



## PĀRSKATS

PAR PĒTĪJUMA REZULTĀTIEM

PĒTĪJUMA NOSAUKUMS: “Siltumnīcefekta gāzu emisiju un CO<sub>2</sub> piesaistes novērtējums vecās mežaudzēs”

IZPILDĪTĀIS: Latvijas Valsts mežzinātnes institūts „Silava”

PASŪTĪTĀIS: AKCIJU SABIEDRĪBA “LATVIJAS valsts meži”

Līguma Nr. 5-5.5.\_000k\_101.16.15

PĒTĪJUMA ZINĀTNISKAIS

VADĪTĀIS: DR. Āris Jansons, LVMI Silava vadošais pētnieks

**Salaspils, 2020**

## Kopsavilkums

Mežam ir būtiska loma klimata pārmaiņu mazināšanā, nodrošinot oglekļa uzkrājumu augošos kokos un koksnes produktos. Lai oglekļa uzkrājumu paaugstinātu, svarīgi dati par šo rādītāju dažādā audžu vecumā un izpratne par to ietekmējošiem faktoriem. Īpaši nozīmīga, taču iztrūkstoša ir informācija par oglekļa uzkrājumu vecās audzēs, kuru platība kā Latvijā, tā Eiropā kopumā pieaug.

Pētījuma mērķis ir novērtēt oglekļa uzkrājumu vecās, saimnieciskās darbības ilgstoši neietekmētās priedes, egles, bērza un apses mežaudzēs, salīdzinājumā ar pieaugušām audzēm.

Kopumā uzmērītas un analizētas 117 pāraugušas mežaudzes, t.sk. 82 audzes meža tipos ar auglīgu minerālaugni (damaksnis un vēris, kas aizņem 40% Latvijas meža platības), par ko apkopota informācija šajā pārskatā. Kokaudze uzmērīta kopumā 507 parauglaukumos, salīdzinājumam izmantojot Meža statistiskās inventarizācijas (MSI) III cikla datus 447 parauglaukumos pieaugušās audzēs. Augsnes un zemsegas paraugi ievākti kopumā 157 audzēs – gan vecās, gan pieaugušās.

Pētījumā iegūti Eiropas mērogā unikāli dati par oglekļa uzkrājumu pāraugušās lapu koku audzēs un nozīmīgi paplašinātas zināšanas par šī elementa uzkrājumu pāraugušās skujkoku audzēs. Šo informāciju būtiski izmantot, vērtējot dažādu stratēģisko un politisko lēmumu ietekmi uz kopējo ekosistēmas oglekļa uzkrājumu mežos.

Konstatēts, ka meža tipos ar auglīgu minerālaugni pāraugušās audzēs, kurās vecie koki ir dominējošais meža elements, kopējais ekosistēmas oglekļa uzkrājums ir: priedes audzēs  $317 \pm 113,1$  C t ha<sup>-1</sup>, egles audzēs  $293,9 \pm 87,33$  C t ha<sup>-1</sup>, apses audzēs  $337,8 \pm 28,51$  C t ha<sup>-1</sup>, bērza audzēs  $302,8 \pm 43,00$  C t ha<sup>-1</sup>. Pāraugušo audžu kopā konstatēta nozīmīga oglekļa uzkrājuma variācija koku biomasā (variē no 90 līdz 252 C t ha<sup>-1</sup>) un atmirušajā koksne (variē no 3 līdz 29 C t ha<sup>-1</sup>), kas nav saistīta ar audžu vecumu (priedes audzes no 163 līdz 218 gadiem; egles audzes no 170 līdz 205 gadiem; apses audzes no 104 līdz 135 gadiem), izņemot bērza audzes, kur līdz ar vecumu (no 123 līdz 148 gadiem) uzkrājums samazinājās.

Vidēji pusi no kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājuma kā pāraugušās (47-59%), tā pieaugušās (45-54%) audzēs veido dzīvā koku biomasā, kas ir lielākā oglekļa krātuve. Tātad ikgadējā oglekļa uzkrājuma maksimizēšanai nozīmīgi nodrošināt augstu audzes ražību. Laika periodā starp pieaugušo (MSI dati) un pāraugušo audžu stadiju (pētījumā ievāktie dati), kas skujkokiem bija vidēji 93 gadi un lapu kokiem vidēji 58 gadi, oglekļa uzkrāšanās mežaudzēs turpinājusies. Tomēr vecās (pāraugušās) audzēs ikgadējais oglekļa uzkrājums ir būtiski mazāks nekā jaunākās, īpaši – skujkoku audzēs. Tātad mežaudzes bez mežsaimnieciskās darbības konkrētajā laika posmā turpina lēni uzkrāt oglekli. Tomēr šāda situācija saglabājas tikai tikmēr, kamēr koku vecuma un/vai dabisko traucējumu ietekmē nemainās dominējošais meža elements (veca kokaudze), līdz ar to audžu saglabāšana pēc pieaugušas audzes vecuma sasniegšanas nenodrošina zemes resursu efektīvu izmantošanu oglekļa uzkrājuma maksimizēšanai.

## Summary

Forests play a fundamental role in the climate change mitigation, contributing to carbon accumulation in tree biomass and wood products. In order to develop efficient measures to increase carbon storage in forests, there is an urgent need to obtain data on carbon stock in different stand age and to understand the main factors affecting it. Especially important, but lacking, is information on old-growth forests with continuously growing area both in Latvia and Europe.

The aim of our study was to assess the carbon stock in old-growth pine, spruce, aspen and birch dominated forests in comparison with mature stands.

In total, 117 old-growth stands were measured, including 82 stands on fertile mineral soils and a normal moisture regime – *Hylocomniosa* and *Oxalidososa* forest types, occupying 40% of total forest area in Latvia. Data of *Hylocomniosa* and *Oxalidososa* forest types were used in this report. Altogether, 507 sample plots of tree cover were measured and compared to national forest inventory data (447 sample plots) from mature stands. Soil and litter sampling were carried out in 157 stands, including both mature and old-growth.

Study provided unique data on carbon stock in old-growth deciduous stands and significantly expands the knowledge on carbon pools in old-growth forests in Europe. Obtained data increase the recognition of carbon stocks within the main carbon pools in these stands and can be used to evaluate various strategic and policy decisions on total ecosystem carbon in forests.

Total ecosystem carbon in old-growth forest, where old trees are still the dominant cohort reached  $317 \pm 113,1 \text{ C t ha}^{-1}$  in pine stands,  $293,9 \pm 87,33 \text{ C t ha}^{-1}$  in spruce stands,  $337,8 \pm 28,51 \text{ C t ha}^{-1}$  in aspen stands and  $302,8 \pm 43,00 \text{ C t ha}^{-1}$  in birch stands. Assessment of old-growth stands reveal high heterogeneity of carbon stock in tree biomass (ranging from 90 to  $252 \text{ C t ha}^{-1}$ ) and deadwood (ranging from 3 to  $29 \text{ C t ha}^{-1}$ ), which is not related to stand age (pine stands: from 163 to 218 years, spruce stands from 170 to 205 years, aspen stands from 104 to 135 years). Exception was birch stands, where the carbon stock decreased with age (from 123 to 148 years), mainly due to the results from oldest assessed stand.

Almost half of the total ecosystem carbon both in old-growth stands (47-59%) and mature stands (46-54%) was found in the living tree biomass, which is the largest forest carbon pool. Thus, in order to maximize the annual carbon stock, it is important to ensure high stand productivity. Carbon sequestration between mature and old-growth age (on average 93 years and 58 years in coniferous and deciduous stands, respectively) continued in forest stands. However, annual carbon stock in old-growth stands were significantly lower than younger (mature) stands, especially observed in coniferous stands. So old forests stand without past and further management activities continue to store carbon as long as dominant old tree cover does not change due to the biological tree age and/or natural disturbance activity. Moreover, maintenance of forest stands after reaching mature age does not ensure efficient use of land resources to maximize carbon storage.

## Saturs

Ievads .....	5
1. Tēmas izziņātības analīze .....	7
1.1. Meža loma klimata pārmaiņu mazināšanas politikas kontekstā .....	7
1.2. Veco mežu definīcija un to platības izmaiņas.....	9
1.3. Oglekļa uzkrājums vecajās audzēs.....	11
1.3.1. Oglekļa uzkrājuma dinamika un krātuves.....	11
1.3.2. Atmirušajā koksne uzkrātā oglekļa apjoms mežos .....	17
1.3.3. Augsnē un zemsegā uzkrātā oglekļa apjoms mežos.....	20
1.4. Oglekļa uzkrājuma izmaiņu ietekmējošie faktori vecos mežos .....	24
1.4.1. Klimats un tā pārmaiņas.....	24
1.4.2. Dabiskie traucējumi .....	26
1.4.3. Trupe .....	28
1.4.4. Mežsaimniecība.....	29
2. Pētījuma metodika .....	31
2.1. Empīriskā materiāla ievākšana .....	31
2.2. Oglekļa noteikšanas metodika .....	35
3. Rezultāti .....	39
3.1. Pāraugušo mežaudžu dendrometriskais raksturojums .....	39
3.2. Oglekļa uzkrājums pāraugušās mežaudzēs .....	42
3.3. Oglekļa uzkrājuma salīdzinājums pieaugušās un pāraugušās mežaudzēs .....	49
Secinājumi.....	57
Literatūras saraksts.....	58

## Ievads

Mežiem ir būtiska loma klimata pārmaiņu mazināšanā, nodrošinot oglekļa uzkrājumu koku biomasā un citos šīs ekosistēmas komponentos. Tāpat mežs nodrošina arī atjaunojamu izejmateriālu oglekļa uzkrājumam produktos un fosilo materiālu aizstāšanai. Plaši pieejama informācija par oglekļa uzkrājumu audzēs līdz pieaugušam vecumam, taču par vecām (pāraugušām) audzēm informācija ir fragmentāra: analizēti tikai konkrēti – vienas vai dažu – audžu dati, un komplekss novērtējums pieejams tikai par dažām koku sugām atsevišķos pētījumos (Jacob et al., 2013; Moreno-Fernández et al., 2015; Seedre et al., 2015; Lee et al., 2016; Nord-Larsen et al., 2019).

