



PĀRSKATS PAR PĒTĪJUMA 2024. GADA REZULTĀTIEM

PĒTĪJUMA NOSAUKUMS: **Tehnoloģijas meža apsaimniekošanas procesu
efektivitātes paaugstināšanai**

LĪGUMA NR.: 5-5.9.1_007R_101_21_80

PĒTĪJUMA ZINĀTNISKAIS VADĪTĀJS: Andis Lazdiņš, LVMI Silava vadošais pētnieks

PĒTĪJUMS ĪSTENOTS AKCIJU SABIEDRĪBAS "LATVIJAS VALSTS MEŽI" UN LATVIJAS VALSTS
MEŽZINĀTNES INSTITŪTA "SILAVA" 2021. GADA 13. SEPTEMBRA SADARBĪBAS LĪGUMA IETVAROS

Salaspils, 2024

Kopsavilkums

Pētījuma “Enerģētiskās koksnes uzglabāšana krautuvēs” turpinās datu ievākšana un apstrāde saskaņā ar darba uzdevumu un kalendāro plānu. Pārskata periodā pabeigta pirmās grupas krautuves šķeldošana, savukārt no trešās un ceturtās grupas krautuvēm, lai raksturotu mežizstrādes atlieku uzglabāšanu cismā un augšgala krautuvē ietekmi uz šķeldu kvalitāti raksturojošajiem parametriem, turpinās datu ievākšana. Savukārt ilgstoši uzglabātās mežizstrādes atlieku krautuvēs (ceturtās grupa) šķeldošana turpinās, plānojot paredzēto apjomu sašķeldot līdz 2025. vidum.

Pētījuma “Forvardera greifera svāri koksnes biokurināmā apjoma noteikšanai” 2024. gadā pabeigta datu ievākšana, izmantojot John Deere svēršanas sistēmu. Izveidoti divi konvertēšanas modeļi, tajā skaitā viens, kas paredzēts pievestā apjoma aprēķiniem no masas (dabiski mitra materiāla tonnām) uz pievestā materiāla tilpuma vienībām (berkubikmetriem), un otrs modelis, kas paredzēts pārrēķiniem uz realizējamo apjomu (berkubikmetri). Otrā modeļa precizēšana paredzēta 2025. gadā, kad plānots sašķeldot atlikušās pievestās krautuves un iegūt patērētajam realizēto apjomu.

Otrā pētnieciskā uzdevuma apakšuzdevuma “Forvardera atstāto risu mērīšanas iekārtas izstrāde” īstenošana atbilstoši kalendārajam plānam. Plānotās trīs RM2 sistēmas nodrošina apaļo kokmateriālu pievešanas datu uzkrāšanu. Pētījuma ietvaros papildināta R vidē funkcionējošā vienādojumu kopa, iekļaujot papildu informāciju par risu izplatību ārpus cismas (ceļā starp cismu un augšgala krautuvi), kā arī izveidots risinājums, lai lietotājs varētu mainīt risu dziļuma robežvērtību.

Trešā pētnieciskā uzdevuma apakšuzdevums “Risinājumi meža ceļu monitoringam – priekšizpētes posms” veikta dažādu tehnoloģisko risinājumu pielietošanas pieredzes analīze un izpētes rezultāti, nosakot ceļa brauktuves stāvokli (bedres, šķērsviļņi jeb trepe, rises) un atpazīstot dažādus ceļa infrastruktūras elementus (ceļa zīmes, kokmateriālu un mežizstrādes atlieku krautuves). Pētījumā vērtētas dažādu risinājumu priekšrocības un trūkumi, tajā skaitā iegūti empīriski dati akselerometra un citu tehnoloģiju efektivitātes novērtēšanai, un sagatavoti priekšlikumi izmēģinājumiem ar pētnieciskā uzdevuma izpildei piemērotākajiem risinājumiem. Perspektīvākie risinājumi šķērsviļņu un bedru noteikšanai ir akselerometrs, risu noteikšanai – vienkārši viena stara LiDAR sensori, bet ceļu infrastruktūras noteikšanai var izmantot auto video reģistratora kameru un izmantojot atvērta pirmkoda datorredzes algoritmus, piemēram OpenCV, datu apstrādei. Augstas izšķirtspējas datorredzes stereo kamera var būt nepieciešama detalizētas informācijas ieguvei par ceļu stāvokli.

Pētījums īstenots Latvijas Valsts mežzinātnes institūta “Silava” (LVMI Silava) un AS “Latvijas valsts meži” (LVM) 2021. gada 13. septembra sadarbības līguma ietvaros un saskaņā ar LVMI Silava un LVM līgumu Nr. 5-5.9.1_007r_101_21_80 par pētījumu programmas “Tehnoloģijas meža apsaimniekošanas procesu efektivitātes paaugstināšanai” īstenošanu. Empīrisko datu analīzi un starpziņojuma sagatavošanu 2023. gadā nodrošina LVMI Silava pētnieki A. Zimelis, S. Kalēja, J. Ivanovs, R. Meļņiks, J. Champion, A. Lazdiņš. Pētījuma izpildes progressa kopsavilkums apkopots tabulā.

Tehnoloģijas meža apsaimniekošanas procesu efektivitātes paaugstināšanai

Darbs	Pamatojums, darbības un metodika (pētījums, darbs)	Nodevumi	Izpildes termiņš	Statuss uz 31.12.2024
1. Meža biokurināmā ražošanas un piegāžu tehnoloģiju pilnveidošana un aprobācija				
1.1. Biomasas uzglabāšana krautuvēs	Darbu nolūks: Novērtēt meža biomasas kvalitātes izmaiņas uzglabāšanas laikā augšgala krautuvē un cismā. Lauku darbi: • koksnes paraugu ievākšana reizi mēnesī no 1., 3. un 4. grupas krautuvēm siltumspējas un mitruma satura analīzēm; • 1., 3. un 4. grupas krautuvju uzmērīšana reizi mēnesī, izmantojot manuālo un fotogrammetrijas metoģi; • uzglabātā materiāla šķeldošana atbilstoši izstrādātajam kalendārajam grafikam šķeldu īpašību (siltumspēja, mitruma un pelnu saturs un tilpumblīvums) izmaiņu raksturošanai; • ražošanas apstākļos 1. grupas krautuvēs sagatavoto šķeldu paraugu ievākšana analīzēm, šķeldu kravu tilpuma mērīšana un svēršana; • ražošanas apstākļos 4. grupas krautuvēs sagatavoto šķeldu paraugu ievākšana analīzēm, šķeldu kravu tilpuma mērīšana un svēršana. Kamerālie darbi: • ievākto biokurināmā paraugu (1., 3. un 4. krautuvju grupas) analīzes laboratorijā, nosakot mitruma un pelnu saturu un siltumspēju; • ievākto šķeldas paraugu (1. un 4. krautuvju grupa) analīze laboratorijā, nosakot mitruma un pelnu saturu, īpatnējo blīvumu un siltumspēju;	1. Pētījuma 2024. gada rezultātu apkopojums etapa pārskatā. 2. Izstrādāti aktualizēti funkcionējoši vienādojumi, ar kuriem var aprēķināt biomasas siltumspējas izmaiņas, biomasu ilgstoši glabājot krautuvē. Vienādojuma aprēķina rezultātu piemēri attēlojami grafiski – līknes veidā, EK siltumspējas izmaiņas laika skalā. 3. Izstrādātas biomasas siltumspēju izmaiņu tabulas % (glabājot EK krautuvē) mežizstrādes atlieku siltumspējas izmaiņām: - lapu koku apaugumam lauksaimnieciski izmantojamās zemēs, - priedes cismās, - jauktu skuju koku cismās un, - lapu koku cismās 4. Pētījuma rezultāti iesniegti publicēšanai starptautiski atzītā, citējamā izdevumā.	31.12.2024	Pilnveidoti vienādojumi, lai aprēķinātu biomasas siltumspējas izmaiņas ilgstošas uzglabāšanas laikā. Izstrādātais vienādojums pielāgots Excel videi, tādējādi uzlabojot to praktisko pielietojumu, sniegts piemērs izstrādātā vienādojuma pielietojumam arī mežizstrādes atlieku ilgstošai uzglabāšanai sadalījumā pa grupām (lapu un skuju koka audzes, atsevišķi izdot priežu audzes). Pārskatā iekļauta tabula ar vidējām siltumspējas izmaiņām uzglabāšanas laikā. Publikācija par pētījuma rezultātiem sagatavota un iesniegta publicēšanai “Research for rural development”, publikācijas nosaukums “The impact of storage duration on changes in the

Tehnoloģijas meža apsaimniekošanas procesu efektivitātes paaugstināšanai

Darbs	Pamatojums, darbības un metodika (pētījums, darbs)	Nodevumi	Izpildes termiņš	Statuss uz 31.12.2024
	- prognožu modeļa pilnveidošana, izmantojot pētījumā iegūto datu kopu; - iegūto datu publicēšana zinātniskajā periodikā.			quality of energy wood in Latvia”.
1.2. Forvardera greifera svāri koksnes biokurināmā apjoma noteikšanai	Darbu nolūks: Uzlabot pievestā materiāla uzskaites precizitāti un nodrošināt ātrāku ražošanas datu apriti. Lauka darbi: - pētījumā iesaistīto operatoru apmācības; - darba metožu aprobēšana praksē, izmantojot citu ražotāju svaru sistēmas; - datu ievākšanas kvalitātes sākotnējā novērtēšana, salīdzinot to ar AGK iegūtiem datiem; - biokurināmā svēruma datu iegūšana LGK. Kamerālie darbi: - empīrisku datu ieguves saskaņošana ar LVM; - darba uzdevuma un sistēmas sagatavošanas prasību izstrādāšana pētījumā iesaistītajām tehnikas vienībām; - pētījumā iegūto datu apkopošana, analīze un sakārību novērtēšana; - pētījumā "Biomases uzglabāšana krautuvēs" izstrādātā modeļa precizitātes izvērtēšanu, izmantojot krautuvju mērījumu datus; - iegūto datu publicēšana zinātniskajā periodikā; - rekomendāciju gatavošanas svaru sistēmu pielietošanai ražošanā.	- Pētījuma 2024. gada rezultātu apkopojums etapa pārskatā. Pievestā materiāla apjoms vērtēts fiziskās mērvienībās (berkubikmetri), sausnas tonnās un enerģijas mērvienībās (MWh). - Rekomendācijas svaru sistēmu pielietošanai praktiskajā ražošanā. - Krautuvē pievestās biomasas masas konvertēšanas modeļa precizitātes izvērtējums (salīdzinājums ar biomasas krautuvju mērījuma datiem, salīdzinājums ar šķeldu realizācijas datiem) - Pētījuma rezultāti iesniegti publicēšanai starptautiski atzītā, citējamā izdevumā.	31.12.2024	Datu iegūšana ar John Deere svēršanas sistēmu pabeigta, apkopoti iegūtie dati. Pārreķiniem no masas mērvienībās uz tilpuma mērvienībām izstrādāts vienādojums, iekļaujot datus par realizēto šķeldu apjomu no 2024. gadā sašķeldotajām krautuvēm. Publikācija par pētījuma rezultātiem sagatavota un iesniegta publicēšanai "Engineering for rural development", publikācijas nosaukums "Accounting of extracted harvesting residues using forwarder boom scales".
2. Meža tehnikas monitoringa sistēmu un datu automatizētās apstrādes instrumentu pilnveidošana un ieviešana ražošanā				
2.1. Forvardera atstāto risu	Darbu nolūks: RM2 sistēmas pielietošanas izmēģinājumi ražošanas apstākļos.	1. Pētījuma 2024. gada rezultātu apkopojums etapa pārskatā.	31.12.2024	Veikta operatoru apmācība, uzstādītas trīs

Tehnoloģijas meža apsaimniekošanas procesu efektivitātes paaugstināšanai

Darbs	Pamatojums, darbības un metodika (pētījums, darbs)	Nodevumi	Izpildes termiņš	Statuss uz 31.12.2024
mērīšanas iekārtas izstrāde	Lauka darbi: • pētījumā iesaistīto forvarderu operatoru apmācības; • bojātās RM2 sistēmas atjaunošana; • vienas RM2 sistēmas izgatavošana; • trīs RM2 prototipu sistēmu uzstādīšana kopšanas un vienlaidus galvenās cirtes cismās strādājošiem forvarderiem; • RM2 prototipu testēšana ražošanas apstākļos, veicot apaļo kokmateriālu pievešanu (pievešanas izmēģinājumi plānoti līdz gada beigām); • risu dziļuma kontrolmērījumu veikšana, izmantojot tradicionālo metodi (kontrolmērījumi un LiDAR jāveic ne mazāk kā 10 ha kopšanas cismās, kur veikta automatizēta risu mērīšana). Kamerālie darbi: • RM2 prototipa pilnveidošana, nodrošinot datu rezerves kopēšanu un pārraidi uz attālinātu serveri; • viena pilnveidota RM2 prototipu izgatavošana lauka izmēģinājumiem; • ar RM2 prototipiem un kontrolmērījumos iegūto brauktuves raksturojošo rādītāju, tajā skaitā tehnoloģisko brauktuves platības un dziļu risu izplatības analīze; • programmas prototipa pilnveidošana risu mērījumu un brauktuves raksturojošo datu analīzei.	2. Pilnveidots un pasūtītājam pieejams pētījuma III etapā izstrādātais programmas prototips datu analizēšanai (<i>RM2 sistēmā funkcionējošu vienādojumu kopa</i>): - ar programmas palīdzību var iegūt datus par risēm uz pievešanas ceļa un atsevišķi – datus par risēm cismā; - risu dziļumu var uzrādīt lietotāja definētās grupās, piemēram, rises, kas dziļākas par 20 cm vai 25 cm. 3. Precizēts programmas darbības apraksts, lietošanas instrukcijas.		RM2 sistēmas. Precizēta RM2 sistēmā funkcionējošu vienādojumu kopa, nodrošinot ārpus cirtes (uz pievešanas ceļiem) esošo risu identificēšanu, kā arī iespēju mainīt risu dziļuma robežvērtību. Papildināts programmas darbības apraksts, iekļaujot 2024. gadā izstrādātos risinājumus.

Tehnoloģijas meža apsaimniekošanas procesu efektivitātes paaugstināšanai

Darbs	Pamatojums, darbības un metodika (pētījums, darbs)	Nodevumi	Izpildes termiņš	Statuss uz 31.12.2024
3. Risinājumi meža ceļu monitoringam				
3.1. Risinājumi meža ceļu monitoringam – priekšizpētes posms	Darbu nolūks: Saskaņā ar pasūtītāja definētām prasībām un nosacījumiem apkopot informāciju par tehnoloģiskām iespējām un risinājumiem, kurus izmantot (uzstādīt) kravas transportlīdzekļos – kokvedējos dinamiskai meža ceļu stāvokļa noteikšanai. Jātiecas uz risinājumiem, kas primāri jāspēj pamanīt un pazīt šādus ceļa defektu veidus un objektus, kā arī fiksēt to atrašanās vietu: bedres un izskalojumi (dziļums > 5 cm, platums > 50 cm, garums > 50 cm); “trepe” (dziļums > 5 cm, periodiski vismaz 20 m 100 m garā posmā); rises (gareniski dziļums > 5 cm, vismaz 20 m 100 m garā posmā); • ceļa zīmes; • krautuves (abās ceļa pusēs) aprises Kamerālie darbi: • Tirgus izpēte, konkurējošo risinājumu apzināšana, iespēju aprakstīšana • Sensoru un saistīto elektronisko un mehānisko komponentu izvietojuma, stiprināšanas un savstarpējas savienojuma variantu aprakstīšana • Secinājumu un priekšlikumu izstrāde	1. Izpētīto tehnoloģisko iespēju un risinājumu vispārīgs apraksts. 2. Risinājumos potenciāli izmantojamo ievadierīču – sensoru un saderīgo kontrolieru saraksts, norādot to: - produkta kodu/modeli; - veidu; - cenu (ja pieejama), var būt aptuvena; - veiktspēju; - priekšrocības, trūkumus; - pieejamību; - integrācijas sarežģītību / pielāgojamību, iespējamus riskus 3. Risinājumos izmantoto sensoru un saistīto elektronisko un mehānisko komponentu izvietojuma, stiprināšanas un savstarpējas savienojuma variantu apraksts. 4. Secinājumi un priekšlikumi: - piedāvāts nosacījums un prasības pamatots piemērotākais risinājums un/vai risinājumu kopums	30.08.2024	Priekšizpētes posms realizēts atbilstoši plānotajam. Veikta zinātniskajā literatūrā aprakstīto un praksē pielietoto risinājumu analīze, salīdzinātas dažādu sensoru iespējas, priekšrocības un trūkumi, kā arī iegūti eksperimentāli dati ceļa virsmas un ceļa infrastruktūras elementu raksturošanai. Sagatavoti priekšlikumi, tajā skaitā izmaksu aprēķins funkcionējošas sistēmas prototipa uzbūvēšanai un izmēģinājumiem 2025. gadā.

Summary

The study on "Energy wood storage in stockyards" continues to collect and process data according to the terms of reference and the timetable. During the reporting period, chipping of the first group of stacks was completed, while data collection continues from the third and fourth group of stacks in order to characterise the impact of logging residue storage in the slash and roadside stack on the quality of the wood chips. In the case of the long term storage of logging residue stockpiles (fourth group), chipping is continuing aiming to complete chipping of target volume by mid 2025.

In the study "Forwarder grab scales for wood biofuel volumes", data collection using a John Deere weighing system was completed in 2024. Two conversion models have been developed, including one for calculating the volume delivered from mass (tonnes of naturally wet material) to volume units of material delivered (bulk cubic meters), and another for converting to volume sold (bulk cubic meters). The second model is to be refined in 2025, when the remaining delivered stockpiles are to be chipped and the volume sold to the consumer is to be obtained.

Implementation of the second subtask of the research task 'Development of a Forwarder's Ruts Measurement Device' continues according to the timetable. The three developed RM2 systems were used to accumulate the logging data. The study has extended the set of equations in the R environment to include additional information on the distribution of ruts outside the felling area (on the path between the felling area and the roadside storage) and has developed a solution to allow the user to change the threshold value for the depth of ruts.

The third sub-task of the research task "Solutions for forest road monitoring – feasibility study phase" analyses the experience of applying different technological solutions and the results of the research by identifying the condition of the road carriageway (potholes, cross waves, ruts) and identifying different road infrastructure elements (road signs, wood and logging residue stockpiles). The study evaluates the advantages and disadvantages of different solutions, including empirical data to assess the effectiveness of the accelerometer and other technologies, and proposes trials of the most appropriate solutions to meet the research target. The most promising solutions are accelerometers for cross wave and pothole detection, simple single beam LiDAR sensors for detection of ruts, and the use of an in-car video camera for road infrastructure detection, and open source computer vision algorithms, such as Opencv, for data processing. A high-resolution stereo computer vision camera may be needed to extract detailed information on road conditions.

The study has been implemented within the scope of the cooperation agreement of the Latvian State Institute of Forestry Science "Silava" (LSFRI Silava) and JSC "Latvia's state forests" (JSC) on September 13, 2021 and in accordance with the agreement No. 5-5.9.1_007r_101_21_80 of LSFRI Silava and JSC on the implementation of the research program "Technologies for increasing the efficiency of forest management processes". Analysis of empirical data and preparation of an interim report in 2023 is provided by LSFRI Silava researchers A. Zimelis, S. Kalēja, J. Ivanovs, R. Meļņiks, J. Champion, A. Lazdiņš.

