



PĒTĪJUMA PĀRSKATS

PĒTĪJUMA
NOSAUKUMS:

Veco mežu loma klimata pārmaiņu mazināšanā:
informācija Latvijas un Eiropas Savienības meža un
saistīto nozaru politiku veidotājiem

IZPILDES LAIKS:

19.04.2024.–05.12.2024.

IZPILDĪTĀJS:

Latvijas Valsts mežzinātnes institūts “Silava”

PĒTĪJUMA VADĪTĀJS:

Laura Ķēniņa, LVMI “Silava” pētniece

Salaspils, 2024

Kopsavilkums

Zinātniskais pētījums: **Veco mežu loma klimata pārmaiņu mazināšanā: informācija Latvijas un Eiropas Savienības meža un saistīto nozaru politikai veidotājiem**

Izpildes laiks: 19.04.2024.–05.12.2024.

Izpildītājs: Latvijas Valsts mežzinātnes institūts "Silava"

Pētījuma zinātniskais vadītājs: Laura Ķēniņa

Projekts Nr. 24-00-SOINZ03-000032

Pētījuma mērķis – Sagatavot un nodot informāciju par senajiem mežiem un vecām mežaudzēm ES Bioloģiskās daudzveidības stratēģijas (2030) prasību kontekstā Latvijas lēmumu pieņēmējiem un ieinteresētajām pusēm.

Pētījuma uzdevumi:

- 1) Informācijas sagatavošana un nodošana Latvijas lēmumu pieņēmējiem un ieinteresētajām pusēm.
- 2) Informācijas sniegšana Eiropas Komisijai, balstoties uz starptautisko sadarbību ar meža nozares pārstāvjiem un pētnieciskajiem institūtiem.
- 3) Parauglaukumu ierīkošana un datu ieguve.
- 4) Attālās izpētes datu analīze.

Meža politikas veidotājiem ir būtiski iegūt zinātniski pamatotu informāciju par veco mežaudžu un veco mežu attīstības dinamiku, gan nacionālo, gan ES un politiku izstrādes kontekstā. Pieņemot lēmumus par zemes lietošanai nosakāmiem mērķiem, būtiski balstīties uz verificētu zinātnisku informāciju. Palielinoties zemes platībām bez saimnieciskās darbības, pieaug arī vecu mežu teritorija, un ir nozīmīgi apzināt šīs tendences ilgtermiņā.

Projekta secinājumi Latvijas un ES meža politikas veidotājiem balstīti uz empīriskiem datiem, attālo izpēti, kā arī realizēto starptautisko (īpaši Ziemeļeiropas) zinātnisko sadarbību, turpinot un paplašinot Meža attīstības fonda (MAF) projektu un Lauksaimniecībā izmantojamo zinātnes pētījumus: 21-00-SOMF10-000019, 22-00-SOMF10-000045, un 23-00-SOINZ03-000004).

Bioloģiskās daudzveidības stratēģijas 2030 kontekstā sagatavots priekšlikums par vecu mežu indikatoru zinātniski pamatotu izvēli atbilstoši Latvijas hemiborealo mežu ekosistēmu raksturojumam. Pētījumā iegūtās zinātniskās atziņas sniegtas gan Latvijas lēmumu pieņēmējiem meža nozares interešu grupām, gan Eiropas Komisijai, kā arī Eiropas meža nozares ekspertiem.

Saturs

1. Informācijas sniegšana Latvijas lēmumu pieņēmējiem un sabiedrībai.....	4
1.1. Starptautiskā konference	4
1.2. Seminārs lēmumu pieņēmējiem	6
1.3. Eiropas Klimata Pakta vēstnieka pasākumi	7
2. Informācijas sniegšana Eiropas Komisijai.....	7
3. Datu ievākšana un analīze.....	8
3.1. Parauglaukumu ierīkošana	8
3.2. Attālās izpētes datu analīze	12
Secinājumi.....	25
Izmantotā literatūra	26

1. Informācijas sniegšana Latvijas lēmumu pieņēmējiem un sabiedrībai

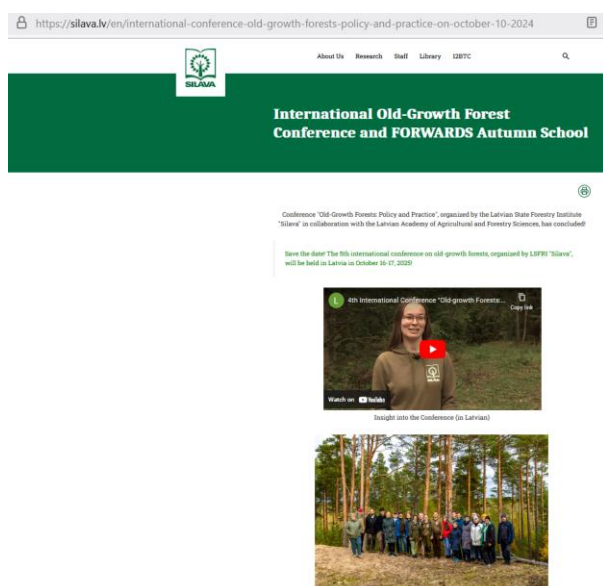
Pētījuma mērķis “sagatavot un nodot informāciju par senajiem mežiem un vecām mežaudzēm ES Bioloģiskas daudzveidības stratēģijas (2030) prasību kontekstā Latvijas lēmumu pieņēmējiem un ieinteresētajām pusēm.” tika sasniegts, gan organizējot zinātnisku konferenci un semināru, gan sadarbojoties ar Eiropas zinātniskajām institūcijām, analizējot jaunākas publikācijas par veciem mežiem Eiropā, kā arī ievācot empīrisko materiālu (lauka darbi Latvijas mežos) un veicot veco mežu analīzi ar attālās izpētes metodēm.

Projekta ietvaros tika organizēti šādi informatīvi pasākumi: seminārs LR ministriju ekspertiem (30.10.2024.), starptautiska konference (10.-11.10.2024.), kā arī nodrošināta dalība ar datu un atziņu sniegšanu Eiropas Komisijas organizētā vebinārā (attālināti, 05.03.2024.), Dabas aizsardzības pārvaldes organizētā seminārā (04.12.2024.), Latvijas mežu sertifikācijas padomes 9. starptautiskajā konferencē (05.12.2024.), un SNS projekta PROFOR seminārā (10.12.2024.) Briselē. Papildus informācija tika sniegta IUFRO kongresā (25.06.2024.).

1.1. Ceturtā starptautiska konference Ziemeļvalstu un Baltijas valstu meža nozares ekspertiem “Old-growth forests: policy and practice”

Kā projekta centrālais pasākums Ziemeļvalstu un Baltijas valstu meža nozares ekspertiem tika organizēta starptautiska konference “Old-growth forests: policy and practice” jeb “Veci meži: politikas un prakse” (Šķēde, 10.-11.10.2024.), pulcējot 70 dalībniekus (gan zinātnieki, gan ministriju pārstāvji, gan starptautisku projektu dalībnieki). Konference aptvēra gandrīz visus Eiropas reģionus, pārstāvēt 15 valstis.

Informācija par konferences norisi publicēta LVMI Silava mājas lapā: <https://silava.lv/en/international-conference-old-growth-forests-policy-and-practice-on-october-10-2024>



Avots: LVMI “Silava”

1. att. Informācija LVMI “Silava” mājas lapā



INTERNATIONAL CONFERENCE
Old-growth forests: policy and practice

October 10-11, 2024

10:00 am – 17:30 pm (EEST); 9:00 am – 16:30 pm (CET), hybrid

Co-organized by Latvian State Forest Research Institute Silava (Latvia)
and Horizon Europe project FORWARDS

AGENDA



October 10

- 10:00 (EEST) Coffee
- 10:15 Welcome and opening
(10 min) *Jurgis Jansons, Director, Latvian State Forest Research Institute Silava, Latvia*
- 10:25 Welcome remarks from William S. Keeton
(5 min) *Head of IUFRO working group on old-growth forests (USA)*
- Establishment of maximum biomass stock capacity of *Pinus sylvestris* forests at the level of global ecological zones
- 10:30 (30 min) *Juan Alberto Molina-Valero, Postdoctoral researcher, Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences Prague (Czech Republic)*
- Monitoring and assessment of old-growth forest biodiversity in Poland: case study of the Białowieża Forest
- 11:00 (30 min) *Maciej Lisiewicz, Assistant Professor, Department of Geomatics, Forest Research Institute (Poland)*
- Protection, Management, and Monitoring of Old-Growth Forests: Insights from the Nature Conservation Agency
- 11:30 (30 min) *Gita Strode, Director of Department of Nature Conservation, Nature Conservation Agency (Latvia)*

Avots: LVMI “Silava”

2. att. Starptautiskās konferences dienas kārtība (1.lapa)

Zinātniskā diskusija starptautiskās konferences ietvaros aptvēra jautājumu loku, kas attiecas gan uz vecu mežu identificēšanu, monitoringu, gan grūtībām saistībā ar veco mežu definīcijas noteikšanu, ņemot vērā to, ka vienlaicīgi pastāv vairākas pieejas veco mežu un veco mežaudžu definēšanā. Ņemot vērā to, ka vecu mežu definīcija un attiecīgie iespējamie indikatori tiek diskutēti Briselē, ES līmenī, metodikas piemēri ir nozīmīgi turpmākajā darbā pie indikatoru izstrādes katras ES valsts nacionālā līmenī.

Eiropas līmenī veco mežu monitorings aizvien ir fragmentārs un prasa papildus ieguldījumu, lai būtu pieejama pilnīga informācijā par Eiropas mežiem, kas ir vecāki par 100 gadiem. Tāpat indikatori un kritēriju vecu mežu noteikšana nav vienoti. Tiek izmantoti vairāki atšķirīgi indikatori. Visbiežāk sastopamais indikators ir mežaudzes vecums, tomēr ar šo indikatoru ir grūti pilnvērtīgi raksturot mežaudzi, tāpēc tiek izmantoti vairāki papildus

indikatori, kā, piem., atmirusī koksne, audzes struktūra koku sugu sastāvs. Retāk kā indikatori tiek noteiktas: vietējās koku sugas augsne, mikrodzīvotnes, indikatorsugas, kultūras vērtības.



3. att. Starptautiskās konferences dalībnieki mežā

1.2. Seminārs lēmumu pieņēmējiem

“Veco mežu loma klimata pārmaiņu mazināšanā: informācijā Latvijas un ES meža un saistīto nozaru politikas veidotājiem” Latvijas meža politikas veidotāji semināra laikā (Rīga, ZM, 30.10.2024.) tika informēti par zinātnieku jaunākajām atziņām saistībā ar senu mežu, vecu mežaudžu un veco mežu attīstības dinamiku un lomu dažādu ES un nacionālo politiku kontekstā. Tostarp, tika prezentēti attālās izpētes datu analīzes rezultāti un veco mežu pirmie kartēšanas rezultāti.

Papildus pētījuma rezultāti tika prezentēti meža nozares interešu grupām, tostarp nevalstiskajām vides organizācijām 04.12.2024. Dabas aizsardzības pārvaldes organizētajā seminārā “Aktualitātes dabas aizsardzībā”, prezentācija “Senie meži un to aizsardzība” Ā.Jansons, LVMI Silava.

Bez tam, pētījuma rezultāti tika prezentēti IUFRO kongresā, kurā prezentēts stenda referāts “What is and what is not an old-growth forest ? A case study from hemiboreal Latvia” Zute D., Ellison D., Ķēniņa L., Bāders E. (Stokholma, 25.06.2024.), kā arī Latvijas mežu sertifikācijas padomes 9. starptautiskā konferencē (05.12.2024.), sagatavots stenda referāts “What is and what is not an old-growth forest ? A case study from hemiboreal Latvia” Zute D., Ellison D., Ķēniņa L., Bāders E.

Pētījuma ietvaros iegūtie secinājumi publicēti žurnālā “Baltijas Koks”, raksts ”Kāpēc pētām senos mežus?” Ā.Jansons (LVMI Silava), 2024.gada novembra izdevums, 42.-44.lpp.

