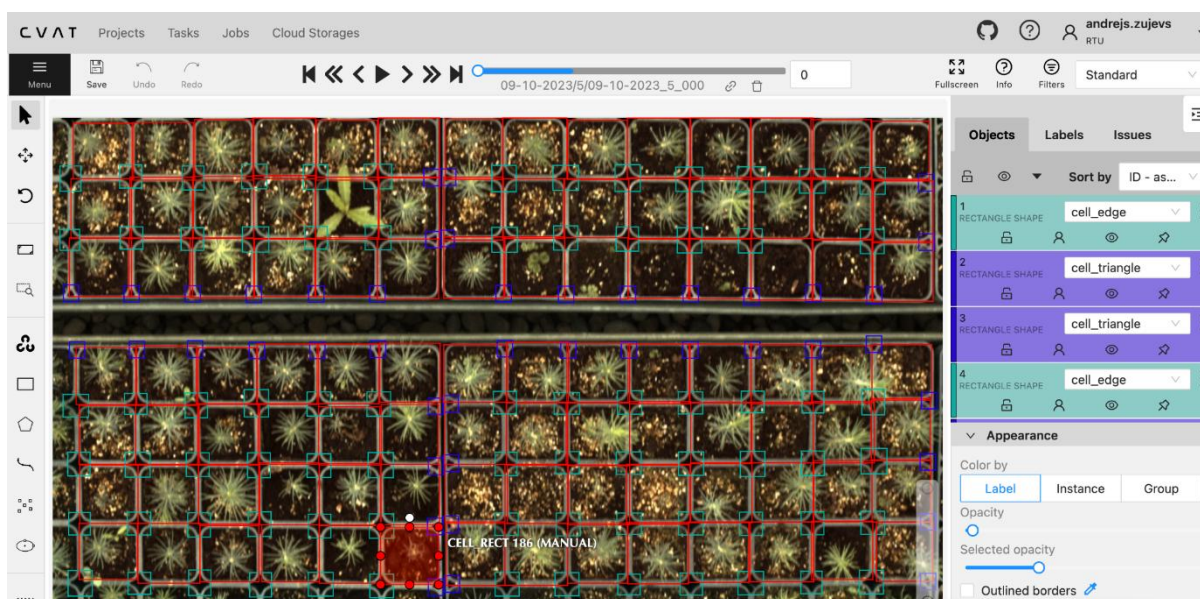


Attēls 26. Vizuālo datu ierakstu žurnāls par 2024.g. (koku sējeņu morfoloģija)

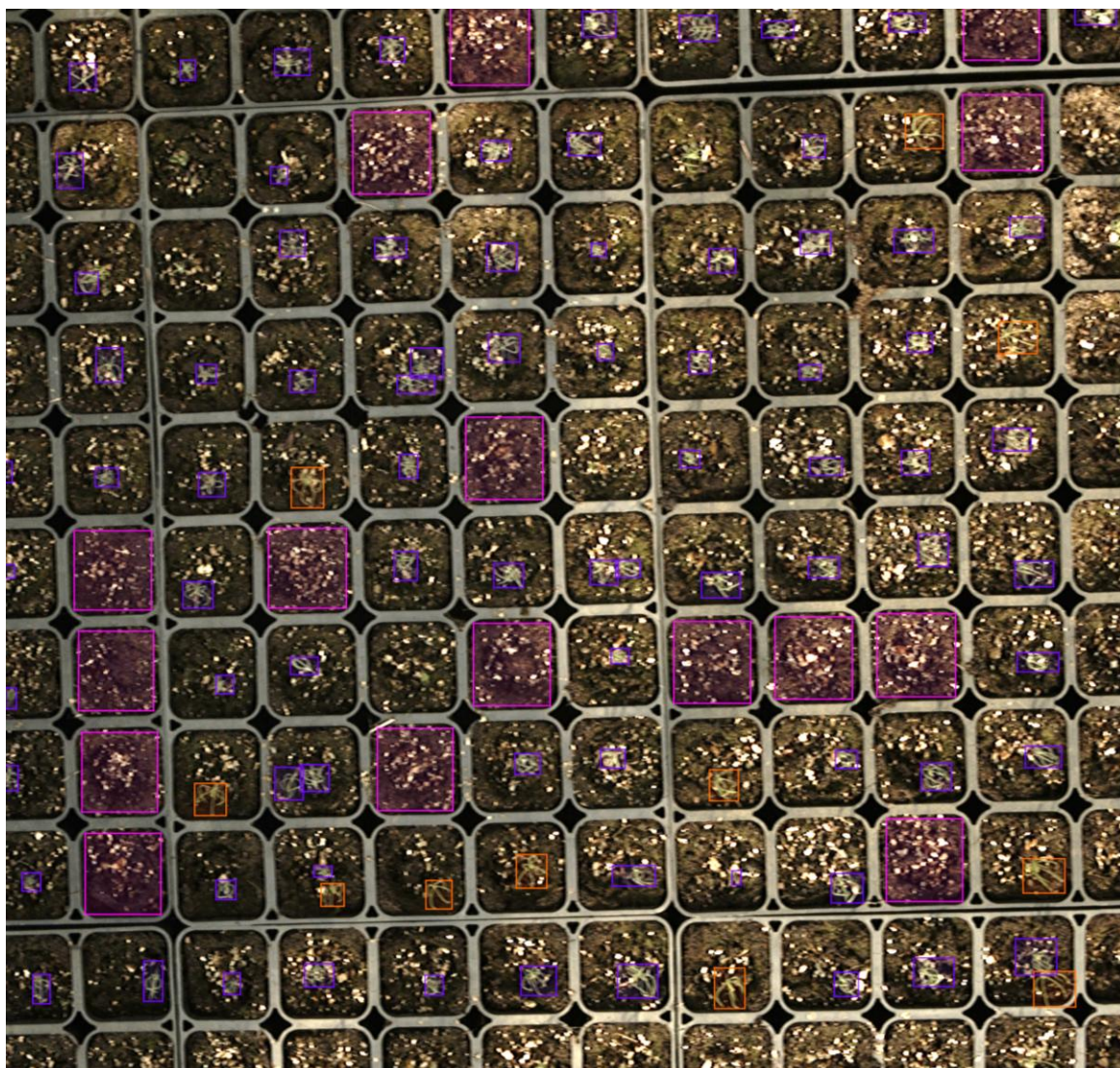
Kopumā projekta ietvaros tika iegūti vairāk nekā 100 tūkst. JPG attēlu, kas satur koku sējeņus, ar kopējo apjomu vairāk nekā 600 GB.