Tomēr šāda informācija ir būtiska, jo veco audžu īpatsvars Eiropā pieaug. To nosaka: a) audžu vecumstruktūra, kas galvenokārt saistīta ar laiku kopš II Pasaules kara, kurā lielas mežaudžu platības nopostītas un vēlāk atjaunotas; b) mežistrādes apjoms, jo lielākajā daļā Eiropas Savienības (ES) valstu gadā nozāgē 40-80% koksnes pieauguma (nevienā ES valstī nenozāgē visu koksnes pieaugumu) (European forest ecosystems – State and trends, 2016); c) sabiedrības urbanizācijas un mežaudzes galvenā izmantošanas mērķa maiņa, ņemot vērā īpašnieka prioritātes attiecībā uz savu meža īpašumu (Heinonen et al., 2020), kā arī balsoties uz valstiski izvirzītajiem mērķiem, kurus īstenojot kā Eiropā kopumā (San-Miguel-Ayanz et al., 2015; Sabatini et al., 2020), tā Latvijā (Valsts Meža dienesta dati) pieaug meža platības ar dažāda veida saimnieciskās darbības ierobežojumiem. Sagaidāms, ka šīs tendences saglabāsies un nākotnē vecu mežu platība palielināsies. Vienlaikus, pieaugot dabisko traucējumu, īpaši vēja, biežumam un intensitātei (Nabuurs et al., 2013; Gregow et al., 2017; Seidl et al., 2020), palielināsies arī to radīto tiešo un sekundāro bojājumu apjoms, tādēļ tikai daļa veco mežu platības būs vecas audzes. Tomēr tieši informācija par oglekļa uzkrājumu vecajās audzēs ir iztrūkstoša arī šādu dabisko traucējumu ietekmes uz oglekļa uzkrājumu novērtēšanai un iespējamo izmaiņu modelēšanai. Šāda modelēšana ir būtiska, analizējot ar mežu saistītu lēmumu, t.sk. stratēģiju, politiku, mežsaimniecisko plānu u.c., sagaidāmo ietekmi uz klimata pārmaiņu mazināšanu. Ieguldījumu klimata pārmaiņu mazināšanā nosaka Latvijas starptautiskās saistības un īstermiņā tā paredzamā īstenošana ietverta “Latvijas Nacionālajā enerģētikas un klimata plānā 2021.- 2030. gadam”, nosakot mērķi samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas visās nozarēs. Tomēr mežs ir vienīgais, kam šajā plānā noteikts konkrēts oglekļa uzkrājuma palielinājuma (CO<sub>2</sub> piesaistes) mērķis. Svarīgi šī mērķa sasniegšanu nodrošināt tādā veidā, kas neapdraud iespējas palielināt oglekļa uzkrājumu ilgtermiņā, jo ne valsts starptautiskās saistības, nedz nepieciešamība šo rezultātu nodrošināt ar 2030. gadu nebeigsies.

Meža tipam (augšnei) un valdošajai koku sugai ir būtiska ietekme uz oglekļa uzkrājumu (Jandl et al., 2007; Lutter et al., 2018; Jones et al., 2019). Nozīmīgākie ir dati par oglekļa uzkrājumu meža tipos ar augstāko īpatsvaru no kopējās meža platības (damaksnis un vēris: kopā 39,5%, MSI IV cikla dati) un plašāk pārstāvētajām koku sugām: priede, egle, bērzs un apse (šo sugu valdošās audzes kopā 80%, MSI IV cikla dati).

**Pētījuma mērķis:** novērtēt oglekļa uzkrājumu vecās, saimnieciskās darbības ilgstoši neietekmētās priedes, egles, bērza un apses mežaudzēs, salīdzinājumā ar pieaugušām audzēm.

Lai sasniegtu pētījuma mērķi, izvirzīti šādi **darba uzdevumi:**

1. Raksturot pāraugušo mežaudžu dendrometriskos rādītājus;
2. Novērtēt pāraugušo audžu galvenās oglekļa krātuves (dzīvo koku biomasā, atmirusī koksne, augsne un zemsega) un dažādu faktoru ietekmi uz to;
3. Salīdzināt oglekļa uzkrājumu starp pāraugušām un pieaugušām audzēm.

## **Tēzes**

Koku biomasa vecās, saimnieciskās darbības ilgstoši neietekmētās mežaudzēs auglīgās minerālaugsnēs ir lielākā oglekļa krātuve un ka tieši koku biomasas atšķirības veido lielāko daļu no kopējā oglekļa uzkrājuma starpības starp pieaugušām un pāraugušām audzēm neatkarīgi no valdošās koku sugas.

Kopējais ekosistēmas oglekļa uzkrājums un oglekļa uzkrājums koku biomasā vecās, saimnieciskās darbības ilgstoši neietekmētās mežaudzēs auglīgās minerālaugsnēs ir būtiski lielāks nekā pieaugušās audzēs, savukārt oglekļa uzkrājums gādā – būtiski mazāks.

## **Zinātniskā novitāte**

Pirmo reizi Eiropā raksturots oglekļa uzkrājums vecās, saimnieciskās darbības ilgstoši neietekmētās, kārpainā bērza un parastās apses audzēs auglīgās minerālaugsnēs, un pirmo reizi – parastās priedes un parastās egles audzēs hemiboreālajos mežos.

# 1. Tēmas izziņātības analīze

Pētījuma aktualitāte saistīta ar izpratni par meža lomu klimata pārmaiņu mazināšanas kontekstā – šo politiku mērķiem un ar tiem saistīto nepieciešamību pēc precīziem datiem. Tāpat būtiski definēt pētījuma objektu, jo izpratne par to, kas ir veci meži un audzes, pētījumos ir dažāda, tāpēc pētījumu rezultāti bieži ir savstarpēji grūti salīdzināmi, un secinājumi - pretrunīgi. Pieejamās informācijas raksturojums par oglekļa krātuvēm un apjomu vecajās audzēs ir nozīmīgs kā salīdzinājumam ar šī pētījuma rezultātiem, tā vispārējam priekšstatam par kopsakarībām starp dažādām oglekļa krātuvēm un tiem aspektiem, par kuriem datu trūkst, piemēram, oglekļa uzkrājums augsnē un zemsegā. Oglekļa krātuvju lielums ir atkarīgs no dažādiem faktoriem – klimata joslas, valdošās koku sugas, augšanas apstākļiem un mežaudzes attīstības (sukcesijas) stadijas, kā arī dabisko traucējumu ietekmes. Tāpēc ir nepieciešams izprast oglekļa uzkrājuma dinamiku ietekmējošos faktoros un to mijiedarbību, t.sk. tos, kas saistīti ar pāreju starp vecu audzi un vecu mežu.

## 1.1. Meža loma klimata pārmaiņu mazināšanas politikas kontekstā

Klimata pārmaiņas ir noturīgas, ilgstošas (vismaz 30 gadu) meteoroloģisko apstākļu izmaiņas. Tās ietekmē mūsu ikdienas dzīvi kā ekstremāli laikapstākļi (vētras, sausuma un karstuma viļņi, plūdi), savvaļas dzīvnieku un augu sugu areālu izmaiņas, patogēnu un insektu izplatības areāla un uzvedības izmaiņas (Feyen et al., 2020). Klimata pārmaiņas ir apdraudējums gan mežsaimniecībai, gan citām tautsaimniecības nozarēm. Tiek prognozēts, ka ilgākā laika periodā klimata pārmaiņas radīs izmaiņas mežu ekosistēmās un tādējādi arī mežsaimniecībā, tāpēc šīm pārmaiņām ir nepieciešams sagatavoties. Pielāgojot (adaptējot) meža apsaimniekošanu jaunajiem apstākļiem, arī turpmāk spēsim nodrošināt meža ekosistēmas pakalpojumus. Adaptācija klimata pārmaiņām ir ļoti būtiska, jo globālajai klimata sistēmai piemīt nozīmīga inerces un, neatkarīgi no veiktiem pasākumiem šobrīd, pārmaiņas turpināsies vēl vismaz gadsimtu.

Vienlaikus ir svarīgi veikt pasākumus klimata pārmaiņu mazināšanai. Pirmais starptautiskā politikas procesa stūrakmens klimata pārmaiņu mazināšanā likts 1994. gadā, kad stājās spēkā Apvienoto Nāciju Organizācijas (ANO) Vispārējā konvencija par klimata pārmaiņām (UNFCCC), kuru atbalstīja 197 valstis. Tad sekoja Kioto protokols (1997), kas attīstītajām valstīm noteica juridiski saistošus ierobežojumus siltumnīcefekta gāzu emisijas (SEG) līmenim.

Kioto protokols laika periodā 2008-2020 bija galvenais globālas politikas ietvars klimata pārmaiņu mazināšanai. Kioto protokols paredz ierobežot un samazināt galveno siltumnīcefekta gāzu - oglekļa dioksīda, metāna, slāpekļa oksīdu, fluorogļūdeņražu, perfluorogļūdeņražu, sēra heksafluorīda - emisijas. Tam sekoja Parīzes nolīgums (2015), kas ir visaptveroša, ambicioza un universāla vienošanās laika periodam pēc 2020. gada, un tās mērķis ir samazināt SEG emisiju daudzumu nodrošinot, lai gaisa temperatūra nepaaugstinās vairāk nekā par 2°C, cenšoties palielinājumu noturēt 1,5 °C robežās. Parīzes nolīgumu uzskata par pirmo vispārējo juridiski saistošo pasaules mēroga vienošanos klimata jomā, jo tam pievienojās visas pasaules valstis. Lai gan daudzas pasaules valstis ir noteikušas siltumnīcefekta gāzu samazināšanas mērķus, kopējais sasniegtais SEG emisiju samazinājums līdz šim nenodrošina pietiekošu globālo emisiju samazinājumu, un vidējā gaisa temperatūra aizvien paaugstinās (Emissions Gap Report, 2019).

Latvija ir ratificējusi Kioto protokolu (2002) un Parīzes nolīgumu (2017), un kā ANO un Eiropas Savienības dalībvalsts ir uzņēmusies saistības valsts līmenī samazināt ikgadējo SEG

emisiju apjomu. Papildus Latvijai kā Eiropas Savienības dalībvalstij jāpilda ES Klimata politikas ietvarā noteiktās prasības.

Lai apzinātu un kontrolētu valstu ikgadējos SEG emisiju apjomus, valstīm jāiesniedz Ikgadējais valsts SEG emisiju ziņojums, izklāstot SEG emisiju un oglekļa dioksīda piesaistes pa sektoriem. Meža zeme ir visbūtiskākā zemes lietošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektora kategorija, par kuru atskaites sagatavo Latvijas Valsts mežzinātnes institūts “Silava” (LVMI Silava) (Latvia’s National Inventory Report 1990-2017, 2019).

2013. gadā ES klimata politikā attiecībā uz zemes sektora lomu notika būtiskas izmaiņas (Grassi et al., 2017) un kuras pamata tika pieņemta jauna regula (ES Regula 2018/841, 2018), kas paredz, ka meža nozarei pirmo reizi nosakot obligātas saistības samazināt SEG emisijas, papildus pieņemot atšķirīgu SEG emisiju uzskaites metodiku (meža references līmeņa metodika).