1.3. Eiropas Klimata Pakta vēstnieka pasākumi

Projekta ietvaros tika paredzēta Eiropas Klimata Pakta vēstnieka iniciatīvu integrēšana un saskaņošana ar projekta mērķi, lielāku uzmanību veltot mežu ekosistēmu, tostarp senu mežu, jautājumiem. LVMI “Silava” pētniece D. Zute apstiprināta Latvijas Eiropas Klimata Pakta vēstnieka statusā kopš 2021. gada, un regulāri piedalās sabiedrības informēšanas pasākumos attiecībā uz klimata pārmaiņām un meža ekosistēmām. Aktuālākās informācijas nodošana lēmumu pieņēmējiem un sabiedrībai nacionālā mērogā veikta, t.sk. ar dalību Eiropas Klimata Pakta vēstnieka iniciatīvā. LVMI “Silava” piedalījās pasākumā “Klimata darbnīca jauniešiem” Jūrmalā (16.05.2024.) un LBTU diskusijā ar studentiem MVF studentiem (22.11.2024.) Jelgavā.



4. att. Eiropas Klimata Pakta vēstniece D. Zute ar LBTU MVF studentiem

2. Informācijas sniegšana Eiropas Komisijai

Šis pētījuma uzdevums paredz starptautiskā sadarbībā ar meža nozares pārstāvjiem un pētnieciskajiem institūtiem nosūtīt informāciju Eiropas Komisijai.

LVMI Silava dalība divos pasākumos. Pirmkārt, dalība Eiropas Komisijas organizētā vebinārā “Mapping, monitoring and protecting primary and old-growth forests “ (5.03.2024., attālināti) ar prezentāciju “Mapping methodologies in Latvia: Primary and Old-Growth Forest Mapping: Methodologies and Progress” Ā.Jansons LVMI Silava, un dalība panelīdiskusijā (D.Zute LVMI Silva)

Otrkārt, dalība SNS sadarbības tīkla PROFOR projekta seminārā “Forest Multifunctionality - future oriented sustainable forest management in Europe“ Briselē, 12.10.2024. ar prezentāciju “Beyond one-size-fits-all: a meaningful approach to define old-growth forest indicators – case from Latvia“ L.Ķēniņa LVMI Silva.

Sadarbību un līdzdalību Eiropas Savienības iniciatīvās un projektos, ietverot sadarbību ar ārvalstu zinātniekiem, gan arī valsts pārvaldes ierēdņiem un citu interešu grupu pārstāvjiem. Organizējot projekta centrālo pasākumu – 4.starptautisko konferenci, tika piesaistīti zinātniskie institūti no dažādiem Eiropas reģioniem. LVMI “Silava” ir jau izveidota cieša sadarbība ar Baltijas valstu zinātniskajiem institūtiem, jauni kontakti tika veidoti ar Horizon un LIFE projektu partneriem. Sadarbību apliecina starptautiskas konferences plašā dalība. Konferencē piedalījās zinātnieki un interešu grupu pārstāvji, aptverot gandrīz visus Eiropas reģionus. Izveidotie kontakti ļaus arī turpmāk sadarboties veco mežu izpētes jautājumos, tādējādi nodrošinot plašu šī jautājuma apskatu. Tika izmantoti jau nodibināti kontakti (SNS projekta PROFOR sadarbības tīklu) kā platforma, lai iesaistītu diskusijā Ziemeļvalstu un Baltijas valstu reģiona zinātniekus. SNS sadarbības tīkla projekta PROFOR līdzdalība LVMI “Silava” organizētajā starptautiskajā konferencē .

2023.gadā tika nodibināti kontakti ar trijiem H2020 projektu partneriem: projekts CLIMB-Forests, projekts CLIMB-Forests , projekts INFORMA, un projekta FORWARDS plašāka līdzdalība. 2024.gadā nodibināti jauni kontakti ar Eiropas zinātniskajiem institūtiem veco mežu turpmākai izpētei (t.sk., LUKE (Somija)). Tostarp, sadarbība ar LIFE projektu PROGNOSIS ir nozīmīga, jo šobrīd šis ir vienīgais Eiropas projekts, kas pēta tiešo veco mežu indikatorus (dižskābārdis). LIFE projekta PROGNOSIS partneriem, kuriem ir pieredze vecu mežu zinātniskās izpētes jomā (Prof. K. Vandekerkhove (INBO) u.c.). Lai gan projekts neapskata heiboreālos un boreālos mežus, vērtīgi iepazīties ar metodikas jautājumiem, kas potenciāli varētu būt piemērojami arī Latvijas mežu novērtēšanā (adaptējot vietējiem apstākļiem).

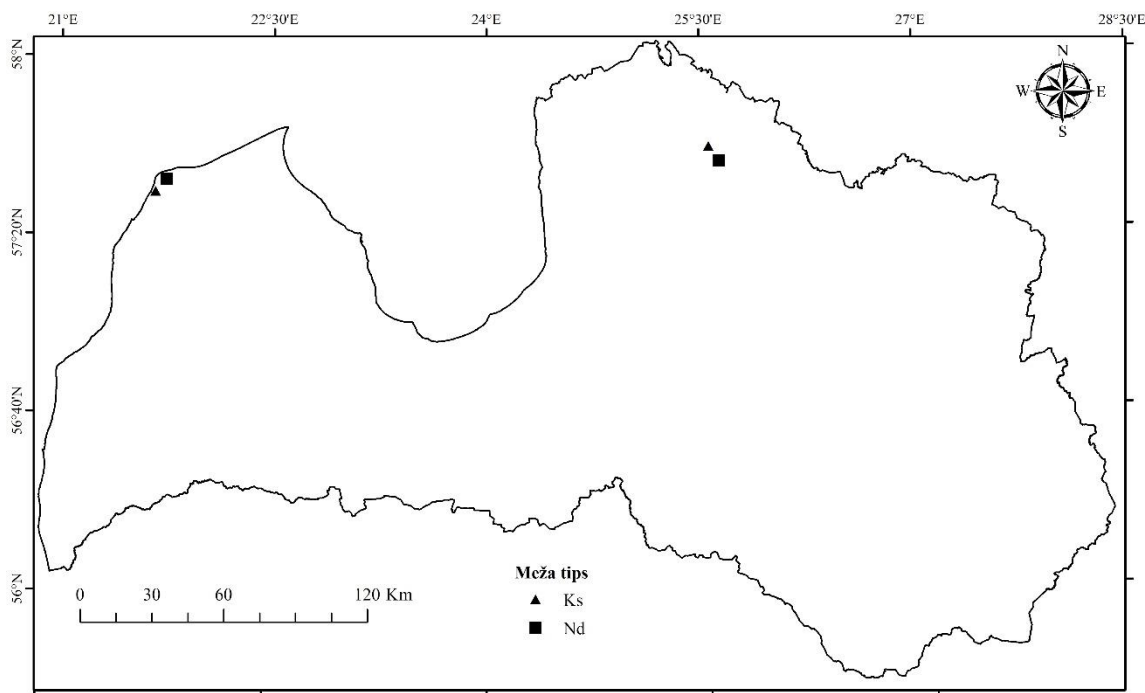
Latvijas zinātniekiem pētījuma ietvaros bija iespēja dalīties ar savām atziņām par veco mežu izpēti starptautiskā arēnā, tostarp uzstājoties 4.starptautiskajā konferencē, LVMI “Silava” prezentēja Latvijā iegūtas jaunākās atziņas vecu mežu izpētē (“Old-growth forests vs. old-growth stands in Latvia” L.Ķēniņa).

3. Datu ievākšana un analīze

Pētījuma ietvaros ierīkoti parauglaukumi papildus empīrisko datu ieguvei ar mērķi pilnīgāk raksturot vecu mežu audzes. Izmantota iepriekš aprobēta metodiku (Ķēniņa 2019). Papildus tradicionālajām empīriskajām datu ieguves metodēm veco mežaudžu identificēšanai un raksturošanai tika izmantoti attālās izpētes dati.

1.1. Parauglaukumu ierīkošana

Lai novērtētu iztrūkstošās vecu mežu datu kopas, tika ierīkoti parauglaukumi bērza audzēs. Parauglaukumi siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju novērtēšanai vecās bērzu audzēs ierīkoti 4 mežaudzēs šaurlapu kūdrēnī (Ks - 2) un niedrājā (Nd - 2), lai raksturotu augsnes kopējās un heterotrofās emisijas un to atšķirības mežaudzēs ar un bez hidrotehniskās meliorācijas (5.att.).



5.att. Pētāmo objektu atrašanās vietas Latvijas teritorijā.
Ks – šaurlapu kūdrēnis; Nd – Niedrājs

Augsnes emisiju mērījumi veikti veģetācijas sezonā, kad gaisa temperatūra ir virs 0°C un zemi neklāj sniega sega (6.att.). Mērījumi uzsākti aprīlī, un pabeigti oktobrī, kopumā 7 atkārtotos mērījumu ciklos ar mēneša intervālu starp tiem. Katrā audzē ierīkoti 3 parauglaukumi, kuros novērtētas augsnes SEG emisijas veģetācijas sezonas ietvaros. Papildus vērtēts un ievākti dati par gruntsūdens līmeni, augsnes temperatūru dažādos dziļumos, nobiru biomasu, veģetācijas projektīvo segumu un koku biomasu un oglekļa uzkrājumu.



6.att. Augsnes elpošanas mērījumu process ierīkotajos parauglaukumos.

Zemsedzes biomasa

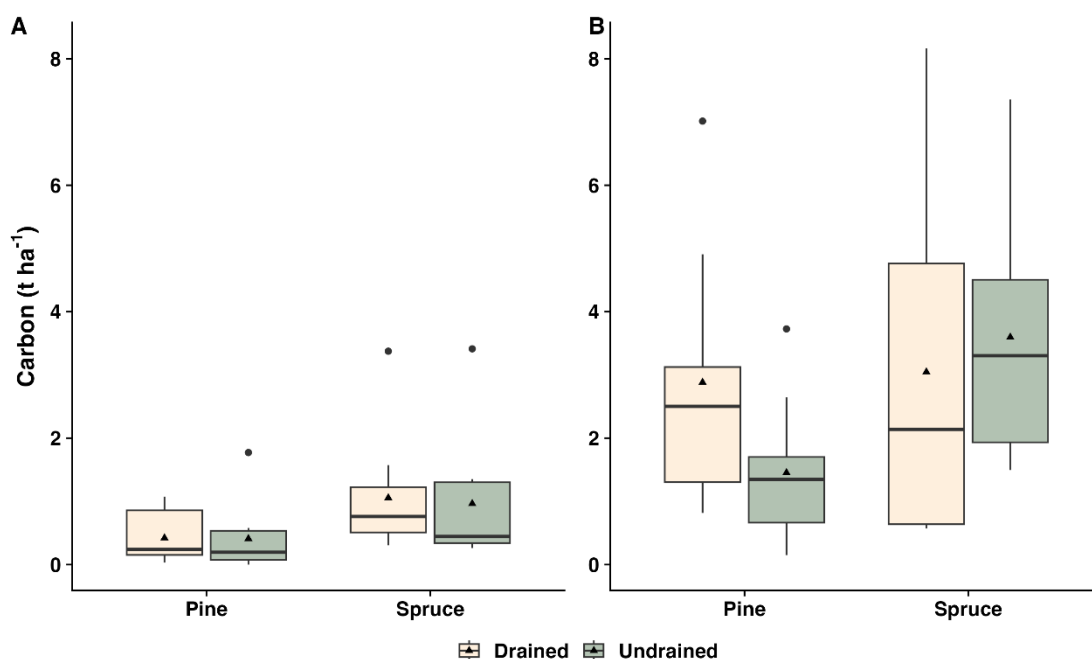
Saskaņā ar pētījuma uzdevumu “Ievākt un analizēt zemesdzes biomasas datus raksturojot šo krātuvju pārmaiņas; analītiskās publikācijas sagatavošana” tika analizēti zemesdzes biomasas dati priežu un egļu audzēs .