4.4. Vizuālo datu anotēšana un datu kopas izveide

Koku sējeņu vizuālie dati (attēli) vispirms tiek anotēti manuāli, kur lietotājs attēlā atrod koka sējeņu, tukšu kasetes šūnu vai nezāli un apvelk to ar robežlodziņšu, piešķirot tam klasi. Piemēram, “priede”, “egle”, “bērzs”, “tukša šūna” vai “nezāle” (sk. att. **Attēls 27.**, **Attēls 28.**, **Attēls 29.**, **Attēls 30.**, **Attēls 31.**, **Attēls 32.**, **Attēls 33.**, **Attēls 34.** un **Attēls 35.**). Vizuālo datu anotēšanai tika izmantots CVAT tiešsaistes rīks.



Attēls 27. Kasešu raksturiezīmju anotēšanas process



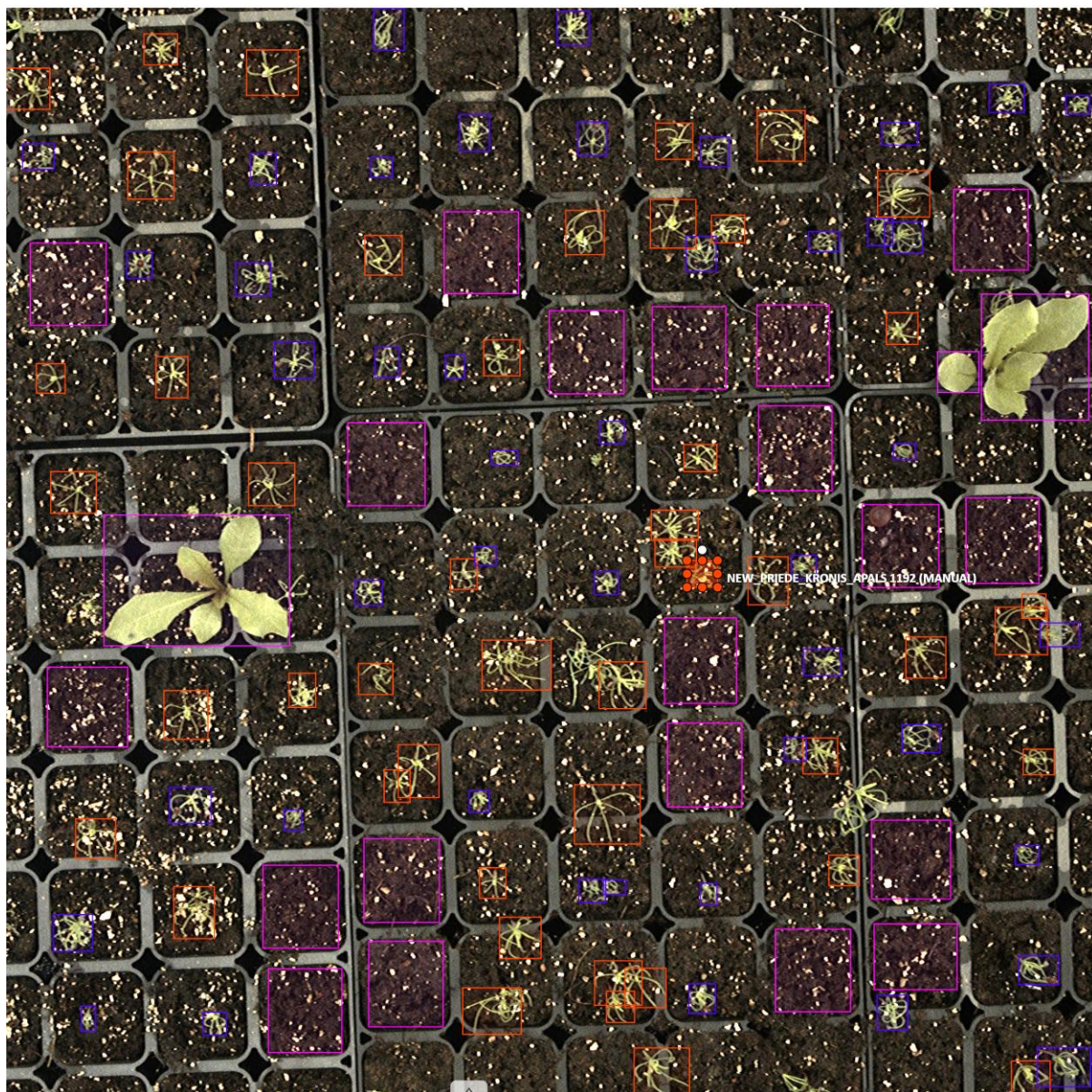
Attēls 28. Priedes sējeņu anotēšanas process