Jaunajā SEG emisiju uzskaites metodikā noteikts atskaites jeb references periods (1990.-2008. gads). Jaunā pieeja paredz, ka, aprēķinot meža sektora SEG bilanci, netiek ņemts vērā oglekļa uzkrājums, bet tiek aprēķināta tikai CO<sub>2</sub> piesaiste, kas rodas koksnes krājas ikgadējā pieauguma rezultātā, no tā atņemot koksnes atmiruma un mežizstrādes bilanci attiecībā pret konkrētu references periodu (1990-2008). Tas nozīmē, ka meža platība vairs nav ietekmējošs faktors virzībā uz klimata mērķa sasniegšanu. Jaunās metodikas ietekmē ES mežainākās valstis (Zviedrija, Somija, Slovēnija, Latvija, Igaunija u.c.) zaudēja priekšrocības klimata politikā, kādas iepriekš sniedza liela meža platība. Arī 2021-2030 noteiktie SEG samazināšanas mērķi meža nozarei ir ambiciozi un to sasniegšana nav pašsaprotams fakts nevienai no ES dalībvalstīm. Latvijas enerģētikas un klimata politikas nacionālais mērķis ir nodrošināt vismaz 3,1 milj. tonnu CO<sub>2</sub> piesaistes ZIZIMM sektorā. Vienlaikus jāņem vērā, ka, lai iegūtu atbalstu savu nozaru uzstādīto SEG samazināšanas mērķu sasniegšanā, tādas nozares kā transporta nozare, lauksaimniecības nozare aizvien palielinās spiedienu iegūt meža nozares emisijas kvotas tā saucamo elastības mehānismu ietvaros. Tāpēc, īpaši Skandināvijas un Baltijas valstīm, kas ir mežiem bagātākās ES valstis, jaunās klimata politikas pieejas dēļ pastāv risks meža nozares klimata mērķi nesasniegt.

Šī brīža tendences, kā arī prognozes nākamajām desmitgadēm apliecina, ka Latvijā mežizstrādes intensitāte saglabāsies tādā pašā līmenī kā pēdējos 10 gadus (vidēji 11,4 milj. m<sup>3</sup> gadā laika posmā no 2008. līdz 2018. gadam pēc Centrālās statistikas pārvaldes datiem), vai nedaudz paaugstināsies. Tieši mežā uzkrātā dzīvo koku krājas diference ir visnozīmīgākais faktors, lai saglabātu pozitīvu ZIZIMM sektora SEG emisiju un piesaistes bilanci. Tautsaimniecībā izmantojot vairāk koksni, pieaug mežizstrādes apjoms. Veidojas paradoksāla situācija, ka pēc būtības klimata pārmaiņu mazināšanas mērķim atbilstoša darbība – izmantot vairāk atjaunojamos resursus – ZIZIMM sektorā tiek uzskaitīta kā negatīva – palielinātas emisijas. Tāpat, izmantojot bioenerģiju (enerģētiskā koksne) kā atjaunojamo resursu, tiek radītas emisijas, bet tās ir salīdzinoši mazākas pretstatā fosilo resursu izmantošanai, apliecinot, ka emisijas no meža sektora nav uzskatāmas par kaitējumu klimatam. Mežizstrādes emisijas ir mežsaimniecības cikla daļa, kas līdzsvarojas, piesaistot oglekli augošos kokos, īpaši, produktīvās mežaudzēs.

Vērtējot ilgtermiņā, meža sektors – mežs un koksnes produkti – ir milzīgas oglekļa krātuves, kur, mērķtiecīgi saimniekojot, iespējams piesaistīt vairāk oglekļa (primārā produktivitāte – biomasa (*net primary productivity*), augsne, atmirusi koksne). Savukārt, vecinot uz augstas pievienotās vērtības un ilga dzīves cikla produktiem vērstu koksnes pārstrādi, iespējams panākt, ka koksnes produktos piesaistītais ogleklis vēl ilgi nenonāktu atmosfērā.



Neatkarīgi no konkrētajā brīdī izmantotās uzskaites sistēmas, precīzs oglekļa uzkrājuma un SEG emisiju apjoma novērtējums ir būtisks, lai raksturotu valstu progresu klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu izpildē un veiktu korektu starpvalstu salīdzinājumu. Līdzšinējos pētījumos Latvijā oglekļa uzskaites precizēšanai analizēts tā uzkrājums koku virszemes un pazemes biomasā, izstrādājot to raksturojošus vienādojumus, kā arī noteiktas oglekļa koncentrācija dažādās koka daļās. Iegūtie rezultāti apkopoti publikācijās, raksturojot biomasas sadalījumu dažādām koku sugām (Bārdulis et al., 2011; Bardulis et al., 2012; Lībiete et al., 2017; Liepiņš et al., 2017; Ķēniņa et al., 2018a), oglekļa koncentrāciju pazemes biomasā (Bārdulis et al., 2017; Jansons et al., 2017), kā arī atmirušajā koksnē pa sadalīšanās pakāpēm (Ķēniņa et al., 2019b) ne tikai mežā, bet arī lauksaimniecības zemēs (Daugaviete et al., 2008; Bārdulis et al., 2012).

Tomēr trūkst datu par oglekļa uzkrājumu vecās audzes, kur platība dažādu iemeslu dēļ palielinās. Šādus datus nav iespējams iegūt arī no kaimiņvalstīm, jo pētījumi par šo jautājumu hemiboreālajos mežos nav veikti. Zinātniski pamatotu datu iegūšana ir noteicoša, lai izvairītos no oglekļa uzkrājuma pārvērtēšanas un iespējamām sankcijām, kas ar to saistītas, kā arī nodrošinātu rekomendācijas mežsaimniecībai un zemes izmantošanas politikas plānošanai oglekļa uzkrājuma kapināšanai.

## 1.2. Veco mežu definīcija un to platības izmaiņas

Veco mežu loma klimata pārmaiņu mazināšanā ir neskaidra, galvenokārt empīrisku datu trūkuma dēļ. Šādi dati ir būtiski, ņemot vērā, ka Eiropā pēdējās desmitgadēs mērķtiecīgi tiek saglabātas un palielinātas veco audžu platības (Vilén et al., 2012; Badalamenti et al., 2019) un sagaidāms, ka šī tendence turpināsies, palielinot šo teritoriju lomu kopējā valsts SEG bilancē.

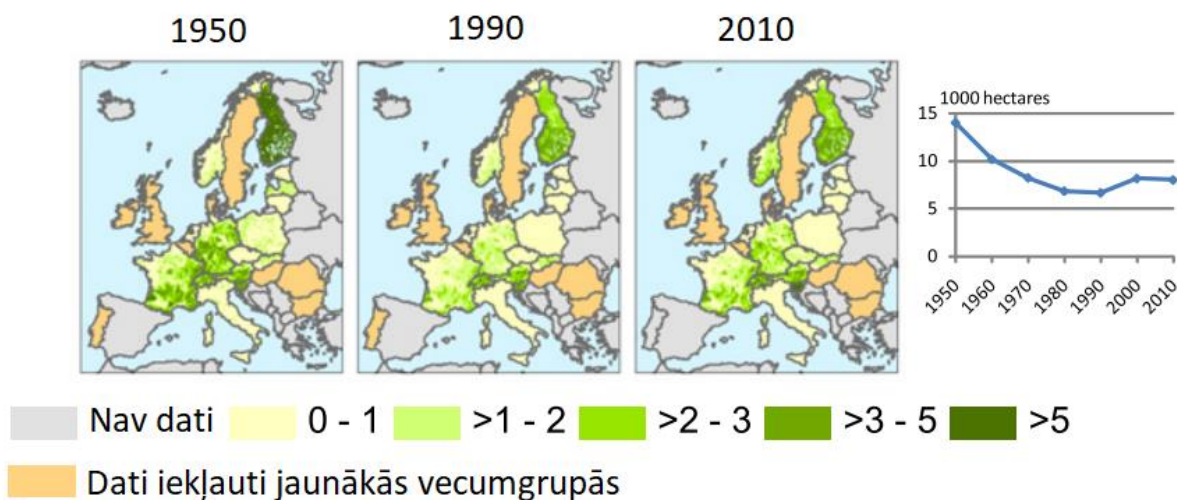
Šobrīd lietotā “vecu mežu” terminoloģija ir balstīta uz Apvienoto Nāciju Organizācijas Pārtikas un lauksaimniecības organizācijas jeb FAO klasifikāciju, kurā atkarībā no “dabiskuma līmeņa” pirmatnējie meži ir sadalīti piecās kategorijās – *primeval forests* (n10), *virgin forests* (n9), *frontier forests* (n8), *near-virgin forests* (n7), *old-growth forests* (n6), *long-untouched forests* (n5) (Buchwald, 2005). Pētījumā apskatītie pāraugušie meži atbilst n6 kategorijai - *old-growth forests*. Pāraugušiem mežiem raksturīgi veci koki un ar tiem saistītie audzes (ekosistēmas) struktūras elementi. Vecie meži ietver vēlīnas audžu attīstības stadijas, kas parasti atšķiras no sākotnējām ar vairākiem raksturlielumiem, kas var būt – koku izmērs, lielu dimensiju atmirusī koksne, kokaudzes stāvu skaits, sugu sastāvs un ekosistēmas funkcijas. Vecums, kādā vecajos mežos parādās specifiskās, tiem raksturīgās, struktūras, ir nozīmīgi atšķirīgs dažādā klimatā, meža tipos, augšanas apstākļos un dabisko traucējumu režīmā. Tomēr vecie meži parasti atšķiras no jaunākiem ar vairākiem no šiem raksturlielumiem: 1) relatīvi (koku sugai un apstākļiem) lielu dimensiju koki; 2) liela koku dimensiju un biezuma dažādība; 3) lielu dimensiju atmirusī koksne (sausokņi, stubeņi, kritālas) tādā apjomā, kas nav raksturīgs jaunākās audžu attīstības stadijās; 4) dažādu traucējumu ietekmes pazīmes, kā lauztas koku galotnes, stumbra vai sakņu bojājumi; 5) vairāki audzēs stāvi; 6) atvērumi audzes vainagu klājā, mozaīkveida struktūra. Šādas mežaudzes var veidoties arī vietās, kur pagātnē ir bijusi cilvēka darbība (ietekme) (Buchwald, 2005).

Jēdzienam “**vecs mežs**” ir vairākas definīcijas, kuras bieži raksturo ne tikai dažāda vecuma, bet arī struktūras mežaudzes, neveicinot vienotas izpratnes veidošanu par pāraugušām un vecām mežaudzēm. Vairākās publikācijās “vecs mežs” ir sinonīms vārdam dabisks mežs (*natural/virgin/wild*), kas raksturo mežus, kuros nekad (parasti ar to saprotot dažus gadsimtus, vai kādu citu ilgāku periodu) nav notikusi cilvēka saimnieciskā darbība. Citos pētījumos vecs mežs tiek asociēts ar dabiskās sukcesijas klimaksa stadiju sasnieguša, nobriedušu (*climax forest, late-*

*successional/aged forest/primary*) mežaudzi, kur mežaudzes struktūra ir salīdzinoši stabila (vai arī sasniegts dinamisks līdzsvars). Šī pētījuma izstrādē jau sākotnēji lietots termins – pāraudzis mežs (*over-mature, un-managed*). Tā kā literatūrā sastopamas dažādas definīcijas, tad, analizējot jebkuru informācijas avotu šajā kontekstā, ir ļoti svarīgi saprast, kāda ir konkrētajā gadījumā lietotā definīcija un vai tā tiešām raksturo konkrēto gadījumu.