Saturs

Kopsavilkums	1
Summary	1
Ievads.....	5
1. Meža biokurināmā ražošanas un piegāžu tehnoloģiju pilnveidošana un aprobācija	6
1.1. Biomasas uzglabāšana krautuvēs	6
Sākotnējie secinājumi un rekomendācijas	18
Priekšlikumi pētījuma turpināšanai 2025. gadā.....	19
1.2. Forvardera greifera svāri koksnes biokurināmā apjoma noteikšanai	20
Svēršanas sistēmas izmēģinājumi 2024. gadā	20
Pieredzes apmaiņas brauciens uz Zviedriju	22
1.3. Sākotnējie secinājumi un priekšlikumi	23
1.4. Priekšlikumi pētījuma īstenošanai 2025. gadā	24
2. Meža tehnikas monitoringa sistēmu un datu automatizētās apstrādes instrumentu pilnveidošana un ieviešana ražošanā.....	25
2.1. Forvardera atstāto risu mērīšanas iekārtas izstrāde	25
2.2. Sākotnējie secinājumi un rekomendācijas.....	32
2.3. Priekšlikumi pētījuma īstenošanai 2025. gadā	32
3. Risinājumi meža ceļu monitoringam.....	34
3.1. Risinājumi meža ceļu monitoringam – priekšizpētes posms	34
Izpētīto tehnoloģisko iespēju un risinājumu vispārīgs apraksts.....	34
Risinājumus izmantojamo ierīču – sensoru un kontrolieru raksturojums.....	36
Risinājumus izmantoto sensoru un saistīto elektronisko un mehānisko komponentu izvietojuma, stiprināšanas un savstarpējas savienošanas variantu apraksts.....	38
Priekšizpētes rezultāti	39
3.2. Secinājumi un priekšlikumi.....	43
3.3. Priekšlikumi pētījuma īstenošanai 2025. gadā	44
Literatūra.....	46

Attēli

Att. 1.1. Krautuvju sadalījums un datu izmantošana	7
Att. 1.2. Relatīvā mitruma saturs lapu koku biomasā uzglabāšanas laikā cīsmā.....	8
Att. 1.3. Relatīvā mitruma saturs egļu audžu biomasā uzglabāšanas laikā cīsmā	8
Att. 1.4. Relatīvā mitruma saturs priežu audžu biomasā uzglabāšanas laikā cīsmā	9
Att. 1.5. Sezonai raksturīgais mitruma saturs biomasā	9
Att. 1.6. Sezonai raksturīgais pelnu saturs biomasā.....	10
Att. 1.7. Vidējās zemākās siltumspēja atkarībā no sezonas	10
Att. 1.8. Relatīvā mitruma saturs lapu koku biomasā uzglabāšanas laikā AGK.....	11
Att. 1.9. Relatīvā mitruma saturs egļu audžu biomasā uzglabāšanas laikā AGK	11
Att. 1.10. Relatīvā mitruma saturs priežu audžu biomasā uzglabāšanas laikā AGK	12
Att. 1.11. Vidējais mitruma saturs biomasā atkarībā no sezonas uzglabāšanas laikā AGK.....	12
Att. 1.12. Krautuvē atlikušās biomasas daudzums šķeldošanas laikā.....	18
Att. 1.13. Biomasas pievešanai pielāgots forvarders	23
Att. 2.1. RM2 sistēma (kreisajā pusē RTK, vidū datu apstrādes bloks (RM2) un labajā pusē GNSS antena).....	25
Att. 2.2. Atbilstoši RM2 sistēmas iegūtajiem datiem (609-266-7) noteiktais risu apjoms	27
Att. 2.3. Forvardera risu izvietojuma piemērs cīsmā un ārpus tās pēc pievešanas.....	28
Att. 2.4. Augstuma virs jūras līmeņa izmaiņu salīdzinājums modeļiem no GNSS un LiDAR datiem veidotiem modeļiem.....	29

Att. 2.5 Uztādīto RStudio bibliotēku pārbaude	31
Att. 3.1. Bedru atpazīšanas piemērs dažādos laikapstākļos, izmantojot datorredzi, pētījumā Norvēģijā (Hoseini, Puliti, u.c., 2024)	35
Att. 3.2. Akselerometrs uzstādīts uz auto šķērsviras	40
Att. 3.3. Akselerometra izmantošanas piemērs sliktu meža ceļa apstākļu identificēšanai. Ar sarkaniem punktiem atzīmētas akselerometra smaguma spēka vērtības virs 1,2 G.....	41
Att. 3.4. Ar akselerometru iegūto datu piemērs, kurā identificēts bruģa ceļa segums, kas ietekmē smaguma spēku līdzīgi ceļa šķērsviļņiem	42
Att. 3.5. Akselerometra dati un ceļa digitālais virsmas modelis	43
Att. 3.6. Iekārtas, kura izmanto lāzersensorus ceļa bojājumu identificēšanai, shematisks attēlojums	45
Att. 3.7. Lāzersensoru izvietojums un bojājumu identificēšanas darbības princips	45

Tabulas

Tab. 1.1. Modeļa informācija par brīvo locekli (<i>Intercept</i>) un virzienu koeficientiem.....	13
Tab. 1.2. Modeļa informācija par brīvo locekli (<i>Intercept</i>) un virzienu koeficientiem.....	14
Tab. 1.3. Relatīvā mitruma satura biomasā, zemākās siltumspējas un FWI indeksa vidējās vērtības gada griezumā	15
Tab. 1.4. Lapu koku audzēs aprēķinātie biomasu raksturojošie rādītāji	17
Tab. 1.5. Mežizstrādes atlieku raksturojošie rādītāji sadalījumā pa sezonām.....	22
Tab. 2.1. Serverī uzkrātais datu (punktu) apjoms 2024. gadā (līdz 10. decembrim)	26
Tab. 2.2. Statistisko rādītāju salīdzinājums	29
Tab. 2.3. R vienādojuma kopuma funkcionēšanai nepieciešamās bibliotēkas.....	30
Tab. 3.1 Pētījumā vērtēto sensoru un ar tiem saderīgo kontrolieru saraksts	36
Tab. 3.2. NIBIO <i>RoadSens</i> sistēmā izmantotās komponentes	37
Tab. 3.3. Elektronisko un mehānisko komponentu izvietojuma, stiprināšanas un savstarpējas savienojuma variantu apraksts.....	38

Darbā lietotie simboli un saīsinājumi

LVM – AS “Latvijas valsts meži”

LVMI Silava – Latvijas Valsts mežzinātnes institūts “Silava”

LiDAR – Atrāšana un attāluma noteikšana ar gaismu (Light detection and ranging)

RTK – Reālā laika kinemātika (Real-time kinematic.)

AGK - augšgala krautuve

IT - informācijas tehnoloģijas

GNSS - Globālās Navigāciju Satelītu sistēmas

R – programmēšanas valoda statistiskiem aprēķiniem

Ievads

Pētījumu programmas “Tehnoloģijas meža apsaimniekošanas procesu efektivitātes paaugstināšanai” aktualitāti nosaka nepieciešamība izmantot mūsdienīgus plānošanas instrumentus un saudzīgas mežizstrādes tehnoloģijas koksnes resursu pieejamības nodrošināšanai, vienlaikus mazinot mežizstrādes negatīvo ietekmi uz vidi. Pētījumu programmas mērķis ir palielināt meža apsaimniekošanas procesu efektivitāti, aprobējot Latvijā vai AS “Latvijas valsts meži” līdz šim neizmantotas, taču tirgū pieejamas vai no jauna izstrādājamas tehnoloģijas.

Pētnieciskie uzdevumi īstenoti kā atsevišķi pētījumi. Pētnieciskā uzdevuma “Meža biokurināmā ražošanas un piegāžu tehnoloģiju pilnveidošana un aprobācija” ietvaros 2024. gadā turpināti divi pētījumi “Biomases uzglabāšana krautuvēs” un “Forvardera greifera svāri meža biomases apjoma noteikšanai”.

Pētījuma “Enerģētiskās koksnes uzglabāšana krautuvēs” mērķis ir novērtēt enerģētiskās koksnes kvalitātes izmaiņas uzglabāšanas laikā augšgala krautuvē (AGK) un cīsmā. Pētījuma ietvaros 2024. gadā turpināta krautņu un krautuvju novērošana uzglabāšanas laikā, iegūstot datus par enerģētiskās koksnes siltumspēju un mitruma saturu un to ietekmējošiem faktoriem.

Pētījuma “Forvardera greifera svāri meža biomases apjoma noteikšanai” mērķis ir uzlabot pievestā materiāla uzskaites precizitāti un nodrošināt ātrāku ražošanas datu apriti. Pētījuma ietvaros līdz 2024. gada jūnijam ievākti enerģētiskās koksnes svērumu dati, izmantojot John Deere integrēto svēršanas sistēmu, kura nodrošina pievestā materiāla masas un kravu skaita uzskaiti objektā. 2024. gadā izstrādāti vienādojumi enerģētiskās koksnes pārrēķiniem no masas mērvienībām (pievestā materiāla tonnas) uz tilpuma mērvienībām (pievestā materiāla berkubikmetri). Enerģētiskās koksnes prognozēšanas vienādojuma pilnveidi turpināsim 2025. gadā, kad plānots iegūt datus no atlikušajām 35 krautuvēm.

Pētnieciskā uzdevuma “Meža tehnikas monitoringa sistēmu un datu automatizētās apstrādes instrumentu pilnveidošana un ieviešana ražošanā” īstenošanas ietvaros 2024. gadā turpināts viens pētījums – “Forvardera atstāto risu mērīšanas iekārtas izstrāde”. Pētījuma mērķis ir izstrādāt un pārbaudīt uz forvardera montējamu iekārtu risu dziļuma mērīšanai, iegūstot informāciju gan par cīsmu, gan pievešanas ceļiem ārpus cīsmas. 2024. gadā iepriekšējos pētījuma etapos izstrādātā programma papildināta ar iespēju identificēt risu ārpus cīsmas, kā arī norādīt risu dziļuma robežvērtību, kas atšķiras no iepriekš noteiktās noklusētās vērtības. Veicot pētījumu 2023. gadā, novērots, ka atsevišķos gadījumos risu identificēšanas precizitāte cīsmas robežās var būtiski atšķirties, tāpēc šajā pētījuma etapā papildus vērtēta mikroreljefa ietekme uz aprēķinu rezultātiem, lai uzlabotu modeļa precizitāti. Pētījumā esam atgriezušies pie LĢIA uzturētā augstas izšķirtspējas zemes virsmas modeļa izmantošanas iespēju analīzes, lai pārbaudītu, vai, izmantojot šo modeli ārpus cīsmas robežām, var panākt lielāku aprēķinu precizitāti.

Pētījuma “Risinājumi meža ceļu monitoringam – priekšizpētes posms” mērķis ir apkopot informāciju par tehnoloģiskām iespējām un risinājumiem, ko var izmantot kravas transportlīdzekļos – kokvedējos – dinamiskam meža ceļu stāvokļa monitoringam. Pētījuma ietvaros veikta dažādu tehnoloģisko risinājumu pielietošanas pieredzes analīze un apkopoti izpētes rezultāti. Tāpat pētījuma ietvaros noteikts ceļa brauktuves stāvoklis (bedres, šķērsviļņi un risas) un atpazīsti dažādi ceļa infrastruktūras elementi (ceļa zīmes, kokmateriālu un mežizstrādes atlieku krautuves). Pētījumā izvērtētas dažādu risinājumu priekšrocības un trūkumi, iegūti empīriski dati un sagatavoti priekšlikumi praktiskiem izmēģinājumiem 2025. gadā.

1. Meža biokurināmā ražošanas un piegāžu tehnoloģiju pilnveidošana un aprobācija

1.1. Biomasas uzglabāšana krautuvēs

Pētījuma ietvaros 2024. gadā turpinājās meža biomasas kvalitātes izmaiņas uzglabāšanas laikā augšgala krautuvē un cirmā datu ievākšana un analīze. Atbilstoši 2022. gadā izstrādātajai metodikai, veikta regulāra (reizi mēnesī) koksnes paraugu ievākšana no pirmās, trešās un ceturtās grupas krautuvēm. Koksnes paraugu ievākšana nepieciešama, lai raksturotu siltumspējas un mitruma izmaiņas biomasas uzglabāšanas laikā. Līdz šim mitruma un citu rādītāju izmaiņu raksturošanai izmantoti sekojoši parametri: nokrišņi, relatīvais gaisa mitrums, vēja ātrums un gaisa temperatūra. Lai precīzāk raksturotu meteoroloģisko apstākļu ietekmi uz biomasas kvalitātes izmaiņām uzglabāšanas laikā, izmantota Fire Weather Index system (FWI), ko plaši pielieto meža ugunsgrēku risku novērtēšanai (Miller, 2020; Wagner & Pickett, 1985). FWI sistēma balstās uz ikdienas meteoroloģiskajiem datiem (LVĢMC, 2024) - diennakts maksimālā gaisa temperatūra (°C), diennakts minimālais relatīvais mitrums (%), vidējais diennakts vēja ātrums (km h⁻¹) un diennakts kopējais nokrišņu daudzums (mm) un modelē, kā laika apstākļi ietekmē meža biomasas mitruma saturu un uguns izplatīšanās iespēju.

Biomasas pievešanas procesu veido trīs secīgas darbības (Att. 1.1), kas paredz mežizstrādes atliekas pēc to sagatavošanas 1-6 mēnešus uzglabāt cirmā nelielās kaudzēs. Nākamā darbība ietver biomasas pievešanu augšgala krautuvē, krautnēšanu un izveidoto krautuvju aplāšanu ar šim nolūkam paredzētu papīru, ja skuju koku proporcija enerģētiskajā koksne veido vairāk nekā 30% (AS "Latvijas valsts meži", 2021). Materiālu augšgala krautuvē paredzēts uzglabāt 3-12 mēnešus un uzglabāšanas periodā jābūt ietvertiem vismaz 3 pavasara vai vasaras mēnešiem, kad notiek visintensīvākā materiāla žūšana un lapu un skuju nobiršana. Kopumā materiāla uzglabāšanas ilgums ir atkarīgs no pieprasījuma tirgū. Trešā darbība ietver biomasas smalcināšanu un nogādāšanu gala patērētājam.

Ilgstoša biomasas uzglabāšana (1-3 gadi) augšgala krautuvē paredzēta 1. un 2. krautuvju grupai un neparedz sagatavoto biomasu pirms pievešanas apžāvēt cirmā. Enerģētiskā koksne, kas pēc sagatavošanas līdz 6 mēnešiem apžāvēta cirmā un pievesta augšgala krautuvē ilgstošai uzglabāšanai (1-2 gadi), ietilpst 3. krautuvju grupā. 4. krautuvju grupā ietilpst ilgstošas uzglabāšanas krautuves, kur materiāls pirms novērojumu uzsākšanas jau ir glabāts vairāk nekā 2 gadus.

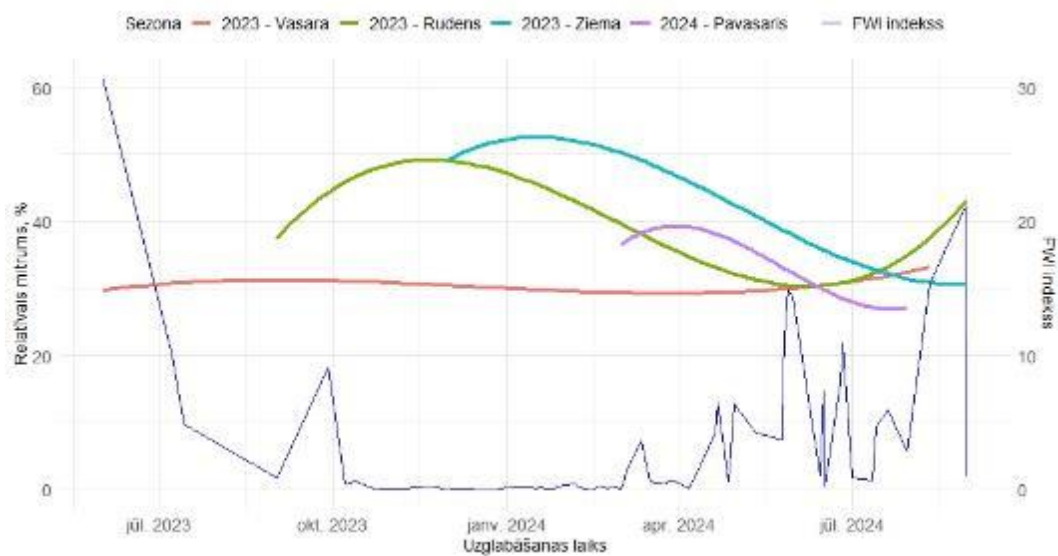


Att. 1.1. Krautuvju sadalījums un datu izmantošana¹

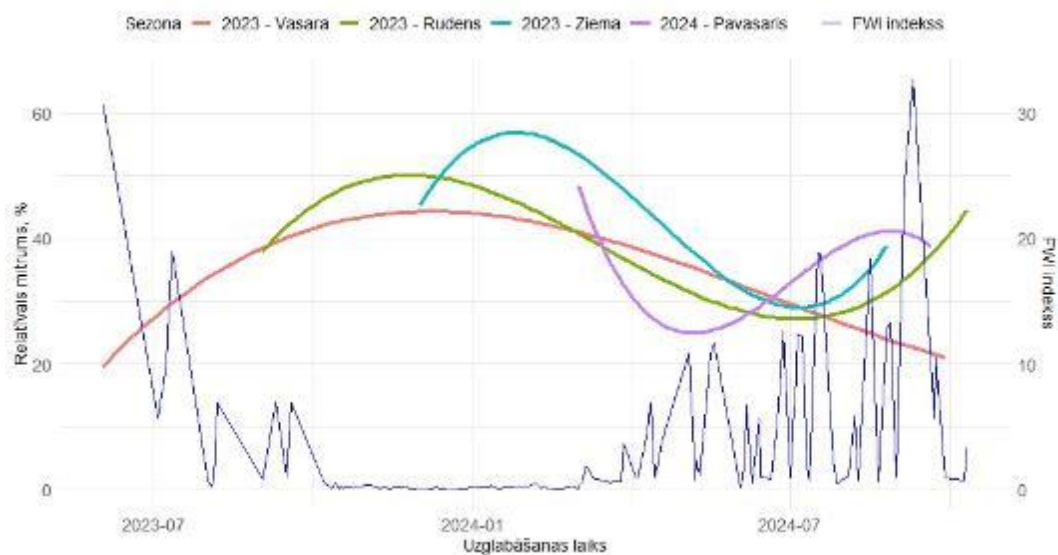
Pirmajā etapā, kas ietver mežizstrādes atlieku (biomasas) sagatavošanu un apžāvēšanu cīrsmā, pirmo koksnes paraugu ievākšana uzsākta apmēram 1-2 nedēļas pēc materiāla sagatavošanas. Datu kopās, kas iegūtas lapu koku (sastāva formulā valdošā koku suga B, A vai Ba), egļu (sastāva formulā E ir ne mazāk kā 4 vienības) un priežu (sastāva formulā P ir ne mazāk kā 6 vienības) audzēs, uzglabāšanas laikā vērojamas koksnes relatīvā mitruma izmaiņas (Att. 1.2, Att. 1.3 un Att. 1.4). Materiālam, kas sagatavots vasarā (sākot ar jūniju), ir vērojama strauja koksnes relatīvā mitruma samazināšanās, kas korelē ar lielu FWI indeksu, kas, savukārt, norāda uz biomasas žūšanai labvēlīgiem apstākļiem.

Saskaņā ar meteoroloģiskajiem novērojumiem attiecīgajā periodā, 2023. gada jūlija vidējā gaisa temperatūra 22 °C, jūlijā – 22°C, augustā – 25°C, bet, sākot ar septembri, vidējā temperatūra strauji samazinājās (septembris – 22°C, oktobris – 11°C, novembrī – 4°C). Zemāks gaisa relatīvais mitrums novērots vasarā (2023. gada jūlija vidējā relatīvais gaisa mitrums 43%, jūlijā – 49%), bet, sākot ar augustu (57%), vērojama relatīvā gaisa mitruma palielināšanās (septembrī – 58%, oktobrī – 77%, novembrī – 84%).

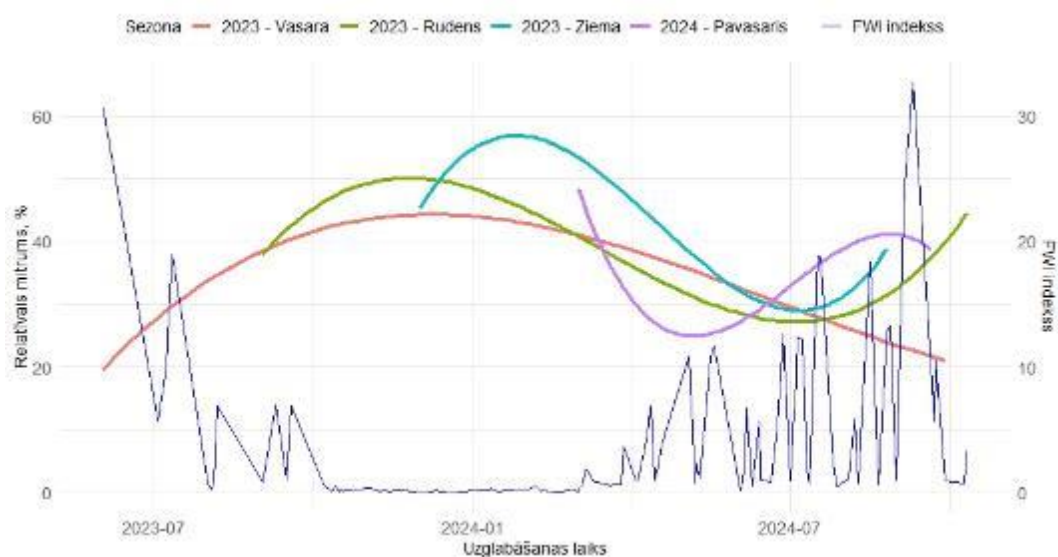
¹ Avots: www.lvm.lv



Att. 1.2. Relatīvā mitruma saturs lapu koku biomasā uzglabāšanas laikā cīsmā

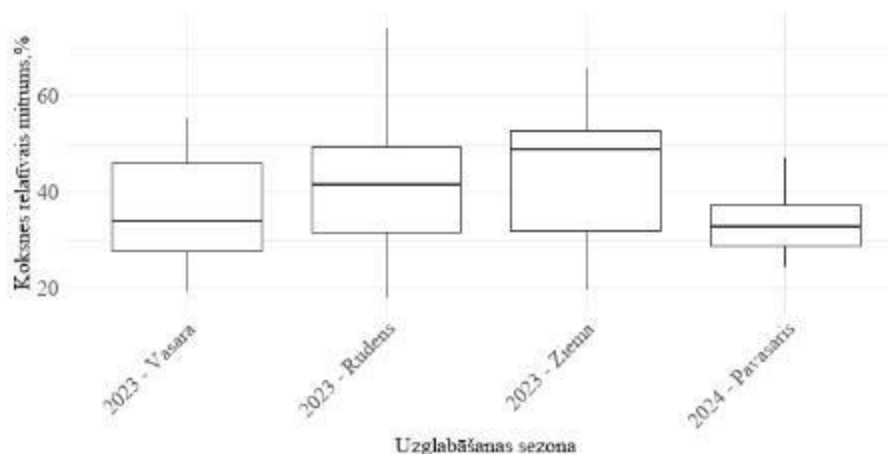


Att. 1.3. Relatīvā mitruma saturs egļu audžu biomasā uzglabāšanas laikā cīsmā



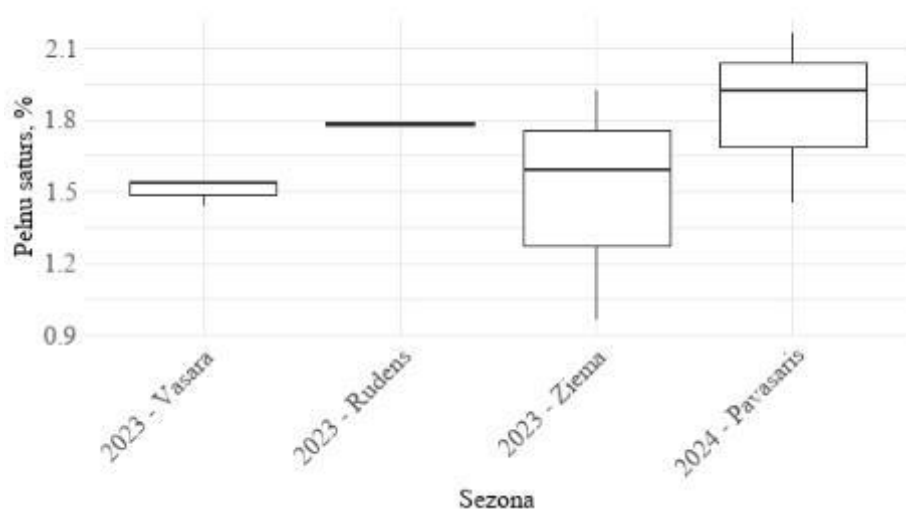
Att. 1.4. Relatīvā mitruma saturs priežu audžu biomasā uzglabāšanas laikā cirsnā

Pētījumā iegūtie dati apstiprina, ka mežizstrādes atlieku uzglabāšana mežā ir efektīva pavasarī un vasarā, kad maksimālās diennakts temperatūras ir salīdzinoši augstas un relatīvais gaisa mitrums ir salīdzinoši zems, tādējādi nodrošinot mazās kaudzēs nokrautā materiāla efektīvu žūšanu. Rudenī un ziemā, kad diennakts maksimālās gaisa temperatūras strauji samazinās un palielinās relatīvais gaisa mitrums, ko lielā mērā ietekmē sezonai raksturīgie nokrišņi, mazās kaudzēs nokrautam materiāla īpaši novērojamas tā hidroskopiskās īpašības (Att. 1.5).