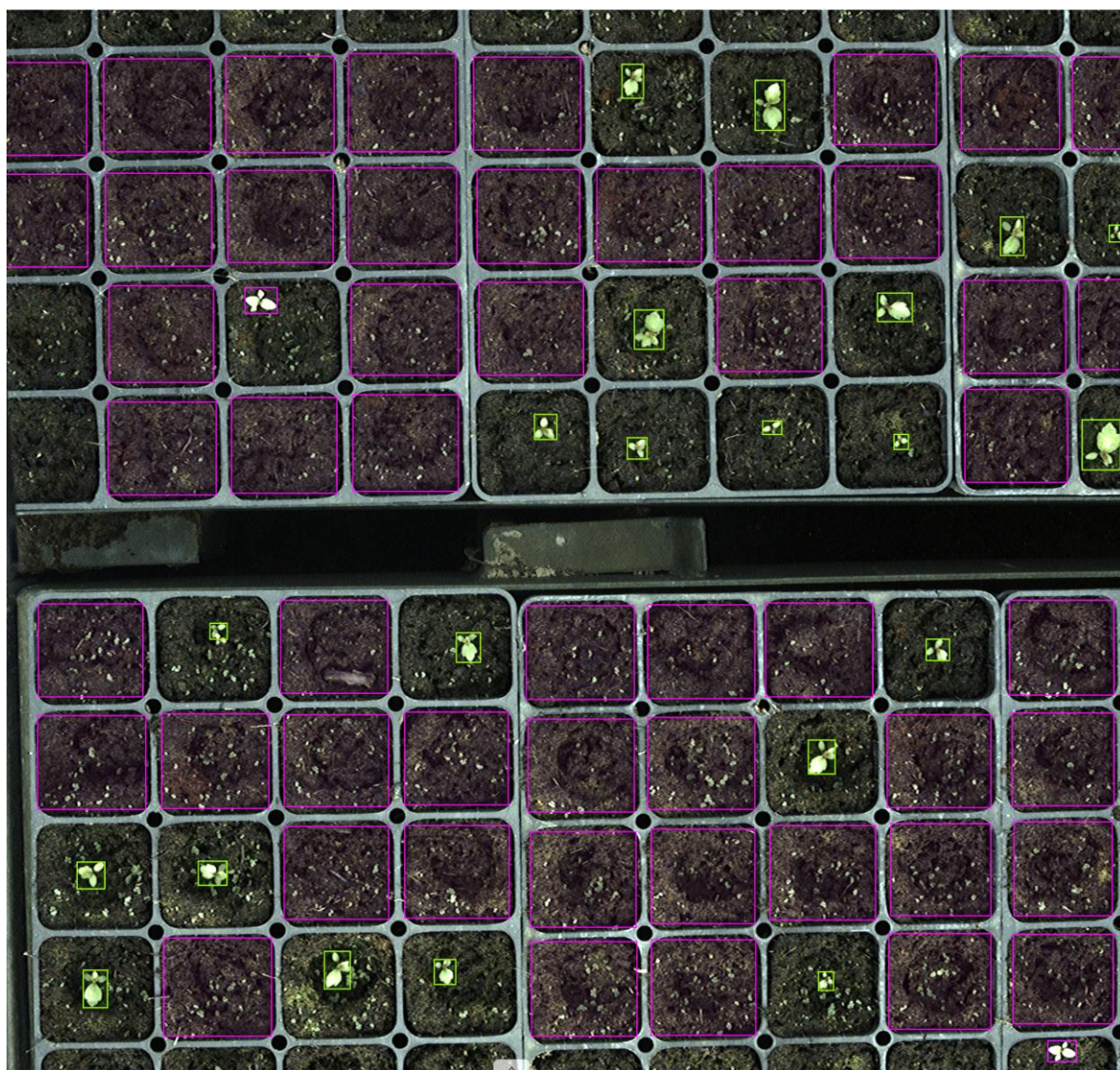
Attēls 29. Priedes sējeņu un nezāļu anotēšanas process



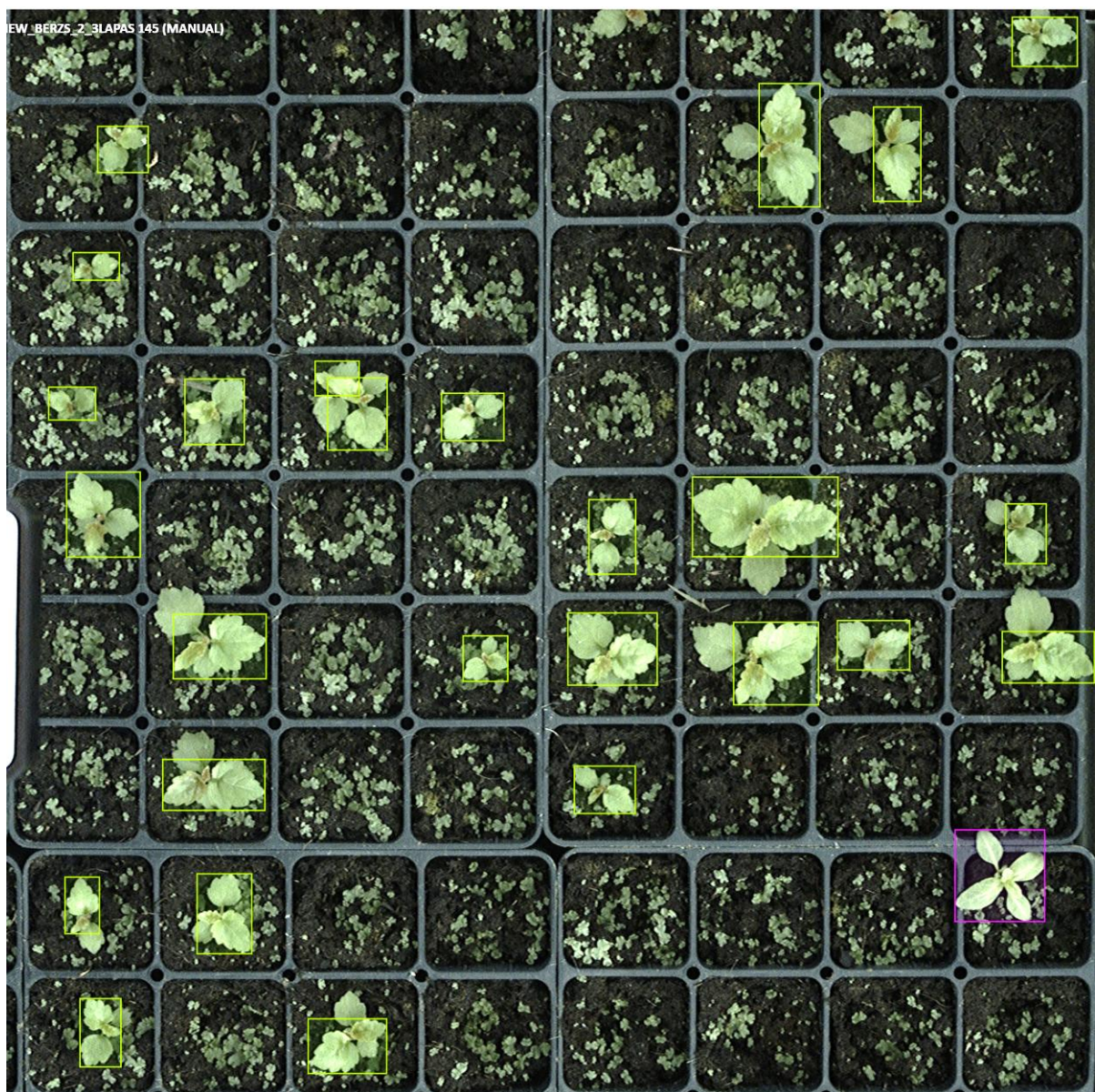
Attēls 30. Priedes sējeņu un nezāļu anotēšanas process