Sagatavota publikācija starptautiskam konferenču rakstu krājumam par zemesdzes biomasas novērtējumu vecās skujkoku audzēs ar un bez hidrotehniskās meliorācijas (Samariks et al., 2024). Samariks, V., Jaunslaviete, I., Adamovičs, A., Dubašinska, S., Jansons, Ā. (2024) Ground vegetation biomass and carbon pool in hemiboreal old-growth coniferous stands on organic soils. SGEM Conference Proceedings 2024, submitted.

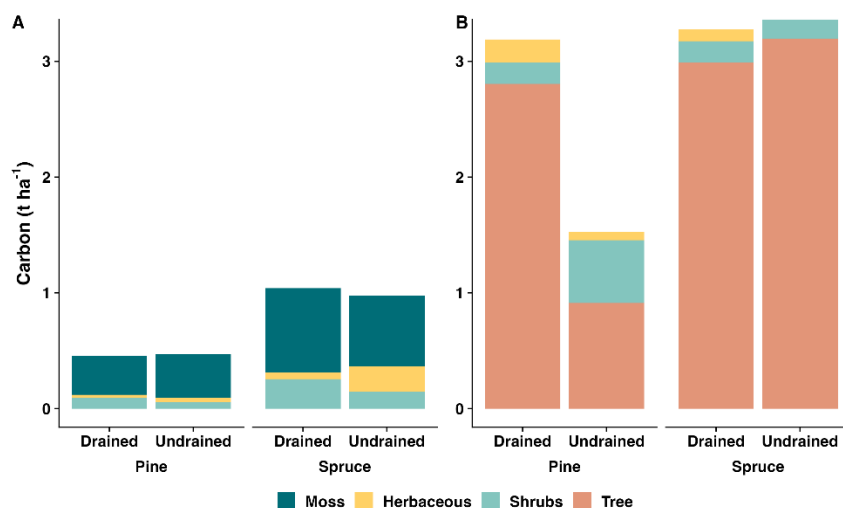
Rezultāti

Priežu audzēs virszemes biomasas oglekļa (C) uzkrājums ir līdzīgs un sastāda 0.42 ± 0.32 t C ha⁻¹ meliorētās un 0.41 ± 0.43 t C ha⁻¹ nemeliorētās audzē, bet pazemes biomasas C uzkrājums ir 2.88 ± 1.52 t C ha⁻¹, meliorētās un 1.45 ± 0.88 t C ha⁻¹ nemeliorētās audzē, turklāt atšķirības ir statistiski būtiskas.

Egļu audzēs virszemes biomasas C uzkrājums sastāda 1.06 ± 0.74 t ha⁻¹ meliorētās un 0.96 ± 0.78 t ha⁻¹ nemeliorētās audzē, bet pazemes biomasas C uzkrājums ir 3.05 ± 2.09 t ha⁻¹ meliorētās un 3.60 ± 1.47 t ha⁻¹ nemeliorētās audzē, turklāt abos gadījumos vidējās vērtības ir līdzīgas.



7.att. Zemesdzes veģetācijas virszemes (A) un pazemes (B) biomasas oglekļa uzkrājums meliorētās un nemeliorētās priedes un egles audzēs. Melnie trijstūri apzīmē vidējās vērtības.



8.att. Zemsedzes veģetācijas virszemes (A) un pazemes (B) biomasas oglekļa uzkrājums dažādās funkcionālās grupās attiecīgajos meža tipos ar dažādām valdošām koku sugām.

Kopsavilkums

Pētījums sniedz jaunu informāciju par zemsedzes veģetācijas biomasas oglekļa uzkrājumu vecos mežos ar kūdras augsnēm ar un bez meliorācijas sistēmām Latvijā. Kopumā zemsedzes veģetācijas virszemes un pazemes biomasas oglekļa uzkrājums neatšķiras starp meliorētām un nemeliorētām audzēm, tomēr tie ir saistīti ar audzes parametriem (īpaši koku augstumu), norādot, ka gaismas pieejamība ir svarīgs faktors. Valdošā koku suga pati par sevi neietekmē zemsedzes veģetācijas biomasas oglekļa uzkrājumu. Lielāko proporciju zemsedzes veģetācijas biomasas pazemes daļā veido koku sakņu biomasas, kas sastāda 87%, 74%, 78% un 79% no kopējās zemsedzes veģetācijas pazemes biomasas meliorētās priedes, egles un nemeliorētās priedes un egles audzēs, attiecīgi.

3.3. Attālās izpētes datu analīze

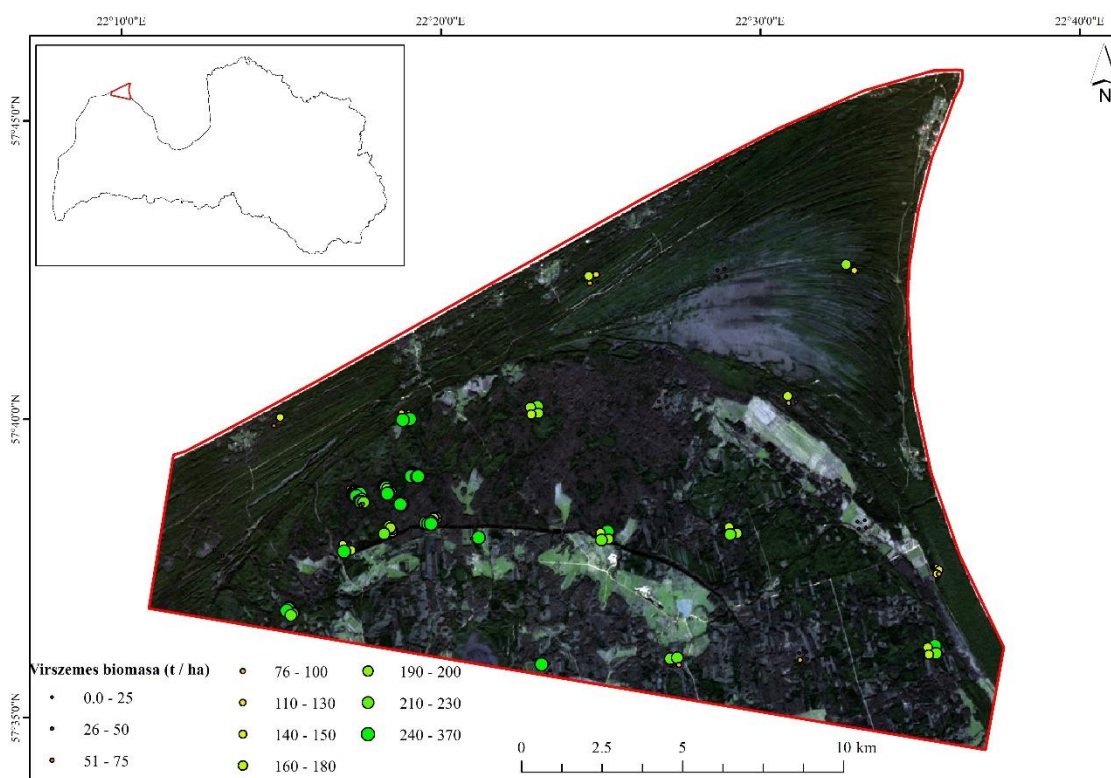
Attālās izpētes datu analīze veikta, lai novērtētu telpiskās struktūras un biomasu vecā mežā. Attālās izpētes metodes ļauj iegūt visaptverošu informāciju, tostarp attiecībā uz veco audžu stāvokli. Virszemes biomasas novērtēšana, kas ir balstīta uz attālās izpētes datiem ir efektīva metode reģionālā mērogā. Citos pētījumos noskaidrojies, ka kombinējot Sentinel 1A SAR datus ar Landsat 8 spektrālajiem datiem var iegūt salīdzinoši augstas precizitātes virszemes biomasas novērtējumu.

Izmantojot parauglaukuma datus no Slīteres dabas rezervāta un Veco audžu parauglaukuma datus iegūti biomasas rādītāji. Paralēli apstrādāti attālās izpētes dati, un balstoties uz attēlu tekstūras iezīmēm, izmantojot Pelēktoņu kopas matricas (GLCM) algoritmu (Grey-level co-occurrence matrix), aprēķinātas dažādas attēlu tekstūras īpašības. Līdzīgi apstrādāti arī Landsat 8 attēli un bez tekstūras īpašībām iegūti arī dažādi veģetācijas indeksi.

Iegūtie tekstūru īpašību attēli, veģetācijas indeksu attēli un parauglaukumu biomasas aprēķini kombinācijā ar dažādiem mašīnmācīšanās algoritmiem (RF un XGBoost) izmantoti, lai prognozētu veco mežu biomasu Slīteres dabas rezervātā.

Pētījuma teritorijas novietojums

Koku biomasas novērtēšanā tālzipētes metodes, tostarp Landsat un SAR (Sintētiskās apertūras radara) datu izmantošana it īpaši pēdējo desmit gadu laikā, kopš pieejami ESA Sentinel 1A SAR, tās kļuvušas par nozīmīgu rīku, kas papildina tradicionālās pieejas, piemēram alometrisko vienādojumu pielietojumu. Tālzipētes metožu pielietojšana var ievērojami atvieglot (zemas izmaksas un īsā laikā) apzināt biomasas apmēru par lielām un grūti pieejamām teritorijām, kā arī sekot līdzi meža biomasas izmaiņām. Pētījuma teritorija izvēlēta Latvijas ziemeļrietumu daļā, Slīteres nacionālā parka teritorijā, Talsu un Ventspils novados; ģeogrāfiskās koordinātas 22°11 – 22°36' A g., 57°34' – 57°45' Z p. (9.att). Virszemes biomasas novērtējums veikts Slīteres dabas rezervāta teritorijai, pamatojoties uz 1922. gada mežaudžu plāna robežām (4. attēls), izvēlētās teritorijas platība ir 488 ha.

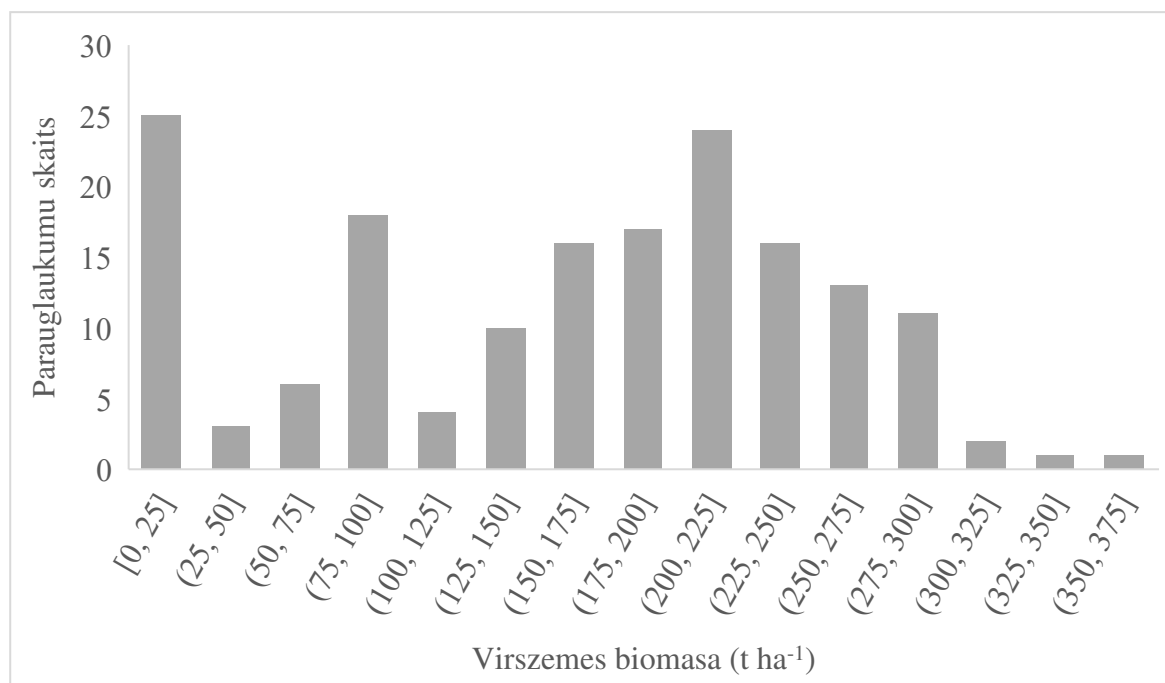


9. att. Pētījumā izmantoto parauglaukumu telpiskais izvietojums

Parauglaukumu dati

Pētījumā izmantoti citos LVMI Silava pētījumos ievākti dati, kopumā 167 aplūveida parauglaukumu ar platību 500 m² (R = 12.62 m). No tiem 88 parauglaukumi ir no Slīteres dabas rezervāta 1969. vējgāzes bojāto audžu 2013 -2015. gada uzmērīšanas (Badars, 2021), 63 parauglaukumu dati ir no Meža resursu monitoringa (MRM) ietvaros veiktās kokaudzes uzmērīšanas (no 2012-2016. gadam), un 16 ir no veco audžu 2014. gada uzmērījumiem. Izvēlēti tikai tie MRM parauglaukumi, kurus veidoja viens zemes seguma veids, piemēram, meža zeme, lauksaimniecības zeme vai izcirtums. Katrā aplūveida parauglaukumā visiem kokiem, kas sasnieguši 6.1 cm caurmēru krūšaugstumā, uzmērīts caurmērs, augstums, bet koki, kuru caurmērs no 2,1 cm līdz 6,0 cm, uzmērīti 1.82 m lielā rādiusā (25 m²). Virszemes biomasas katrā parauglaukumā aprēķināta izmantojot koku caurmēra un augstuma mērījumus atbilstoši

Liepiņa et al., 2017 metodikai un sugas koeficientiem. Kopumā izmantotajos parauglaukumos vidējā biomasa bija 159.55 ± 7.22 (\pm SE) $t\ ha^{-1}$, variēja no 0 līdz $374.63\ t\ ha^{-1}$ (10. att.).