Svarīgi ir nodalīt vairākus atšķirīgus jēdzienus, kuri arī izmantotajās FAO izstrādātajās “vecu mežu” definīcijās ir saplūduši un kuru nenodalīšanas dēļ bieži rodas rezultātu un to interpretāciju atšķirības. **Veca kokaudze (pāraugusi audze)** – audze, kurā valdošās sugas koki pārsnieguši noteikto ciršanas vecumu par vairāk nekā divām vecumklasēm. **Vecs mežs** – ilgstoši (vismaz divas valdošās koku sugas vecumklases) antropogēni maz traucēts mežs, t.i., tajā nav veikta krājas kopšanas un galvenā cirte, un to veido vai nu veca vai dabisko traucējumu ietekmē izveidojusies jauna audze (audzes). Līdz ar to vecs mežs var sastāvēt un var nesastāvēt no vecām kokaudzēm. Šajā pētījumā analizēts tikai viens specifiskais gadījums, kad vecā mežā dominējošais meža elements vēl joprojām ir veci koki t.i. tā ir veca audze.

Vecu mežu (*primary forests*) īpatsvars pasaulē kopumā ir ļoti mazs, kaut arī pieejamie dati ir nepilnīgi, ar tendenci samazināties (samazinājums par 81 milj. ha kopš 1990. gada) (The State of the World's Forests, 2020). Aplēsts, ka šobrīd ES ir 1,4 milj. ha jeb 0,7% vecu mežu (*primary forests* – n10 līdz n5) no kopējās Eiropas mežu platības un 90% no šiem mežiem ir piemērots kāds no aizsardzības statusiem (Sabatini et al., 2017). Kopumā Eiropā ir ap 3 milj. ha vecu mežu (>100 gadi), kas ir mazāk kā 2% no kopējās mežu platības, un lielākā daļa ir atrodami Somijā un Zviedrijā, kā arī Centrāleiropas kalnu reģionā – Karpatos (European forest ecosystems – State and trends, 2016). Tieši pāraugušie meži (*old-growth forests*) ir atzīti par galveno un nozīmīgāko elementu bioloģiskās daudzveidības saglabāšanā mežā, ņemot vērā ievērojamo tajos sastopamo sugu daudzveidību. Galvenokārt, tieši bioloģiskā daudzveidība ir aspekts, kādēļ vecu mežu loma dabas aizsardzības nostādņu un politikas veidošanā tikai pieaug (Bernáldez, 2017; Badalamenti et al., 2019). Eiropas Savienība šobrīd strādā pie vienotas stratēģijas, kas attieksies uz pieaugušiem (mature) un veciem mežiem (*primary forests*). Arī jaunajā 2030 ES Bioloģiskās daudzveidības stratēģijā vecie meži ir noteikti kā nozīmīgs dabas aizsardzības elements, paredzot noteikt stingras aizsardzības prasības. Jau šobrīd vairākās ES dalībvalstīs ir panākts progress to identificēšanā un aizsardzībā. Piemēram, Spānijā veido ekoloģisko uzraudzības/monitoringa tīklu tieši dabiskajiem mežiem, ar šo jēdzienu saprotot visas kategorijas (*ancient, primary, old-growth, natural, semi-natural forests*), kas sastopamas konkrētajā reģionā. Eiropā ir organizācijas, kas aktīvi strādā, lai meklētu un identificētu vecās mežaudzes (Bernáldez, 2017). Samazinoties meža sektora lomai ekonomikā, īpaši Eiropas dienvidu un centrālajā daļā, kā arī palielinoties sabiedrības urbanizācijai, dzīves līmenim līdz ar to pieprasījumam pēc citiem ekosistēmas pakalpojumiem, vecu mežu (vecums > 120 gadi) platības Eiropā pakāpeniski pieaug, īpaši pēdējās trīs desmitgadēs (Vilén et al., 2012) (1. att.).



### 1. attēls. Veco mežu (>120 gadi) platību izmaiņas Eiropā no 1950.-2010.gadam

Kartē izmantota režģa šūnu vienības no 0-1, līdz >5, kur vienība ir 1000 ha.

(attēls sagatavots pēc Vilén et al., 2012)

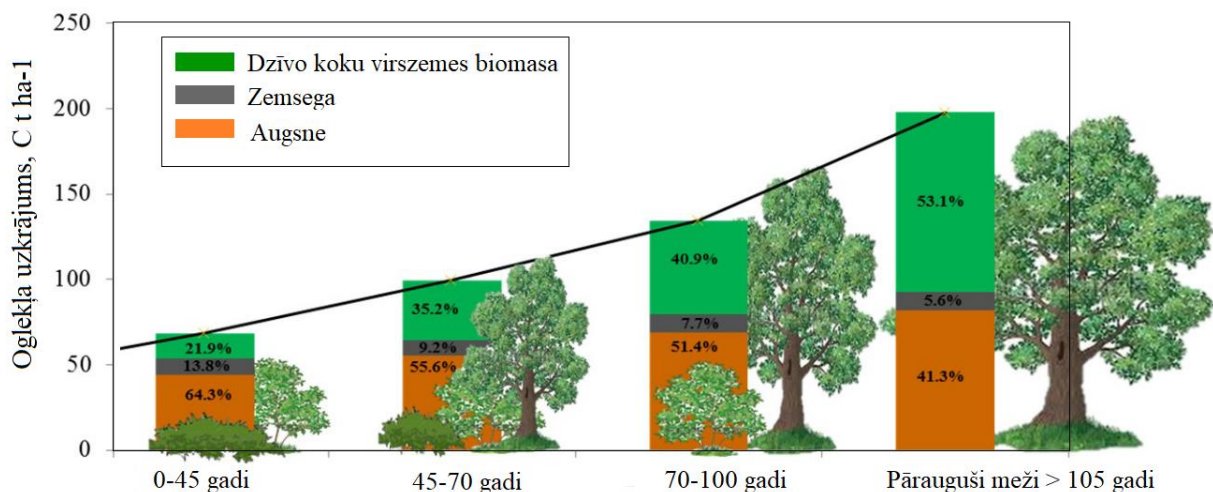
Aprakstītās likumsakarības liecina, ka veco mežu platība Eiropā turpinās pieaugt, līdz ar to palielinoties arī nepieciešamībai pēc datiem oglekļa uzkrājuma raksturošanai šajās platībās.

## 1.3. Oglekļa uzkrājums vecajās audzēs

### 1.3.1. Oglekļa uzkrājuma dinamika un krātuves

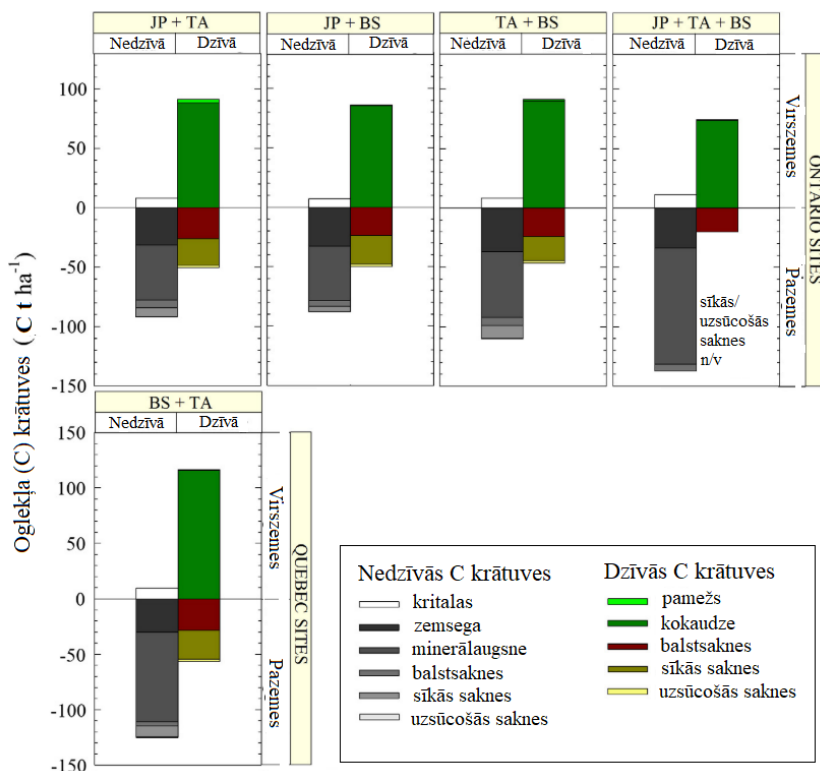
Kopējo ekosistēmas oglekļa uzkrājumu (*carbon stock, carbon storage*) veido dažādas oglekļa krātuves (*carbon pools*): **dzīvo koku virszemes** (stumbrs, zari) un **pazemes** (sīkās saknes, pārējā pazemes biomasa) **biomasa**, **atmirusī koksne** (sausokņi, stumbeņi, kritalas), **augsne** un **zemsega**, kā arī zemsedzes augi. Oglekļa krātuvju lielums ir atkarīgs no klimatiskās joslas, valdošās koku sugas, augšanas apstākļiem (augšnes, mitruma režīma u.c.), un to ietvaros - no mežaudzes attīstības stadijas (Jacob et al., 2013).

Latvijā (hemiboreālajos mežos) veiktie pētījumi liecina, ka vidēji gandrīz 60% no kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājuma pāraugušās (*old-growth*) priedes mežaudzēs veido dzīvā koku biomasa. Minerālaugsne ir otra lielākā oglekļa krātuve (31% no kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājuma), kam seko atmirusī koksne (5%) un nedzīvā zemsega (5%) (Ķēniņa et al., 2019a). Vienlaikus individuālos parauglaukumos novērojamas arī ļoti nozīmīgas atšķirības no šiem vidējiem rādītājiem. Tas apliecina, ka ir vajadzīga ievērojama empīriskā materiāla bāze pamatotu secinājumu izdarīšanai par oglekļa uzkrājumu vecajās audzēs. Līdzīgs procentuālais sadalījums starp oglekļa krātuvēm konstatēts Vidusjūras mežos Itālijā veiktajā hronosekvences pētījumā - dzīvo koku virszemes biomasa (53%) un augšne (41%) veido lielāko oglekļa uzkrājumu vecās ozola (*Quercus ilex*) mežaudzēs (2. att.) (Badalamenti et al., 2019). Kopumā, pieaugot audzes vecumam, oglekļa uzkrājums dzīvo koku virszemes daļā no kopējā oglekļa uzkrājuma konsekventi palielinās no 21% līdz 53%, bet augsnē - samazinās no 64% uz 41%, ņemot vērā nozīmīgo koku biomasas pieaugumu (Badalamenti et al., 2019).