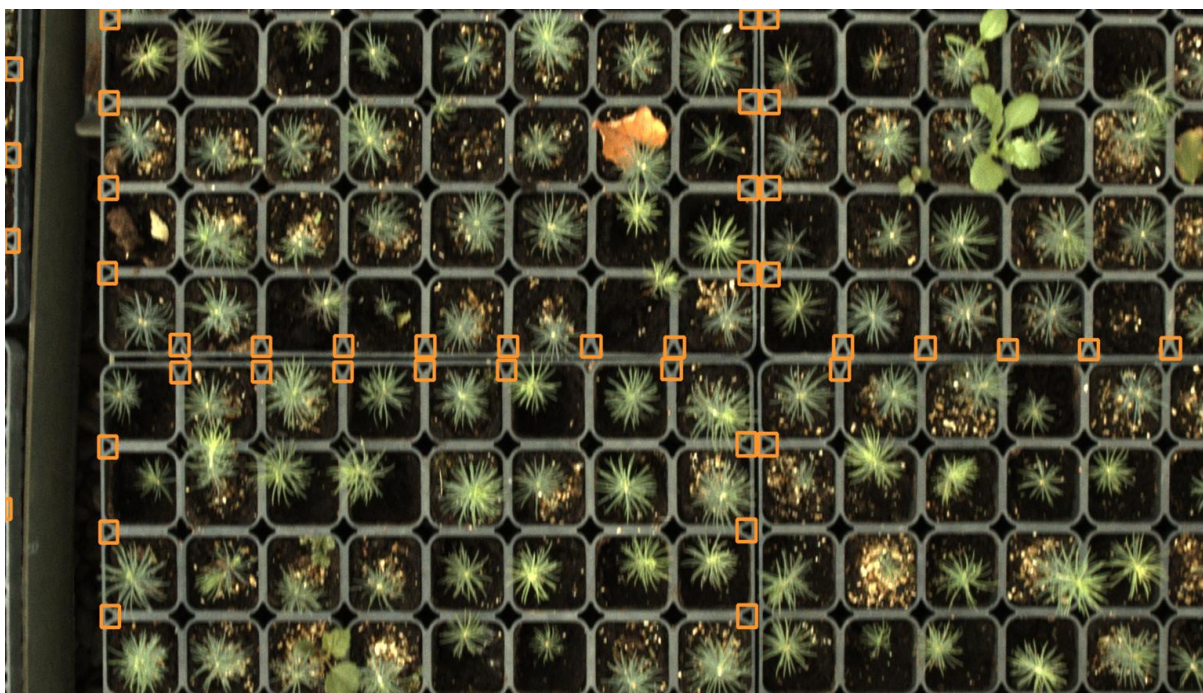
Attēls 31. Priedes sējeņu un nezāļu anotēšanas process



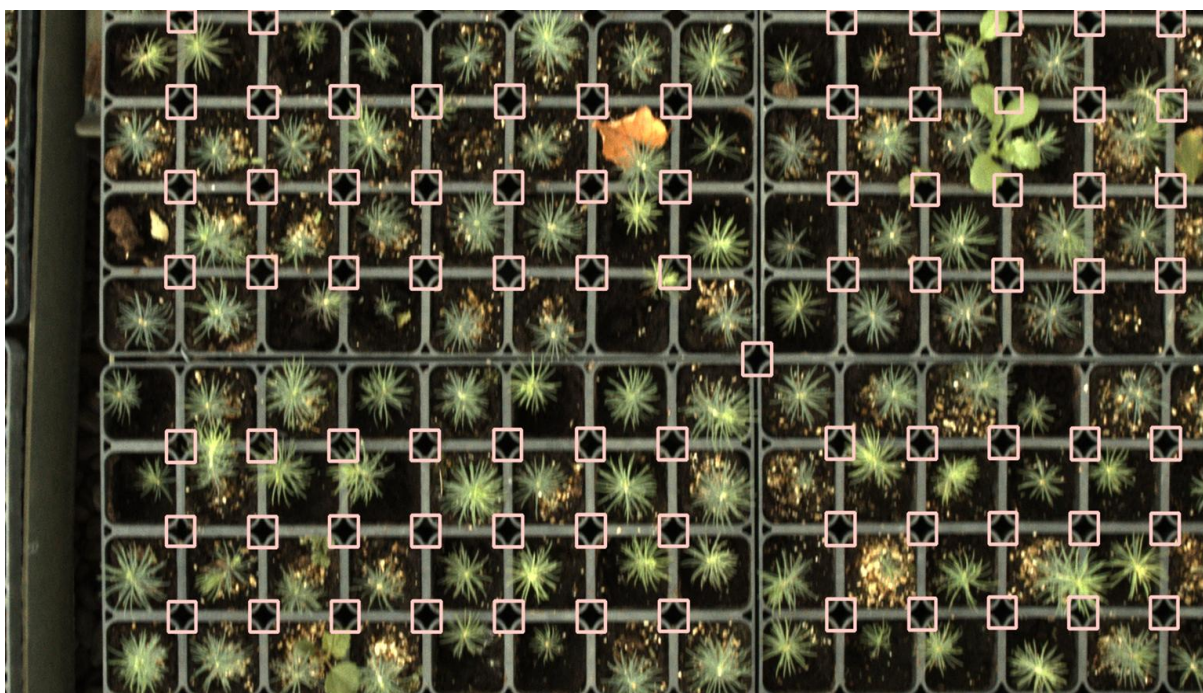
Attēls 32. Bērza sējeņu anotēšanas process



Attēls 33. Bērza sējeņu un nezāļu anotēšanas process



Attēls 34. Kasešu raksturierzīmju anotēšanas process (automātiski)



Attēls 35. Kasešu raksturierzīmju anotēšanas process (automātiski)

Vizuāli anotētie dati tālāk tiek izmantoti DM modeļu apmācības datu kopas izveidei. Projektā tika izmantota YOLO v.5.0 DM bibliotēka, lai apmācītu *YOLO* DM mākslīgo neironu tīklu modeļus, izmantojot RTU HPC skaitļošanas centra infrastruktūru.