10. att. Virszemes biomasas apjoms ($t\ ha^{-1}$) parauglaukumos

Attālās izpētes dati (satelītattēli) un datu pirmapstrāde

Šajā pētījumā izmantoti brīvpieejas Landsat L8 satelītattēli un sintezētās apertūras radara (SAR) tālīzpētes dati, kas iegūti no Sentinel 1A satelīta, kas ir C joslas SAR ar centrālo frekvenci 5,405 GHz (Tabula 1.). Landsat satelītattēli ar 11 spektra joslām sniedz vērtīgu informāciju par veģetācijas stāvokli, struktūru un izmaiņām, izmantojot spektrālos indeksus, piemēram, NDVI un EVI, vai tekstūras analīzi, izmantojot pelēkā līmeņa līdzības matricas (*Gray Level Co-occurrence Matrix* GLCM) analīzei. Šīs metodes ļauj noteikt veģetācijas blīvumu, veselību un, netieši, arī biomasas sadalījumu plašā teritorijā. SAR attēli papildina Landsat attēlus, nodrošinot informāciju neatkarīgi no apgaismojuma un laikapstākļiem. Radara signāli reaģē uz veģetācijas struktūru un ūdens saturu, tādējādi palīdzot precīzāk noteikt biomasu sarežģītos apstākļos, piemēram, teritorijās, ar biežu mākoņainību. Savukārt, piemērojot SAR attēlus un GLCM analīzi, iespējams atklāt smalkas meža struktūras detaļas, kas palīdz precizēt biomasas prognozes. Apvienojot šīs divas datu kopas iespējams izveidot modeļos, kuros tiktu apvienotas katras metodes priekšrocības.

Pētījumā Sentinel 1A *Level-1 Ground Range Detection* (GRD) izmantoti, kā divu polarizāciju attēli, kā arī GLCM analīzei, tekstūras rādītāju iegūšanai. Lai sagatavotu Sentinel 1A attēlus GLCM analīzei veikta sākotnējā apstrāde izmantojot programmu SNAP (pieejams tiešsaistē: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>), kas ietver radiometrisko korekciju, spekļa samazināšanu ar filtriem, pielietojot *Lee* plankumainības filtru ar izmēru 5×5 un attēlu ģeometrisko korekciju. Sagatavotie dati tiek izmantoti GLCM analīzei, aprēķinot tekstūras rādītājus (piemēram, kontrastu, atšķirīgumu, homogenitāti, entropiju u.c.), kas ļauj izpētīt telpiskās struktūras un raksturīgo modeļu izmaiņas dažādos zemes seguma veidos (Haralick

u.c. 1973). SAR Sentinel 1A attēli sagatavoti 25.24m izšķirtspējā, respektīvi atbilstoši parauglaukuma diametram.

Papildus izmantoti Landsat L8 attēli ar telpisko izšķirtspēju 30 m/pikseli. Šajā gadījumā, lai pielāgotu Landsat L8 attēlus pārējai datu kopai, izmantota tuvākā kaimiņa piešķiršanas metode ar ArcMap rīku *Resample*, Landsat L8 attēla pikseļu izmērs pārveidots uz 25.24 m. Landsat 8 attēli tika iegūti 2014. gada 29. oktobrī. Datu sagatavošanas un apstrādes soļi shematiski ir parādīti 11. attēlā.

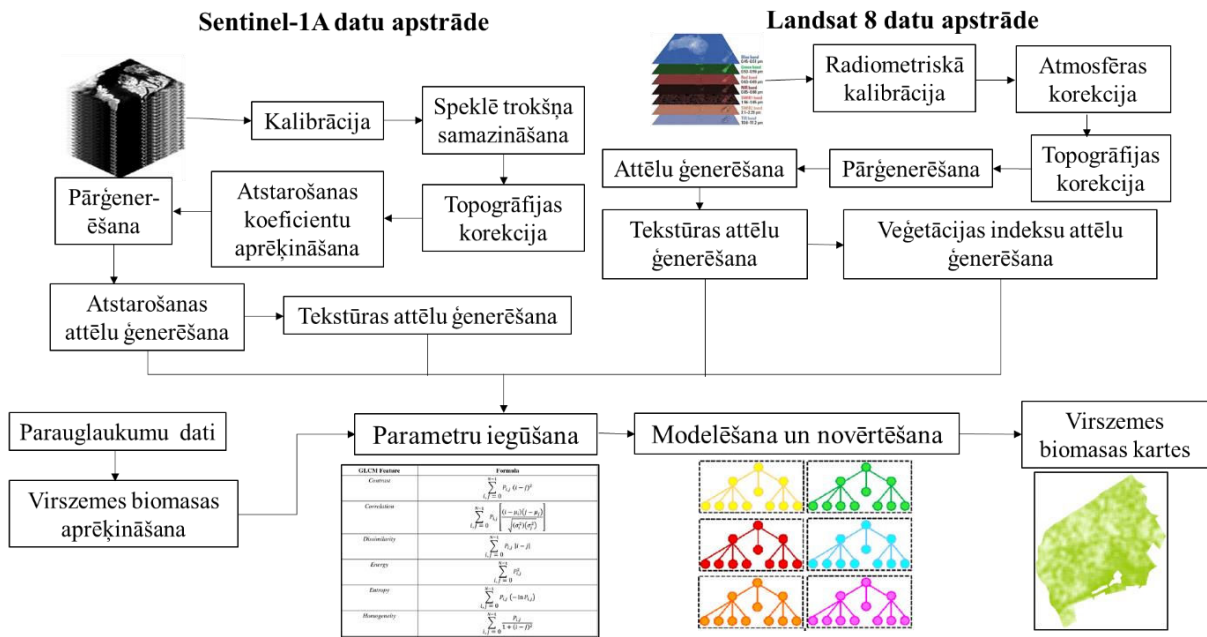
Tabula 1. Šajā pētījumā izmantotie tālzipētes dati.

Tālzipētes dati	Path, Frame/ Row	Uzņemšanas laiks	Maikoņainība (%)	Telpiskā izšķirtspēja (m)	Frekvenču joslas	Pielietojums
Sentinel-1A	T045044	21. oktobris 2014	–	5	C	VH un VV polarizācijas un tekstūras rādītāji
Landsat 8 OLI	P180, R20	29. oktobris 2014	4.13	30	0.43-0.45 μm (krasta, aerosolu josla); 0.45-0.51 μm (zils, B); 0.53-0.59 μm (zaļš, G); 0.64-0.67 μm (sarkans, R); 0.85-0.88 μm (tuvais infrasarkanais, NIR); 1.57-1.65 μm (īso viļņu infrasarkanais, SWIR1); 2.11-2.29 μm (īso viļņu infrasarkanais, SWIR2); 1.36-1.38 μm (dūmakas josla).	Telpiskie un tekstūras rādītāji

Parametru izvilšana no attālās izpētes datiem parauglaukumos

Katram parauglaukuma bija zināmas centra koordinātas, neskatoties uz to, ka attālās izpētes attēla pikseļi tika pielāgoti parauglaukuma diametra izmēram, tomēr parauglaukuma robežas pilnībā nesakrīt ar parauglaukuma izmēru. Lai novērstu vai mazinātu iespējamo neprecizitāti, kas varētu rasties no pikseļu un parauglaukuma centra savstarpējās nobīdes, tika izveidoti 12.62 m rādiusa buferzona ap katra parauglaukuma centru. Izmantojot ArcMap *Spatial analyst* rīku *Extract Multi Values to Points* par katru parauglaukumu iegūtas katra parauglaukuma centra bufera vidējās pikseļu vērtības.

Virszemes biomasas prognozēšanai šādā veidā sagatavoti 73 mainīgie, kas ietvēra Landsat L8 septiņas spektra joslas, septiņus veģetācijas indeksu attēlus, 48 Landsat L8 tekstūras (GLCM) attēlus un 11 Sentinel 1A SAR tekstūras (GLCM) attēlus. Sagatavotie mainīgie dažādās kombinācijās (Tabula 2) izmantoti, kā prognozēšanas mainīgie, lai izveidotu mašīnmācīšanās modeļus.



11. att. Datu sagatavošanas un apstrādes shēma

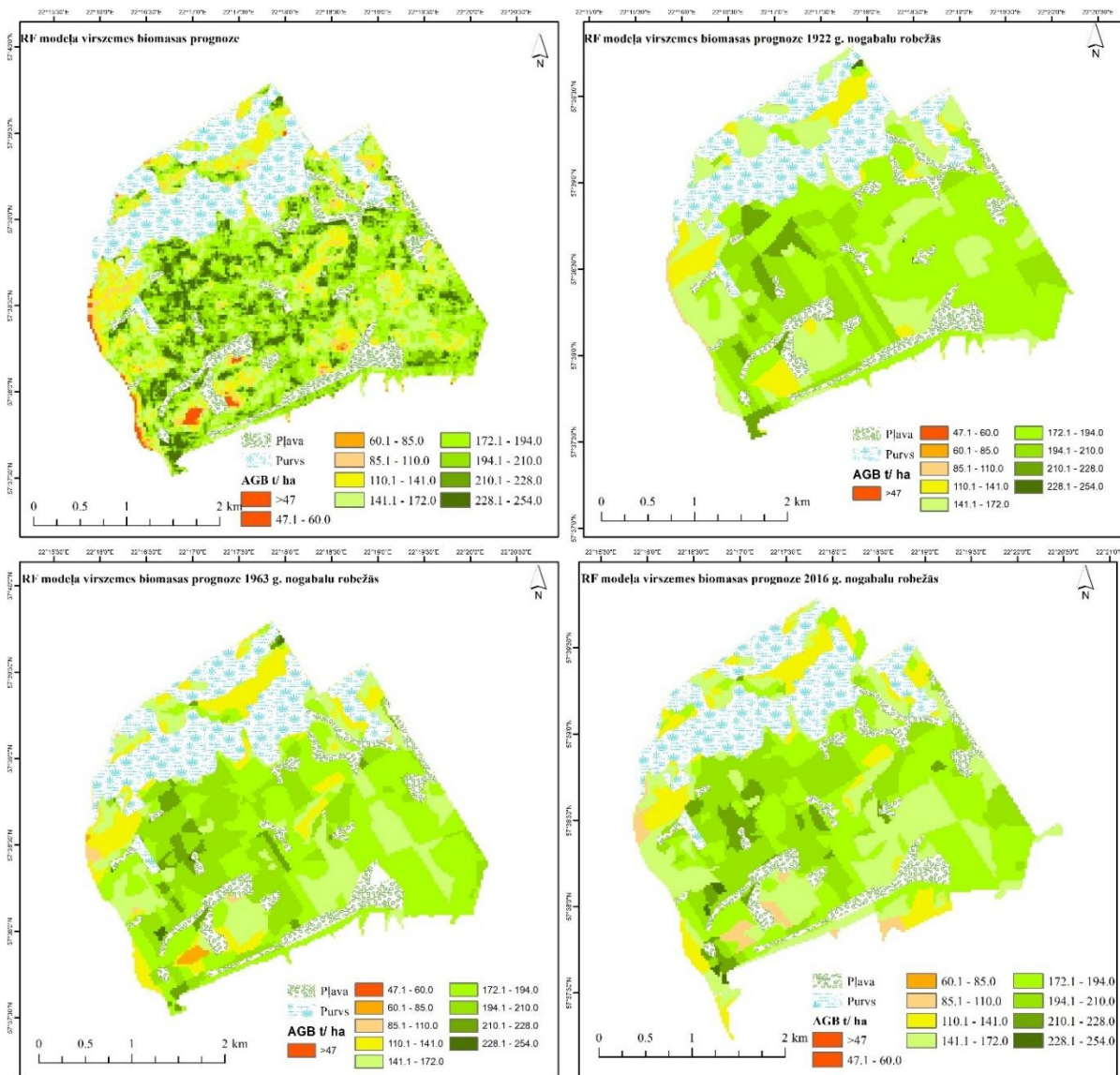
Prognozēšanas modeļa izveide un novērtēšana