2. attēls. Oglekļa uzkrājuma procentuālā variācija dažādos audzes attīstības posmos (attēls sagatavots pēc Badalamenti et al., 2019)

Arī Kanādas boreālajos mežos pieaugušās (*mature stands*) mistrotās audzēs (*Pinus banksiana*, *Populus tremuloides*, *Picea mariana*) (3. att.) dzīvo koku biomasā ir 56% no kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājuma, minerālaugsnē 33%, zemsegā 14%, bet atmirušajā koksnē 9% (3. att.) (Laganière et al., 2015).



3. attēls. Oglekļa sadalījums pa krātuvēm mistrotās mežaudzēs divos Kanādas boreālo mežu reģionos

Koku sugu mistrojuma esošās koku sugas (piem. JP+TA): JP – *Pinus banksiana*, TA – *Populus tremuloides*, BS – *Picea mariana*.

(attēls sagatavots pēc Laganière et al., 2015)

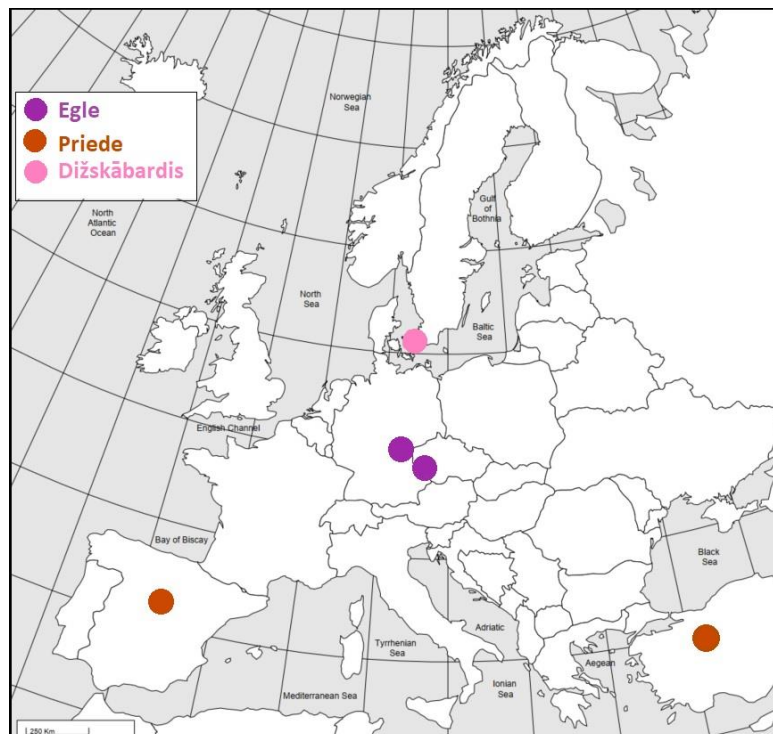
Veco mežu loma klimata pārmaiņu mazināšanā ir neskaidra, galvenokārt, empīrisko datu trūkuma dēļ. Šis ir viens no iemesliem, kas sarežģī klimata (un saistītajās) politikā nepieciešamo līdzsvara nodrošināšanu starp dažādiem ekosistēmas pakalpojumiem, radot iespējami lielāko kopējo ieguvumu sabiedrībai (Kēniņa et al., 2019a). Atsevišķos pētījumos secināts, ka veci meži ir oglekļa neitrāli (Gower, 1997), citos pētījumos par atsevišķām audzēm dažādās mežu zonās – ka vecās mežaudzes ir stabila oglekļa krātuve vai pieaugoša oglekļa krātuve (atmiruma sadalīšanās ir lēnāka, kā primārā produktivitāte). Ziemeļamerikā, modelējot oglekļa uzkrājuma dinamiku pieaugušās (60 gadi ( $274 \text{ C t ha}^{-1}$ )) un pāraugušās (450 gadi ( $612 \text{ C t ha}^{-1}$ )) duglāzijas (*Pseudotsuga sp.*) audzēs, kā arī priedes un baltegles mistraudzēs (*Pinus albicaulis*, *Abies lasiocarpa*) vecumā no 67 līdz 458 gadiem, secināts, ka pāraugušās audzēs ir nozīmīgs oglekļa uzkrājums, un, kaut arī primārā produktivitāte ir ievērojami kritusies, tā ir pozitīva, jo notiek nepārtrauktas izmaiņas audzes struktūrā (Harmon et al., 1990; Carey et al., 2001). Plašākā literatūras pārskatā un meta analizē, iekļaujot informāciju par mērenās joslas mežos un boreālajiem mežiem, audzēm no 15 līdz 800 gadu vecumam, arī secināts, ka pārauguši meži (*old-growth forests*) saglabā pozitīvu primāro produktivitāti - koki turpina piesaistīt oglekli, nevis darbojas kā CO<sub>2</sub> emisiju avoti; lai gan boreālajos mežos nozīmīgākais pieaugums ir ap 100 gadu vecumu (80-100 gadiem) (Luyssaert et al., 2008). Tas sakrīt ar Framstad et al. (2013) veikto literatūras analīzi boreālajos mežos, kur secināts, ka individuālu koku bojāeja dabisko traucējumu rezultātā nav tik būtiska, kā oglekļa piesaistes pozitīvais nodrošinājums dabiskās sukcesijas (audzes strukturālās izmaiņas) procesā, īpaši tādēļ ka, lai arī oglekļa piesaistes ātrums samazinās līdz ar vecumu, tā turpinās vismaz dažus gadu simtus, sasniedzot CO<sub>2</sub> piesaistes un tā emisiju neitralitāti ievērojamā audzes vecumā (vairāk nekā 400–600 gadi Ziemeļamerikas boreālajos mežos *Pinus sp* sugām) (Framstad et al., 2013).

Kopumā var secināt, ka kopējais ekosistēmas oglekļa uzkrājums zināmu laika periodu pieaug, pieaugot audzes vecumam, un ir cieši saistīts ar audzes produktivitāti un dabisko traucējumu ietekmi audzē (Luyssaert et al., 2008). Boreālajos mežos Kanādas mistrotās audzēs (*Pinus banksiana*, *Populus tremuloides*, *Picea mariana*, *Betula papyrifera*) veiktā hronosekvences pētījumā secināts, ka oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā pēc ugunsgrēkiem pieaug no 0 līdz  $288 \text{ C t ha}^{-1}$  līdz 92 gadu vecumam, sasniedzot arī maksimālo ekosistēmas produktivitāti ( $1,9 \text{ C t ha}^{-1}$  gadā). Pēc šī posma piesaistītais oglekļa daudzums samazinājās; ekosistēmas neto produktivitāte kļuva negatīva līdz 140 gadu vecumam ( $-0,5 \text{ C t ha}^{-1}$  gadā<sup>-1</sup>) un turpināja samazināties līdz 203 gadu vecumam ( $-0,7 \text{ C t ha}^{-1}$  gadā<sup>-1</sup>), kad konstatēts oglekļa uzkrājums  $70 \text{ C t ha}^{-1}$  (Seedre & Chen, 2010; Taylor et al., 2014). Tātad meža ekosistēmas produktivitāte, kas ir starpība starp kopējo oglekļa piesaisti (*carbon sequestration*) no atmosfēras un kopējo atmosfērā atgrieztā oglekļa daudzumu (*carbon emissions*), var būt gan pozitīva (t.i., ekosistēma var piesaistīt oglekli), gan negatīva (t.i., emitēt to). Jāņem vērā, ka oglekļa bilance (*carbon budget*) var būt gan pozitīva, gan negatīva, un tā dinamiski mainās atkarībā no audzes produktivitātes un dabisko traucējumu ietekmes.

Pēc ugunsgrēka vai kailcirtes var paiet pat līdz 30 gadiem (atkarībā no klimata zonas, augsnes auglības, valdošās koku sugas u.c. faktoriem), kamēr mežaudze ar negatīvu ekosistēmas produktivitāti (t.i., negatīvu oglekļa bilanci, *carbon source*) atkal kļūst par mežu ar pozitīvu ekosistēmas produktivitāti (t.i., pozitīvu oglekļa bilanci, *carbon sink*) (Taylor et al., 2014), kamēr vecs mežs (*old-growth forest*) saglabā pozitīvu oglekļa bilanci pat līdz 250 gadu vecumam (Framstad et al., 2013). Tomēr, tā kā pozitīvā piesaistītā un emitētā CO<sub>2</sub> bilance ar vecumu samazinās, ar laiku audzes kļūst par CO<sub>2</sub> emisijas avotu, tikai ievērojami vēlāk, ne kā sākotnēji pieņemts (Pukkala, 2017). Šī sakarība šķiet universāla, bet konkrētais laiks, kad audze kļūst par emisiju avotu, atkarīgs no jau pieminētā dabisko traucējumu režīma, kā arī klimata, augsnes, valdošās koku sugas. Piemēram, Igaunijā analizēta oglekļa bilance 12 līdz 78 gadus vecās purva

bērza (*Betula pubescens*) audzēs, secinot, ka, pieaugot audzes vecumam, bērza audzes mainās no oglekļa piesaistītāja (*carbon sink*) uz neizteiktu oglekļa emisijas avotu (*carbon source*), jau 78 gadu vecumā emitējot 0,95 C t ha<sup>-1</sup> gadā (Uri et al., 2017).

Eiropā, neskatoties uz veco mežu lomas uzsvēršanu dažādu ekosistēmas pakalpojumu nodrošināšanā, līdz šim veikts maz pētījumu par kopējo ekosistēmas oglekļa uzkrājumu tajos; tanī pat laikā jau plānojot stiprināt veco mežu lomu klimata politikas kontekstā. Vēl jo vairāk, **Ziemeļeiropā – hemiboreālajos un boreālajos mežos, kur atrodas nozīmīgi meža resursi Eiropas līmenī, nav visaptverošu zinātnisku pētījumu par oglekļa uzkrājumu pāraugušās mežaudzēs.**



#### 4. attēls. Pētījumi par oglekļa uzkrājumu pāraugušās audzēs Eiropā

Literatūras analizē izmantoti pētījumi par dažādām koku sugām, tomēr kartē parādīti tie pētījumi par koku sugām, kas sastopamas Latvijas apstākļos un kuros analizētas vairāk nekā 1-2 vecās audzes.