Piemēram, priedes sējeņu detektēšanai tika sagatavota datu kopa ar šādu datu sadalījumu:

total_train_freq:

6: new_priede_kronis_kopa = 13726

7: new_priede_kronis_apals = 8070

14: new_tuksa_shuna = 9855

total_val_freq:

6: new_priede_kronis_kopa = 2313

7: new_priede_kronis_apals = 1378

14: new_tuksa_shuna = 1665

volume:

img_size: 1024 x 1024 px

test_size: 0

train_size: 1420

val_size: 245"

Savukārt, tukšu kasešu šūnu atpazīšanai šāda datu kopa:

total_train_freq:

5: nezale = 1222

total_val_freq:

5: nezale = 217

volume:

img_size: 1024 x 1024 px

test_size: 0

train_size: 3983

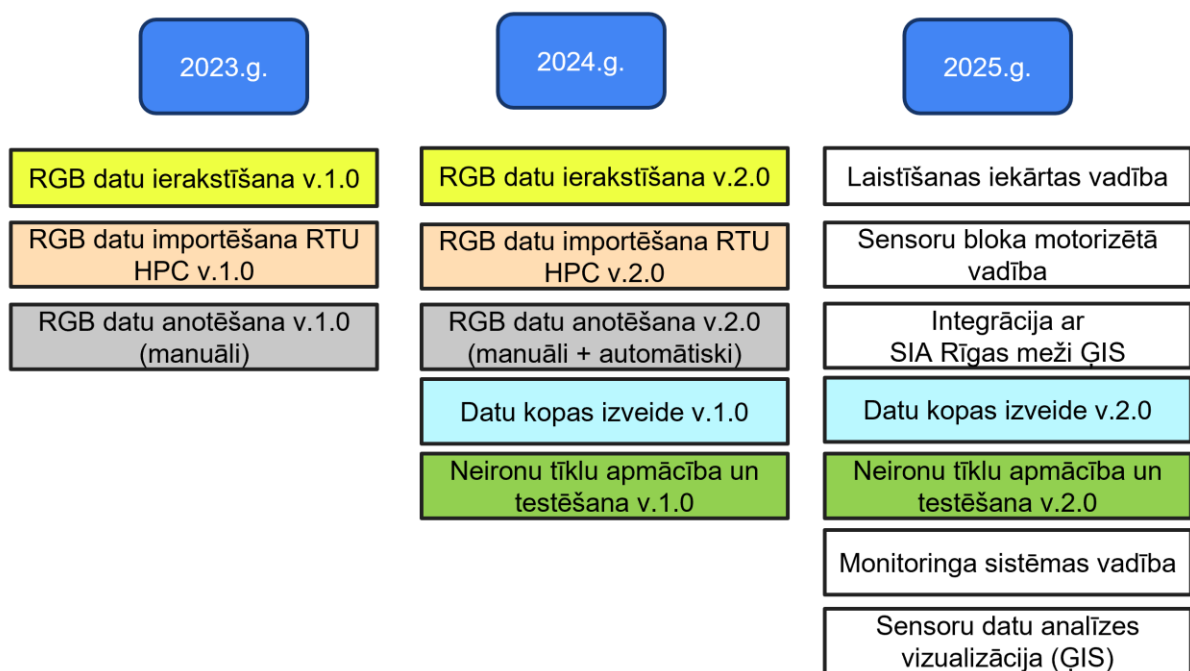
val_size: 733"

4.5. Risinājuma programmatūras attīstība

Projekta īstenošanas laikā programmatūras attīstība turpinājās, sākot ar 2023.g. Atsevišķiem programmatūras blokiem kods tika būtiski mainīts/uzlabots projekta īstenošanas gaitā, kur lielākie programmatūras izstrādes darbi notika tieši 2025.g (sk. att. **Attēls 36.**). Zemāk ir dots programmatūras bloku īss apraksts:

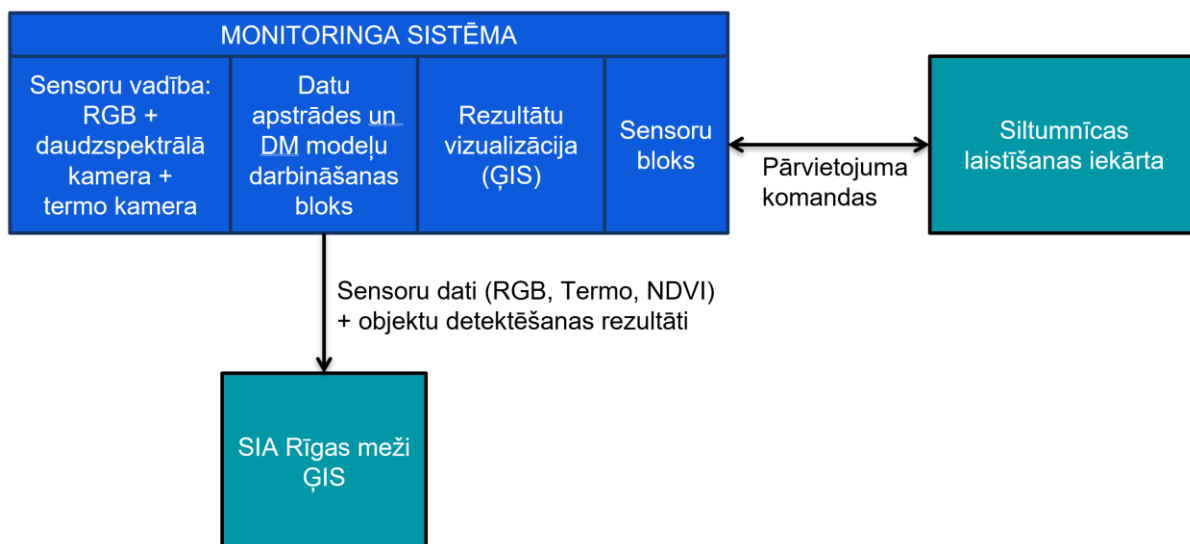
- 1) **RGB datu ierakstīšana** – programmatūras kopums, kas balstās uz ROS v.1.0 bibliotēkām. Tas ļauj konfigurēt, vadīt RGB kameru, kā arī ierakstīt kameras datus, gan video, gan atsevišķu attēlu datņu formātā, iepakojot tos *rosvbag* datnē;
- 2) **RGB datu importēšana RTU HPC** – programmatūras kopums, kas importē RGB kameras ierakstu datu RTU HPC datu glabāšanas infrastruktūrā, ļauj veikt ierakstu datņu (*rosvbag*) atpakošanu un datu izvietošanu to lietošanai CVAT rīka ietvaros;
- 3) **RGB datu anotēšana** – CVAT tiešsaistes rīks, kas konfigurēts atbilstoši projekta vajadzībām, kā arī integrēts ar DM modeļu darbināšanas programmatūru;
- 4) **datu kopas izveide** – programmatūras kopums, kas ļauj izmantot CVAT rīka attēlu anotāciju rezultātus un konvertēt tos *YOLO* v.5.0 datu formātā DM modeļu apmācībai;
- 5) **neironu tīklu apmācība un testēšana** – programmatūras kopums, kas ļauj apmācīt *YOLO* v.5.0 DM bibliotēkas modeļus, izmantojot RTU HPC infrastruktūru, kā arī veikt DM modeļu testēšanu un to rezultātu atspoguļošanu CVAT rīka ietvaros;
- 6) **laistīšanas iekārtas vadība** – programmatūras kopums, kas ļauj datu apmaiņas protokolu līmenī sensoru blokam komunicēt ar siltumnīcas laistīšanas iekārtu, vadot to automatizēti visas siltumnīcas garuma ietvaros;
- 7) **sensoru bloka motorizētā vadība** – programmatūras kopums, kas nodrošina zemā līmeņa sensoru bloka motoru vadību, nodrošinot tā pārvietošanu ar augstu precizitāti (kļūda $\pm 1,0$ mm) gar siltumnīcas laistīšanas iekārtas galveno stieni;
- 8) **integrācija ar SIA Rīgas meži ĢIS** – programmatūras kopums, kas nodrošina monitoringa sistēmas datu analīzes rezultātu importēšanu SIA Rīgas meži ĢIS sistēmā, izmantojot tīmekļa pakalpojumu interfeisus (*web services*);
- 9) **monitoringa sistēmas vadība** – programmatūras kopums (ROS1 sakņots), kas tiek darbināts ārpus sensora bloka, tā uzdevums vadīt sensoru bloku, konfigurēt un vadīt tā sensorus, pārvietot sensoru bloku, nodrošinot visas siltumnīcas virsmas skenēšanu, apstrādāt un analizēt sensoru datus, darbināt DM modeļus un eksportēt datu analīzes rezultātus uz lokālo ĢIS sistēmu, kā arī apstrādāt monitoringa sistēma dažādas kļūdas;