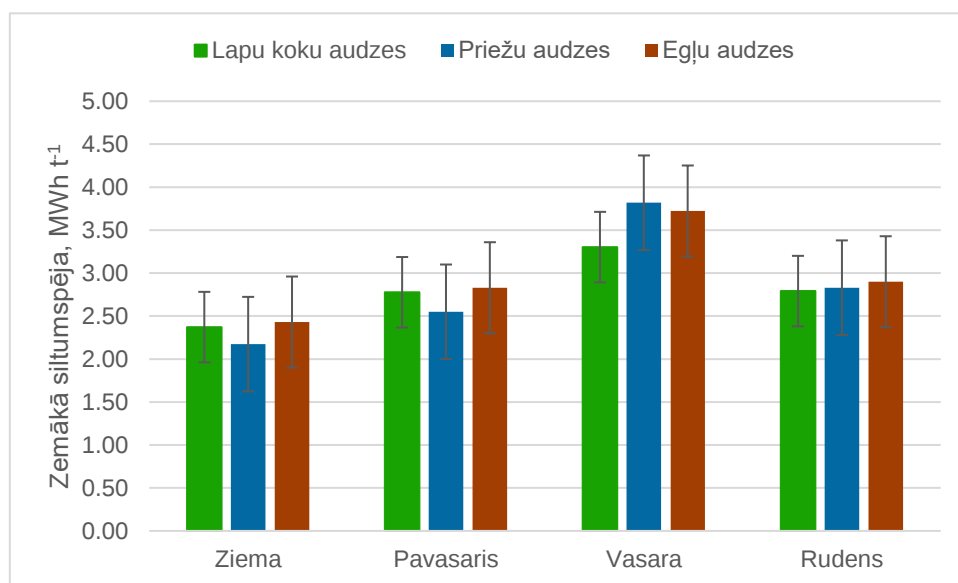
Att. 1.5. Sezonai raksturīgais mitruma saturs biomasā

Pelnu saturs mainās atkarībā no sezonas (Att. 1.6), tomēr šīs izmaiņas nav statistiski būtiskas ($p = 0,06$). Straujākais pelnu satura pieaugums ir vērojams pavasarī, ko visticamāk ietekmē materiāla piesārņojums, kas veidojas no putekļiem.



Att. 1.6. Sezonai raksturīgais pelnu saturs biomasā

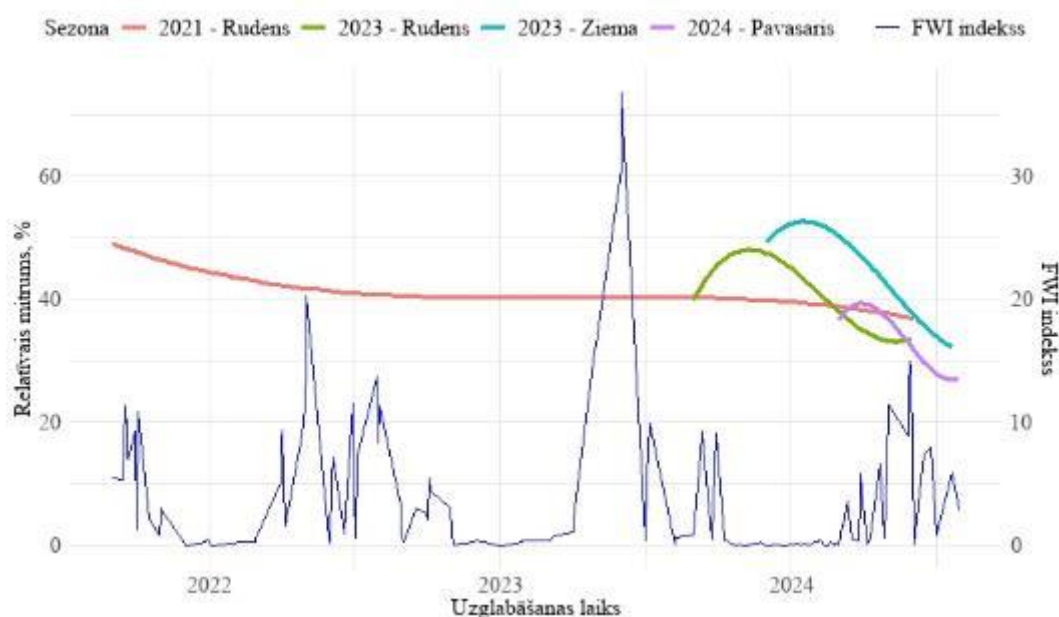
Biomasas zemāko siltumspēju ietekmē uzglabāšanas sezona un suga. Mazākie siltumspējas rādītāji ziemā konstatēti no priedes audzēm izvestās mežizstrādes atliekās, bet vasarā – no lapu koku audzēm izvestās mežizstrādes atliekās (Att. 1.7).



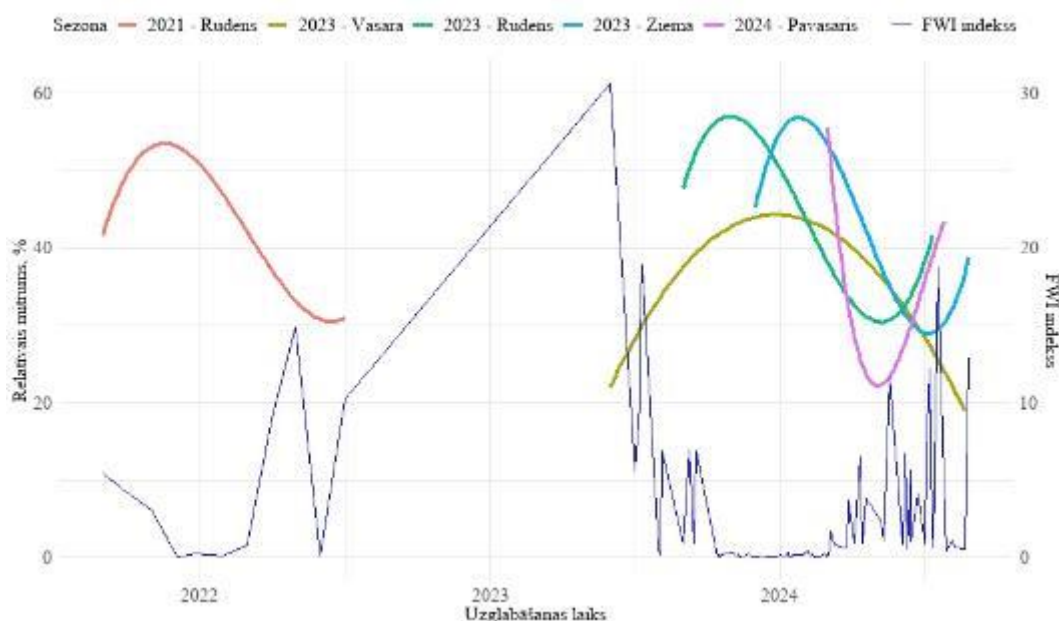
Att. 1.7. Vidējās zemākās siltumspēja atkarībā no sezonas

Otrais etaps ietver biomasas ilglaicīgu uzglabāšanu AGK. Pirmo koksnes paraugu ievākšana uzsākta 1-2 nedēļas pēc materiāla pievešanas. Pirmajā un otrajā krautuvju grupā datu ievākšana uzsākta 2021. gadā. Trešajā krautuvju grupā datu ievākšana uzsākta 2023. gadā, bet izmēģinājuma ietvaros atsevišķās cismās nevarēja nodrošināt biomasas pievešanu AGK pēc sešus mēnešus ilgas apžāvēšanas cismā. Tas skaidrojams ar sarežģītiem pievešanas apstākļiem un tehnikas pieejamību. Kaut arī iegūtais datu apjoms ir mazāks nekā sākotnēji plānots, iegūtie rezultāti raksturo kopējās tendences.

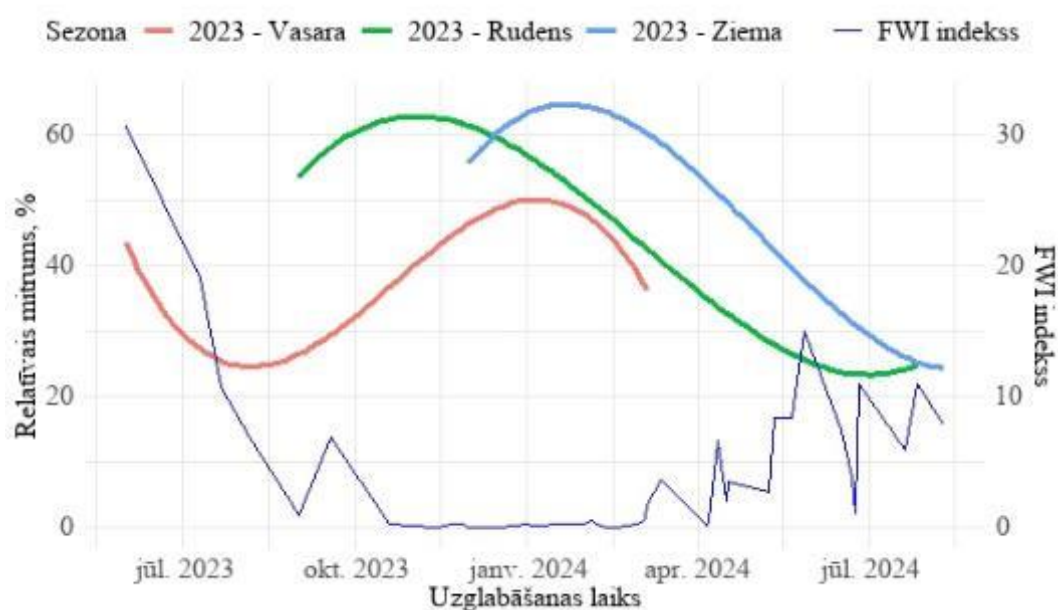
Biomases ilgstošas uzglabāšanas laikā AGK relatīvā mitruma izmaiņas gada griezumā ir vidēji $\pm 15\%$. Raksturojot biomasas žūšanas procesu uzglabāšanas laikā (Att. 1.8, Att. 1.9 un Att. 1.10), vērojama sakarība, ka palielinoties FWI indeksam, notiek intensīvāka materiāla žūšana. Intensīvs biomasas žūšanas process vērojams sākot no 2023. gada jūnija, kad gaisa vidējā temperatūra bija 23°C un gaisa relatīvais mitrums 44%. Materiāla žūšana novērojama līdz 2023. gada septembrim, kad strauji samazinās gaisa vidējā temperatūra līdz 22°C un palielinās gaisa relatīvais mitrums 58%. Materiāla relatīvā mitruma palielināšanas novērojama līdz aprīļa beigām, kad vērojama vidējās gaisa temperatūras strauja palielināšanās līdz 22°C un relatīvā gaisa mitruma samazināšanās līdz 50%.



Att. 1.8. Relatīvā mitruma saturs lapu koku biomasā uzglabāšanas laikā AGK

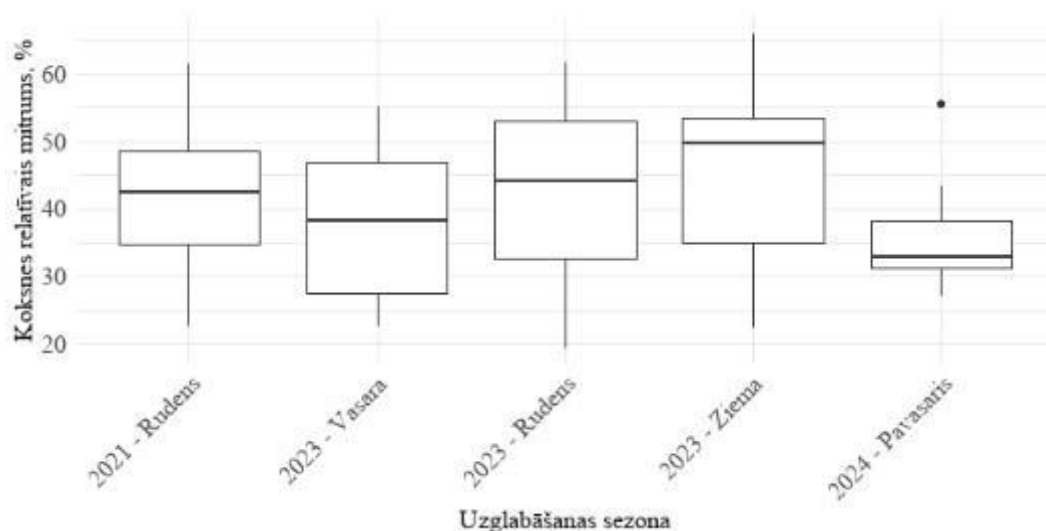


Att. 1.9. Relatīvā mitruma saturs egļu audžu biomasā uzglabāšanas laikā AGK



Att. 1.10. Relatīvā mitruma saturs priežu audžu biomasā uzglabāšanas laikā AGK

Ilgstoši uzglabājot biomasu AGK, relatīvā mitruma saturs, līdzīgi kā uzglabājot materiālu cīsmā, samazinās vasarā un pavasarī (Att. 1.11). Rudenī un ziemā vērojama relatīvā mitruma satura palielināšanās koksne, ko ietekmē apkārtējās vides faktori un koksnes hidroscopiskās īpašības, tomēr AGK uzglabātam materiālam relatīvā mitruma satura svārstības notiek salīdzinoši šaurākā diapazonā nekā cīsmā uzglabātam materiālam.



Att. 1.11. Vidējais mitruma saturs biomasā atkarībā no sezonas uzglabāšanas laikā AGK

Lai prognozētu zemāko siltumspēju, pilnveidots 2023. gadā izstrādātais vienādojums zemākās siltumspējas prognozēšanai šķeldās (1.1) un tajā lietotie koeficienti (

Tab. 1.1). Iegūtais rezultāts atspoguļos zemāko siltumspēju brīdī, kad ievākti koksnes paraugi. Piemēram, aprēķinot lapu koku šķeldu, ar mitruma saturu koksne 55%, zemāko siltumspēju, izmanto

Tab. 1.1 koeficientus $I = -5,26$ un $k_1 = -0,059$, un iegūst zemāko siltumspēju – $2,18 \text{ MWh t}^{-1}$.

$$MWht^{-1} = I + k_1 * r \quad (1.1.)$$

kur:

k_1 – koeficients;

r – relatīvais mitruma saturs koksne, %.

Tab. 1.1. Modeļa informācija par brīvo locekli (*Intercept*) un virzienu koeficientiem

Koku sugas	<i>Intercept</i> (I)	Koksnes mitruma koeficients (k_1)
Lapu koku audzes	5,426	-0,059
Egļu audzes	5,527	-0,062
Priežu audzes	5,489	-0,061

Saskaņā ar pētījumā iegūtajiem datiem, lapu kokiem relatīvā mitruma satura pieaugums par 1% samazina materiāla zemāko siltumspēju par aptuveni 0,059 MWh t⁻¹. Skuju kokiem samazinājums ir lielāks un ir robežās no 0,061 līdz 0,062 MWh t⁻¹. Vienādojuma 1.2. praktiskai pielietošanai nepieciešams zināt sākotnējo koksnes relatīvo mitruma saturu AGK, kas ļauj raksturot sākotnējo faktisko materiāla zemāko siltumspēju.

Lai prognozēšanas modeli (1.4) izmantotu zemākās siltumspējas dinamikas raksturošanai laikā, nepieciešami papildus aprēķini. Sākotnēji aprēķina materiāla vidējās relatīvā mitruma izmaiņas uzglabāšanas laikā (1.2).

$$M_{delta} = \frac{M_1 - M_0}{X_{beig} - X_{sāk}} \quad (1.2.)$$

kur:

M_{delta} - vidējās relatīvā mitruma izmaiņas uzglabāšanas laikā, %;

M_1 – relatīvais mitruma saturs koksne uzglabāšanas perioda beigās (Tab. 1.3), %;

M_0 – sākotnējais relatīvā mitruma saturs koksnes, %;

X_{beig} – uzglabāšanas noslēguma mēnesis;

$X_{sāk}$ – uzglabāšanas uzsākšanas mēnesis.

Relatīvā mitruma satura koksne noteikšanai uzglabāšanas noslēguma mēnesī izmanto vienādojumu 1.3.

$$M_{beigās} = M_0 + M_{delta} * X_{ilgums} \quad (1.3.)$$

kur:

$M_{beigās}$ – aprēķinātais relatīvais koksnes mitrums uzglabāšanas beigās, %;

X_{ilgums} – uzglabāšanas ilgums mēnešos.

Zemākās siltumspējas noteikšanai uzglabāšanas noslēguma mēnesī izmanto vienādojumu 1.4.

$$MWht^{-1} = I + k_1 * M_{beigās} + k_2 * X_{beigās} + k_3 * f \quad (1.4.)$$

kur:

MWh t⁻¹ – zemākā siltumspēja uzglabāšanas perioda beigās, MWh t⁻¹;

I – brīvais loceklis;

k₁, k₂ un k₃ – koeficienti;

M_{beigās} – aprēķinātais relatīvais mitruma saturs koksnē, %;

f – FWI koeficients (Tab. 1.3).

Tab. 1.2. Modeļa informācija par brīvo loekli (Intercept) un virzienu koeficientiem

Grupa	<i>Intercept</i> (I)	Mitruma satura koeficients (k₁)	Mēnesis, (k₂)	FWI indekss (k₃)
Lapu koku audzes	5,304	-0,059	-0,005	0,0001
Egļu audzes	5,524	-0,062	0,003	-0,0024
Priežu audzes	5,481	-0,061	0,003	-0,0014

Tab. 1.3. Relatīvā mitruma satura biomasā, zemākās siltumspējas un FWI indeksa vidējās vērtības gada griezumā

Mēnesis	Lapu koku audzes			Egļu audzes			Priežu audzes		
	Zemākā siltumspēja, MWh t	Vidējais relatīvais koksnes mitrums, %	Vidējais FWI mēneša indekss	Zemākā siltumspēja, MWh t	Vidējais relatīvais koksnes mitrums, %	Vidējais FWI mēneša indekss	Zemākā siltumspēja, MWh t	Vidējais relatīvais koksnes mitrums, %	Vidējais FWI mēneša indekss
01	2,4 ±0,38	49,53 ±5,85	0,11	2,61 ±0,38	47,66 ±5,92	0,17	2,23 ±0,45	53,73 ±7,33	0,15
02	2,66 ±0,44	44,31 ±8,02	0,27	2,39 ±0,43	50,62 ±6,96	0,14	2,39 ±0,61	50,78 ±10,01	0,18
03	2,79 ±0,52	42,13 ±8,68	2,08	2,78 ±0,52	43,89 ±7,69	0,95	2,71 ±0,63	45,58 ±10,51	1,79
04	3,01 ±0,53	38,68 ±9,05	4,86	3,07 ±0,51	38,73 ±7,65	3,66	3,37 ±0,66	35,79 ±10,46	2,27
05	3,25 ±0,41	34,74 ±6,82	12,04	3,76 ±0,59	28,43 ±8,27	7,40	3,81 ±0,56	28,96 ±8,85	8,65
06	3,33 ±0,38	33,5 ±5,85	13,36	3,45 ±0,66	33,3 ±9,74	12,97	3,5 ±0,71	33,38 ±11,19	12,15
07	3,34 ±0,37	32,83 ±5,31	5,28	3,79 ±0,57	28,09 ±8,77	6,66	3,94 ±0,26	25,14 ±4,55	13,46
08	3,18 ±0,52	34,42 ±7,10	6,29	3,68 ±0,28	29,12 ±5,22	2,44	3,94 ±0,1	23,85 ±1,27	6,33
09	2,65 ±0,41	44,09 ±6,77	6,48	2,89 ±0,77	41,98 ±12,84	2,63	2,64 ±0,73	47,1 ±12,7	2,48
10	2,51 ±0,37	46,97 ±5,52	4,2	2,54 ±0,17	47,56 ±2,65	0,68	2,6 ±0,13	47,9 ±2,19	0,18
11	2,58 ±0,40	45,72 ±7,79	0,68	2,72 ±0,5	45,73 ±6,79	0,41	2,11 ±0,49	56,08 ±7,83	0,10
12	2,47 ±0,32	47,99 ±5,26	0,15	2,43 ±0,45	50,63 ±6,15	0,06	2,22 ±0,42	54,36 ±6,72	0,01

Aprēķinu piemērs: mežizstrādes atliekas pievestas AGK no lapu koku audzes (JO_SK00110) februārī (sākotnējais relatīvais mitruma saturs koksne 55%). Šķeldošana plānota jūlijā, attiecīgi, biomasas uzglabāšanas laiks AGK ir 5 mēneši. Vispirms aprēķina vidējās ikmēneša mitruma satura izmaiņas koksne. Nolasa vidējo relatīvo mitruma saturu koksne uzglabāšanas perioda beigās (Tab. 1.3; 7. mēnesī lapu koku cirmās tas ir 32,83%).

$$M_{\text{delta}} = \frac{32,83 - 55}{7 - 2} = -4,43\% \text{ mēnesī} \quad (1.5.)$$

Relatīvā mitruma satura koksne izmaiņas ir vidēji -4,43% mēnesī. Nākošajā solī izrēķina mitruma satura izmaiņas uzglabāšanas laikā AGK (no februāra līdz jūlijam, 5 mēneši).

$$M_5 = 55 + (-4,43) * 5 = 32,85\% \quad (1.6.)$$

Izmantojot aprēķināto relatīvo mitruma saturu koksne uzglabāšanas perioda beigās (32,85%), plānoto uzglabāšanas laiku (līdz 7. mēnesim) un FWI vērtību uzglabāšanas perioda beigās (Tab. 1.3, jūlijā – 5,25), aprēķina zemāko siltumspēju (MWh t^{-1}) atbilstoši vienādojumam 1.4.

$$MWh t^{-1} \text{ jūlijam} = 5,34 + (-0,059) * 32,85 + (-0,05) * 7 + 0,01 * 5,25 \quad (1.7.)$$

Saskaņā ar aprēķinu rezultātu, uzglabājot mežizstrādes atliekas AGK no februāra līdz jūlijam, prognozētā zemākā siltumspēja perioda beigās ir $3,10 \text{ MWh t}^{-1}$. Salīdzinot ar laboratorijas analīžu rezultātiem no attiecīgajā AGK sagatavotajām šķeldām, atšķirība ir $0,1 \text{ MWh t}^{-1}$ (laboratorijā noteiktā zemākā siltumspēja ir $3,00 \text{ MWh t}^{-1}$). Atšķirība ir nenoteiktības robežās (jūlijā $\pm 5,31\%$).