Parastā egļu (*Picea abies*) līdz šim pētīta Centrāleiropas kalnu reģionos - Čehijas (116-145 gadi) (Seedre et al., 2015) un Vācijas kalnos (Jacob et al., 2013), arī vienā hronosekvences pētījumā (16-142 gadi) (Mund et al., 2002) (4. att.). Viena 140 gadus veca parastās egles (5E3P2B) mistraudze pētīta arī Somijā, analizējot ne tikai oglekļa, bet arī slāpekļa krātuves (Finér et al., 2003). Zemākais kopējais ekosistēmas oglekļa uzkrājums (175 C t ha<sup>-1</sup>) fiksēts boreālajos mežos (Finér et al., 2003), vidēji augsts uzkrājums – hemiboreālajos mežos (240 C t ha<sup>-1</sup>; Ķēniņa et al., 2018b), bet lielākie oglekļa uzkrājumi (>400 C t ha<sup>-1</sup>) konstatēti Centrāleiropas kalnu reģiona vecajās parastās egles mežaudzēs (Jacob et al., 2013; Seedre et al., 2015). Dānijā ir veikts viens ilglaicīgais pētījums mistrotās pāraugušās (*semi-natural*) parastā dižskābarža (*Fagus sylvatica*) un parastā ozola (*Quercus robur*) audzēs (30-142 gadi), kurās konstatēta minimāla cilvēka darbība pēdējos 200 gadus – līdzīgā vecumā, kā mūsu pētījumos pāraugušās lapu koku mežaudzēs Latvijā. Secināts, ka vecie parastā dižskābarža meži ir liela un stabila oglekļa krātuve (kopējais ekosistēmas oglekļa uzkrājums vidēji 395 C t ha<sup>-1</sup>), bet šādi veci meži ir nebūtiski oglekļa piesaistītāji (Nord-Larsen et al., 2019).

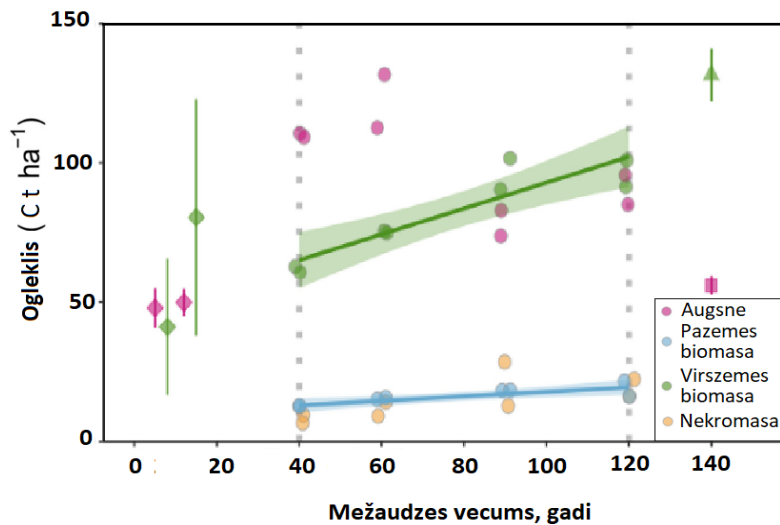
Pavisam maz ir pētīts oglekļa uzkrājums vecās parastās priedes (*Pinus sylvestris*) mežaudzēs, kas ir viena no izplatītākajām koku sugām Ziemeļeiropā. Oglekļa uzkrājuma dinamika mežaudzes aprites ciklā (10-120 gadi) analizēta vecos kalnu priedes mežos Spānijā (Moreno-Fernández et al., 2015) un Turcijā (8-177 gadi; Lee et al., 2016), apliecinot, ka uzkrājums ir tieši atkarīgs no audzes vecuma. Pētījumā par ģeogrāfiskā platuma ietekmi uz oglekļa uzkrājumu (nelielā audžu kopā) ir analizēti priežu meži, sākot no Polijas dienvidiem līdz Somijas ziemeļiem, konstatējot, ka oglekļa uzkrājums ir tieši atkarīgs ne tikai no koku sugas un vecuma (66 līdz 178 gadi), bet arī ģeogrāfiskā platuma (Vucetich et al., 2000). Šī pētījuma rezultāti sakrīt ar iegūtajiem datiem par parastās egles mežaudzēm, salīdzinot oglekļa uzkrājumus Eiropas centrālajos rajonos ar hemiboreālajiem un boreālajiem mežiem pašos Somijas ziemeļos.

Tādēļ Latvijā izstrādātais pētījums par uzkrātā oglekļa apjomu pāraugušās parastās priedes un parastās egles mežaudzēs uzskatāms par ļoti nozīmīgu Eiropas mērogā, un pat unikālu, jo iegūti dati arī par pāraugušām kārpainā bērza (*Betula pendula*) un parastās apses (*Populus tremula*) mežaudzēm (skatīt rezultātus). Tas rada iespēju veidot pamatotu izpratni par oglekļa uzkrājumu un piesaisti vecajās (pāraugušajās) mežaudzēs, kurās vecie koki ir dominējošais meža elements. Nozīmīgi, ka šādās audzēs konstatētās sakarības būs atkarīgas arī no koku vidējā dabiskā mūža ilguma konkrētajā valdošās koku sugas mežaudzē. Vērtējot vecumstruktūru vecās mežaudzēs Somijā, konstatēts, ka bērzs var sasniegt pat 162 gadu vecumu, bet apsēm vecumu nebija iespējams noteikt trapes radīto bojājumu dēļ (Kuuluvainen et al., 2002). Arī Latvijā veiktajā pētījumā vecākā atrastā bērza mežaudze bija 148 gadus veca. Kokaudžu dabisko mūža ilgumu ietekmē ne tikai vidējais vai potenciālais koku dabiskais vecums, bet arī dabiskie traucējumi: vecākās mežaudzēs samazinās koku noturība, kā arī pieaug kumulatīvā traucējuma varbūtība (Jōgiste et al., 2017). Nav pieejami salīdzināmi dati par oglekļa uzkrājumu neapsaimniekotos mežos, izvērtējot dabisko traucējumu ietekmi un ar to saistīto atmirušās koksnes dinamiku (Šēnhofa et al., 2020), kā arī daudzveidīgās audžu strukturālas atšķirības (atšķirīgs vecuma sadalījums un sugu mistrojums), kas saistītas arī ar nepārtrauktu atjaunošanos (Carey et al., 2001). Sukcesija pēc dabisko traucējumu ietekmes dažādām audzēm var būt ļoti atšķirīga. Tā atkarīga no dabiskā traucējuma parametriem:

- 1) aptvertā platība (*area extent*) – traucētās (ietekmētās) platības izmēri;
- 2) traucējuma nozīmīgums (*magnitude*), ko raksturo tā intensitāte (*intensity*) – traucējošā aģenta spēks (vēja ātrums u. tml.) un smagums (*severity*) – traucējošā aģenta nodarītais bojājums;
- 3) frekvence (*frequency*) – traucējumu skaits laika vienībā, izdalot, pirmkārt, frekvence nejaušā punktā (*random point*) – vidējais traucējumu skaits laika vienībā reģiona nejaušā punktā - atgriešanās intervāls (*return interval*) un, otrkārt, reģionālā frekvence (*regional*) – kopējais traucējums laika vienībā reģionā;
- 4) prognozējamība (*predictability*) – vidējā laika posma garuma starp diviem traucējumiem mainība;
- 5) rotācijas periods (*turnover period*) – vidējais laiks, kas nepieciešams, lai traucējums skartu visu apskatāmo platību (Sousa, 1984).

Tāpat būtiska loma ir tam, kādi traucējumi audzē ir bijuši iepriekš, veidojot audzes “atmiņas kodu” (*ecosystem legacies*) un tādējādi nodrošinot audzes spēju pielāgoties (Jōgiste et al., 2017; Jōgiste et al., 2018). Tas, iespējams, izskaidro, kāpēc pāraugušās audzes ir tik ļoti dažādas un to, cik atšķirīgi vecos kokus nomaina jauni koki pēc dabisko traucējumu, kā vētras vai meža ugunsgrēki, ietekmes (Baders et al., 2017; Donis et al., 2017; Donis et al., 2018; Jōgiste et al., 2018).

Pētījumos secināts, ka oglekļa uzkrājums mežā palielinās, pieaugot audzes vecumam, sekojot koku augšanas gaitai līdz noteiktam laika periodam, kad sākas vecās kokaudzes nomaina (5. att.).

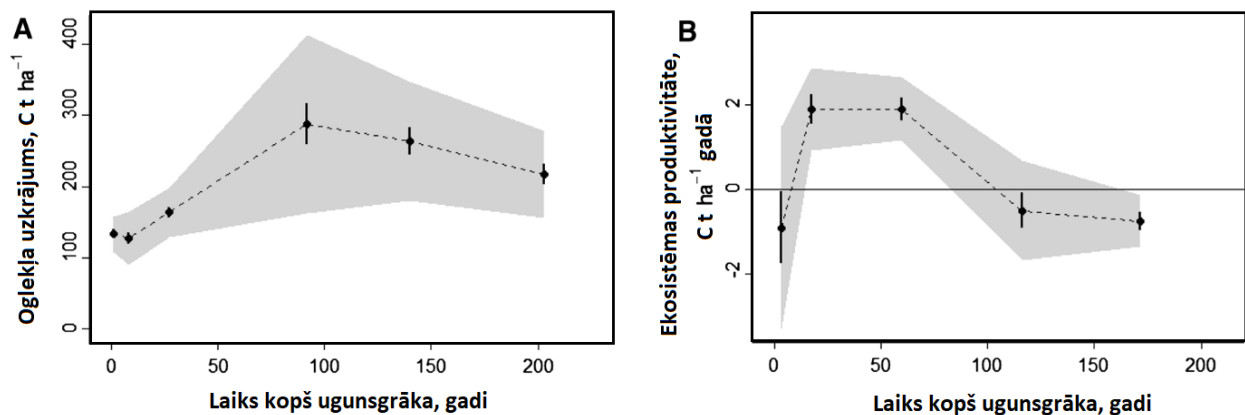


**5. attēls. Oglekļa uzkrājuma izmaiņas tropu lietus mežos atkarībā no audzes vecuma (0-120 gadi) ± 95% C.I.**

(attēls sagatavots pēc Jones et al., 2019)

Šāda likumsakarība saglabājas pie nosacījuma, ja oglekļa uzkrājums netiek būtiski samazināts dabisko traucējumu vai mežizstrādes ietekmē, vai arī pasliktinoties meža vitalitātei.