Virszemes biomasas prognozēšanā svarīgi izvēlēties piemērotu algoritmu. Līdz šim, lai izveidotu virszemes biomasas novērtēšanas modeļus izmantota samērā vienkārši un viegli aprēķināma lineārās regresijas metode. Tomēr, šo modeļu trūkums ir situācijas, kad ir jāraksturo sarežģītas nelineāras attiecības starp meža biomasas un tālzipētes datiem, tāpēc, lai uzlabotu biomasas modeļu veikspēju, šajā pētījumā izmantota viena no mašīnmācīšanās metodēm nejausie meži (RF), kas iepriekš uzrādījuši labus veikspēju biomasas novērtēšanas modeļu izveidē (Luo et al., 2016). RF algoritms ir plaši izmantots klasifikācijas algoritms, lai izveidotu RF modeli no apmācības datiem nejausi tika izvēlēti 80 % no visiem ierakstiem, bet atlikušā daļa (20 %) no apmācības datu kopas atstājot RF modeļa testēšanai. RF modelis sākotnēji tika izveidots izvēloties noklusējuma vērtības ($Ntree = 100$, $Mtry = auto$, $random_state = 42$). Turpinājumā, lai uzlabotu modeļa veikspēju, tas tika optimizēts, piemeklējot labākās parametru kombinācijas. RF modeļu gadījumā nepieciešams koriģēt tikai divus parametrus ($Ntree$, $Mtry$). Lai atrastu optimālo modeļa parametru kombināciju $Ntree$ vērtību palielinājām līdz 200, 500, saglabājot $Mtry$ noklusējuma vērtību ($auto$), līdz tika atrasta piemērotākā $Ntree$ vērtība. Pēc tam tika piemeklēta optimālā $Mtry$ vērtība izmēģinot dažādus diapazonus (1, 3, 6, 9, sqrt, log2). Mašīnmācīšanās modeļu izstrāde veikta Python 3.8 vidē, izmantojot *sklearn* bibliotēkā pieejamo RF algoritmu (Pedregosa, et al. 2021). Modeļu prognozēšanas veikspēja novērtēta pamatojoties uz determinācijas koeficienta (R^2), vidējās kvadrātiskās kļūdas (RMSE) un procentuālās vidējās kvadrātiskās kļūdas (RMSE %) vērtībām. Modelis ar augstākajiem rādītājiem (augstāks R^2 un zemāks RMSE un RMSE %) norādīja uz labāku veikspēju, tādējādi izvēlēts, lai izveidotu virszemes biomasas rastra (katrs pikselis raksturo biomasas daudzumu tonnās uz 1 ha) karti Slīteres dabas rezervāta teritorijai. Virszemes biomasas apjoms 2016. gada nogabaliem, kartēts izmantojot labāko RF modeli. Šim nolūkam ar ArcMap rīks *Zonal statistics* rīku no RF modeļa prognozētās virszemes biomasas rastra faila, katram nogabalam tika aprēķinātas vidējās pikseļu vērtības. Papildus, lai raksturotu

virszemes biomasas ilgtermiņa izmaiņas, līdzīgā veidā sagatavotas kartes arī ar prognozētajām virszemes biomasas vērtībām 1922. gada un 1963. gada nogabalu robežās (12. att.).

Tabula 2. AGB prognozēšanas modeļu veidošanā izmantotie mainīgie, ieskaitot Landsat L8 spektrus, veģetācijas indeksus, Landsat 8 un Sentinel-1A tekstūru. *Svarīgākie mainīgie noteikti izmantojot sliekšni 0.2.

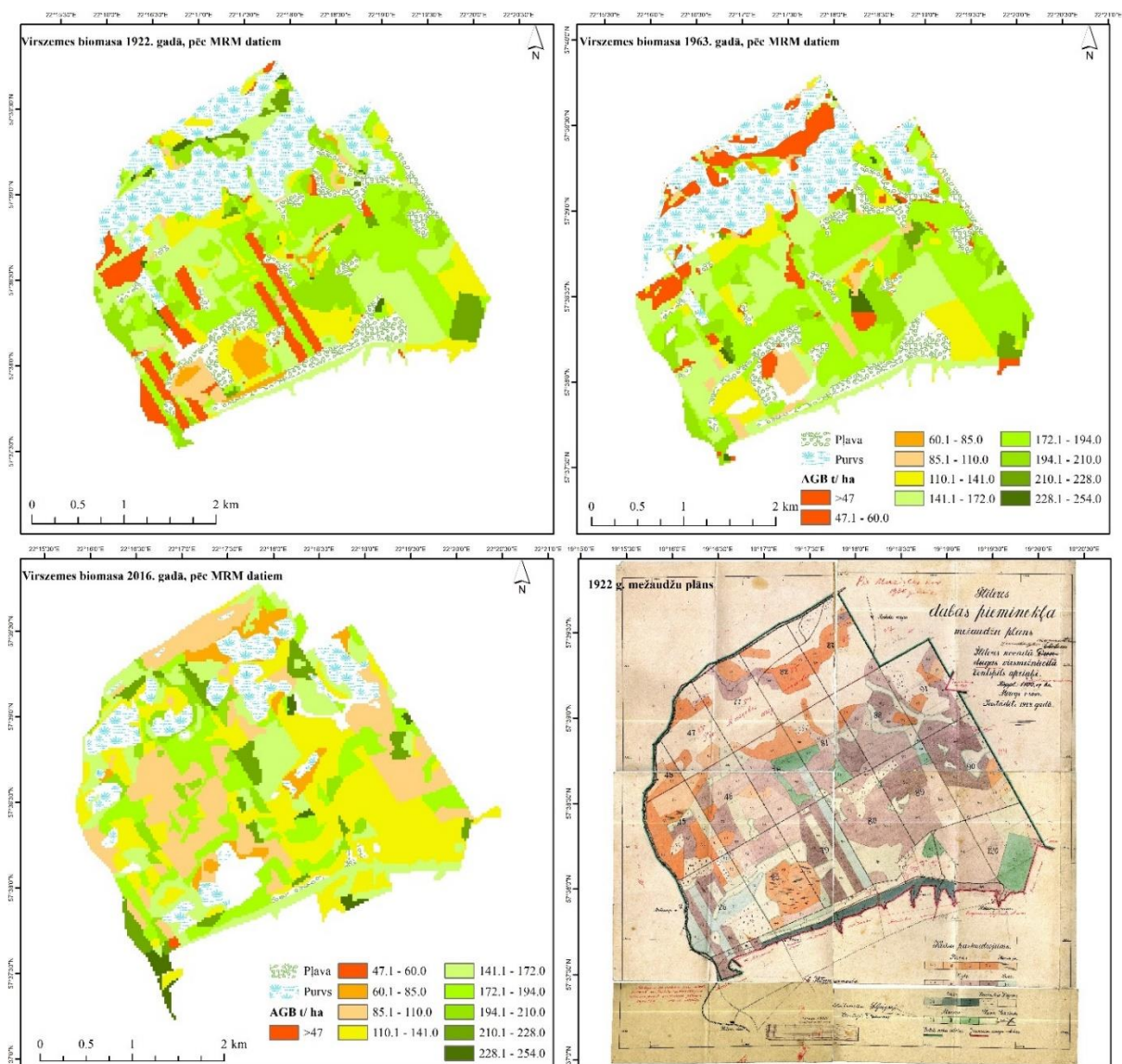
Datu kopa RF modelim	Mainīgā nosaukums
Visi mainīgie	NDVI, SAVI, DVI, RVI, ARVI, MTVI, RARSc, B2_con, B2_dis, B2_ent, B2_hom, B2_mea, B2_mom, B2_var, B3_con, B3_dis, B3_ent, B3_hom, B3_mea, B3_mom, B3_var, B6_con, B6_cor, B6_dis, B6_ent, B6_hom, B6_mea, B6_mom, B6_var, B7_con, B7_cor, B7_dis, B7_ent, B7_hom, B7_mean, B7_mom, B7_var, NIR_con, NIR_cor, NIR_dis, NIR_ent, NIR_hom, NIR_mea, NIR_mom, NIR_var, RED_con, RED_dis, RED_ent, RED_hom, RED_mea, RED_mom, RED_var, L8_B1, L8_B2, L8_B3, L8_B4, L8_B5, L8_B6, L8_B7, ST_VH_Con, ST_VH_Cor, ST_VH_Dis, ST_VH_Ene, ST_VH_Ent, ST_VH_Hom, ST_VH_Mea, ST_VH_Mom, ST_VH_Var, ST_VH, ST_VV, B2_cor, B3_cor, RED_cor
Svarīgākie mainīgie*	NDVI, RVI, ARVI, MTVI, B2_ent, B2_hom, B2_mea, B3_mea, B3_var, B6_con, B6_cor, B6_hom, B6_mea, B7_con, B7_cor, NIR_cor, NIR_ent, NIR_var, RED_ent, RED_hom, RED_mea, L8_B1, L8_B3, L8_B4, L8_B7, ST_VH_Con, ST_VH_Cor, ST_VH_Dis, ST_VH_Ent, ST_VH_Hom, ST_VH_Var, ST_VH, ST_VV, B2_cor
Landsat L8 GLCM	B2_con, B2_dis, B2_ent, B2_hom, B2_mea, B2_mom, B2_var, B3_con, B3_dis, B3_ent, B3_hom, B3_mea, B3_mom, B2_cor, B3_cor, RED_cor, B3_var, B6_con, B6_cor, B6_dis, B6_ent, B6_hom, B6_mea, B6_mom, B6_var, B7_con, B7_cor, B7_dis, B7_ent, B7_hom, B7_mean, B7_mom, B7_var, NIR_con, NIR_cor, NIR_dis, NIR_ent, NIR_hom, NIR_mea, NIR_mom, NIR_var, RED_con, RED_dis, RED_ent, RED_hom, RED_mea, RED_mom, RED_var
Sentinel 1A SAR GLCM	ST_VH_Con, ST_VH_Cor, ST_VH_Dis, ST_VH_Ene, ST_VH_Ent, ST_VH_Hom, ST_VH_Mea, ST_VH_Mom, ST_VH_Var, ST_VH, ST_VV
Landsat L8 veģetācijas indeksi	NDVI, SAVI, DVI, RVI, ARVI, MTVI, RARSc
Landsat L8 veģetācijas indeksi un atsevišķi spektri, un Sentinel 1A SAR GLCM	NDVI, SAVI, DVI, RVI, ARVI, MTVI, RARSc, L8_B1, L8_B2, L8_B3, L8_B4, L8_B5, L8_B6, L8_B7, ST_VH_Con, ST_VH_Cor, ST_VH_Dis, ST_VH_Ene, ST_VH_Ent, ST_VH_Hom, ST_VH_Mea, ST_VH_Mom, ST_VH_Var, ST_VH, ST_VV