Pētījuma ietvaros veikts arī biomasas un siltumspējas izmaiņu aprēķins pirmās grupas krautuvēm pēc 36 mēnešus ilgas uzglabāšanas AGK. Atbilstoši 2021. gadā veikto mērījumu rezultātiem, uzsākot izmēģinājumus ar pirmās grupas krautuvēm, kopējais no izmēģinājumu platības iegūstamais biomasas daudzums bija 280 t sausas (LVMI Silava, 2021). Izmantojot *Intermercato* svēršanas sistēmu, kas bija uzstādīta forvardera manipulatorā, noteikts, ka faktiski pievestas 588 t dabiski mitra materiāla vai, ņemot vērā mitruma saturu koksne, 282 t sausas. Vidējais relatīvais mitruma saturs koksne tūlīt pēc pievešanas bija 52% (pievešana veikta tūlīt pēc mežizstrādes). Pēc pievešanas AGK sagatavotā biomasa sadalīta 10 līdzīga izmēra krautuvēs, kas 36 mēnešu laikā monitorēta, nosakot izmēru, mitruma un pelnu satura un siltumspējas izmaiņas, reizi trīs mēnešos sašķelidojot vienu no kaudzēm. Lai pagarinātu novērojumu periodu līdz 36 mēnešiem, daļa no krautuvēm otrajā gadā sadalīta.

Lai aprēķinātu siltumspējas zudumus uzglabāšanas laikā, izmantoti pirmās grupas krautuvju monitoringa rezultāti (Tab. 1.4). Tabulā iekļauta detalizēta informācija par sākotnējo biomasas daudzumu, šķeldošanas datumu, uzglabāšanas ilgumu, siltumspējas un relatīvā mitruma satura izmaiņām uzglabāšanas laikā. Iegūtie rezultāti attiecināmi uz krautuvēm, kuras veidotas krautuves pamatu izklājot ar krautuvju segšanai paredzēto materiālu. Pirmajā gadā novērtotais biomasas zudums ir līdz 18% no sākotnējās biomasas sausas. Visticamāk, ka tas noticis, nobirstot un mineralizējoties sīkajām biomasas frakcijām un viegli šķīstošiem organiskiem savienojumiem. Analīze ietver biomasas, siltumspējas un mitruma satura koksne izmaiņu dinamiku, kā arī šķeldošanas laikā sagatavoto biokurināmā daudzumu un tā bēruma blīvumu. Otrajā un trešajā gadā vidējie biomasas zudumi uzglabāšanas periodā ir 11%.

Tab. 1.4. Lapu koku audzēs aprēķinātie biomasu raksturojošie rādītāji

Krautuves Nr.	Sākotnējā biomasa, t sausnas	Krautuves šķeldošana datums	Uzglabāšanas ilgums, dienas	Zemākā siltumspēja uzglabāšanas beigās, MJ kg⁻¹	Augstākā siltumspēja uzglabāšanas beigās, MJ kg⁻¹	Relatīvais mitruma saturs koksne uzglabāšanas beigās, %	Aprēķinātā biomasa beigās, t sausnas	Biomasas zudumi, %
1. krautuve	24,4	07.12.2021	0	19,4	20,6	52	23,46	3,9
6. krautuve	32,3	16.02.2022	71	19,57	20,3	51	30,04	6,9
2. krautuve	35,7	25.05.2022	169	18,23	19,8	44	31,69	11,1
7. krautuve	24,6	09.08.2022	245	19,23	20,4	47,3	20,17	17,9
8. krautuve	23,0	06.02.2023	426	18,83	20,5	42	19,8	13,8
4. krautuve	32,4	28.04.2023	507	19,14	19,8	37,1	27,92	13,9
9. krautuve	20,6	21.08.2023	622	19,06	20,1	38,3	17,81	13,6
3. krautuve	35,7	07.11.2023	700	19,47	20,6	42,2	28,54	20,0
10. krautuve	15,0	17.05.2024	892	19,33	20	37,1	14,38	4,4
5. krautuve	13,0	17.05.2024	892	19,27	20,1	26,6	11,39	12,2
10. krautuve	7,8	23.07.2024	959	19,15	19,3	31,1	7,28	6,1
5. krautuve	17,9	13.11.2024	1072	20,61	21,1	34,2	15,86	11,5

Att. 1.12 grafiski parādīta sakarība starp uzglabāšanas ilgumu un biomasas zudumiem, kas sākumā norāda uz straujākiem biomasas zudumiem pirmajā gadā un lēnāku sadalīšanos otrajā un trešajā gadā. Grafikā uzskatāmi redzams, ka masas zudumi veidojas galvenokārt pirmajā gadā, bet turpmākajos divos gados uzglabājamā biomasas zudums ir neliels. Biomasas zudumi korelē ar augstāko siltumspēju, tāpēc var pieņemt, ka pēc pirmā uzglabāšanas gada augstākās siltumspējas zudums atbilst aptuveni 11% no sākotnēji pievestā materiāla siltumspējas, bet turpmāko viena līdz divu gadu uzglabāšanas laikā – vēl par aptuveni 1%. Zemākās siltumspējas zudumi atkarīgi no mitruma satura koksni. Ņemot vērā koksnes kalšanu krautuvēs, zemākās siltumspējas zudums var būt arī negatīvs uzglabāšanas perioda beigās. Pētījuma rezultātus nevar ekstrapolēt uz visām mežizstrādes atlieku krautuvēm, jo konkrētajā gadījumā analizētie dati ir no lapu koku audzes, un, ierīkojot krautuvi, zem mežizstrādes atliekām noklāts krautuvju segšanai paredzētais materiāls, kā rezultātā materiāls nebija tiešā saskarē ar augsni.

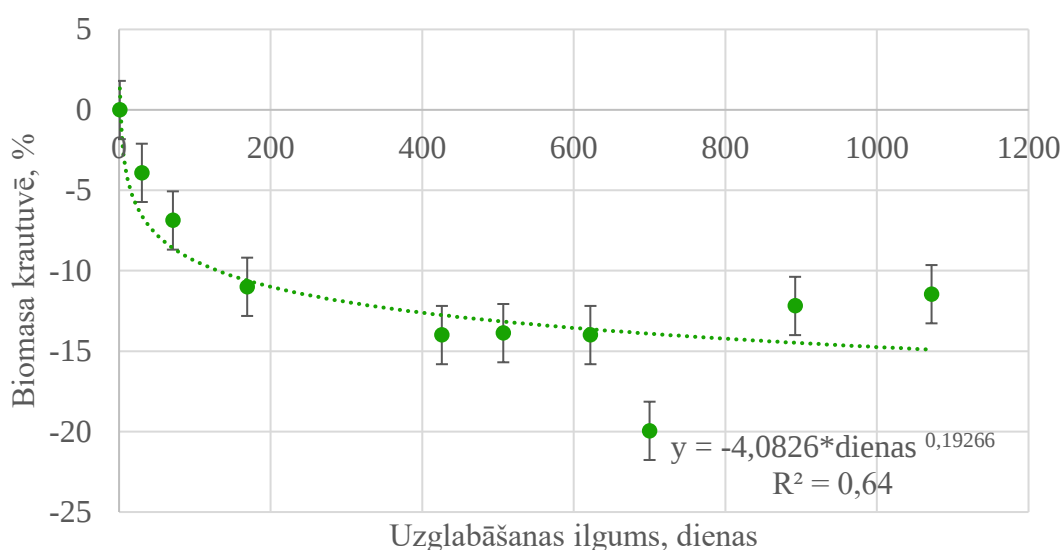
$$t_{sausna} = -4,0826 * \text{dianas}^{0,19266} \quad (1.8.)$$

kur:

t_{sausna} – aprēķinātais sausnas daudzums perioda beigās, t;

dianas – biomasas uzglabāšanas ilgums, dienas;

-4,0826 un 0,19266 – koeficienti.



Att. 1.12. Krautuvē atlikušās biomasas daudzums šķeldošanas laikā

Sākotnējie secinājumi un rekomendācijas

Mežizstrādes atlieku apžāvēšana cīsmā ir efektīvs veids, kā samazināt mitruma saturu koksni, tomēr šādām darbībām raksturīga sezonālitate (žūšana notiek pavasarī un vasarā).

Lai novērstu atkārtotu cīsmā uzglabāto mežizstrādes atlieku samirkšanu, pievešanas darbi uz AGK jāveic līdz augusta vidum, kad saskaņā ar ilggadīgiem meteoroloģiskajiem novērojumiem, strauji pazeminās diennakts vidējā gaisa temperatūra un palielinās nokrišņu daudzums, kas veicina atlieku atkārtotu samirkšanu.

Ilgstošī (līdz 1000 dienas) AGK uzglabājot mežizstrādes atliekas, kas iegūtas no lapu koku audzēm, perioda beigās biomasas, attiecīgi, arī augstākās siltumspējas, zudums ir 8,2% no sākotnējiem rādītājiem. Tas nozīmē, biomasas uzglabāšanas laika ietekmes novērtējumā jāņem vērā ne tikai mitruma satura koksne izmaiņas, bet arī biomasas zudumi. AGK uzglabājot ciršanas atliekas (līdz aptuveni 180 dienām) no egļu un priežu audzēm zudumus varēs novērtēt pēc krautuvju šķeldošanas, kas plānota 2025. gadā. Biomasas zudumu novērtējumu pētījuma ietvaros 2025. gadā turpināsim 5. grupas krautuvēs, kurās šobrīd pieejami dati par pievesto materiālu (masa, mitruma un pelnu saturs koksne, zemākā un augstākā siltumspēja). Šķeldošanas laikā iegūsim datus, kas ļaus novērtēt, vai arī priežu, egļu audzēs un lapu koku audzēs mežizstrādes atlieku kaudzēs iegūsim līdzīgus biomasas zudumu datus.

Izmantojot pētījumā izstrādāto vienādojumu zemākās siltumspējas prognozēšanai, var pietiekoši precīzi raksturot mežizstrādes atlieku žūšanu vismaz 12 mēnešu periodā, tādējādi izvēloties piemērotāko laiku pievešanas un šķeldošanai. Izstrādātos mitruma izmaiņu prognozēšanas grafikus un vienādojumu zemākās siltumspējas aprēķiniem ir jāaprobē praksē. Mežizstrādes atlieku žūšanai modelēšanas precizitātes uzlabošanai izmantojams FWI indekss.

Priekšlikumi pētījuma turpināšanai 2025. gadā

Lai sasniegtu pētījumā izvirzīto mērķi novērtēt meža biokurināmā kvalitātes izmaiņas uzglabāšanas laikā, tajā skaitā novērtēt šķeldu siltumspējas un mitruma satura izmaiņas un tās ietekmējošos faktorus, 2025. gadā jāturpina iepriekš plānotie lauku un kamerālie darbi.

Lauku darbi (eksperimentālo datu iegūšana):

- koksnes paraugu ievākšana reizi mēnesī no 3. un 4. grupas krautuvēm;
- uzglabātā materiāla šķeldošana atbilstoši izstrādātajam kalendārajam grafikam šķeldu īpašību (siltumspēja, mitruma un pelnu saturs un tilpumbūvums) raksturošanai;
- ražošanas apstākļos 4. grupas krautuvēs sagatavoto šķeldu paraugu ievākšana analīzēm, šķeldu kravu tilpuma mērīšana un svēršana.

Kamerālie darbi:

- ievākto biomasas paraugu (3. un 4. krautuvju grupas) analīzes laboratorijā, nosakot mitruma un pelnu saturu un siltumspēju;
- ievākto šķeldas paraugu (4. krautuvju grupa) analīzes laboratorijā, nosakot mitruma un pelnu saturu, īpatnējo blīvumu un siltumspēju;
- prognožu modeļa pilnveidošana, izmantojot pētījumā iegūto datu kopu.

Pētījumu lietderīgi paplašināt, iekļaujot tajā šķeldu uzglabāšanu starpkrautuvēs, tādējādi ietverot enerģētiskās koksne ciklu no meža līdz starpkrautuvei un patēriņa vietai. Šobrīd mums ir pieejama informācija, kā mainās biomasu raksturojošie rādītāji cirmā un AGK, bet izmaiņas turpinās arī starpkrautuvē, kur, atkarībā no sezonas, krautuves konfigurācijas, lieluma un pievestā materiāla īpašībām, var notikt gan žūšana, gan atkārtota samirkšana, gan biomasas zudumi. Lai risinātu šos jautājumus, 2025. gada uzdevumos nepieciešams iekļaut šādus darbus:

- Lauku darbi:
 - šķeldas paraugu ievākšana reizi mēnesī starpkrautuvē, lai novērtētu biokurināmā īpašību izmaiņas atkarībā no vides faktoru ietekmes, uzglabāšanas ilguma un krautuves konfigurācijas;
 - krautuves tilpuma noteikšana reizi mēnesī, izmantojot precīzas uzmērīšanas metodes;

- pastāvīgs mitruma satura un temperatūras monitorings krautuvēs, lai raksturotu konfigurācijas un citu faktoru ietekmi;
- periodisks (reizi mēnesī) heterotrofās elpošanas un metāna emisiju monitorings, lai raksturotu oglekļa zudumus starpkrautuvē un mikrobioloģiskos procesus, kas tos ietekmē.
- Kamerālie darbi:
 - ievākto šķeldas paraugu analīzes laboratorijā, nosakot mitruma un pelnu saturu, kā arī siltumspēju;
 - krautuves tilpuma izmaiņu analīze;
 - mitruma un temperatūras monitoringa datu analīze;
 - heterotrofās elpošanas un metāna emisiju monitoringa datu analīze.

1.2. Forvardera greifera svāri koksnes biokurināmā apjoma noteikšanai

Turpinot svēršanas sistēmas novērtēšanas darbu, veikti izmēģinājumi mežizstrādes atlieku apjoma noteikšanas precizitātes palielināšanai un darbietilpības un izmaksu samazināšanai pievestā materiāla uzmērīšanas procesā. Pētījuma 2024. gada uzdevums ir uzlabot pievestā materiāla uzskaites precizitāti skaidrojot iemeslus 2023. gadā veikto mērījumu atšķirībām, un nodrošināt ātrāku ražošanas datu apriti.

Svēršanas sistēmas izmēģinājumi 2024. gadā

2024. gadā noslēdzās datu ievākšana, izmantojot John Deere ražotāja integrēto svēršanas sistēmu, kas ietvēra arī operatoru atkārtotu instruktažu par izmantojamām darba metodēm, darba failu izveidi un uzkrāšanu, kā arī iegūto datu tālāku izmantošanu, veidojot operatoru izpratni par svēršanas sistēmas izmantošanas nepieciešamību un datu kvalitātes nozīmīgumu. Lai raksturotu pievestās biomasas apjomu un veiktu mērvienību pārrēķinu, nepieciešamas nodrošināt:

- krautuves identificēšanu, pamatojoties uz forvardera produkcijas failu un tajā iekļauto informāciju (krautuves ID, pievestais apjoms, kravu skaits un patērētais laiks);
- pievesto mežizstrādes atlieku uzskaiti;
- paraugu ievākšanu pēc mežizstrādes atlieku pievešanas AGK un to apstrādi laboratorijā;
- šķeldu pārdotā apjoma (saskaņā ar krautuves identifikācijas numuru) noteikšanu pie gala patērētāja.

Pētījuma ietvaros mežizstrādes atliekas pievestas uz AGK 98 objektos, tajā skaitā 2024. gadā iegūti dati par mežizstrādes atlieku pievešanu 28 objektos (1. Pielikums). Tehnisku bojājumu dēļ 2024. gada maijā svēršanas sistēmu demontējām. Pēc sākotnējās datu kvalitātes pārbaudes tālākai datu apstrādei izmantoti dati no 92 krautuvēm.

Izmantojot pētījuma rezultātus, izstrādāts prognožu vienādojums pievestā apjoma pārrēķiniem no masas vienībām (t dabiski mitra materiāla) uz tilpuma vienībām (ber. m³). Sakarību starp pievesto apjomu un masu raksturo lineārs regresijas vienādojums (1.9.) ar determinācijas

koeficientu $R^2 = 0,89$. Vienādojuma atbilstība izvērtēta izmantojot statistiskos rādītājus: vidējā absolūtā kļūda (MAE) ir 22,73, vidējā kvadrātiskā kļūda (MSE) ir 904, standartnovirze (RMSE) ir 30,65, procentuālā vidējā novirze (RMSE%) ir 20,6, vidējā novirze (MRES) ir 0,00, vidējā absolūtā novirze (AMRES) ir 1432, modeļa efektivitātes indekss (MEF) ir 0,899 un dispersijas attiecība (VR) ir 0,899.

$$ber. m^3 = 20,32 + 1,50 * t \quad (1.9.)$$

kur:

ber. m^3 – augšgala krautuvē pievesto mežizstrādes atlieku apjoms, ber. m^3 ;

t – forvardera sistēmas uzskaitītā masa, t;

2,78 un 1,73 – koeficienti.

Pārdodamā šķeldu apjoma (ber. m^3) prognozēšanai, izmantojot forvardera svēršanas sistēmas datus, izstrādāts otrs lineārās regresijas vienādojums, kurā izmantoti dati par pārdoto šķeldu apjomu (1.10.). Aprēķinos izmantoti dati no 17 cismām, no kurām pievestā biomasa pētījuma īstenošanas laikā sašķeldota. Izstrādātajam vienādojumam ir pietiekoši liels determinācijas koeficients ($R^2=0,85$). Vienādojuma atbilstība izvērtēta izmantojot statistiskos rādītājus: vidējā absolūtā kļūda (MAE) ir 39,12, vidējā kvadrātiskā kļūda (MSE) ir 2636, standartnovirze (RMSE) ir 51,35, procentuālā vidējā novirze (RMSE%) ir 25,5, vidējā novirze (MRES) ir 0,00, vidējā absolūtā novirze (AMRES) ir 665, modeļa efektivitātes indekss (MEF) ir 0,923 un dispersijas attiecība (VR) ir 0,844.

$$ber. m^3 = -4,3522 + 2,5107 * t \quad (1.10.)$$

kur:

ber. m^3 – pārdotais šķeldu apjoms, ber. m^3 ;

t – forvardera sistēmas uzskaitītais apjoms, t;

2,78 un 1,73 – koeficienti.

Izstrādātais vienādojums balstās uz datu kopu, kas iegūta ar John Deere integrēto svēršanas sistēmas risinājumu. Svēršanas sistēmas testēšanas procesā identificēti iespējamie riski, kuri var ietekmēt datu precizitāti:

- pievešanas ceļu uzlabošanai tehnoloģiskajā brauktuvē ieklātais mežizstrādes atlieku apjoms;
- svēršanas sistēmas datu pārraides signāla īslaicīgs zudums;
- pievesto mežizstrādes atlieku apjoma krāvuma blīvums un virziens.

Laboratorijā apstrādāto biomasas paraugu analīžu rezultāti apkopoti sadalījumā pa sezonām, kad materiāls pievests AGK (Tab. 1.5), tādējādi nosakot sezonai raksturīgās vidējās vērtības. Mazākais mitruma saturs koksnē konstatēts vasarā, lielākais – ziemā. Augstākā siltumspēja, ko neietekmē mitruma saturs koksnē, sezonāli nemainās.

Tab. 1.5. Mežizstrādes atlieku raksturojošie rādītāji sadalījumā pa sezonām

Datu ievākšanas sezona	Relatīvais mitruma saturs, % ($\pm$ standartklūda)	Pelnu saturs, % ($\pm$ standartklūda)	Augstākā siltumspēja, MJ kg⁻¹ ($\pm$ standartklūda)	Zemākā siltumspēja, MJ kg⁻¹ ($\pm$ standartklūda)
Ziema	49,18 $\pm$ 6,45	1,50 $\pm$ 0,35	20,00 $\pm$ 0,50	8,82 $\pm$ 1,51
Pavasaris	44,62 $\pm$ 8,07	1,36 $\pm$ 0,31	20,12 $\pm$ 0,31	9,90 $\pm$ 1,80
Vasara	27,71 $\pm$ 3,90	1,55 $\pm$ 0,41	20,16 $\pm$ 0,44	13,68 $\pm$ 1,04
Rudens	38,66 $\pm$ 6,83	1,51 $\pm$ 0,38	20,22 $\pm$ 0,43	11,27 $\pm$ 1,55

Vērtējot izmēģinājumos ar dažādām svēršanas sistēmām gūto pieredzi, identificēti galvenie aspekti, kuriem jāpievērš uzmanība mežizstrādes atlieku pievešanas plānošanas procesā:

- forvarderu svēršanas sistēmas periodiska kalibrēšana;
- forvardera datu sistēmas atbilstība StanForD 2010 datu standartam, lai nodrošinātu datu savienojamību un datu tālāku izmantošanu;
- svēršana AGK samazina riskus, kas saistīti ar:
 - mežizstrādes atlieku izmantošanu tehnoloģisko brauktuvi stiprināšanā;
 - atkārtotu materiāla svēršanu, ja tas izkrīt no forvardera cīsmā;
- svēršanas sistēma aprīkošana ar GNNS – nodrošina iespēju reģistrēt datus cīsmā un AGK. Šādā veidā var efektīvāk izsekot enerģētiskās koksnes piegādei no visa objekta un noteikt, kurā krautuvē tā nokrauta, ja apvienotas vairākas krautuves;
- operatoru instruktaža – operatoriem ir jāizskaidro datu ievākšanas mērķis un nepieciešamība. Pastāv risks, ka svēršanas sistēma var neuzskaitīt visu forvardera pievesto apjomu, piemēram, īslaicīgu datu pārraides traucējumu gadījumā;
- svēršanas sistēmas funkcionalitāte – svēršanas sistēmas, kas integrētas forvardera datorsistēmā, nodrošina detālāku datu uzskaiti, kas ļauj operatoram izvairīties no papildus darbībām, vienlaikus saglabājot darba procesa nepārtrauktību.

Pieredzes apmaiņas brauciens uz Zviedriju

Pētījuma ietvaros organizēts pieredzes apmaiņas brauciens uz Zviedriju, lai iepazītos ar forvarderu svēršanas sistēmas izmantošanu biomasas pievešanā ražošanas apstākļos un gūtu ieskatu par biomasas pievešanas un izvešanas procesa organizēšanu Zviedrijā. Pieredzes apmaiņas brauciens notika sadarbībā ar Linneja universitāti, brauciena laikā apmeklēti mežizstrādes un meža apsaimniekošanas pakalpojumu sniedzēji Zviedrijas dienvidos Kalmāras reģionā.