10) **sensoru datu analīzes vizualizācija** (ĢIS) – tīmekļa programmatūras kopums, kas ļauj sekot monitoringa sistēmas darba progresam reālajā laikā un aplūkot vēsturiskos datus par iepriekšējām siltumnīcas skenēšanas reizēm. Programmatūra ļauj vizualizēt sensoru (RGB, termo un daudzspektrālās kameras) datus sistēmas lietotājam ērtā veidā, atsevišķi piedāvājot: a) aplūkot RGB attēlus ar detektētiem koku sējeņiem, tukšām kasešu šūnām un nezālēm; b) aplūkot termo kameras datu vizualizāciju; c) aplūkot daudzspektrālās kameras datu vizualizāciju. Papildus tam, visu sensoru datu analīzes rezultāti tiek atspoguļoti objektu veidā uz siltumnīcas kartes (ĢIS slānis).



Attēls 36. Monitoringa sistēmas programmatūras attīstības diagramma

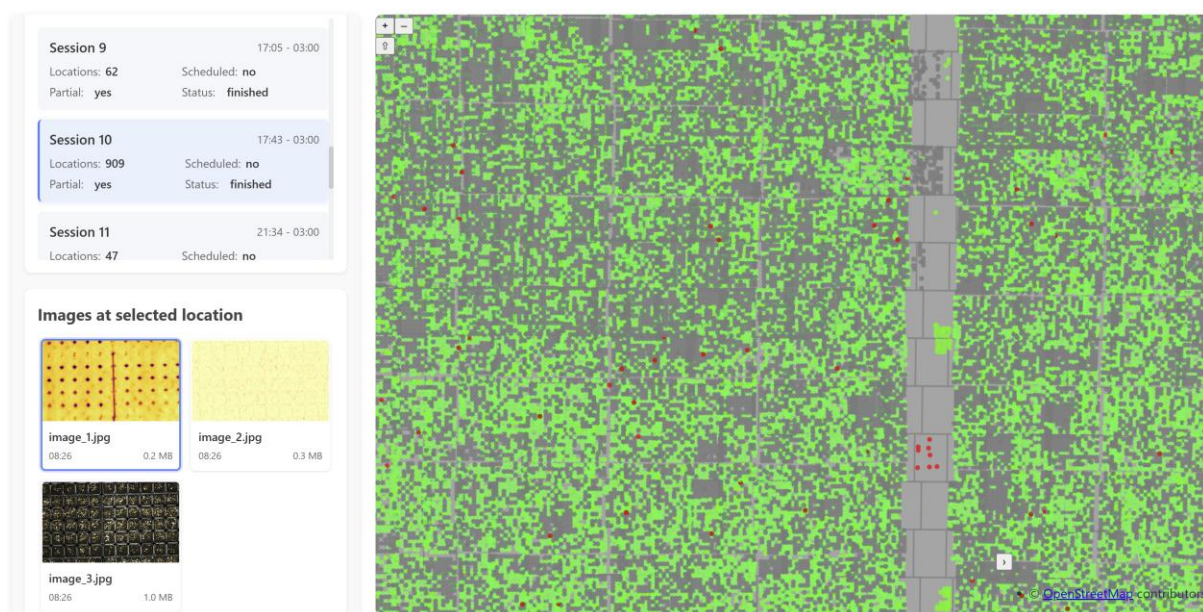
Monitoringa sistēmu var iedalīt četros lielos loģiskos blokos, kur atsevišķi bloki tiek integrēti ar ārējām sistēmām: siltumnīcas laistīšanas iekārtu un SIA Rīgas meži ĢIS (sk. att. **Attēls 37.**).



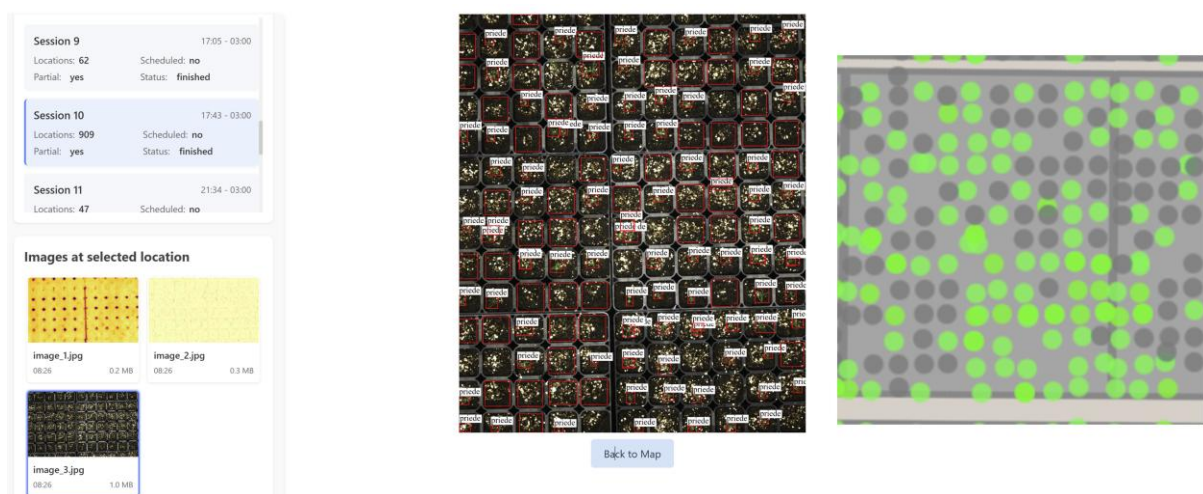
Attēls 37. Monitoringa sistēmas blokshēma