12. att. Virszemes biomasas kartēšana Slīteres dabas rezervāta teritorijā pēc RF modeļa datiem

Virszemes biomasas raksturošana vēsturiskajos kartogrāfiskajos materiālos

Lai raksturotu veco audžu virszemes biomasas izmaiņas ar attālās izpētes metodēm, veikta virszemes biomasas kartēšana Slīteres dabas rezervāta teritorijai, izvēloties trīs novērojuma periodus: 1922. gads, 1963. gads un 2016. gads. Šādas teritorijas un laika perioda izvēle, pamatojuma galvenokārt uz vēsturisko kartogrāfisko materiālu pieejamību un kvalitāti. Slīteres dabas rezervāts ir īpaši piemērota veco audžu raksturošanai, jo tā ir viena no vismazāk ietekmētajām dabas teritorijām Latvijā, kas izceļas ar lielu strukturālo un bioloģisko daudzveidību. Turklāt, senākā pieejamā informācija par meža resursiem Slīteres dabas rezervātā ir pieejama jau no 1922 gada (13.att. Mežaudžu plāns). Virszemes biomasas kartēšana 1922. gadam veikta, apvienojot pieejamo vēsturisko informācija par dominējošajām sugām un vecuma grupām, kam pievienoti aktuālie meža tipi no Valsts meža dienesta (VMD) 2024. gada datubāzes. Potenciālās virszemes biomasas apjoms 1922. gadam, iegūts, kā no MRM datubāzes, katram nogabalam atkarībā no tā valdošās sugas, piederības vecuma grupai un meža tipam, piešķirot vidējo vērtību. Līdzīgā veidā izveidotas kartes par virszemes biomasas apjomu 1963. un 2016. gadam (13.att.).



13. att. Virszemes biomasas kartēšana Slīteres dabas rezervāta teritorijā pēc MRM datiem

Rezultāti

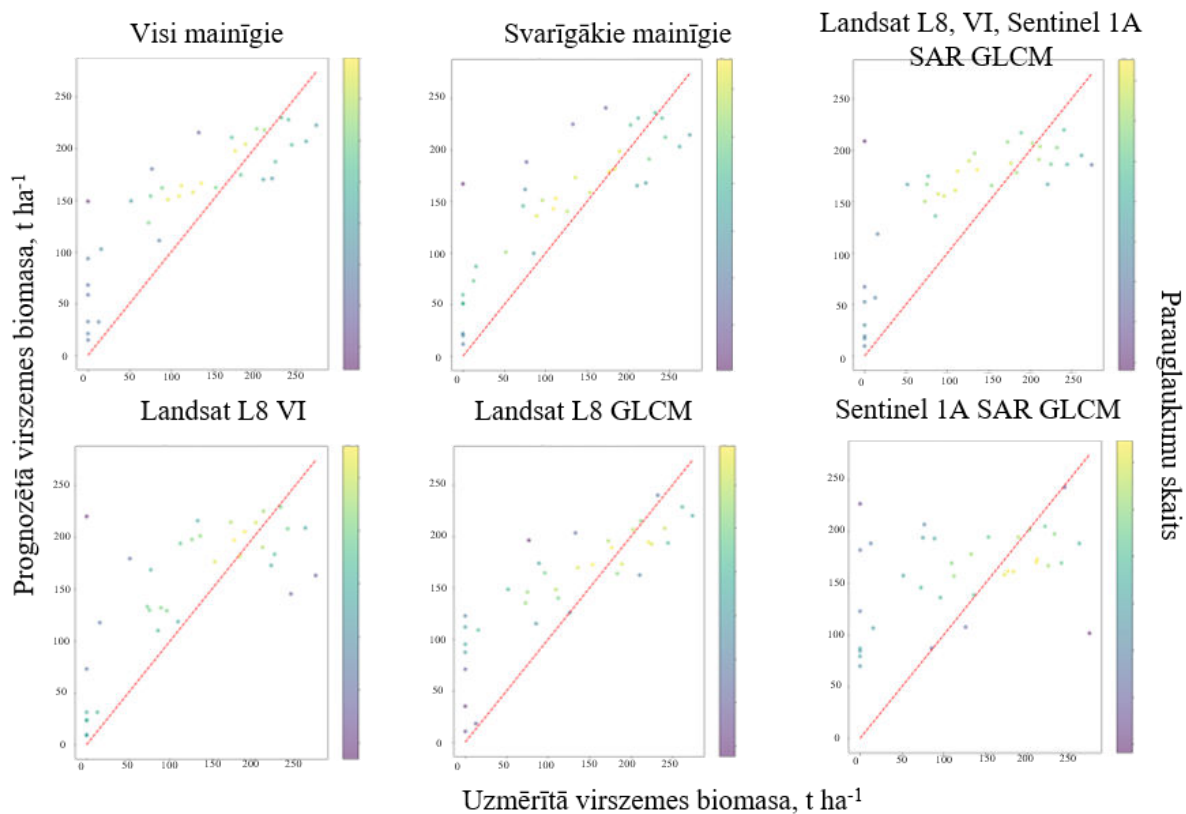
RF modeļu veikspējas novērtējums

Virszemes biomasas raksturošanai ar attālās izpētes metodēm kopumā tika izveidoti 6 RF modeļi, izmantojot dažādas mainīgo kombinācijas (Tabula 2). Mūsu rezultāti parādīja, ka labākais RF modelis bija veidots no datu kopas, kas sastāvēja no svarīgākajiem mainīgajiem, uz to norāda visaugstākā determinācijas koeficienta R^2 vērtība (0.65) un viszemākās RMSE ($52,89 \text{ t ha}^{-1}$) un RMSE% (43.35) vērtības. Virszemes biomasas prognozēšana tikai ar Sentinel 1A SAR RF modelim sagādāja lielas grūtības R^2 (0.004) un viszemāko RMSE ($88,68 \text{ t ha}^{-1}$). RF modeļa prognozēšanas veikspēja pētītajai teritorijai parādīta ar izkliedes diagrammām, kas parāda prognozēto virszemes biomasas vērtību saistību ar parauglaukumos uzmērītajām. (14. att.). Attēlos redzams, ka visiem izveidotajiem modeļiem bija tendence virszemes biomasas vērtības pārvērtēt un nenovērtēt, proti, modelis virszemes biomasas prognozēja augstāk pie

zemākajām uzmērītajām vērtībām (<30 t ha⁻¹), bet zemāk, ja biomasas vērtība bija augstāka (>210 t ha⁻¹), kas nozīmē, ka modeļi pārvērtē zemākās vērtības un nepietiekami novērtē augstākās vērtības, piemēram, redzams, ka prognozētā maksimālā vērtība labākajam modelim bija 237.50 t ha⁻¹, bet minimālā prognozētā vērtība 10.73 t ha⁻¹, savukārt uzmērīto virszemes biomasas vērtības bija robežās no 0 līdz gandrīz 300 t ha⁻¹.

Tabula 3. Kļūdu mērījumi RF modeļiem, izmantojot Landsat L8, Sentinel-1A un apvienoto datu kopu.

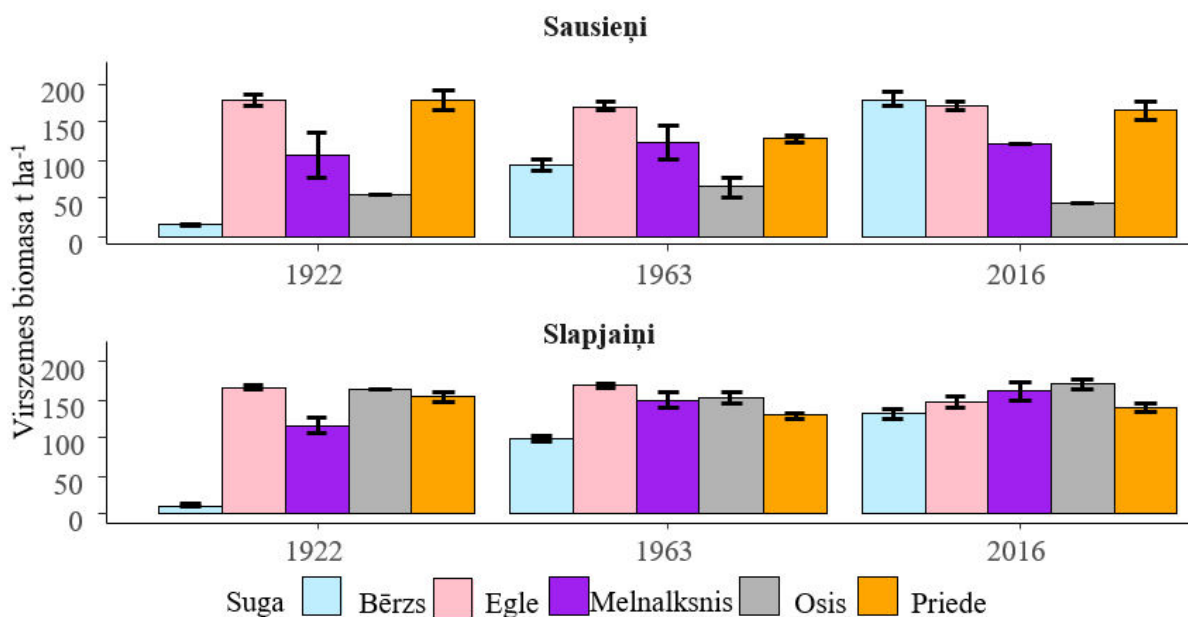
Datu kopa RF modelim	Model Nr.	Mainīgo skaits	R ²	RMSE	RMSE%	Standart-kļūda	Prognozētais maksimums t ha ⁻¹	Prognozētais minimums t ha ⁻¹ s
Visi mainīgie	1	73	0.59	56.76	46.52	9.465	229.61	14.77
Svarīgākie mainīgie	2	34	0.65	52.89	43.35	9.10	237.50	10,73
Landsat L8 GLCM	3	48	0.55	59.31	48.62	9.89	240.02	10.51
Sentinel 1A SAR GLCM	4	11	0.004	88.68	72.70	14.78	242.67	69.89
Landsat L8 veģetācijas indeksi un atsevišķi spektri,	7	14	0.44	66.33	54.37	11.06	229.09	8.98
Landsat L8, veģetācijas indeksi un atsevišķi spektri, un Sentinel 1A SAR GLCM	6	25	0.46	65.50	53.70	10.92	219.61	9.56



14. att. Prognozētās virszemes biomasas apjoms pret parauglaukumos uzņēmītajām vērtībām

Virszemes biomasas novērtējums Slīteres dabas rezervātā vēsturiskos kartogrāfiskos materiālos kombinējot ar MRM vidējām biomasas vērtībām