Pievestā materiāla uzskaiti veic forvardera operators, vizuāli novērtējot pievestā materiāla apjomu mežizstrādes atlieku berkubikmetros. Biomasas krautuves pēc pievešanas netiek mērītas, jo apmaksas sistēma paredz veikt norēķinus saskaņā ar forvardera operatora norādīto apjomu. Gadījumos, ja tas atšķiras no realizētā, veic finanšu korekciju. Lai nebūtu nepieciešamības veikt korekcijas, mežizstrādes atlieku pievešanā izmanto forvardera svēršanas sistēmas. Šādas sistēma nodrošina kontroles mērījumus, sniedzot iespēju precīzāk uzskaitīt pievesto mežizstrādes atlieku apjomu. Reizi dienā informāciju par pievesto mežizstrādes atlieku apjomu nosūtīta pasūtītājam,

tādējādi nodrošinot regulāru informācijas apmaiņu. Datu struktūra paredz sagatavot datus atbilstoši StanForD 2010 standartam, kur uzskaitītais pievestais apjoms atšifrējams sadalījumā pa kravām, balstoties uz operatora norādīto informāciju vai svēršanas sistēmas fiksētiem datiem. Zviedrijā biokurināmā pievešanas procesā atļauts izmantot gan apaļajiem kokmateriāliem paredzēto, gan tieši mežizstrādes atlieku pievešanai pielāgoto forvarderu (Att. 1.13). Mežizstrādes atlieku pievešanai paredzētais forvarders nodrošina iespēju saspīest mežizstrādes atliekas, būtiski palielinot vienā reizē pievestā materiāla apjomu. Zviedrijā vizītes laikā demonstrētajam forvarderam ir hidrauliski saspiežamas sienas. Šādu kravu var arī ātrāk izkraut, paņemot lielāku mežizstrādes atlieku daudzumu katrā satvērīenā, un mežizstrādes atlieku krautne ir kompaktāka.

Latvijā atsevišķos uzņēmumos apaļajiem kokmateriāliem paredzētajiem forvarderiem uzstāda papildu statņus, lai nodrošinātu lielāka apjoma pievešanu. Šādai rīcībai ir arī trūkumi, jo papildu stiprinājumi var tikt bojāti un nonākt mežizstrādes atlieku krautuvēs, palielinot šķeldotāju bojājumu risku.



Att. 1.13. Biomassas pievešanai pielāgots forvarders

Vizītes laikā apmeklēts viens no reģionālajiem siltumapgādes uzņēmumiem “Kalmar Energi Värme AB”, kas izmanto meža biokurināmo (šķeldas) galvenokārt no vietējiem piegādātājiem. Biomassas pieņemšanu un uzskaiti nodrošina neatkarīgs uzmērītājs “Biometria” (www.biometria.se). Šķeldu pieņemšanas procesā nosaka:

- piegādātā materiāla tilpumu, veicot kravas augstuma manuālu uzmērīšanu un tilpuma aprēķinu berkubikmetros,
- piegādātā materiāla masu, veicot materiāla svēršanu. Iegūto informāciju izmanto šķeldu zemākās siltumspējas noteikšanai,
- mitrumu saturu piegādātajā materiālā, veicot analīzes no šķeldu kravās paņemtajiem paraugiem. Iegūtos datus izmanto šķeldu zemākās siltumspējas aprēķiniem.

Uzņēmumā nevērtē pelnu saturu koksnē, jo tas ir salīdzinoši konstants rādītājs, kas nemainās atkarībā no piegādātāja. Zemākās siltumspējas noteikšanai izmanto vidējos, sezonai raksturīgos pelnu satura un augstākās siltumspējas rādītājus. Šķeldu piegādes procesā netiek ņemta vērā kravu sablīvēšanās transportēšanas laikā, kravas mēra piegādes brīdī.

1.3. Sākotnējie secinājumi un priekšlikumi

Pētījuma rezultāti apstiprina pieņēmumu, ka, izmantojot forvardera datorsistēmā integrētos pievestā materiāla svēršanas risinājums, var nodrošināt nepārtrauktu datu apmaiņu par pievesto

biomasu un citiem rādītājiem, kas raksturo ražīgumu un ietekmi uz vidi. Tas uzlabo procesa pārskatāmību un efektivitāti, vienlaikus samazinot kļūdu un neskaidrību iespējamību uzskaitē.

Ražošanā pašreiz izmantotajai metodei (krautuvju uzmērīšanai) un svēršanai ir trūkumi, kā rezultātā neviena no tām nenodrošinās 100% precīzu prognozi pārdotajam apjomam. Efektīvākais risinājums ir apjoma uzskaitē atbilstoši operatora sniegtajai informācijai, paralēli pievestā apjoma uzskaitē veicot materiāla masas uzskaiti. Prioritārai jābūt pievestās masas uzskaitē, kas optimālos apstākļos nodrošina lielāku precizitāti un izslēdz cilvēcisko faktoru kā kļūdu avotu, bet, ņemot vērā svēršanas sistēmu iespējamās darbības pārtraukumus, paralēli nepieciešami arī pievestā apjoma dati, lai koriģētu pievešanas pārskatus būtisku atšķirību gadījumā.

Lai iegūtu labāku priekšstatu par svaru sistēmu pielietošanu mežizstrādes atlieku pievešanā, jāturpina svēršanas sistēmu aprobēšana ražošanas apstākļos, jo pagaidām Latvijā mežizstrādē nedarbojas neviens forvarders ražošanas apstākļos aprīkots ar svēršanas sistēmu.

Izstrādātie vienādojumi pievesto mežizstrādes atlieku pārrēķiniem no masas mērvienības (dabiski mitra materiāla tonnas) uz tilpuma mērvienībām (berkubikmetri AGK vai pie gala patērētāja) nodrošina lielu precizitāti un ir aprobējamai ražošanas apstākļos.

Plānojot svēršanas sistēmu ieviešanu ražošanas procesā, jāpievērš uzmanība forvarderu svaru kalibrēšanai, lai novērstu sistemātiskas kļūdas, un operatoru apmācībām, lai novērstu kļūdas, kas veidojas nepareizas svaru izmantošanas rezultātā. Lai uzlabotu integritāti ar citām datu sistēmām, jānodrošina forvardera datora atbilstība StanForD 2010 standartam. Operatoru instrukstāžā jāizrunā situācijas, kad, īslaicīgi pazūdot datu pārraides signālam, nenotiek datu uzskaitē. Šādas situācijas savlaicīgi jāidentificē, pārbaudot pēc katras kravas pievešanas reģistrēto masu un paralēli veicot apjoma uzskaiti.

Pievestā materiāla masas uzskaitē rekomendējama AGK. Tas samazina uzskaites kļūdu risku, izmantojot mežizstrādes atliekas tehnoloģisko brauktuvju stiprināšanā, kā arī atkārtoti satverot materiālu, ja tas izkrīt no forvardera.

Ja svēršanas sistēma ir aprīkota ar GNNS, var automatizēti nodalīt datus, kas reģistrēti cirmsā un AGK, kā arī var operatīvi novērtēt, vai mežizstrādes atliekas pievestas no visa objekta, kā arī kurā krautuvē (ja ir vairākas krautuves) mežizstrādes atliekas nokrautas.

1.4. Priekšlikumi pētījuma īstenošanai 2025. gadā

Lai sasniegtu pētījuma mērķi – uzlabot pievestā materiāla uzskaites precizitāti un nodrošināt ātrāku ražošanas datu apriti – nepieciešams veikt šķeldošanu un sašķeldotā materiāla uzskaiti un kvalitātes novērtēšanu objektos, kur 2023. un 2024. gadā veikta pievesto mežizstrādes atlieku svēršana, kā arī ražošanas apstākļos aprobēt izstrādātos vienādojumus. Lauku darbi ietver biokurināmā svēruma datu iegūšanu no AGK un šķeldu paraugu ievākšanu. Kamerālie darbi ietver šķeldu paraugu analīzes, izstrādāto vienādojumu precizēšanu un pētījumā iegūto datu apkopošanu, analīzi un sakarību novērtēšanu. Paralēli jāturpina svēršanas sistēmu pielietošana ražošanas apstākļos, pilnveidojot izstrādātos prognozēšanas modeļus, uzsvaru liekot uz sezonālītāti, jeb katrā sezonā novērtējot 10 cirsma.

2. Meža tehnikas monitoringa sistēmu un datu automatizētās apstrādes instrumentu pilnveidošana un ieviešana ražošanā

2.1. Forvardera atstāto risu mērīšanas iekārtas izstrāde

Pētījuma uzdevums 2024. gadā bija pilnveidot un aprobēt ražošanas apstākļos 2022. gadā izstrādāto risu mērīšanas sistēmu RM2, kas aprīkota ar GNSS RTK (Att. 2.1), papildinot R vidē funkcionējošu vienādojuma kopu (ietver secīgu darbību kopumu, lai no forvardera pārvietošanās cīsmā būtu iespējams aprēķināt kopējo risu garumu) ar risu garuma novērtējumu pievešanas ceļos. 2022. gadā izstrādāta metodika (LVMI Silava, 2023) risu garuma uzskaitē cīsmās, izmantojot datus, kas iegūti no RM2 sistēmas.



Att. 2.1. RM2 sistēma (kreisajā pusē RTK, vidū datu apstrādes bloks (RM2) un labajā pusē GNSS antena)

Balstoties uz lauka darbos iegūtiem kontrolmērījumiem, 2024. gadā precizēta R vidē funkcionējošā vienādojumu kopakasetver:

- risinājumu risu noteikšanai ārpus nogabala robežām (uz pievešanas ceļiem),
- iespēju mainīt uzstādījumus aprēķinos lietojamo risu dziļuma robežu noteikšanai,
- risinājumu tehnoloģisko koridoru platības noteikšanai cīsmā.

2024. gada sākumā atjaunotas abas iepriekšējā gadā bojātās RM2 sistēmas, un izgatavots trešais RM2 sistēmas komplekts, kas uzstādīts forvarderā 2024. gada oktobrī. Iekārtu darbības nepārtrauktības nodrošināšanai veiktas iesaistīto meža mašīnu operatoru apmācības, kas ietvēra operatoru informēšanu par sistēmas darbības principiem. Pievešanas izmēģinājumu laikā operatoriem vajadzēja sekot līdzi iekārtu darbībai, nodrošinot nepārtrauktu strāvas padevi. Pārējie procesi, kas saistīti ar mērīšanu un datu uzkrāšanu, notika automātiski.

Pievešanas izmēģinājumos identificētās vairākas problēmas, kas var ietekmēt datu kvalitāti:

- GNSS antenas sabojāšana – lai izslēgtu risku, uzstādīts papildu stiprinājums;
- savienojošā kabeļa (GNSS) bojājums – kabeļa savienojuma veidošana caur forvardera kabīni ražošanā strādājošām sistēmām (šobrīd kabelis atrodas ārpus kabīnes);

- datu zaudēšana starp RTK un RM2, izmantojot bezvadu risinājumu datu pārraidei – izveidots drošs vadu savienojums;
- tīkla pārklājuma zudums, kas izslēdz RTK funkcionalitāti – šai problēmai pagaidām nav risinājuma, bet tā var būtiski ietekmēt datu kvalitāti;
- augsti celmi uz tehnoloģiskajiem koridoriem, kas kropļo reljefa izmaiņu datus – pagaidām nav atrasts risinājums;
- straujas mikroreljefa izmaiņas – pagaidām nav atrasts risinājums;
- iepriekšējā izstrādes procesā izveidotās rises – pagaidām nav atrasts risinājums.

2024. gadā uzstādītās RM2 sistēmas nav plānots demontēt, turpinot datu uzkrāšanu arī 2025. gadā. RM2 sistēma nodrošina nepārtrauktu datu ievākšanu un saglabāšanu datu nesējā, kam seko automātiska rezerves datu kopijas pārsūtīšana, izmantojot platformu DigitalOcean, uz PostgreSQL datubāzi. Šāds nepatrauktas datu plūsmas nodrošinājums nepieciešams, lai izslēgtu cilvēciskā faktora ietekmi (operators aizmirst ieslēgt sistēmu). Izstrādātais programmas prototipa kods pievienots elektroniskā veidā pielikumā. Uzkrāto datu kopsavilkums dots Tab. 2.1.

Tab. 2.1. Serverī uzkrātais datu (punktu) apjoms 2024. gadā (līdz 10. decembrim)

Forvarders	Gads	Punktu skaits, gab.
Komatsu 911	2024	887051
Ponsse ELK	2023	2409329
	2024	2769696
Ponsse Wisent	2023	810001
	2024	2327539

Pētījuma ietvaros 2024. gadā papildinātais R kods automātiskai datu apstrādei iekļauj datus par tehnoloģiskajām brauktuvēm ārpus cirsmas robežas un tehnoloģisko koridoru aizņemto platību cīsmā (Att. 2.2). Datu automātiskais apstrādes process nodrošina to analīzi viena nogabala ietvaros, taču, ja nepieciešams vienlaicīgi analizēt datus no vairākiem nogabaliem (vienā darba uzdevumā iekļauti vairāki nogabali), tad nepieciešams mainīt ievades parametrus. Parametru nomaiņa nogabalu apvienošanai veicama ui.R koda sadaļā “getCompartment”. Esošajā programmas versijā šāds scenārijs nav ietverts, jo par pamatu nogabala robežām tiek ņemta telpiskā nogabalu robežu informācija, kura pieejama publiski pasūtītāja mājaslapā (www.lvmgeo.lv/dati/). Par nogabalam piesaistītām tehnoloģiskajām brauktuvēm uzskata tās, kuras robežojas ar nogabalu.

Datu apstrādes procesā automātiski ģenerējas failu direktorija, kurā saglabāti apstrādes procesā izveidotie faili, tai skaitā *.shp un informatīvs kopsavilkums, kas arī atspoguļots RStudio vidē, iekļaujot šādu informāciju:

- nogabala platība, ha;
- nogabalā nobrauktais attālums, m;
- kopējais risu garums nogabalā, m;
- aprēķinātais risu garums uz platības vienību, m ha⁻¹;
- tehnoloģisko koridoru aizņemtā platība, ha;

- kopējais risu garums ārpus nogabala robežām, m.

Lai adaptētu risu dziļuma noteikšanas risinājumu dažādām vajadzībām, izstrādātā vienādojumu kopa papildināta ar iespēju lietotājam norādīt minimālo risu dziļumu aprēķinos (Att. 2.2, “Risu dziļuma sliekšnis”). Maksimālais dziļuma sliekšnis ir 1 m. Tehnoloģisko koridoru aizņemtās platības noteikšanai izmanto fiksētu koridora platumu, ko reizina ar tehnoloģisko garumu cīrsmā, tāpēc iegūtais rādītājs ir indikatīvs, un ražošanas apstākļos tehnoloģisko koridoru platības raksturošanai jāizmanto AS “Latvijas valsts meži” vadlīniju “Krājas kopšanas cirtes izpildes pārbaužu procedūra” 4.9. punktā “Tehnoloģiskā koridora platumā mērīšana” dotā metodika.

Kvartāla apgabals (piem: 610)

609

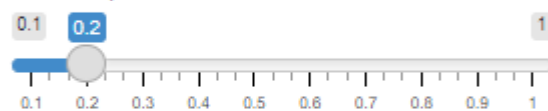
Kvartāla numurs (piem: 33)

266

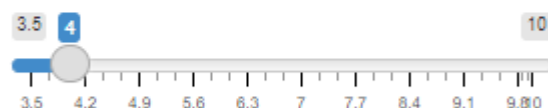
Nogabala numurs (piem: 8 vai 14,21,3)

7

Risu dziļuma sliekšnis (m):



TK platums (m):



Aprēķins

Rezultātu direktorija: C:/Silava/Projekti_2024/Rises_2024/RM2_R_kods/609-266-7

Nogabalā veiktais attālums - 2949 m

Rises garums nogabalā - 50 m

Nogaba platība - 2.99 ha

Rises garums uz hektāra - 17 m

TK aizņemtā platība - 1.1 ha

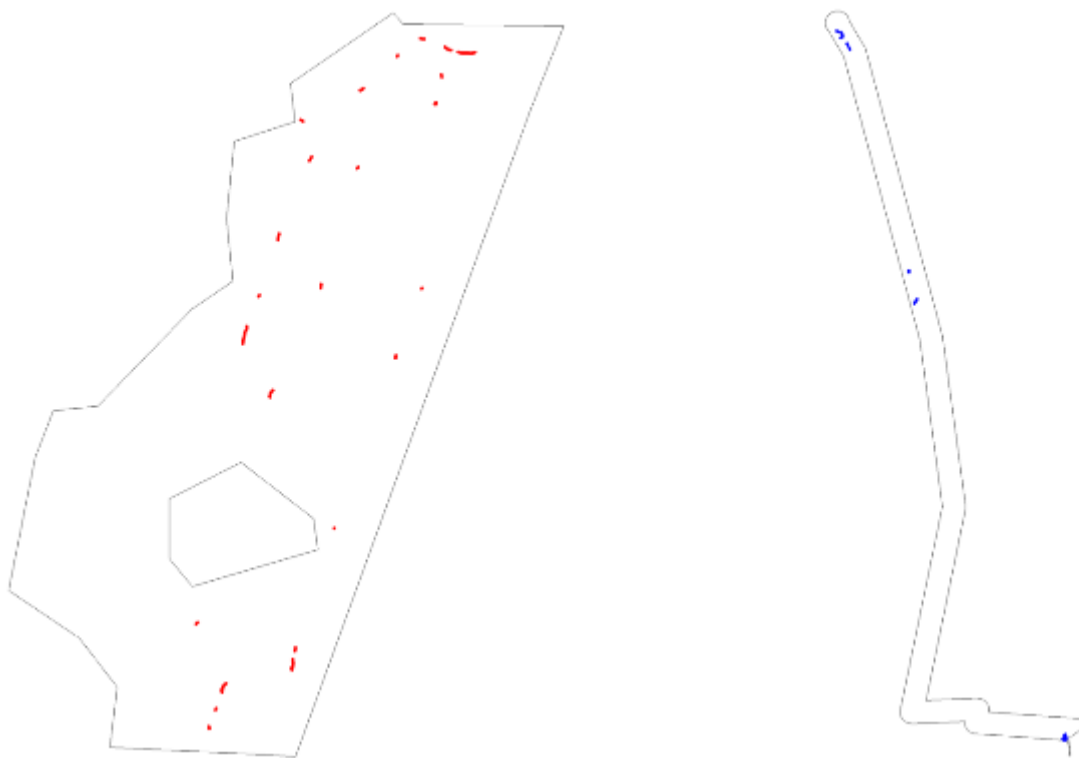
Rises garums TK - 22 m

Att. 2.2. Atbilstoši RM2 sistēmas iegūtajiem datiem (609-266-7) noteiktais risu apjoms

Programmas pārskatā iekļauta telpiskā informācija par risu atrašanās vietu (Att. 2.3, līnijas ar sarkanu un zilu krāsu), sniedzot lietotājam indikatīvu informāciju par iespējamo risu izplatību cīrsmā. Risu platības novērtējums ir indikatīvs un norāda uz tām cīrsmām, kurās nepieciešama manuāla cīrsmu uzmērīšana, lai iegūtu precīzus datus par risu izplatību. Lai lietotājam būtu vieglāk atrast rises dabā, failu direktorijā ir pieejami *.shp faili cīrsmā, nogabalam un brauktuvei ārpus nogabala.

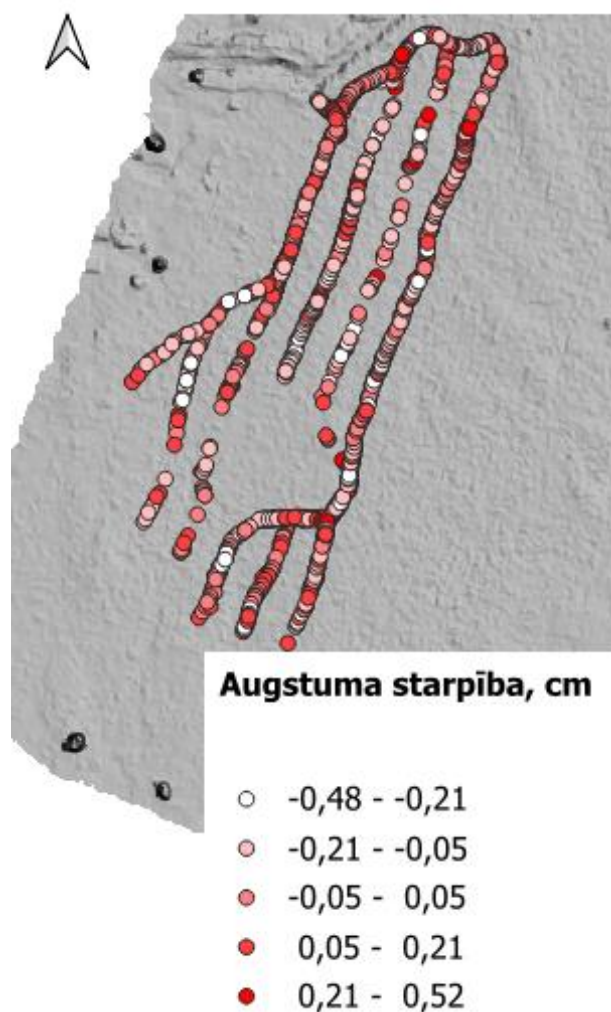
Izstrādātā RM2 sistēma šobrīd paredzēta par 20 cm dziļāku risu identificēšanai cīsmā. Balstoties uz līdz šim iegūto datu kopu, RM2 sistēma strādā ar precizitāti $\pm 0,06$ m. Sistēmas mērījuma precizitāti ietekmē GNSS RTK $0,01 \pm 0,01$ m (minimālā vērtība – 0,01 un maksimālā vērtība – 0,8).

•



Att. 2.3. Forvardera risu izvietojuma piemērs cīsmā un ārpus tās pēc pievešanas

2023. gadā, izmantojot RM2 sistēmu, zemes virsmas modelis sākotnējās situācijas raksturošanai veidots no GNSS mērījumu datiem, kas iegūti pirmajā braucienā. Alternatīvs risinājums ir izmantot LiDAR tehnoloģiju zemes virsmas modeļa izveidošanai, piemēram, LĢIA brīvi pieejamos LiDAR datus. Pētījuma ietvaros salīdzināts RM2 sistēmas ģenerētais zemes virsmas modelis un no LĢIA pieejamais LiDAR datiem ģenerētais zemes virsmas modelis sākotnējā stāwokļa (pirms pievešanas) raksturošanai. Salīdzinot iegūtos modeļus, būtiskas atšķirības pētījuma objektos nav konstatētas, tomēr no LiDAR datiem ģenerētajā modelī konstatēts sistemātiskas kļūdas, kas saistītas ar nepietiekošu punktu skaitu zem koku vainagiem, kas neļauj pietiekoši precīzi izsekot mikroreljefam, kā arī sistemātiskas zemes virsmas augstuma novirzes. Piemēram, 609. kvartālu apgabala 266. kvartāla 7. nogabalā (Att. 2.4), salīdzinot 1795 punktus, iegūtie rezultāti būtiski neatšķiras, vidējais augstums virs jūras līmeņa atbilstoši datiem, kas iegūti ar RM2, ir $25,07 \pm 0,35$ m, bet atbilstoši LiDAR datiem – $25,07 \pm 0,32$ m. Neskatoties uz to, ka būtiskas atšķirības nav, 44% no punktiem, kas iegūti ar LiDAR, atrodas zemāk nekā ar RM2 sistēmu iegūtie punkti. Tas nozīmē, ka, izmantojot LiDAR datus es virsmas augstuma raksturošanai pirms pievešanas, ir lielāka sistemātiskas kļūdas varbūtība, vērtējot risu izplatību.