4.6. Risinājuma lietotāja saskarne

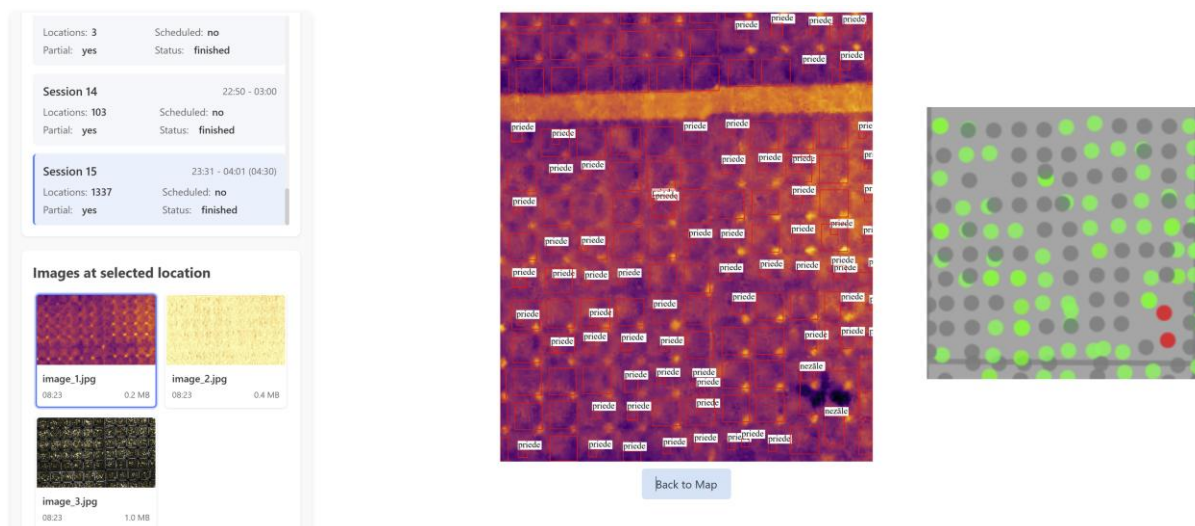
Monitoringa sistēmas saskarnei ir nozīmīga loma sistēmas lietderīgai izmantošanai un tās sensoru datu analīzes rezultātu interpretācijai no lietotāja puses. Lietotāja saskarne vizuāli atspoguļo monitoringa sistēmas darbību reālajā laikā, kur lietotājam ir iespēja sekot sējeņu kasešu virsmas temperatūras un relatīvās temperatūras mērījumu datiem, NDVI indeksa datiem, RGB kameras attēlu analīzes rezultātiem un aplūkot sensoru jēldatus (sk. att. **Attēls 38.**). Attēlā zemāk ir dots monitoringa sistēmas ekrānu uzņēmums, kur zaļie punkti atbilst detektētiem koku sējeņiem, tumšipelēki punkti atbilst tukšām kasešu šūnām, un sarkanie punkti – nezālēm. Lietotājam kreisajā apakšējā loga stūrī iespējams izvēlēties attēlu, kas atbilst sensora bloka pozīcijas siltumnīcas sensora datiem: RGB (sk. att. **Attēls 39.**), termo (sk. att. **Attēls 40.**), vai daudzspektrālo kamera.



Attēls 38. Monitoringa sistēmas logs ar RGB kameras attēlu analīzes rezultātiem

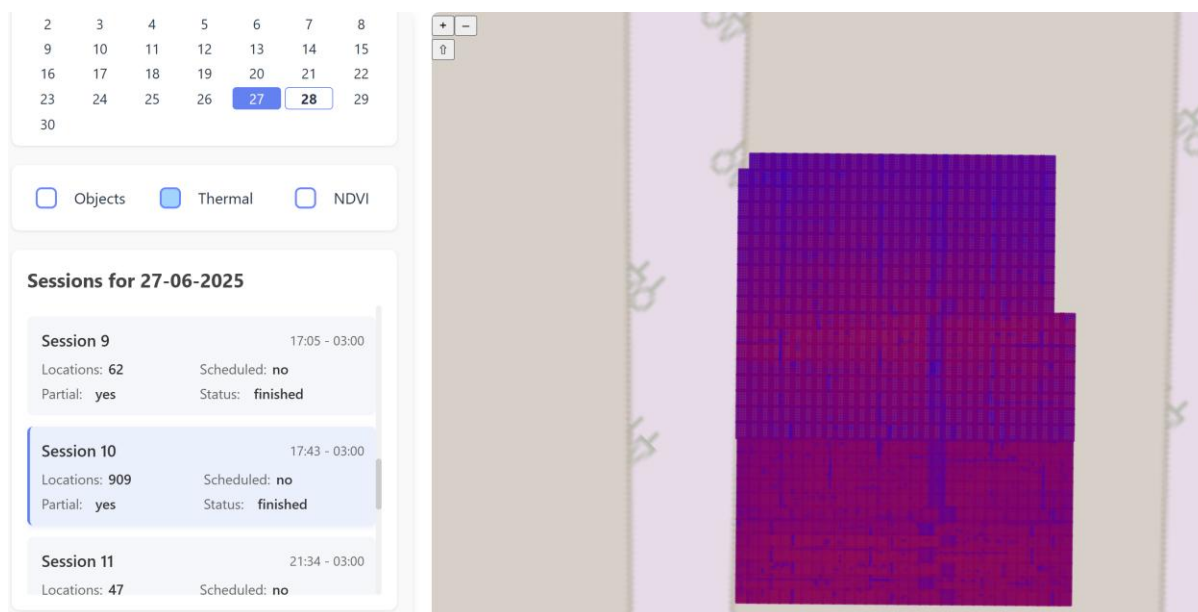


Attēls 39. Monitoringa sistēmas logs ar RGB kameras redzeslauku un tajā detektētiem vizuālajiem objektiem (tukšas šūnas, nezāles un koku sējeņi) vienai no sensoru bloka pozīcijām siltumnīcā