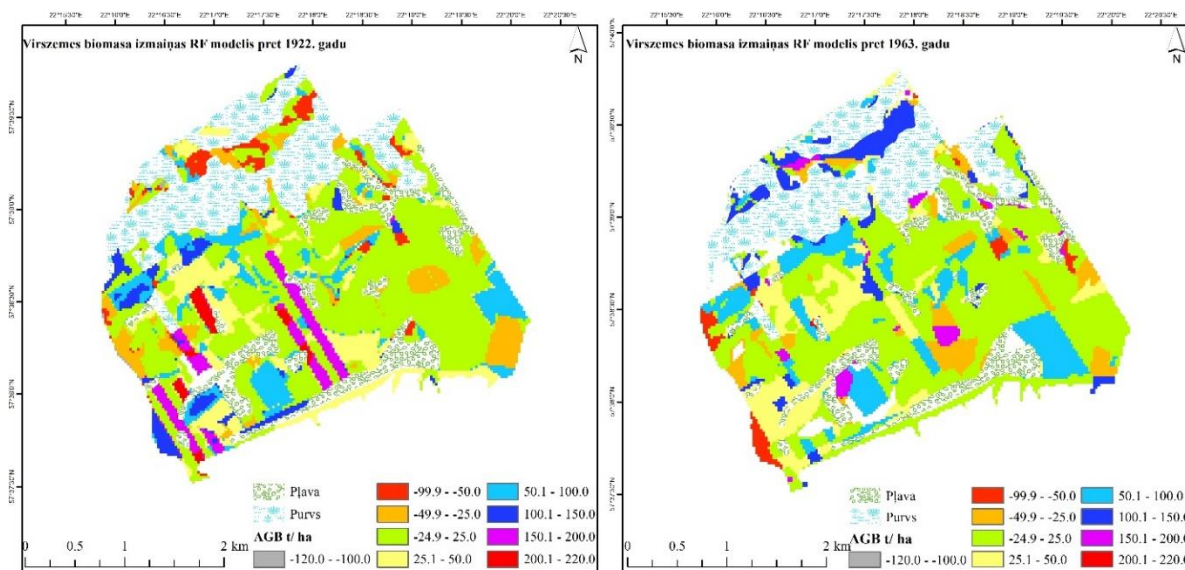
Pamatojoties uz vēsturisko kartogrāfisko materiālu raksturota virszemes biomasas dinamika Slīteres dabas rezervātā laika periodā no 1922. līdz 2016. gadam. Vidējā virszemes biomasa ($t\ ha^{-1}$) katram novērojumu gadam apkopota pa valdošajām sugām dažādos meža augšanas apstākļu tipos (15.att). Sausienos bērza virszemes biomasas vērtība laika gaitā pieauga, sākot no $15.92\ t\ ha^{-1}$ 1922. gadā līdz $180.63\ t\ ha^{-1}$ 2016. gadā, kas norāda uz pastāvīgu izaugsmi, īpaši starp 1963. un 2016. gadu. Egļu biomasa šajā periodā ir nedaudz samazinājusies – no $179.46\ t\ ha^{-1}$ 1922. gadā līdz $171.62\ t\ ha^{-1}$ 2016. gadā. Melnalkšņa biomasa sasniedza maksimumu 1963. gadā ($124.89\ t\ ha^{-1}$), bet līdz 2016. gadam nedaudz samazinājās līdz $121.85\ t\ ha^{-1}$. Ošu biomasai pieauga no 1922. līdz 1963. gadam, tomēr līdz 2016. gadam tā ievērojami samazinājās līdz $44.41\ t\ ha^{-1}$. Priedēm biomasa sākotnēji samazinājās līdz $128.47\ t\ ha^{-1}$ 1963. gadā, bet pēc tam atkal pieauga līdz $164.37\ t\ ha^{-1}$ 2016. gadā. Slapjajos biotopos bērza biomasa pieauga daudz straujāk, sākot no $11.17\ t\ ha^{-1}$ 1922. gadā līdz $130.98\ t\ ha^{-1}$ 2016. gadā. Egļu biomasa palielinājās laika posmā no 1922. līdz 1963. gadam ($168.52\ t\ ha^{-1}$), bet līdz 2016. gadam samazinājās līdz $147.12\ t\ ha^{-1}$. Melnalkšņa biomasa turpināja augt visā periodā, sasniedzot $160.95\ t\ ha^{-1}$ 2016. gadā. Oša biomasa svārstījās, bet kopumā pieauga, līdz 2016. gadā sasniedza augstāko vērtību – $169.98\ t\ ha^{-1}$. Priedēm biomasa samazinājās līdz 1963. gadam, tomēr līdz 2016. gadam atjaunojās, sasniedzot $138.97\ t\ ha^{-1}$.



15. att. Virszemes biomasas novērtējums Slīteres dabas rezervātā

Virszemes biomasas izmaiņas Slīteres dabas rezervātā laika periodā no 1922. līdz 2014. gadam

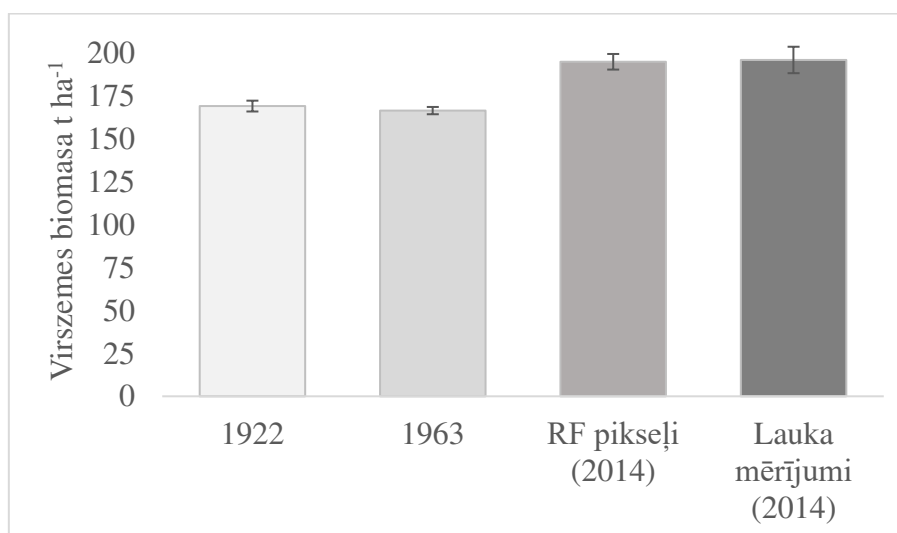
Virszemes biomasas izmaiņu novērtēšanai visai Slīteres dabas rezervāta teritorijai izmantota RF modeļa prognozētā rastra karte. Aplūkojot virszemes biomasas izmaiņas starp 1922. gadu un 2014. gadu, kā arī 1963. gads pret 2014. gadu, konstatēts, ka lielākajā daļā teritorijā izmaiņas vērtējamas, kā nelielas ($\pm 25 \text{ t ha}^{-1}$) (16. att.) un galvenokārt atkarīgas no koku sugu sadalījuma. Kopumā starp 1922. un 2014. gadu virszemes biomasas vērtības vidēji bija pieaugušas par 26.13 t ha^{-1} . Novērots, ka lielākās izmaiņas konstatētas aizaugot pļavām un laucēm, šajās teritorijās, mūsu rezultāti parādīja, ka virszemes biomasas pieaugums bija vidēji par 51.76 t ha^{-1} , tāpat novērojumi liecina, ka starp 1922. gadu un 2014. gadu, ievērojami palielinājusies arī priežu virszemes biomasa, vidēji par 48.04 t ha^{-1} , savukārt, egļu, bērzu un melnalkšņu audžu biomasas palielinājās, attiecīgi, vidēji par 18.82 , 20.68 un 21.24 t ha^{-1} . Salīdzinot virszemes biomasas izmaiņas starp 2014. gadu un 1963. gadu, virszemes biomasas vidējais pieaugums ir 33.76 t ha^{-1} . Konstatēts, ka bērza audzēs virszemes biomasa pieauga par vidēji 76.26 t ha^{-1} , priedes audzēs biomasas vērtība pieauga vidēji par 20.83 t ha^{-1} , egļu audzēs biomasas vērtība pieauga vidēji par 17.98 t ha^{-1} , melnalkšņu audzēs virszemes biomasu palielinājās vidēji par 20.31 t ha^{-1} .



16.att. Virszemes biomasas izmaiņas Slīteres dabas rezervātā, RF prognozētās vērtības attiecībā pret 1922 un 1963. gadu.

Virszemes biomasas izmaiņas Slīteres dabas rezervātā parauglaukumos laika periodā no 1922. līdz 2014. gadam.

Kopumā vērtējot izmaiņas Slīteres dabas rezervāta parauglaukumos laika periodā no 1922. līdz 1963. gadam, novērots neliels biomasas samazinājums, ņemot vērā abu periodu vidējās vērtības. 1922. gadā biomasas vidējā vērtība bija 169.0 t ha^{-1} , kamēr 1963. gadā tā samazinājās līdz 167.0 t ha^{-1} . Biomasas izmaiņas starp gadiem, ņemot vērā RF modeļa un lauka mērījumu rezultātus, liecina par nelielu atšķirību vidējās biomasas vērtībās un lielāku nenoteiktību lauka mērījumos. Vidējā biomasas vērtība, ko prognozē RF modelis, ir 195.0 t ha^{-1} , savukārt lauka mērījumu vidējā vērtība ir 196.1 t ha^{-1} (17. att.).



17. att. Virszemes biomasas novērtējums Slītere Dabas rezervātā parauglaukumos

Secinājumi

Pētījumā iegūtie rezultāti parāda, ka RF modeļu izmantošana virszemes biomasas prognozēšanai ir atkarīga no izmantotajiem mainīgajiem. Landsat L8 un Sentinel 1A tālzpētes datu apvienošana, izmantojot spektrālo indeksu un tekstūras analīzi, ļauj precīzāk ($R^2=0,65$) prognozēt virszemes biomasu Slīteres dabas rezervātā, kamēr tikai Sentinel 1A SAR datu izmantošana liecināja par zemu modeļa veiktspēju. Tomēr modeļiem ir tendence pārvērtēt zemākās biomasas vērtības un nepietiekami novērtēt augstākās.

Vēsturisko datu analīze norāda, ka pēdējo 100 gadu laikā Slīteres dabas rezervātā virszemes biomasas dinamika dažādu koku sugām ievērojami mainījusies, par ko liecināja dažādu sugu atšķirīgās izmaiņām, bērza un melnalkšņa biomasas kopumā palielinājās, savukārt egles un oša biomasas nedaudz samazinājās.

Secinājumi

1. Bioloģiskās daudzveidības stratēģijas 2030 kontekstā sagatavots priekšlikums par vecu mežu indikatoru zinātniski pamatotu izvēli atbilstoši Latvijas hemiborealo mežu ekosistēmu raksturojumam.
2. Mērķtiecīga mežsaimniecības realizācijai ir nozīmīga uz faktiem (zinātniski apstiprinātas informācijas) balstīta, pārdomāta ilgtermiņa rīcībpolitika.
3. Apzinoties, ka dzīvo koku biomasa ir lielākā dinamiskā oglekļa krātuve, rekomendējams meža platībās, kurās ietekme uz klimata pārmaiņu mazināšanu ir galvenais mērķis, pielietot tādu mežsaimniecības modeli, lai veidotu iespējami ražīgas un pret dabiskajiem traucējumiem noturīgas audzes, tādējādi veicinot arī oglekļa uzkrājuma palielināšanās efektivitāti.
4. Meža platībās, kurās primārais mērķis ir dabas aizsardzība, jāņem vērā, ka oglekļa uzkrāšanās efektivitāte (oglekļa uzkrājums gadā) koku biomasā un atmirušajā koksne laika periodā starp jaunākām kontroles un veco audžu stadiju būtiski samazinās. Vecās mežaudzes (vecas kokaudzes) turpina lēni uzkrāt oglekli koku biomasā tik ilgi, kamēr koku vecuma un/vai dabisko traucējumu ietekmē nemainās dominējošais meža elements. Tādēļ, plānojot šādu teritoriju izvietojumu, ieteicams rīkoties tā, lai atstātu iespējami mazāku negatīvo ietekmi uz ES līmeņa klimata politikas realizāciju.
5. Pētījums sniedz jaunu informāciju par zemesdzemes veģetācijas biomasas oglekļa uzkrājumu vecos mežos ar kūdras augsnēm ar un bez meliorācijas sistēmām Latvijā. Kopumā zemesdzemes veģetācijas virszemes un pazemes biomasas oglekļa uzkrājums neatšķiras starp meliorētām un nemeliorētām audzēm, tomēr tie ir saistīti ar audzes parametriem. Valdošā koku suga pati par sevi neietekmē zemesdzemes veģetācijas biomasas oglekļa uzkrājumu.
6. Lielāko proporciju zemesdzemes veģetācijas biomasas pazemes daļā veido koku sakņu biomasa, kas sastāda 87%, 74%, 78% un 79% no kopējās zemesdzemes veģetācijas pazemes biomasas meliorētās priedes, egles un nemeliorētas priedes un egles audzēs, attiecīgi.
7. Priežu audzēs virszemes biomasa oglekļa (C) uzkrājums ir līdzīgs un sastāda 0.42 ± 0.32 t C ha⁻¹ meliorētās un 0.41 ± 0.43 t C ha⁻¹ nemeliorētās audzē, bet pazemes biomasas C uzkrājums ir 2.88 ± 1.52 t C ha⁻¹, meliorētās un 1.45 ± 0.88 t C ha⁻¹ nemeliorētās audzē, turklāt atšķirības ir statistiski būtiskas. Egļu audzēs virszemes biomasa C uzkrājums sastāda 1.06 ± 0.74 t ha⁻¹ meliorētās un 0.96 ± 0.78 t ha⁻¹ nemeliorētās audzē, bet pazemes biomasas C uzkrājums ir 3.05 ± 2.09 t ha⁻¹ meliorētās un 3.60 ± 1.47 t ha⁻¹ nemeliorētās audzē, turklāt abos gadījumos vidējās vērtības ir līdzīgas.
8. Attālās izpētes metodes veco mežu identifikācijai pielietot konvolūciju tīklu modeli uzrādīja labu precizitāti, augstāko precizitāti sasniedzot izmantojot UNet arhitektūru kombinācijā ar resNet50 ietvaru. Attālās izpētes metodes ir perspektīvs izpētes virziens, tostarp veco mežu identifikācijai. Vēsturisko datu analīze norāda, ka pēdējo 100 gadu laikā Sļiteres dabas rezervātā virszemes biomasas dinamika dažādu koku sugām ievērojami mainījusies, par ko liecināja dažādu sugu atšķirīgās izmaiņām, bērza un melnalkšņa biomasa kopumā palielinājās, savukārt egles un oša biomasa nedaudz samazinājās.
9. Veikta attālās izpētes datu analīze un raksturota veco mežu izplatība Latvijā, prezentēti kartēšanas rezultāti (vecu mežu izplatība saskaņā ar Bioloģiskās daudzveidības stratēģijas 2030 vecu mežu definīciju un nacionāli noteiktiem indikatoriem, vadoties pēc EK primāro un veco mežu definēšanas vadlīnijām.).