Att. 2.4. Augstuma virs jūras līmeņa izmaiņu salīdzinājums modeļiem no GNSS un LiDAR datiem veidotiem modeļiem

Kopšanas cirtē salīdzināti risu dziļuma mērījumi, kas iegūti ar RM2 sistēmas un kontrolmērījumos. Augsta precizitāte (atšķirības starp iegūtajām datu kopām ir $\pm 0,5$ m) novērojama 57% gadījumu. Pārējos gadījumos vidēji RM2 sistēma uzrāda lielākas risu garuma atšķirības (One-Way ANOVA tests, $p=0,82$) nekā kontrolmērījumos (vidējā atšķirība 5,05 m, Tab. 2.2).

Tab. 2.2. Statistisko rādītāju salīdzinājums

Rādītājs	Kontrolmērījums	RM2 sistēmas mērījums	Atšķirības
Cirsmu skaits	10	10	-
Vidējais risu garums	20,95	26,0	5,05
Standartnovirze	$\pm 50,2$	$\pm 48,4$	$\pm 5,9$
Minimālā vērtība	0	0	-0,5
25%	0,13	4,0	0,0

Rādītājs	Kontrolmērījums	RM2 sistēmas mērījums	Atšķirības
50%	1,75	13,0	3,5
75%	13,75	20,50	10,0
Maksimālā vērtība	162,0	162,0	15,0

Izstrādātā R vienādojumu kopa aprakstīta 2023. gada pārskatā (LVMI Silava, 2023). Lietošanas instrukcija papildināta, lai izmantotu jaunās funkcijas. Lai veiktu aprēķinu, secīgas jāveic šādas darbības:

1. jāuzstāda programmas R un RStudio (pieejama lejupielādei, piemēram, RStudio vietnē²), kā arī R paplašinājumu “rtools” (pieejama lejupielādei, piemēram, CRAN.R vietnē³);
2. jāpārlicinās par to, vai uzstādītas aprēķiniem nepieciešamās bibliotēkas, nepieciešamības gadījumā tās uzstādot RStudio programmas “Console” logā ar komandu `install.packages(c('shiny', 'sf', 'rgdal', 'readxl', 'ggplot2', 'plyr', 'dplyr', 'purrr', 'gstat', 'data.table', 'tidyr', 'maptools', 'raster', 'sp', 'DBI', 'RPostgres', 'leaflet', 'tidyverse', 'writexl', 'png', 'akima'))`, kā arī jāpārlicinās par to, vai aprēķiniem nepieciešamās bibliotēkas R vidē atbilst minimālām versijas prasībām (Tab. 2.3).

Tab. 2.3. R vienādojuma kopuma funkcionēšanai nepieciešamās bibliotēkas.

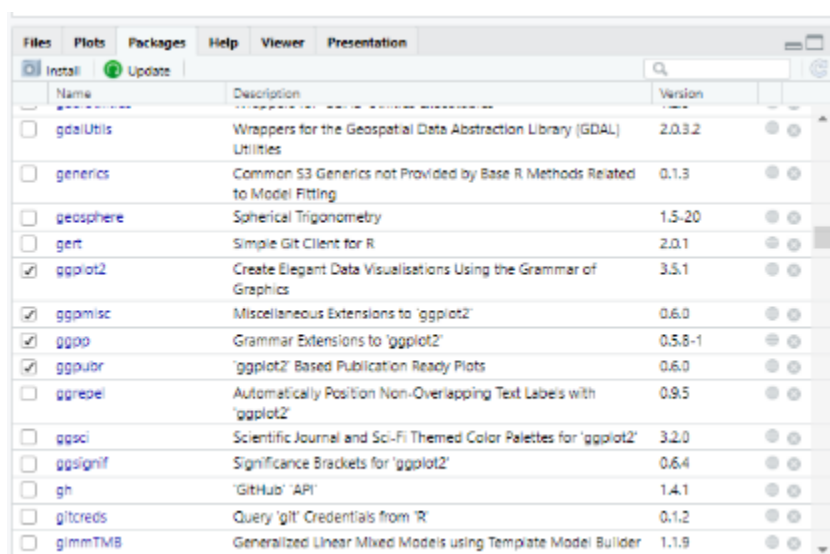
RStudio bibliotēkas	Versijas Nr.	RStudio bibliotēkas	Versijas Nr.
shiny	1.8.0	sf	1.0-15
ggplot2	3.5.1	plyr	1.8.9
akima	0.6 – 3.4	png	0.1. -8
xritexl	1.4.3	Tidyverse	2.0.0
leaflet	2.2.1	RPostgres	1.4.6
DBI	1.2.1.	sp	2.1-3
raster	3.6-26	maptools	1.1-8
tidyr	1.3.1	data.table	1.15.0
gstat	2.1.-1	purrr	1.0.2

Bibliotēku uzstādīšana vai aktualizācija RStudio ir jāveic pirms koda palaišanas. Ja kādu no bibliotēkām neizdodas uzstādīt vai aktualizēt automātiski, tas jā dara manuāli, RStudio logā “Tools” izvēloties komandu “Install Packages” un logā “Install from” izvēloties “Package Archive File”. Uzstādītās bibliotēkas un to versijas var pārbaudīt RStudio labajā pusē, izvēloties sadaļu “Packages”

² <https://rstudio-education.github.io/hopr/starting.html>

³ <https://cran.r-project.org/bin/windows/Rtools/rtools43/rtools.html>

(Att. 2.5), kur kolonā “Name” redzamas visas uzstādītās bibliotēkas. Kad aprēķiniem nepieciešamo programmu un bibliotēku uzstādīšana ir pabeigta, veic darbības ar RM2 programmas prototipu.



Att. 2.5 Uzstādīto RStudio bibliotēku pārbaude

Aprēķinu veikšanai secīgi izpildāmās darbības:

1. ziņojumam elektroniski pievienoto datni “RM2_R_kods” atarhivē direktorijā, kurā notiks darbs ar programmu un tās izveidotajām datnēm;
2. izstrādātās programmas prototipa funkcionēšanai direktorijā “/.../RM2_R_kods/LVM_NOGABALI”, ko izveido turpat, kur atarhivēts programmas kods, ievieto analizējamo nogabalu ģeogrāfisko informāciju “*.shp” datņu formātā (<https://www.lvmgeo.lv/dati> sadaļā “Meža īpašnieku nogabali” jāizvēlas “AS Latvijas valsts meži meža nogabali SHP”;
3. atver programmu RStudio, un, izmantojot programmas RStudio galvenā loga izvēlni, atver (Open File) datni “ui.R”, kas atrodas direktorijā, kur atarhivēta datne “RM2_R_kods”;
4. programmas RStudio logā R console norāda, kurā mapē atrodas izstrādātais kods “workdir”, izmantojot komandu setwd (“<ceļš uz direktoriju>/RM2_R_kods/”), kā direktoriju atdalītāju izmantojot “/”;
5. aktivizē programmu, apstiprinot izvēlni “Run App”. Pēc programmas palaišanas notiek R koda aktivizēšana un process noslēdzas ar interneta pārlūka atvēršanu vai RStudio papildu loga atvēršanu;
6. jaunatvērtais interneta pārlūka logā ievada pamatinformāciju par objektu – kvartālu apgabalu, kvartālu un nogabalu;
7. papildus norāda aprēķinos lietojamo risu dziļuma robežvērtību (noklusētā vērtība ir 20 cm), bet nepieciešamības gadījumā to var palielināt līdz 1 m;
8. pēc pamatinformācijas ievadīšanas aktivizē aprēķinu, interneta pārlūkā nospiežot pogu “Aprēķins” (process var aizņemt no dažām sekundēm līdz dažām minūtēm, atkarībā no datu apjoma uz servera un datora jaudas).

Pēc šo darbību izpildīšanas programma ģenerē datni ar apstrādāto informāciju, kura ietver – nogabala robežas (*.shp), risu izvietojumu cīsmā (*.shp), risu izvietojumu ārpus cīsmās (*.shp), kā

arī kopsavilkumu par cīsmā nobraukto attālumu, indikatīvo risku garumu cīsmā un ārpus tās, kā arī risu garumu uz 1 ha un tehnoloģisko koridoru aizņemto platību.

2.2. Sākotnējie secinājumi un rekomendācijas

Saskaņā ar pētījumā iegūtiem datiem, risu uzmērīšanas sistēma RM2 kopšanas cirtēs sniedz indikatīvu informāciju par risu platību, tomēr tās mērījumiem un kontrolmērījumiem nav statistiski būtisku atšķirību ($p=0,82$). Abi mērījumi sakrīt 57% gadījumu, bet atsevišķās cīsmās RM2 sistēma uzrāda dziļākas rīses nekā kontrolmērījumi. Tā kā vidējā atšķirība risu garuma mērījumos ir neliela (5,05 m), bet rezultātu dispersija ir liela, RM2 sistēmas dati var būt noderīgi indikatīvai manuālas uzmērīšanas nepieciešamības novērtēšanai. Daļā objektu RM2 sistēma fiksējusi dziļākus iespaidumus augsnē nekā konstatēts kontrolmērījumos. Precizitāti ietekmē vairāki faktori, tajā skaitā celmu augstums, mikroreljefs, un iepriekš tehnikas atstātās rīses, tāpēc izstrādāto programmas prototipu šobrīd var izmantot, lai iegūtu indikatīvu informāciju par risu izplatību cīsmās un ārpus tām, samazinot nepieciešamību apmeklēt un manuāli uzmērīt risu izplatību visās cīsmās. Viens no faktoriem, kas kavē risu izplatības novērtēšanas precizitātes uzlabošanu, ir nepietiekoši precīzs digitālais reljefa modelis sākotnējā stāvokļa (zemes virsmas augstuma) cīsmā raksturošanai.

Pētījumā salīdzinājām digitālo reljefa modeli, kas veidots no publiski pieejamajiem LĢIA ALS datiem, ar reljefa modeli, kas veidots no pievešanas laikā iegūtiem GNSS datiem. Abām metodēm ir trūkumi, taču no ALS datiem veidotajam reljefa modelim raksturīgas sistemātiskas kļūdas, kas saistītas gan ar nepietiekošu izšķirtspēju, gan ar modeļa nenoteiktību, kas izriet no instrumentu un aprēķinu metodes kļūdas. Lai novērstu ar sākotnējā stāvokļa novērtēšanu saistītās problēmas, turpmākajos pētījuma etapos ir jāvērtē reljefa modeļa uzlabošanas iespējas, izmantojot mežizstrādes laikā iegūstamus datus.

R vidē funkcionējošo vienādojumu kopa 2024. gadā pilnveidota, nodrošinot iespēju iegūt indikatīvus datus par risēm cīsmā un uz pievešanas ceļiem, kā arī ļaujot lietotājam definēt risu dziļuma robežvērtību (robežā no 0,1 m līdz 1 m).

Pētījuma ietvaros izstrādāto R kodu var papildināt, iekļaujot informāciju par:

- koridoru izvietojumu un to kopējo platību;
- pievešanas darbu efektivitāti (braucienu skaits, ilgums, garums, pievestais apjoms, patērētā degviela);
- detalizētāk raksturot pievešanas apstākļus cīsmā, izmantojot informāciju par braucienu skaitu, pievesto apjomu, vidējās kravas lielumu, augšanas apstākļus, risu dziļumu u.c.;
- siltumnīcefekta gāzu emisiju aprēķinam nepieciešamo datu sagatavošanai;
- sagatavot rekomendācijas degvielas patēriņa samazināšanai pievešanas darbos, palīgu operatoram, kas, izmantojot papildus ievades datus, parāda vietas ar potenciāli zemu grunts nestspēju un vietas, kur ieteicama papildu brauktuves seguma nostiprināšana.

2.3. Priekšlikumi pētījuma īstenošanai 2025. gadā

Lai sasniegtu pētījuma mērķi – RM2 sistēmas pielietošanas izmēģinājumi ražošanas apstākļos – jāturpina izstrādātās programmatūras pilnveide, uzlabojot iegūto datu precizitāti, un pielāgošana ražošanas apstākļiem, tajā skaitā uzlabojot zemes virsmas modeļa izveidošanas metodi stāvokļa raksturošanai pirms pievešanas.

RM2 sistēmu aprobācija ražošanas apstākļos sniegs praktisku atbalstu sistēmas pilnveidošanai un integrācijai ražošanas procesos. 2025. gadā lietderīgi veikt vismaz 20 ha cīsmu,

Tehnoloģijas meža apsaimniekošanas procesu efektivitātes paaugstināšanai

kurās risu izplatības dati iegūti ar RM2 sistēmu, apsekošanu kopā ar uzņēmuma mežizstrādes meistarū, identificējot raksturīgākās kļūdas un iespējamās risinājumus to novēršanai.

RM2 sistēmas darbība neietekmē forvardera operatora darbu, tāpēc 2025. gadā visas trīs sistēmas var uzstādīt kopšanas cirtēs nodarbinātiem forvarderiem, lai iegūtu lielāku datu kopu sistēmas uzlabošanai.

3. Risinājumi meža ceļu monitoringam

3.1. Risinājumi meža ceļu monitoringam – priekšizpētes posms

Pētījuma uzdevums 2024. gadā ir apkopot informāciju par tehnoloģiskām iespējām un risinājumiem, kurus var izmantot (uzstādīt) kravas transportlīdzekļos – kokvedējos – dinamiskam meža ceļu stāvokļa monitoringam.

Izpētīto tehnoloģisko iespēju un risinājumu vispārīgs apraksts

Mežsaimniecības pasākumu, apsaimniekošanas un rekreācijas kvalitāte ir cieši saistīta ar meža ceļu stāvokli. Regulāri atjaunināta informācija par meža ceļu infrastruktūras stāvokli ir būtiska, taču manuālas monitoringa metodes ir dārgas un sarežģītas. Attālās izpētes risinājumi sniedz iespējas samazināt patērētos resursus, bet arī šiem risinājumiem ir trūkumi, ja nepieciešams apsekt plašas teritorijas, kā tas ir meža ceļu gadījumā. Satelītu dati, kas parasti ir ar zemāku telpisko izšķirtspēju, šim nolūkam nav piemēroti, tādējādi bezpilota lidaparātu dati ir piemērotāki un biežāk pieminēti arī zinātniskajā literatūrā. SfM (*Structure from Motion*) fotogrammetrija no gaisa, izmantojot digitālos attēlus, ir ierobežota meža biežības un vainagu slēguma dēļ, kas traucē skaidru ceļa redzamību (David u.c., 2009). Ar bezpilota lidaparātiem iegūtiem dati var nodrošināt detalizētu informāciju, bet tiem trūkst mobilitātes un šāda monitoringa mērogošanas iespējas ir ierobežotas, kas padara tos neefektīvus visaptverošai meža ceļu tīklu analīzei.

Zinātniskajā literatūrā aprakstīts neliels funkcionējošu risinājumu skaits detalizētai ceļu stāvokļa novērtēšanai, attālās izpētes (*remote sensing*, angl.) vietā izmantojot *tuvo izpēti* (*proximal sensing*, angl.). Lielākā daļa šo risinājumu balstās fotogrammetrijas un datorredzes tehnoloģijās, atkarībā no vēlamā sasniedzamā rezultāta (Ali u.c., 2022; Barriera u.c., 2020; Bochinski u.c., 2017; Cao u.c., 2020; Hoseini, Gobakken, u.c., 2024; Hoseini, Puliti, u.c., 2024).

Sensoru tehnoloģiju attīstība ir sniegusi dažādas iespējas, kuras var integrēt meža ceļu monitoringa sistēmās. Šīs tehnoloģijas ietver stereo kameras, akselerometrus, globālās navigācijas satelītu sistēmas (GNSS) sensorus un citas optiskās sistēmas, kas ļauj iegūt datus un novērtēt ceļa apstākļus un bojājumus (Picchio u.c., 2019). Piemēram, Kanādas Opti-Grade izmanto akselerometru, lai novērtētu ceļa virsmas raupjumu. Arī viedtālruņi, kas aprīkoti ar akselerometru un GNSS sensoru, var nodrošināt telpisku ceļa stāvokļa monitoringu. Tomēr mobilo telefonu iespējās balstītajām metodēm ir ierobežota izšķirtspēja un precizitāte, kas var ietekmēt rezultātus, jo to ierakstīšana notiek no transportlīdzekļa salona (Šušnjar u.c., 2020). Transportlīdzekļos uzstādītas tuvās izpētes metodes jau plaši izmanto ceļu uzturētāji ar sarežģītām un specializētām platformām, lai periodiski veiktu ceļu uzraudzību. Dažādos risinājumos, lai noteiktu ceļa ģeometriju un ceļu bojājumus, piemēram, virsmas nelīdzenumus, izmantoti lāzerskeneri, akselerometri un GNSS (Svenson & Fjeld, 2017). Lai izveidotu ekonomiskākus un plašāk lietojamus risinājumus, ir bijuši mēģinājumi izstrādāt samazinātas platformas, kuras varētu izmantot reālā satiksmē. Piemēram, Starke un Geiger (2022) pētīja piecu punktu ultraskaņas sensoru veidotu ceļu skenera iespējas noteikt šķērsriezuma profilu, un Šušnjar u.c. (2020) testēja planšetdatora akselerometra pielietošanas iespējas mērīt ceļa virsmas nelīdzenumu identificēšanai.

Plaši izmantotas arī optiskās sistēmas apvienojumā ar objektu atpazīšanas algoritmiem, kas piedāvā efektīvu dažādu objektu automātisku atpazīšanu attēlos vai video, piemēram, video reģistratora datus. YOLO (You Only Look Once) algoritms, it īpaši YOLOv5 versija, ir pielietots, lai identificētu ceļu virsmas bojājumus, piemēram, bedres, kā arī ceļazīmes un citus ceļa infrastruktūras elementus. Šī pieeja izmanto mašīnmācīšanas un datorredzes tehnoloģijas, lai identificētu bojājumus, izmantojot attēlus vai video, kas iegūti ar plaša patēriņa ierīcēm, piemēram, viedtālruņiem un automašīnu video reģistratoriem (Heidari u.c., 2022; Hoseini, Puliti, u.c., 2024; Starke & Geiger,

2022). Lai uzlabotu ceļu bojājumu veidošanās dinamikas monitoringu laika gaitā, izmantotas objektu izsekošanas metodes, piemēram, *Simple Online and Realtime Tracking* (SORT) un *StrongSORT*. Šīs metodes izseko un kartē bedru un citu ceļa defektu, ar kuru attēliem veikta modeļa apmācīšana, atrašanās vietu video kadrus (Du u.c., 2022).

Automatizētas sistēmas, kas balstītas uz YOLO un citiem mašīnmācīšanās modeļiem, ir apliecinājušas savu pielietojamību ceļu monitoringā, un spēj identificēt bedres un ceļazīmes ar telpisku piesaisti, veidojot bojājumu kartes. Ieraksts ar viedtālruni ir viegli mērogojams un ekonomisks risinājums, tomēr iegūtie dati var nebūt savstarpēji savietojami un to kvalitāte var būt būtiski atšķirīga, vienkāršo sensoru un to pielietošanas tehnisko ierobežojumu ietekmē (Puliti & Astrup, 2022). Visbiežāk tas rezultējas nekorektos un nesalīdzināmos datos un zemā telpiskā izšķirtspējā. Augstas izšķirtspējas sistēmas, piemēram, mobilās lāzerskeneru sistēmas, kuras izmantotas automaģistrāļu monitoringā, bieži ir pārāk dārgas un sarežģītas zema intensitātes meža ceļiem, kā arī tām ir apgrūtināta datu ieguve, pārraidīšana un uzglabāšana lielā datu apjoma dēļ (Hoseini, Puliti, u.c., 2024).

Jaunākajos pētījumos Norvēģijas Bioekonomikas Institutā (NIBIO, Hoseini, u.c. (2024), demonstrēta automatizēta pieeja meža ceļu bedru, monitoringam, izmantojot datorredzi (Att. 3.1). Videofragmenti, kas uzņemti ar standarta automašīnas video reģistratoru, analizēti, izmantojot modeli YOLOv5, kas identificēja bedres. Rezultāti parādīja, ka modelis veiksmīgāk darbojās apmākušos un lietainos laika apstākļos, kad bedres bija piepildītas ar ūdeni. Šīs metodes trūkums ir arī ierobežotais braukšanas ātrums – pētījumā testi veikti, braucot ar ātrumu 20 km h⁻¹. Pētījumā arī izskatītas iespējas uzlabot sistēmu, piemēram, ar bedru dziļuma novērtēšanu, bet neveiksmīgi nepietiekamā attēlu dziļuma un fotogrammetrijas metodes ierobežojumu rezultātā.



Att. 3.1. Bedru atpazīšanas piemērs dažādos laikapstākļos, izmantojot datorredzi, pētījumā Norvēģijā (Hoseini, Puliti, u.c., 2024)

Otrs šīs grupas pētījums (Hoseini, Gobakken, u.c., 2024) ir par NIBIO izstrādāto *RoadSens* ierīci, kura izmanto stereo attēlus, segmentējot tos ar mašīnmācīšanās algoritmiem. Tādā veidā iegūti ceļu ģeometriskie dati. Šī sistēma ir aprīkota ar stereo kameru (30Hz), GNSS antenu, datoru, tīkla rūteri un akumulatoru sistēmas darbības nodrošināšanai. Iegūtie stereo attēli apstrādāti fotogrammetriski, rezultātā iegūstot punktu mākonī, kas ir šīs sistēmas izejas fails. *RoadSens* nodrošina slīpuma, horizontālā un vertikālā ceļa rādiusa un dažādu šķēsgriezuma parametru mērījumus, piemēram, redzamo ceļa platumu, centra līnijas pozīciju, kreisā un labā sāna nogāžu slīpumus, kā arī redzamo grāvju dziļumu un attālumu no ceļa malām. Ierīces mīnusi ir tās izmērs,

sarežģītā uzstādīšana, tās atrašanās ārpus auto salona uz jumta vai motora pārsega, kā arī ierobežotais ātrums, ar kādu var pārvietoties transportlīdzeklis (30 km h^{-1}).