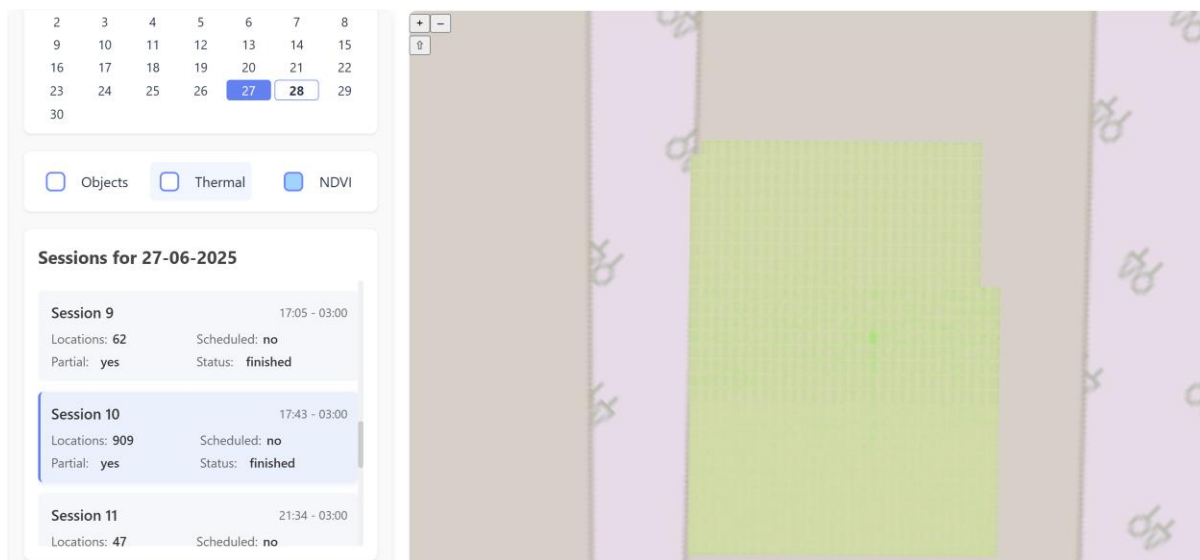


Attēls 40. Monitoringa sistēmas logs ar termo kameras redzeslauku un tajā detektētiem vizuālajiem objektiem (tukšas šūnas, nezāles un koku sējeņi) vienai no sensoru bloka pozīcijām siltumnīcā

Monitoringa sistēma ļauj vizualizēt arī termo kameras mērījumu datus siltumnīcas skenētai platībai. Vizualizācija ļauj iegūt priekšstatu par temperatūras un relatīvā mitruma svārstībām (sk. att. **Attēls 41.**). Līdzīgas iespējas tiek piedāvātas arī NDVI indeksa mērījumiem (sk. att. **Attēls 42.**).



Attēls 41. Monitoringa sistēmas logs ar termo kameras datu vizuālo interpretāciju



Attēls 42. Monitoringa sistēmas logs ar daudzspektrālās kameras datu vizuālo interpretāciju

5. Kopsavilkums

Projekta rezultāti veicina precīzās mežsaimniecības (projekta kontekstā - kokaudzēšanas) pētījumu un ražošanas virziena tālāko attīstību, kur lēmumu pieņemšana balstās uz precīziem datiem/faktiem. Reālo datu pieejamība ļaus efektīvāk pārvaldīt pieejamus resursus, t. sk. finanšu. No precīziem datiem varēs iegūt informāciju, kura nav saskatāma uzreiz vai tās iegūšana ir ārkārtīgi dārga.

Jaunā monitoringa sistēma nodrošina šādas iespējas:

- a) siltumnīcas koku sējeņu un to augšanas procesu detalizētu monitoringu:
 - i) koku sējeņu dīgšana un augšana;
 - ii) nezāļu izplatība;
 - iii) veģetācijas līmeņa novērtējums, t. sk. par nezālēm;
 - iv) dubultsējeņu eksistences noteikšana;
- b) siltumnīcas substrāta un sējeņu virsmas temperatūras un relatīvā mitruma mērījumi:
 - i) substrāta un koku sējeņu virsmu temperatūras, kā arī relatīvā mitruma svārstību noteikšana;
 - ii) laistīšanas režīma un siltumnīcas klimata kontroles ietekme uz siltumnīcas virsmas temperatūras un relatīvā mitruma svārstībām;
- c) dažādu anomāliju noteikšana:
 - i) tukšas šūnas;
 - ii) sēklu dīgstība;

- iii) nezāļu izplatība;
- iv) veģetācijas novirzes;
- v) sējeņu morfoloģijas nevienlīdzīgums;
- d) attālināta procesu uzraudzība, izmantojot ĢIS:
 - i) koku sējeņu augšanas procesu uzraudzība un pārvaldība, t. sk. kokaudzēšanas uzdevumu plānošana;
 - ii) sēklu dīgstības kontrole;
 - iii) virsmu relatīvā mitruma un temperatūras kontrole;
 - iv) nezāļu izplatības kontrole;
 - v) veģetācijas līmeņa (NDVI) kontrole;
 - vi) vizuālā kontrole (izvēlētai sensoru bloka lokācijai vietai siltumnīcā).

Monitoringa sistēmas attīstības iespējas nākotnē:

- 1) koku sējeņu morfoloģijas un fizioloģijas analīze;
- 2) produkcijas apjomu precizēta prognozēšana;
- 3) nezāļu un dubultsējeņu ravēšanas robotizācija;
- 4) siltumnīcas laistīšanas režīmu optimizācija;
- 5) siltumnīcas klimata kontroles režīmu optimizācija;
- 6) koku sējeņa dzīves cikla novērošana līdz tā stādīšanai mežā;
- 7) darbspēka noslodzes plānošana, balstoties uz precīziem datiem;
- 8) sēklu materiāla dīgstības pētījumi.

6. Pieeja programmatūrai, projektējumiem, datu kopām un DM modeļiem

Interesentiem viena mēneša laikā tiks sagatavota pieeja projekta ietvaros radītai programmatūrai, aparatūras un elektronikas projektējumiem, datu kopām un DM modeļiem, rakstiski iesniedzot pieprasījumu un nosūtot to uz e-pasta adresi: andrejs.zujevs@rtu.lv adresēto RTU vadošajam pētniekam Dr. sc. ing. Andrejam Zujevam.