Izmantotā literatūra

1. Bādērs, E., Jōgiste, K., Elferts, D. *et al.* Storm legacies shaping post-windthrow forest regeneration: learnings from spatial indices in unmanaged Norway spruce stands. *Eur J Forest Res* **140**, 819–833 (2021).<https://doi.org/10.1007/s10342-021-01368-x>
- 2.
3. Barredo J. I., Brailescu C., Teller A., Sabatini F.M., Mauri A., Janouskova K. 2021. Mapping and assessment of primary and old-growth forests in Europe, EUR 30661 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. DOI: 10.2760/797591, ISBN 978-92-76-34230-4, JRC124671.
4. Choi S.-S., Cha S.-H., Tappert C. C. 2010. A survey of binary similarity and distance measures. *J. Syst. Cyberne. Inform.*, 8, 43–48.
5. COM. 2020. EU Biodiversity Strategy for 2030-Bringing Nature Back into our Lives; Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions COM (2020) 380 Final: Brussels, Belgium.
6. Congalton R. G., Green K. 2019. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
7. De Luca G., Silva J. M. N., Di Fazio S., Modica G. 2022. Integrated use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data and open-source machine learning algorithms for land cover mapping in a Mediterranean region. *European Journal of Remote Sensing*, 55(1), 52–70.
8. ESA SNAP. 2023. URL: <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>. Last access 11/01/2023.
9. ESA. 2020. Sentinel-2 Mission. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
10. ESRI. 2017: *ArcGIS Desktop: Redlands*, CA: Redlands, CA Environ. Syst. Res. Institute, Release 10.5.
11. Gundersen P., Thybring E. E., Nord-Larsen T. *et al.* 2021. Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature*, 591, E21–E23. DOI: 10.1038/s41586-021-03266-z.
12. Illarionova S., Trekin A., Ignatiev V., Oseledets I. 2021. Tree species mapping on sentinel-2 satellite imagery with weakly supervised classification and object-wise sampling. *Forests*, 12(10).
13. Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, I., “Textural features for image classification,” *IEEE Trans Syst Man Cybern*, vol. 3, no. 6, pp.610–621, 1973.
14. Kattenborn T., Leitloff J., Schiefer F., Hinz S. 2021. Review on Convolutional Neural Networks (CNN) in vegetation remote sensing. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 173, 24–49.
15. Ķēniņa L., Elferts D., Bādērs E., Jansons Ā. 2018. Carbon pools in a hemiboreal over-mature Norway Spruce stands. *Forests*, 9, 435. DOI: 10.3390/f9070435.
16. Ķēniņa L., Jaunslaviete I., Liepa L., Zute D., Jansons Ā. 2019. Carbon pools in old-growth Scots pine stands in hemiboreal Latvia. *Forests*, 10, 911. DOI: 10.3390/f10100911.
17. Ķēniņa L., Zute D., Jaunslaviete I., Samariķis V., Jansons Ā. 2022. Old-Growth Coniferous Stands on Fertile Drained Organic Soil: First Results of Tree Biomass and

- Deadwood Carbon Stocks in Hemiboreal Latvia. *Forests*, 13(2): 279. DOI: 10.3390/f13020279.
18. Key T., Warner T. A., McGraw J. B., Fajvan M. A. 2001. A comparison of multispectral and multitemporal information in high spatial resolution imagery for classification of individual tree species in a temperate hardwood forest. *Remote Sens. Environ.*, 75, 100–112.
 19. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. 2012. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Paper presented at International Conference on Neural Information Processing Systems, Doha, Qatar, p. 1097–1105.
 20. Lamtom S. H., Savidge R. A. 2003. A reassessment of carbon content in wood: Variation within and between 41 North American species. *Biomass Bioenergy*, 25, 381–388.
 21. Lecun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. 1998. Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278–2324.
 22. Liepiņš J., Lazdiņš A., Liepiņš K. 2017. Equations for estimating above- and belowground biomass of Norway spruce, Scots pine, birch spp. and European aspen in Latvia. *Scand. J. Forest Res.* DOI: 10.1080/02827581.2017.1337923.
 23. Lingua E., Garbarino M., Mondino E. B., Motta R. 2011. Natural disturbance dynamics in an old-growth forest: from tree to landscape. *Proc. Environ. Sci.*, 7, 365–370.
 24. Luo, Y.-M., Huang, D.-T., Liu, P.-Z. & Feng, H.-M. An novel random forests and its application to the classification of mangroves remote sensing image. *Multimed. Tools Appl.* 75, 9707–9722 (2016).
 25. Maxwell A. E., Warner T. A., Guillén L. A. 2021. Accuracy Assessment in Convolutional Neural Network-Based Deep Learning Remote Sensing Studies – Part 1: Literature Review. *Remote Sensing*.
 26. Merce O., Borlea G.F., Turcu D. O. 2014. Definitions and structural attributes of the ecosystems from natural forests-short review. *J. Hortic. For. Biotechnol.*, 18, 114–120.
 27. Meyer P., Aljes M., Culmsee H., Feldmann E., Glatthorn J., Leuschner C., Schneider, H. 2021. Quantifying old-growthness of lowland European beech forests by a multivariate indicator for forest structure. *Ecological Indicators* 25, 107575.
 28. O'Brien L., Schuck A., Fraccaroli C., Pötzelsberger E., Winkel G., Lindner M. 2021. Protecting old-growth forests in Europe - a review of scientific evidence to inform policy implementation. Final report. European Forest Institute. DOI: 10.36333/rs1.
 29. Pedregosa, F.; Varoquaux, G.; Gramfort, A.; Michel, V.; Thirion, B.; Grisel, O.; Blondel, M.; Prettenhofer, P.; Weiss, R.; Dubourg, V. Scikit-learn: Machine learning in Python. *J. Mach. Learn. Res.* 12, 2825–2830, 2011.
 30. Pukkala T. 2014. Does biofuel harvesting and continuous cover management increase carbon sequestration? *For. Policy Econ.*, 43, 41–50.
 31. Puletti N., Chianucci F., Castaldi C. 2018. Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments. *Annals of Silvicultural Research*, 42(1), 32–38.
 32. Safarov F., Temurbek K., Jamoljon D., Temur O., Chedjou J. C., Abdusalomov A. B., Cho Y.-I. 2022. Improved Agricultural Field Segmentation in Satellite Imagery Using TL-ResUNet Architecture. *Sensors*, 22, 9784.

33. Seedre M., Kopáček J., Janda P., Bace R., Svoboda M. 2015. Carbon pools in a montane old-growth Norway spruce ecosystem in Bohemian Forest: Effects of stand age and elevation. *For. Ecol. Manag.*, 346, 106–113.
34. Šēnhofa S., Jaunslaviete I., Šņepsts G., Jansons J., Liepa L., Jansons Ā. 2020. Deadwood Characteristics in Mature and Old-Growth Birch Stands and Their Implications for Carbon Storage. *Forests*, 11(5), 536. DOI: 10.3390/f11050536.
35. Sertel E., Ekim B., Ettehadi Osgouei P., Kabadayi M. E. 2022. Land Use and Land Cover Mapping Using Deep Learning Based Segmentation Approaches and VHR Worldview-3 Images. *Remote Sensing*, 14(18).
36. Shafaey M. A., Salem M. A. M., Ebied H. M., Al-Berry M. N., Tolba M. F. 2019. *Deep Learning for Satellite Image Classification*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, Vol. 2019, p. 383–391.
37. Spracklen B., Spracklen D. V. 2021. Synergistic use of sentinel-1 and sentinel-2 to map natural forest and acacia plantation and stand ages in north-central Vietnam. *Remote Sensing*, 13(2), 1–19.
38. Spracklen B.D., Spracklen D. V. 2019. Identifying European old-growth forests using remote sensing: A study in the Ukrainian Carpathians. *Forests*, 10(2).
39. Tyrell L. et al. 1998. Information about old growth for selected forest type groups in the eastern United States. USDA General Technical Report NC-197. St. Paul, MN: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 507 pp. DOI: 10.2737/NC-GTR-197.
40. USDA Forest Service. 1989. Generic definition and description of old-growth forests. Report onfile at PNW Research. Station, Forestry Sciences Laboratory, Corvallis, Oregon.
41. Vandekerkhove K., De Keersmaeker L., Menke N., Meyer P., Verschelde P. 2009. When nature takes over from man: dead wood accumulation in previously managed oak and beech woodlands in North-West- and Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 258, 425–435.
42. Vandekerkhove K., De Keersmaeker L., Walley R., Köhler F., Crevecoeur L., Govaere L., Thomaes A., Verheyen K. 2011. Reappearance of old-growth elements in lowland woodlands in northern Belgium: do the associated species follow? *Silva Fennica*, 45, 909–935.
43. Vandekerkhove K., Thomaes A., Jonsson B.G., 2013. Connectivity and fragmentation: Island biogeography and metapopulation applied to old-growth-elements. In: Kraus D., Krumm F. (Eds.) *Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity*. In Focus: managing forest in Europe. European Forest Institute – Central European Office (EFI-CENT), Freiburg, p. 104–115.
44. Vandekerkhove K., Vanhellefont M., Vrška T., Meyer P., Tabaku V., Thomaes A., Leyman A., De Keersmaeker L., Verheyen K. 2018. Very large trees in a lowland old-growth beech (*Fagus sylvatica* L.) forest: Density, size, growth and spatial patterns in comparison to reference sites in Europe. *Forest Ecology and Management*, 417, 1–17.
45. Weng Q., Mao Z., Lin J., Liao X. 2018. Land-use scene classification based on a CNN using a constrained extreme learning machine. *International Journal of Remote Sensing*, 39, 6281–6299.

46. Yang C., Rottensteiner F., Heipke C. 2018. Classification of land cover and land use based on convolutional neural networks. *ISPRS Annals Photogr. Remote Sensing Spatial Inf. Sci.*, 4(3), 251–258.
47. Yao C., Luo X., Zhao Y., Zeng W., Chen X. 2017. A review on image classification of remote sensing using deep learning. In: *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Comput. Commun.*, p. 1947–1955.