Risinājumos izmantojamo ierīču – sensoru un kontrolieru raksturojums

Pētījuma ietvaros veikta dažādu praksē pielietoto un zinātniskajā literatūrā aprakstīto sensoru un kontrolieru analīze (Tab. 3.1). Detalizētāk veikts NIBIO *RoadSens* sistēmas vērtējums, jo šī sistēma, lai arī agrīnā izstrādes stadijā, visvairāk atbilst pētījuma darba uzdevumam (Tab. 3.2).

Tab. 3.1 Pētījumā vērtēto sensoru un ar tiem saderīgo kontrolieru saraksts

Akselerometrs	Lēts elektronisks sensors ar mazu mehānisku daļu skaitu, kas piemērots izmantošanai kravas automašīnās, kas brauc meža ceļu, reizēm ekstremālos apstākļos. Tas uztver vibrācijas, interpolē vibrāciju frekvences, kas atbilst ceļa, pa kuru pārvietojas automašīna, īpašībām. Sensors jāuzstāda starp riteniem un amortizācijas sistēmu, pēc iespējas tuvāk ceļam, lai novērstu amortizācijas sistēmas ietekmi uz rādītājiem. Akselerometra izmantošanas trūkums ir apstākļi, ka tas neuztver visu ceļa virsmu, bet gan tikai to brauktuves daļu, kur riepa saskaras ar zemi. Ja vadītājs veic manevru, lai izvairītos no ceļa bojājumiem, tie netiks konstatēti. Ceļa bojājumu dimensiju noteikšana arī var būt sarežģīta, jo tie ir atkarīgi no transportlīdzekļa ātruma un citiem faktoriem, ko ir grūti precīzi noteikt. Sistēma jāsaista ar precīzu GNSS uztvērēju. Sensori atrodas tiešā apkārtējās vides iedarbībā, tādēļ nepieciešams testēt to noturību, izmantojot ilgstoši reālos apstākļos.
RGB kamera	Ar RGB kameru domāts videoattēla sensors, kas var būt RGB vai IR (nakts apstākļos), taču princips ir nemainīgs – savienot kameru ar datoru, uz kura darbojas automatizēta attēlu atpazīšanas programmatūra. Programmatūra ir jāapmāca, izmantojot datu bāzi, kas jāizveido pirms sistēmas ieviešanas ekspluatācijā, un to regulāri jāatjaunina, lai attīstītu iespējas un atpazīšanas precizitāti. Vienas lēcas kameru var izmantota ceļa zīmju un citu ceļa infrastruktūras elementu atpazīšanai. Citiem objektiem un 3D modeļa izveidei ieteicama stereo kamera. Iegūtie dati izmantojami gan datorredzes algoritmos objektu atpazīšanai, gan fotogrammetrijā virsmas nelīdzenumu analīzei. Iegūto attēlu kvalitāte ir mainīga, atkarīga no gaismas apstākļiem, vējstikla tīrības un citiem apstākļiem. Būtiskas grūtības attēlu analīzē rada koku un zemsedzes veģetācijas ēnas uz ceļa, kā arī ūdens pelķēs.
Lāzersensori	Viena stara lāzersensori, ko izmanto automašīnās un bezpilota lidaparātos šķēršļu noteikšanai, darbojas līdzīga kā sarežģītākie LiDAR sensori, bet ar vienkāršotu tehnoloģiju. Šie sensori izstaro vienu infrasarkanu lāzerstaru, kas izplatās telpā un, sasniedzot šķērslī, atstarojas atpakaļ uz sensoru. Tā kā viens sensors izmanto tikai vienu lāzerstaru, tā redzes lauks ir ierobežots, un tas spēj mērīt attālumu tikai vienā virzienā. Lai nodrošinātu pilnīgāku apkārtnes aptveri, uz automašīnas var uzstādīt vairākus šādus sensorus. Piemēram, uzstādot 16 viena stara lāzersensorus, var panākt plašāku telpas pārklājumu nekā ar vienu sensoru, kur katrs sensors būs vērsts noteiktā virzienā, nodrošinot to, ka vienlaicīgi tiek aptverts būtiski lielāks redzes lauks, nodrošinot iespēju veidot ceļa brauktuves virsmas modeli, kas pietiekoši labi raksturo ceļa deformācijas.

	Šie sensori ir efektīvāki izskalojumu, risu un citu būtisku ceļa bojājumu atpazīšanai, kurus ir sarežģīti identificēt, izmantojot akselerometru vai RGB kameru, pielietojot to kā alternatīvu risinājumu stereo kamerai ar fotogrammetrijas metodi, kas prasa būtiski vairāk datorresursu un ir jūtīgāka pret vides apstākļu ietekmi. Lāzersensoru priekšrocības: • mērījumu precizitāte un maza staru kūļa izkliede; • barošana no transportlīdzekļa elektrosistēmas, kas samazina kļūdu iespēju bateriju defektu gadījumā vai pazeminoties temperatūrai; • mazāka atkarība no braukšanas ātruma, salīdzinot ar metodēm, kas izmanto fotogrammetriju vai LiDAR datus; • datu pārraide pa vadiem, samazinot datu zaudēšanas risku. Trūkumi: • jutīgi pret piesārņojumu, jānovieto drošā vietā (izmēģinājumos iekārtu plānots likt kabīnes augšpusē; attiecīgi, operators varēs novērtēt tās stāvokli arī vizuāli); • datu pārraide un barošana no transportlīdzekļa elektrosistēmas palielina uzstādīšanas un montāžas laiku; • jutība pret laika apstākļiem, sensoru precizitāte var būtiski samazināties pazeminātā temperatūrā (atbilstoši ražotāja specifikācijām, pazeminoties temperatūrai zem -5°C, iekārta nevar strādāt).
LiDAR	Precīzākais, bet dārgākais risinājums precīza ceļa profila raksturošanai, tomēr, neskatoties uz iegūto datu blīvumu, precizitāti ierobežo transportlīdzekļa pārvietošanās ātrums, sensora novietojums un tīrība, kuru nodrošināt ikdienas lietošanas apstākļos var būt sarežģīti. Iegūtais datu apjoms ir ļoti liels, un tā automātiska apstrāde, uzglabāšana vai pārraide var būt ļoti apgrūtināta vai pat neiespējama, izmantojot bezvadu tehnoloģijas. Bedru un ceļa zīmju noteikšana ar LiDAR var nebūt iespējama, tādēļ LiDAR apsverams tikai kā papildu sensors.
Datu pārraide	GNSS uztvērējs, 500-800 EUR. Vienkāršs GPS modulis, 50-150 EUR. Tīkla rūteris, 150-300 EUR.

Tab. 3.2. NIBIO RoadSens sistēmā izmantotās komponentes

GNSS uztvērējs un antena	Ražotājs: Swift Navigation. Aparatūras modulis: Piksi Multi v2.2 un novērtēšanas plate. RTK: Divfrekvenču līdz 10 Hz (GPS L1/L2, GLONASS G1/G2, BeiDou B1/B2, Galileo E1 E5b). IMU: Integrēts MEMS (neapstrādāts izvads līdz 100 Hz). Satelītu izsekošana: L1 un L2 līdz 22 satelītiem. Barošanas diapazons: 5,0 - 15,0 VDC. Digitālās saskarnes: USB, CAN, UART, Ethernet, PPS. Sakaru protokoli: Swift Binary Protocol, NMEA 0183, RTCM v3. GNSS antena: Survey Antenna GPS500.
Stereo RGB kamera	Ražotājs: Stereolabs Inc., Sanfrancisko, Kalifornija/ASV. Aparatūras modulis: ZED 2i Stereo Camera.

	Saskarne: USB3-C. Fokusa attālums: 2,1 mm vai 4,0 mm. Funkcijas: Polarizators atspīdumu noņemšanai, 120° redzes lauks, IP66 korpus.
Dators	Ražotājs: StereoLabs INC, NVIDIA. Aparatūras modulis: ZED Box Xavier NX 8GB. Procesors: NVIDIA Jetson Xavier NX, 8GB LPDDR4x RAM, 384 kodolu NVIDIA Volta GPU, 6 kodolu NVIDIA Carmel ARM v8.2 64 bitu CPU. Saskarnes: Ethernet, USB3, USB2, HDMI.
Tīkla maršrutētājs	Ražotājs: Teltonika. Aparatūras modulis: RUT 955. Saskarnes: 4G LTE, 2,4 GHz WLAN, 10/100 Mbps WAN, 3x 10/100 Mbps LAN.
Barošanas bloks	Ražotājs: Teltonika. Modelis: BAT120 Mini-UPS. Ieejas spriegums: 9 - 30 VDC. Izejas jauda: 22 W. Kapacitāte: 2,3 Ah pie 3,7 VDC.

Risinājumos izmantoto sensoru un saistīto elektronisko un mehānisko komponentu izvietošanas, stiprināšanas un savstarpējas savienošanas variantu apraksts

Atbilstoši literatūras analīzes un praktiski pielietojamo risinājumu analīzes rezultātiem pētījumā novērtētas praktiskiem izmēģinājumiem nepieciešamās elektroniskās un mehāniskās komponentes (Tab. 3.3). Tabulā doti galveno komponentu piemēri, kā arī aptuvenā tirgus cena. Jāņem vērā, ka komponentu veids un skaits var būtiski atšķirties, atkarībā no izvēlēta risinājuma.

Tab. 3.3. Elektronisko un mehānisko komponentu izvietošanas, stiprināšanas un savstarpējas savienošanas variantu apraksts

Aprīkojums	Modelis	Cena ar PVN (gab.)	Skaits	Kopā
Akselerometrs				
Mikrokontrolieris Mega2560 R3	ARD-Mega2560R3	23	1	23,00
Akselerometrs, kustību sensors	SEN-MPU6050	5,2	2	10,40
Micro-SD SPI modulis	COM-MSD	3,68	1	3,68
GPS MODULE U-BLOX NEO-7M	WPI430	34,95	1	34,95
multiplexer; I2C	DF-DFR0576	15,22	1	15,22
Kopā				87,25
Viena punkta lāzersensors				

Aprīkojums	Modelis	Cena ar PVN (gab.)	Skaitis	Kopā
Mikrokontrolieris Mega2560 R3	ARD-Mega2560R3	23	1	23,00
Micro-SD SPI modulis	COM-MSD	3,68	1	3,68
GPS MODULE U-BLOX NEO-7M	WPI430	34,95	1	34,95
multiplexer; I2C	SX1509	6,5	1	6,50
Single-Point Ranging Solid State LiDAR Sensor	SEN0340	24,79	16	396,64
Kopā				464,77
Stereo kamera				
Stereo Perception Kit - USB 3.0	ZED 2i Stereo Camera	2566	1	2566,00
GNSS Antena	ANN-MB-00	49	1	49,00
Programmatūras izstrāde		30000	1	30000,00
Kopā				32615,00

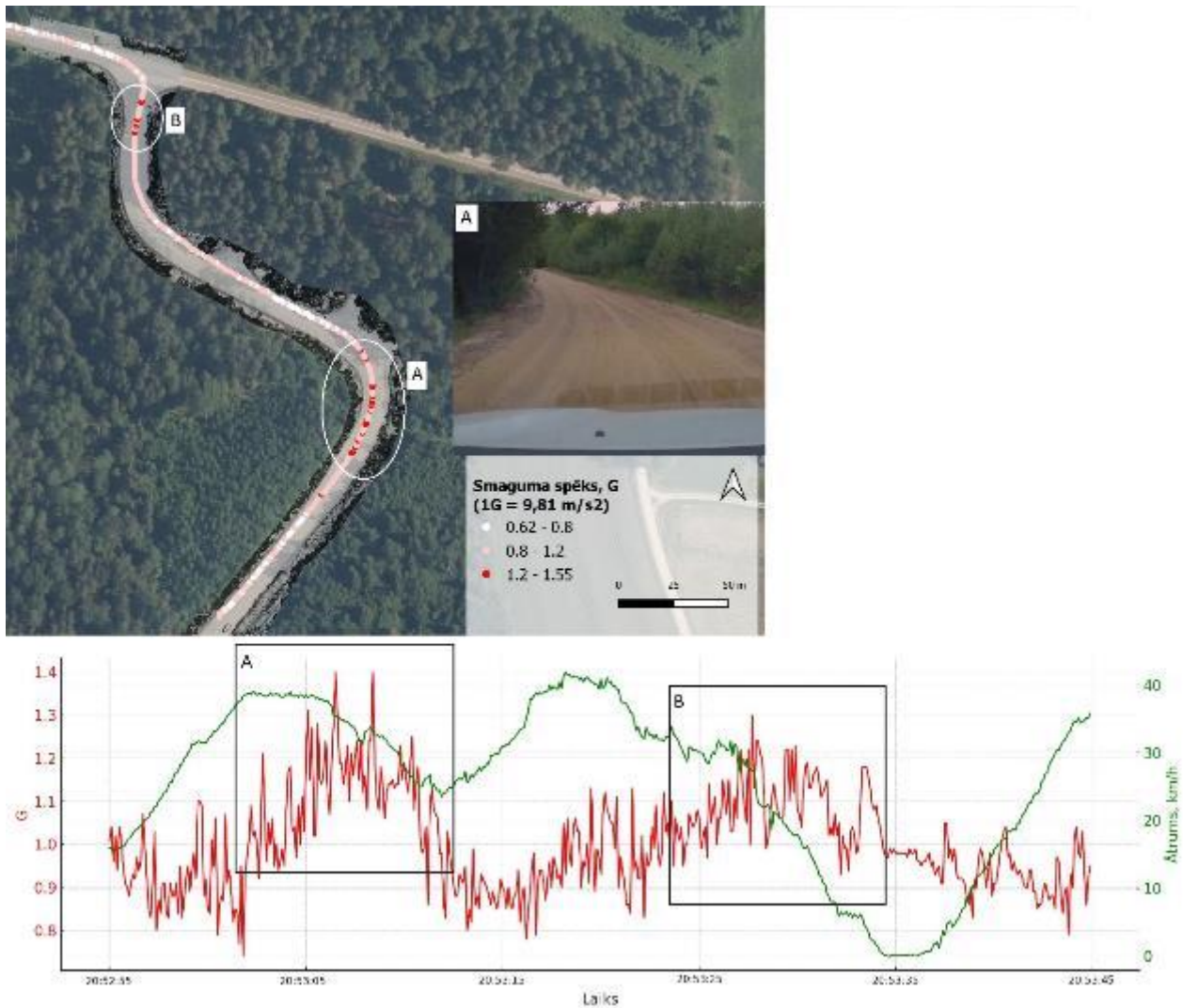
Priekšizpētes rezultāti

Priekšizpētes posmā iegūti dati ceļa bojājumu identificēšanai, izmantojot akselerometru (TDK MPU-9250 ar Arduino NEO-7 GPS uztvērēju). Šis akselerometrs var ierakstīt datus ar 4-1000 Hz frekvenci, bet GPS uztvērējs – ne vairāk kā 10 Hz, attiecīgi, datu blīvumu ierobežo GPS uztvērējs. Faktiski tas nozīmē ātruma ierobežojumu kvalitatīvas, blīvas datu kopas ieguvei. Pētījuma ietvaros veikta akselerometra, kas uzstādīts uz automašīnas aizmugurējā tilta (Att. 3.2), kalibrēšana un noteikta smaguma spēka robežvērtība (1,5 G) tādu ceļa bojājumu kā atsevišķas bedres un ceļa šķērsviļņi (*trepe*) identificēšanai.

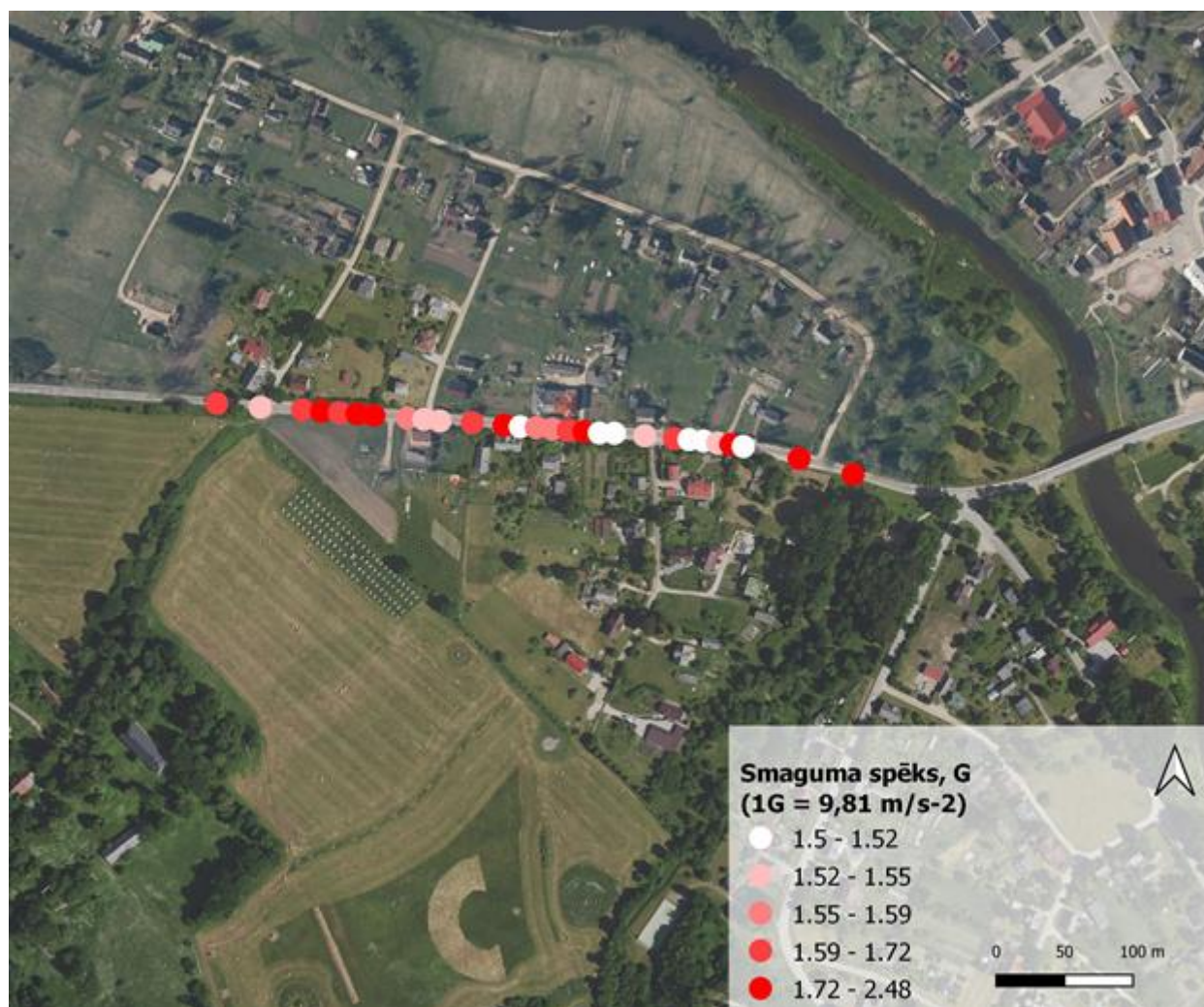


Att. 3.2. Akselerometrs uzstādīts uz auto šķērsviras

Tāpat, iegūti dati no auto video reģistratora, lai novērtētu to potenciālo izmantošanu fotogrammetrijā, kā arī iegūti attēli, izmantojot bezpilota lidaparātu, lai novērtētu fotogrammetrijas metodes potenciālu ne tikai ceļa šķēršprofila informācijas iegūšanai, kā to darīja NIBIO, bet arī bedru un citu bojājumu identificēšanai, izmantojot bezpilota automašīnu vai automašīnu. Šajā posmā noteikts akselerometra fona smaguma spēka robežvērtības koeficients (1,2 G), kas izmantots iekārtas kalibrēšanai. Iekārtas vadības sistēma veidota tā, ka, sasniedzot šo vērtību, GPS uztvērējs veic ierakstu, uzkrājot datus tikai par tiem ceļa posmiem, kur smaguma spēks pārsniedz fona līmeni (Att. 3.3 un Att. 3.4).



Att. 3.3. Akselerometra izmantošanas piemērs sliktu meža ceļa apstākļu identificēšanai. Ar sarkaniem punktiem atzīmētas akselerometra smaguma spēka vērtības virs 1,2 G



Att. 3.4. Ar akselerometru iegūto datu piemērs, kurā identificēts bruģa ceļa segums, kas ietekmē smaguma spēku līdzīgi ceļa šķērsvīļņiem

Izmantojot bezpilota lidaparātu, iegūti attēli fotogrammetriskā punktu mākoņa un virsmas modeļa izveidei vietās, kur, izmantojot akselerometra datus, identificētas bedres uz ceļa. Iegūstot digitālo virsmas modeli ar 10 cm horizontālo izšķirtspēju, secināts, ka, izmantojot šo metodi, bedru identificēšana nav vizuāli iespējama (Att. 3.5), jo modeļa izšķirtspēja nav pietiekoša, kas atbilst arī par *RoadSens* izstrādātāju grupas izdarītajiem secinājumiem (Hoseini, Gobakken, u.c., 2024). Virsmas modelis, kas iegūts ar LiDAR vai fotogrammetrijas metodi, izmantojams lielāku ceļa bojājumu, piemēram, risu vai izskalojumu identificēšanai.



Att. 3.5. Akselerometra dati un ceļa digitālais virsmas modelis

3.2. Secinājumi un priekšlikumi

Atbilstoši priekšizpētes rezultātiem secināts, ka ekonomiski un tehniski efektīvākais risinājums vienkāršotai sliktu ceļa apstākļu (šķērsviļņu un bedru) identificēšanai ir akselerometra dati, kas iegūti ar GPS piesaisti. Lai identificētu bedru un citu bojājumu dimensijas, fotogrammetrijas metode nav piemērota, jo ir atkarīga no vides apstākļiem un prasa daudz datorresursu datu apstrādes etapā, tāpēc turpmākajos pētījuma etapos jāveic izmēģinājumi ar viena punkta lāzersensoru ceļa bojājumu identificēšanai un to dimensiju raksturošanai. Šīs metodes izmantošana var būt lētāka un mazāk atkarīga no vides apstākļiem nekā stereo kameras un fotogrammetrijas metodes izmantošana bedru, risu un izskalojumu identificēšanai un raksturošanai.