Boreālajos mežos Kanādā hronosekvences pētījumā konstatēts, ka uzreiz pēc ugunsgrēkiem (kas izraisījis pilnīgu audzes bojāeju) mežaudzes neto produktivitāte ir negatīva (strauji samazinās uzkrājums lielajos koks un to nespēj kompensēt uzkrājuma sējeņu biomasā), bet 30 gadu vecumā tiek sasniegta pozitīva neto ekosistēmas produktivitāte (6. att.). Pēc tam kopējais ekosistēmas oglekļa uzkrājums mežaudzē strauji pieaug un sasniedz maksimumu 92 gadu vecumā ( $288 \text{ C t ha}^{-1}$ ), bet pēc kā ekosistēmas neto produktivitāte atkal samazinās un arī kopējais ekosistēmas oglekļa uzkrājums sarūk ( $217 \text{ C t ha}^{-1}$  203 gadu vecumā) (6. att.) (Taylor et al., 2014). Tas sakrīt ar citos pētījumos iegūtajiem rezultātiem, ka līdz ar vecumu pozitīvā piesaistītā un emitētā  $\text{CO}_2$  bilance samazinās un audzes var atkal kļūt par  $\text{CO}_2$  emisijas avotu – tikai ievērojami vēlāk, kā sākotnēji tika pieņemts (Pukkala, 2017).



**6. attēls. Ekosistēmā piesaistītais oglekļa daudzums (A) un ekosistēmas neto produktivitāte (B) atkarībā no laika kopš pēdējā ugunsgrēka**

Simboli un vertikālā līnija norāda vidējo vērtību un tās standartkļūdu, pelēkais lauks norāda 95% ticamības intervālu.

(attēls sagatavots pēc Taylor et al., 2014)



Audzės vecums ir ļoti nozīmīgs faktors, kas būtiski ietekmē oglekļa uzkrājumu – to apliecina daudzas zinātniskas publikācijas (Carey et al., 2001; Pregitzer & Euskirchen, 2004; Wei et al., 2013; Lee et al., 2016; Yuan et al., 2016; Zhu et al., 2017; Martin et al., 2018). Jaunākās audzēs koku dimensijas un koku krāja ir mazāka, attiecīgi arī uzkrātā oglekļa apjoms koksne ir mazāks, kaut arī tā pieaugums ir daudz straujāks. Kokiem augot, arī uzkrātā oglekļa apjoms pieaug un stabilizējas pieaugušās audzēs (līdz 100 gadu vecumam) (Uri et al., 2019). Savukārt vecos mežos oglekļa uzkrājuma pieauguma apjoms jeb produktivitāte ir salīdzinoši mazāka (Pregitzer & Euskirchen, 2004). Atsevišķos gadījumos audzēs, kas pārsniedz noteiktu vecumu, sāk sabrukt un tās var kļūt par SEG emisiju avotu. Vecās audzēs ir raksturīgs arī lielāks atmirušās koksnes daudzums, kas maina oglekļa krātuvju īpatsvaru.

Boreālajos mežos lapu koku audzēs (bērzi, apse, baltalksnis) vecumā no 42 līdz 117 gadiem mežaudzēs vecuma un augstuma korelācija ir tikpat cieša, kā mežaudzēs vecuma un caurmēra korelācija (Kuuluvainen et al., 2002). Savukārt skujkoku (priede audzēs vecumā no 152 līdz 245 gadiem, egle audzēs vecumā no 61 līdz 173 gadiem) grupā konstatēja, ka vecuma un augstuma korelācija ir negatīva, bet vecuma un caurmēra korelācija ir pozitīva. Tika secināts, ka, pārsniedzot konkrētu vecuma sliekšni, skujkokiem vēl joprojām vērojams caurmēra pieaugums, taču, pretēji tam, augstuma pieaugums ir nenozīmīgs vai vispār netiek fiksēts (Kuuluvainen et al., 2002).

### 1.3.2. Atmirušajā koksne uzkrātā oglekļa apjoms mežos

Atmirusī koksne ir dinamiska oglekļa krātuve – paildzinot oglekļa saglabāšanas laiku koksne pēc koka nokalšanas un pakāpeniski to emitējot sadalīšanās procesā (Mäkinen et al., 2006; Šēnhofa et al., 2020). Atmiruma veidošanos ietekmē ne tikai dabisko traucējumu režīms audzē, bet arī sugu sastāvs, audzēs biezums, vecums, kā arī saimnieciskā darbība ne tikai audzē, bet arī blakus mežaudzēs (t.i., kopšanas circes, galvenā cirte) (Nilsson et al., 2002; Yatskov et al., 2003; Nord-Larsen et al., 2019). Tāpat atmirušās koksnes apjoms un tā dinamika audzē ir atkarīga no klimatiskajiem apstākļiem un meža tipa (Yatskov et al., 2003; Šēnhofa et al., 2020). Sausokņu, stumbeņu un kritalu veidošanos nosaka tādu dabisko traucējumu kā sausuma, vēja, uguns, dendrofāgo kukaiņu, patogēnu u.c. bojājumi, koku savstarpējā konkurence; taču primāri – veco koku apjoms audzē atmiruma veidošanai (Pregitzer & Euskirchen, 2004; Oberle et al., 2018; Nord-Larsen et al., 2019).

Pēdējās desmitgadēs interese par oglekļa uzkrājumu nedzīvajā koksne pieaug, jo atmirusī koksne ir nozīmīga ne tikai bioloģiskās daudzveidības kontekstā mežā, bet arī kā oglekļa krātuve (Yatskov et al., 2003; Mäkinen et al., 2006; Worrall & Fairweather, 2009; Di Cosmo et al., 2013; Köster et al., 2015; Stakēnas et al., 2020; Šēnhofa et al., 2020). Kanādas boreālajos mežos melnās egles (*Picea mariana*) un balzama baltegles (*Abies balsamea*) neapsaimniekotajos mežos (*old-growth forests*) vecumā no 37 līdz 242 gadiem (vidēji 118 gadi) konstatēta neviendabīga vecumstruktūra un atmiruma apjoms, kas saistīti ar vēja, slimību un dendrofāgo kukaiņu, kā arī koku fizioloģisko procesu un šo faktoru mijiedarbības telpā un laikā heterogenu ietekmi (Ruel & Gardiner, 2019). Vecās audzēs veidojas liels atmirušās koksnes apjoms, jo resnākajiem kokiem novēro augstu mirstību (kokiem ar caurmēru 28 cm izdzīvošanas varbūtība ir 0,89-0,93, un tā samazinās kokiem, kam apkārt veikta ciršana pēdējo 10 gadu laikā), tomēr vēja bojājumi tieši ietekmē tikai daļu no gadījumiem, kad notiek koku atmiršana (Ruel & Gardiner, 2019). To apliecina arī lielais sausstāvošo koku (stumbeņi un sausokņi) apjoms neapsaimniekotajās mežaudzēs (Ruel & Gardiner, 2019). Secināts, ka šādā vecā mežā kopējo atmiruma apjomu ir iespējams samērā labi prognozēt, bet konkrēto atmiruma veidu prognozēt ir grūtāk, jo to nosaka individuālie koka parametri, īpaši vecās, dažāda vecuma audzēs (Ruel & Gardiner, 2019).

Kopumā pāraugušās mežaudzēs veidojas lielāks atmirums, salīdzinot ar pieaugušām audzēm, jo tajās ir ierobežota koku ciršana (Parisi et al., 2018). Dānijā vecās platlapju (parastā dižskābarža un parastā ozola) mistraudzēs oglekļa uzkrājums atmirušajā koksne sastāda vidēji  $35 \text{ C t ha}^{-1}$ . Laika periodā no 2002. līdz 2012. gadam atmirušās koksnes apjoms, līdz ar to arī tās oglekļa krātuve pieaugusi par 37%, bet ekosistēmas produktivitāte (*net ecosystem productivity*) ir tuvu nullei pāraugušās parastā dižskābarža audzēs. Tomēr atmirusi koksne vēl joprojām ir liela un stabila oglekļa krātuve (Nord-Larsen et al., 2019).

Hemiboreālajos neapsaimniekotos mežos ne vienmēr veidojas liels atmirušās koksnes apjoms, kas apliecina nepieciešamību veikt papildus pētījumus, lai iegūtu padziļinātu izpratni par atmiruma veidošanās cēloņiem. Lielie sausstāvošie koki samērā ilgu laiku turpina saglabāties vertikāli audzē (pat 40 gadus), jo to sadalīšanās ātrums ir lēnāks kā kritālām (izņemot mīkstos lapu kokus) (Mäkinen et al., 2006; Parisi et al., 2018; Šēnhofa et al., 2020), nodrošinot stabilu mikroklimatu dažādām retām organismu sugām (Pouska et al., 2010) un ilgstoši saglabājot daļu no koka dzīves laikā uzkrātā oglekļa.

Koksnes sadalīšanos galvenokārt ietekmē apkārtējā vide – gaisa temperatūra, mitrums, kā arī biotiskie faktori (sēnes, kukaiņi) un koksnes īpašības – koku suga, koksnes ķīmiskais sastāvs, koku dimensijas, kā arī koksnes novietojums – saskare ar zemsegu, zemsedzi un augsni (Yatskov et al., 2003; Ruel & Gardiner, 2019). Sadaloties koksnei (palielinoties sadalīšanās pakāpei), mazinās arī tās oglekļa uzkrājums: notiek oglekļa emitēšana, samazinoties koksnes blīvumam. No oglekļa uzkrājuma palielināšanas viedokļa būtiski izvērtēt, vai tas atmosfērā  $\text{CO}_2$  formā nonāks atpakaļ ātrāk, glabājoties sausajos kokos mežā, vai arī izmantojot kokus konkrētu produktu (ar noteiktu dzīves cikla garumu) ražošanā. Šādam salīdzinājumam nozīmīga arī informācija par oglekļa koncentrāciju dažādās sadalīšanās pakāpēs dažādu sugu atmirušajā koksne, un koksnes sadalīšanās (blīvuma izmaiņu) laiku. Pasaulē izmanto dažādas skalas sadalīšanās pakāpes vērtēšanai, izdalot pārsvarā trīs līdz piecas sadalīšanās pakāpes.

Kopumā SEG inventarizācijas aprēķinos izmantotais oglekļa satura rādītājs gan dzīvo koku biomasai, gan atmirušajai koksnei ir 50% lielā daļā Eiropas valstu (Neumann et al., 2016). Taču atmirušās koksnes blīvums un oglekļa koncentrācija ir atkarīga no koku sugas un sadalīšanās pakāpes, kā arī klimata, kurā notiek sadalīšanās (mainot sadalīšanās ātrumu). Lai precīzāk raksturotu oglekļa uzkrājumu atmirušajā koksne hemiboreālajos mežos Baltijas valstu reģionā, vākti un analizēti dati par galvenajām koku sugām – parastā priede, parastā egle, parastā apse, kārpainais bērzs, baltalksnis (*Alnus incana*), melnalksnis (*Alnus glutinosa*) (Lietuvā ievākti dati arī par parasto ozolu un parasto osi (*Fraxinus excelsior*) (1. tab.) (Köster et al., 2015; Ķēniņa et al., 2019b, Stakėnas et al., 2020). Mūsu valstī ievākto paraugu apjoms ir mazāks, nekā Igaunijā, bet konstatētās sakarības līdzīgas.