Datorredzes metodes ir piemērotākais risinājums ceļa zīmju un citu objektu identificēšanai video vai fotogrāfijās, tāpēc turpmākajos pētījuma etapos jātestē kāds no citu pētnieku aprakstītajiem datorredzes modeļiem, izmantojot ar video reģistratoru vai stereo kameru iegūtus video vai attēlus. Stereo kameras izmantošana izmēģinājumos ļautu salīdzināt vairāku viena punkta lāzersensoru datu apstrādes un vienkāršotas (kamera automašīnas salonā) fotogrammetrijas metodes ceļa deformāciju raksturošanai, kā arī ļautu iegūt punktu mākoņus digitālā virsmas modeļa izveidei, lai identificētu un raksturotu ceļmalas krautuvju un grāvju profilu dimensijas. Fotogrammetrijas metodes krautuvju un citu ceļmalas elementu raksturošanai jāvērtē kopā ar datorredzes modeļiem, izmantojot video reģistratoru, kas var izrādīties būtiski lētāks un tehniski vienkāršāks risinājums.

Ņemot vērā nepieciešamību pēc plaši un ērti pielietojama risinājuma, kas uzstādāms uz smagā transporta, nodrošinot pastāvīgu datu ieguvu bez papildus izmaksām, efektīvākais risinājums

ir iekārta, kurā apvienots akselerometru pāris (pa vienam uz katras viena tilta ass), vairāki viena stara lāzersensori, kā arī stereo kamera vai video reģistrators un GNSS uztvērējs apvienojumā ar datorredzes modeļiem, kas palīdz identificēt ceļa zīmes, krautuves un citus ceļa infrastruktūras elementus. Lai samazinātu uzkrājamo datu apjomu, ir jāizstrādā risinājumi ieraksta (datu saglabāšanas) ieslēgšanai un izslēgšanai, piemēram, smaguma spēka robežvērtības, kā tas šobrīd jau realizēts sistēmā, kas izmanto akselerometru ceļa deformāciju identificēšanai (robežvērtība 1,2 G) vai telpisko datu slānis ar ceļa zīmju un krautuvju izvietojumu.

Turpmākajos pētījuma etapos ir jāizveido pilotiekārta datu ievākšanai, kurā integrēti dažādi mērīšanas risinājumi, jāizstrādā programmatūra datu uzkrāšanai un apstrādei un jāizvēlas paraugteritorijas, kurās ievākt lauka datus, fiksējot ceļa bojājumus – bedru un šķērsviļņu posmu dziļumu un garumu, kā arī šo bojājumu un ceļazīmju un biomasas krautuvju fotoattēlus datorredzes modeļu apmācībai. Ceļa zīmju un biomasas krautuvju automātiskai atpazīšanai video reģistratora datus izmantosim YOLOv5 vai YOLOv8 datorredzes modeli, kas ir plašāk izmantotais risinājums līdzīgu uzdevumu veikšanai. Ceļa deformāciju atpazīšanai izmantosim akselerometrus un viena punkta lāzersensorus, kā arī datorredzes modeļus, kas izmanto zemas izšķirtspējas video no auto video reģistratora.

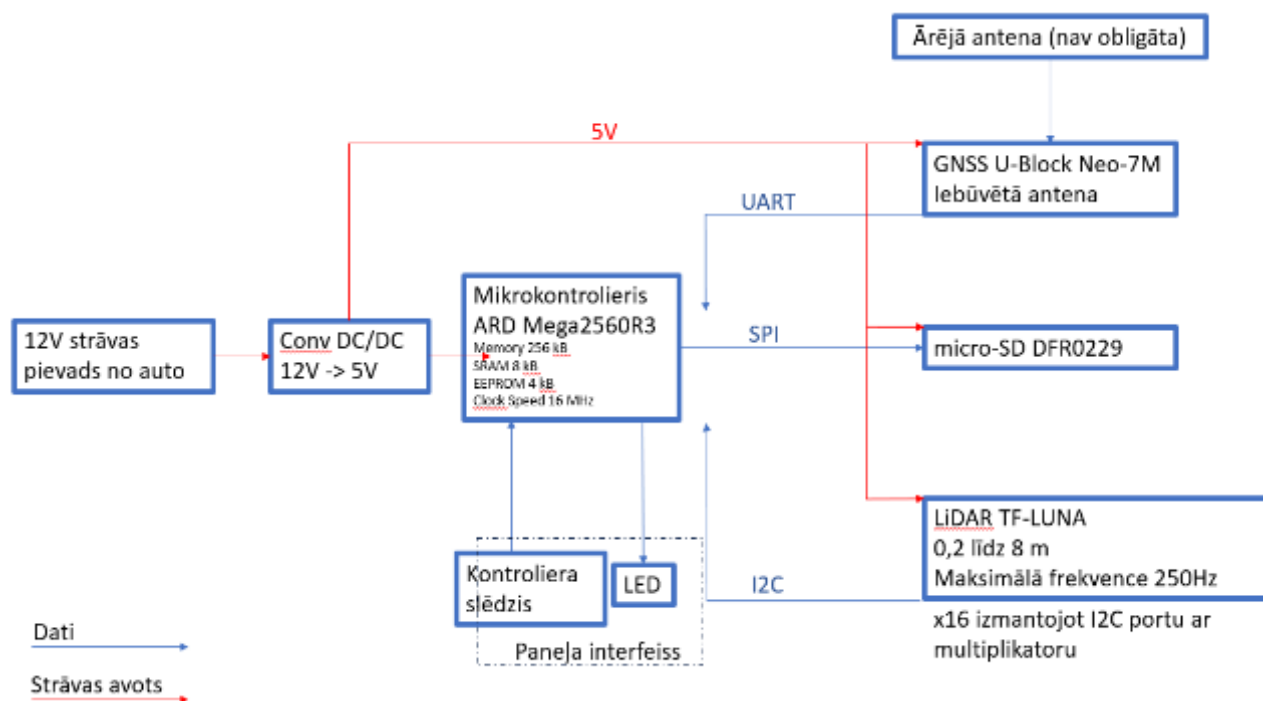
3.3. Priekšlikumi pētījuma īstenošanai 2025. gadā

Pētījuma priekšizpētes posms noslēdzies 2024. gada 30. augustā, identificējot tehniskās iespējas dažādu ceļa defektu identificēšanai. Pamatojoties uz priekšizpētē iegūtiem rezultātiem 2025. gadā nepieciešams turpināt izmēģinājumus ar identificētajiem risinājumiem. Pirmais solis ir pilotiekārtas izveidošana ceļa deformāciju, ceļa zīmju un krautuvju atpazīšanai un identificēšanai. Otrs solis ir šīs iekārtas testēšana modelētos un reālos apstākļos atbilstoši priekšizpētes etapā izstrādātajiem priekšlikumiem.

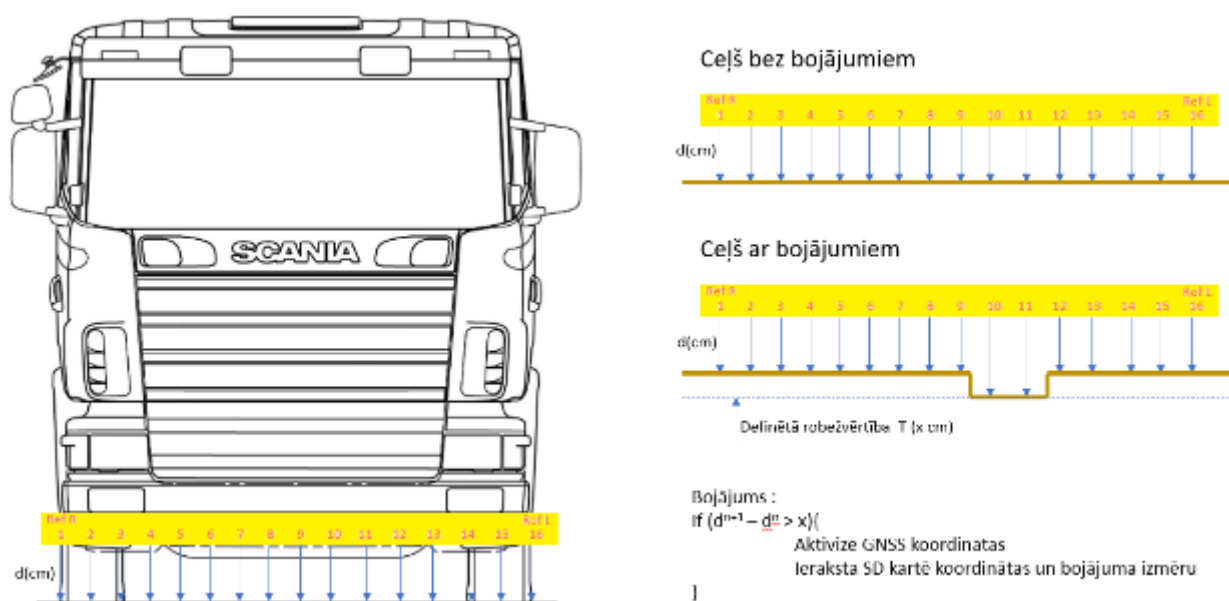
Kamerālie darbi 2025. gadā ietver pilotiekārtas izveidi reāla laika ceļa deformāciju identificēšanai, izmantojot viena punkta lāzersensorus, akselerometru pāri un video reģistratoru. Lauka darbi 2025. gadā ietver šīs sistēmas un to veidojošo komponentu savienojamības un sistēmas funkcionalitātes testēšanu lauka apstākļos modelētā vidē (mākslīgi veidoti šķēršļi ar noteiktām dimensijām) un ražošanas apstākļos (uz meža ceļiem).

Risinājums akselerometra datu izmantošanai izstrādāts jau 2024. gadā, tāpēc 2025. gadā galvenā uzmanība pievēršama viena punkta lāzersensoru sistēmas izveidei un testēšanai. Šādas sistēmas shematiskais raksturojums dots Att. 3.6. Galvenie elementi tajā ir GNSS uztvērējs un 16 stara lāzersensoru bloks (Att. 3.7), kas raksturos brauktuves virsmu tajā posmā, ko šķērso automašīna.

Šai sistēmai plānojam pievienot arī divus akselerometrus, kuru izmantošanas iespējas aprakstītas iepriekš. Tāpat, šim pašam strāvas avotam pievienojams video reģistrators, kura datu apstrāde veicama atsevišķi, jo prasa būtiski vairāk datorresursu, bet nākotnē visas sistēmas var apvienot. Iekārta izmantos transportlīdzekļa 12V barošanas avotu, kas pārveidots uz 5V spriegumu. Galvenais sistēmas komponents ir Arduino Mega 2560 mikrokontrolieris, kas pārvalda sensoru datu apstrādi un saziņu ar pārējām ierīcēm. Sistēma izmantos GNSS moduli U-Blox Neo-7M atrašanās vietas noteikšanai, kam var pieslēgt arī ārējo antenu labākai signāla uztveršanai. Datu glabāšanai izmantots microSD kartes modulis. Ceļa virsmas nelīdzenumu mērīšanai izmantosim TF-LUNA viena stara LiDAR sensorus. Sensori mēra attālumu līdz ceļa virsmai diapazonā no 0,2 līdz 8 m ar maksimālo frekvenci 250 Hz. Sistēma atbalsta līdz 16 sensoru pieslēgšanu, izmantojot I2C multiplikatoru. Sistēmā iekļausim vadības interfeisu ar slēdzi un LED indikatoru, kas parāda sistēmas darbības statusu. Sistēma ievāks un reģistrēs datus par ceļa stāvokli, apvienojot LiDAR sensoru un akselerometra mērījumus ar ģeogrāfisko piesaisti tālākai analīzei.



Att. 3.6. Iekārtas, kura izmanto lāzersensorus ceļa bojājumu identificēšanai, shematisks attēlojums



Att. 3.7. Lāzersensoru izvietojums un bojājumu identificēšanas darbības princips

2025. gada pavasarī plānota arī sadarbība ar NIBIO, Latvijas apstākļos testējot *Roadsens* iekārtu. Izmēģinājumus plānots veikt 2025. gada pavasarī pēc sniega nokuššanas, uzstādot to uz vieglās automašīnas, kā to dara arī NIBIO. Datu ieguve plānota viena mēneša laikā, paralēli kopīgi pilnveidojot datorredzes modeli, ko izmanto *Roadsens*, lai nodrošinātu ceļa zīmju atpazīšanas funkciju.

Literatūra

1. LVMI Silava. (2022). *Etapa ziņojums par pētījumu programmas Tehnoloģijas meža apsaimniekošanas procesu efektivitātes paaugstināšanai darba uzdevumu izpildi 2022. gadā*.
2. R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
3. Bochinski E, Eiselein V, Sikora T. 2017. High-speed tracking-by-detection without using image information. In: *2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)* [Internet]. Lecce, Italy: IEEE; [accessed 2022 Dec 8]. p. 1–6.
4. Barriera M, Pouget S, Lebental B, Van Rompu J. 2020. *In situ pavement monitoring: a review*. *Infrastruct.* 5(2):18. doi: 10.3390/infrastructures5020018.
5. Cao MT, Tran QV, Nguyen NM, Chang KT. 2020. Survey on performance of deep learning models for detecting road damages using multiple dashcam image resources. *Adv Eng Inform.* 46:101182. doi: 10.1016/j.aei.2020.101182.
6. Ali L, Alnajjar F, Parambil MMA, Younes MI, Abdelhalim ZI, Aljassmi H. 2022. Development of YOLOv5-based real-time smart monitoring system for increasing lab safety awareness in educational institutions. *Sensors.* 22(22):8820. doi: 10.3390/s22228820.
7. Hoseini, M., Puliti, S., Hoffmann, S., & Astrup, R. (2023). Pothole detection in the woods: a deep learning approach for forest road surface monitoring with dashcams. *International Journal of Forest Engineering*, 35(2), 303–312. <https://doi.org/10.1080/14942119.2023.2290795>
8. Hoseini M., Gobakken H.R., Hoffmann S., Horvath C., Rahlf, J., Bjerketvedt, J., Puliti S., Astrup, R., *Roadsens: An Integrated Near-Field Sensor Solution for 3d Forest Road Monitoring*. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4895956>
9. N. David, C. Mallet, T. Pons, A. Chauve, F. Bretar, Pathway detection and geometrical description from als data in forested mountaneous area, in: *Laserscanning*, 2009.
10. Picchio R, Proto AR, Civitarese V, Di Marzio N, Latterini F. 2019. Recent contributions of some fields of the electronics in development of forest operations technologies. *Electron.* 8(12):1465. doi: 10.3390/electronics8121465.
11. M. Šušnjar, Z. Pandur, H. Nevečerel, K. Lepoglavec, M. Bačić, Development of a new method for assessing condition of forest road surface, *Gradevinar* 71 (2019) 1121–1128.
12. Starke M, Geiger C. 2022. Machine vision based waterlogged area detection for gravel road condition monitoring. *Int J For Eng.* 33(3):243–249. doi: 10.1080/14942119.2022.2064654.
13. Heidari MJ, Najafi A, Borges JG. 2022. Forest roads damage detection based on deep learning algorithms. *Scand J Forest Res.* 37(5–8):366–375. doi: 10.1080/02827581.2022.2147213.
14. Du Y, Song Y, Yang B, Zhao Y. 2022. *StrongSORT: make DeepSORT great again* [Tiešsaistē, skatīts 2024. gada 20. jūlijā]. doi: 10.48550/ARXIV.2202.13514.
15. Puliti S, Astrup R. 2022. Automatic detection of snow breakage at single tree level using

YOLOv5 applied to UAV imagery. *Int J App Earth Obser And Geoinfor*. 112:102946. doi: 10.1016/j.jag.2022.102946.

Pievesto objektu datu kopsavilkums

Krautuves ID	Sugu sastāvs	Uzmērītais apjoms krautuvē, ber. m³	Nosvērtais apjoms pievešanas procesā, t	Kravu skaits, gab.
LVM_AC_SK00365	4CS3E2B1A	382,6	204,2	41
LVM_AC_SK00367	5P3E1B1M	173,7	100,4	18
LVM_AC_SK00368	9P1E	157,9	108,2	17
LVM_AC_SK00369	9P1E	172,8	85,8	18
LVM_AC_SK00370	4E3M2B1A	98,3	71,5	13
LVM_AC_SK00372	6P2E2B	286,1	164,1	24
LVM_AC_SK00373	8P1B1E	251,1	159,7	26
LVM_AC_SK00374	6P3E1B	342,3	232,6	32
LVM_AC_SK00375	8P2E	284,7	182,0	27
LVM_AC_SK00376	6P2B2E	49,7	31,9	5
LVM_AC_SK00377	6P2E1B1A	213,2	159,2	25
LVM_AC_SK00378	9P1E	513,7	261,6	39
LVM_AR_SK00275	9P1E	535,4	279,5	54
LVM_BS_SK00230	9P1E	653,0	153,2	24
LVM_IM_SK00242	5P 3B 1A 1M	189,0	20,8	6
LVM_JE_SK00393	4E3P2A1B	93,0	48,1	9
LVM_JE_SK00394	4P4E2B	57,0	52,6	8
LVM_JE_SK00395	9E1B	327,0	162,2	29
LVM_JE_SK00396	9P1E	115,0	29,1	7
LVM_JE_SK00397	4B3E3A	482,0	334,5	63
LVM_JE_SK00398	4P3E2B	185,0	66,5	11
LVM_JE_SK00399	5E3B1P	134,5	62,8	12
LVM_JE_SK00400	10E	87,0	66,5	10
LVM_JE_SK00401	6E4P	109,0	76,3	14
LVM_JE_SK00402	9P1E	418,0	88,6	21
LVM_JE_SK00403	8P2E	58,0	22,6	5
LVM_JE_SK00430	6E3B1P	84,3	59,8	10
LVM_JE_SK00431	8P1E1B	315,6	157,8	32
LVM_JE_SK00454	4E 3P 3B	171,6	152,7	25
LVM_JE_SK00455	8P1E1B	297,6	147,5	25
LVM_JE_SK00456	3P 2A 2E 2B 1L	181,5	139,5	19

Tehnoloģijas meža apsaimniekošanas procesu efektivitātes paaugstināšanai

Krautuves ID	Sugu sastāvs	Uzmērītais apjoms krautuvē, ber. m ³	Nosvērtais apjoms pievešanas procesā, t	Kravu skaits, gab.
LVM_JE_SK00457	7P 1E 1A 1B	163,6	108,1	17
LVM_JE_SK00459	8P2E	91,9	52,2	11
LVM_JE_SK00464	3P 3B 3Ba 1E	170,6	67,6	15
LVM_JE_SK00465	8P 2E	172,4	114,9	20
LVM_JE_SK00466	9P 1E	104,2	86,2	14
LVM_JE_SK00467	8P 1B 1E	50,9	25,9	4
LVM_JE_SK00468	8P 2E	111,3	70,0	12
LVM_JE_SK00469	8P 2E	186,6	106,3	19
LVM_JE_SK00470	6P 3E 1B	199,0	88,8	18
LVM_JE_SK00472	5E 4B 1M	75,0	0,6	1
LVM_JE_SK00473	8P 2E 1B	94,6	51,6	10
LVM_JE_SK00474	5P 3E 2B	138,1	144,3	26
LVM_JE_SK00475	6E 2B 1P 1M	57,6	51,3	9
LVM_JE_SK00476	9P 1E	125,8	102,8	16
LVM_JE_SK00477	7E 2B 1M	137,1	93,3	16
LVM_JE_SK00479	10P	50,7	17,5	4
LVM_JH_SK00073	8E1B1P	357,0	707,4	121
LVM_JH_SK00127	6P3E1B	74,0	5,6	4
LVM_JH_SK00146	5E4B1P	124,0	43,6	11
LVM_JH_SK00147	8P2E	59,0	18,1	6
LVM_JH_SK00148	4E2B2A1M1P	87,0	44,1	7
LVM_JH_SK00149	6E2B1P1ML	62,0	21,6	5
LVM_JH_SK00150	4E4B1ML1P	31,0	8,2	4
LVM_JH_SK00151	6B4E	155,0	53,3	14
LVM_JH_SK00152	4E3B2M1A	349,0	240,2	47
LVM_JH_SK00156	4CS4P2E	24,0	13,2	4
LVM_JH_SK00157	5E3CS1A1P	62,0	16,6	5
LVM_JJ_SK00206	5E 4P 1B	233,4	177,1	29
LVM_JN_SK00111	7P2E1B	606,0	144,1	29
LVM_KG_SK00084	9P 1E	22,1	16,4	5
LVM_KG_SK00085	7P 2E 1B	23,9	14,1	4
LVM_KG_SK00086	7E 1B 1P	150,5	99,2	23
LVM_KG_SK00087	7B 2E 1P	47,5	26,0	5

Tehnoloģijas meža apsaimniekošanas procesu efektivitātes paaugstināšanai

Krautuves ID	Sugu sastāvs	Uzmērītais apjoms krautuvē, ber. m ³	Nosvērtais apjoms pievešanas procesā, t	Kravu skaits, gab.
LVM_KG_SK00088	8P 2E	212,3	134,8	21
LVM_KG_SK00089	7P 3E	199,7	102,6	20
LVM_KG_SK00090	10E	60,1	65,1	11
LVM_KJ_SK00070	6B1 2A 2B	49,0	170,3	26
LVM_KJ_SK00075	3B 3B1 3P	5,0	24,0	5
LVM_KJ_SK00077	10P	18,0	23,0	6
LVM_KJ_SK00078	9P 1B	81,0	179,5	35
LVM_KJ_SK00087	5P3E2B	195,0	121,2	26
LVM_KJ_SK00093	10Ba	88,3	48,7	9
LVM_KJ_SK00094	10Ba	61,8	45,0	9
LVM_KJ_SK00095	10B1	27,1	29,9	5
LVM_KJ_SK00096	10Ba	83,9	83,3	16
LVM_MD_SK00004	6E 2Ba 2B 1A	47,0	20,7	6
LVM_MD_SK00008	7A 2Ba 1E	25,5	68,1	14
LVM_MD_SK00019	8P2E	1790,7	1029,7	162
LVM_MD_SK00022	5P3A2E	54,7	20,2	4
LVM_MD_SK00025	5P3E2B	226,1	0,9	3
LVM_ME_SK00016	7A 2B1 1B 1M	940,1	364,0	61
LVM_ME_SK00018	7M 1E 1B 1A	154,8	8,2	3
LVM_ME_SK00019	10A	582,7	152,2	27
LVM_ME_SK00023	4A3B2E1M	356,0	182,4	42
LVM_R_SK00170	7P 2B 1E	120,0	0,0	0
LVM_R_SK00171	5A 3E 1B	207,0	324,6	58
LVM_V_SK00400	8E2CS	115,7	32,0	5
LVM_V_SK00401	8E2CS	133,5	96,3	14
LVM_V_SK00402	8E1CS1B	53,3	38,4	7
LVM_V_SK00403	4B2E1M1A1OZ1L	139,2	115,2	18
LVM_V_SK00404	4P3E2A1B	162,6	119,2	18