1. tabula. Atmirušās koksnes blīvums un oglekļa koncentrācijas galvenajām koku sugām pa sadalīšanās pakāpēm Baltijas valstu hemiboreālo mežu reģionā

(Igaunija - Köster et al., 2015; Latvija - Ķēniņa et al., 2019b, Lietuva- Stakėnas et al., 2020)

Sadalīšanās pakāpe	Igaunija		Lietuva		Latvija
	Blīvums (kg m <sup>-3</sup> )	Oglekļa koncentrācija (%)	Blīvums (kg m <sup>-3</sup> )	Oglekļa koncentrācija (%)	Oglekļa koncentrācija (%)
<b>Parastā priede (<i>Pinus sylvestris</i>)</b>					
1	381,1 (±15,7)	49,03 (±0,42)	410 (±0,10)	48,27 (± 0,79)	47,91 (± 1,12)
2	337,2 (±16,5)	49,26 (±0,29)	380 (±0,20)	49,46 (± 0,67)	47,92 (± 1,34)
3	258,8 (±28,1)	49,56 (±0,48)	330 (±0,20)	50,27 (± 0,97)	48,75 (± 0,81)
4	233,7 (±29,6)	49,58 (±0,38)	200 (±0,20)	53,66 (± 1,33)	53,14 (± 1,56)
5	141,8 (±13,6)	50,21 (±0,83)	110 (±0,10)	54,06 (± 0,92)	53,19 (± 1,65)
<b>Parastā egle (<i>Picea abies</i>)</b>					
1	410,7 (±25,2)	48,35 (±0,09)	390 (±0,10)	47,31 (± 0,86)	43,53 (± 1,60)
2	354,2 (±17,9)	48,31 (±0,07)	380 (±0,20)	48,16 (± 0,64)	45,45 (± 1,21)
3	280,7 (±9,8)	47,93 (±0,25)	320 (±0,10)	49,30 (± 0,90)	46,98 (± 0,95)
4	191,3 (±12,6)	49,60 (±0,71)	200 (±0,10)	49,47 (± 0,77)	48,06 (± 1,06)
5	124,8 (±10,5)	51,33 (±0,77)	110 (±0,10)	50,60 (± 1,24)	47,77 (± 1,89)
<b>Bērzs (<i>Betula pendula</i>, <i>Betula pubescens</i>)</b>					
1	466,6 (±21,6)	47,16 (±0,22)	530 (±0,20)	47,18 (± 1,14)	44,76 (± 1,44)
2	326,5 (±17,1)	47,69 (±0,19)	500 (±0,20)	47,30 (± 0,63)	44,62 (± 1,62)
3	230,0 (±19,5)	47,45 (±0,28)	380 (±0,10)	47,45 (± 0,83)	44,82 (± 1,71)
4	175,9 (±26,3)	48,80 (±0,54)	240 (±0,20)	49,87 (± 1,02)	47,39 (± 0,90)
5	112,1 (±20,8)	50,12 (±1,19)	120 (±0,10)	52,43 (± 1,09)	49,55 (± 1,11)
<b>Parastā apse (<i>Populus tremula</i>)</b>					
1	391,3 (±18,0)	47,19 (±0,16)	460 (±0,10)	46,88 (± 0,71)	42,49 (± 2,28)
2	330,6 (±21,2)	47,37 (±0,23)	390 (±0,20)	47,16 (± 0,66)	42,09 (± 2,19)
3	230,6 (±15,4)	47,38 (±0,51)	320 (±0,20)	46,72 (± 0,54)	-
4	161,1 (±46,9)	46,56 (±0,62)	150 (±0,20)	48,21 (± 0,88)	45,21 (± 1,35)
5	60,7 (±33,5)	46,31 (±0,86)	80 (±0,10)	50,98 (± 1,22)	41,73 (± 2,76)
<b>Baltalksnis (<i>Alnus incana</i>)</b>					
1	426,9 (±17,5)	48,02 (±0,20)	400 (±0,10)	47,46 (± 0,90)	
2	345,3 (±31,9)	48,07 (±0,14)	390 (±0,20)	47,48 (± 0,77)	
3	220,7 (±25,7)	48,71 (±0,38)	290 (±0,10)	47,30 (± 0,98)	
4	184,9 (±19,5)	47,95 (±0,27)	160 (±0,10)	49,11 (± 1,15)	
5	152,6 (±23,9)	48,04 (±0,60)	110 (±0,10)	50,24 (± 1,11)	
<b>Melnalksnis (<i>Alnus glutinosa</i>)</b>					
1	422,4 (±29,8)	47,98 (±0,16)	430 (±0,20)	47,35 (± 0,82)	
2	289,4 (±20,8)	48,24 (±0,13)	400 (±0,10)	48,83 (± 0,79)	
3	212,9 (±24,5)	48,07 (±0,15)	320 (±0,10)	47,66 (± 0,80)	
4	158,9 (±29,2)	48,35 (±0,42)	200 (±0,20)	48,29 (± 0,64)	
5	95,6 (±35,2)	48,11 (±0,45)	80 (±0,10)	49,95 (± 0,96)	

(±) standartnovirze

Baltijas valstīs veiktajos pētījumos, oglekļa koncentrācija variē atkarībā no sugas un sadalīšanās pakāpes no 42% līdz 54%. Visām sugām novērots, ka svaigi atmirušā koksne (1. un 2. sadalīšanās pakāpe) oglekļa koncentrācijas ir zemākas – no 42% līdz 48%, bet koksne, kurā notiek aktīvi sadalīšanās procesi (4. un 5. sadalīšanās pakāpes), oglekļa koncentrācijas ir augstākas – no 48% līdz 54%. Šādu sakarību gan nenovēro parastajai apsei Igaunijā un Latvijā. Iegūtie rezultāti apstiprina, ka Baltijas valstu hemiboreālajos mežos šobrīd pārvērtē oglekļa uzkrājumu atmirušajā koksne.

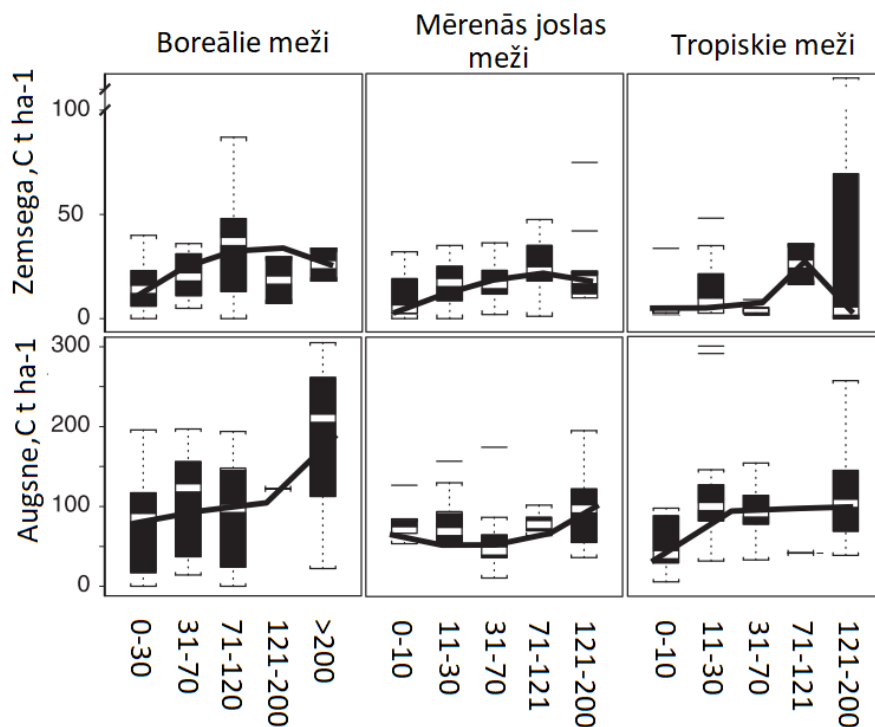
### 1.3.3. Augsnē un zemsegā uzkrātā oglekļa apjoms mežos

Augsne ir pati lielākā oglekļa krātuve sauszemes ekosistēmās (Liski et al. 1999; Davidson & Janssens 2006), piešķirot tai īpašu lomu klimata pārmaiņu mazināšanas kontekstā. Līdz ar klimata pārmaiņām un saimniecisko darbību, arī oglekļa uzkrājuma dinamika augsnē mainās, tomēr precīzu datu par šīm izmaiņām trūkst (Liski et al., 2002). Arī Eiropas līmenī veiktais augšņu monitorings ir fragmentēts nenodrošinot pilnīgu informāciju par oglekļa uzkrājumu. Mežā augsnes oglekļa uzkrājums un tā dinamika (novērtējot oglekļa koncentrācijas izmaiņas) ir maz pētīti, jo tas ir sarežģīts, dārgs un laikietilpīgs process (Liski et al., 2002; Lazdiņš & Lupiķis, 2019). Valstis, sagatavojot Ikgadējo SEG emisiju ziņojumu, izmanto vidējās vērtības oglekļa uzkrājumam augsnē, kas iegūtas citu valstu (atsevišķos) pētījumos, vai arī Klimata pārmaiņu starpvaldību padomes (IPCC) vadlīnijās noteiktās vērtības (Eggleston et al., 2006). Taču tas nerada precīzu priekšstatu par oglekļa uzkrājuma apjomu, jo neņem vērā augšņu izteikto heterogenitāti pat viena meža tipa ietvaros (Pregitzer & Euskirchen, 2004; Zhou et al., 2006; Laganière et al., 2015). Tāpat augsnē esošā oglekļa izmaiņu un to saistības ar veģetāciju un augsnes tipu (Liski et al., 2002) novērtēšanai izmanto modelēšanas rīkus, piemēram, Yasso (Didion et al., 2014). Tomēr ikviens modelis ir precīzs tikai tad, ja balstīs uz pilnvērtīgu (tām situācijām/apstākļiem, ko vēlas modelēt) datu kopu.

Augsnes ir ļoti dinamiska oglekļa krātuve, kurā liela daļa oglekļa atrodas nestabilos savienojumos, līdz ar to oglekļa saturs augsnē ir atkarīgs no oglekļa ieneses un pārejas atpakaļ atmosfērā caur augsnes elpošanu (Jandl et al., 2007). Augsnes oglekļa daudzums ir tieši atkarīgs no augsnes raksturlielumiem (augsnes slāņa biezums, tās vecums, ķīmiskais un mehāniskais sastāvs) un klimata, kas ietekmē oglekļa saturu augsnē, kā arī organisko vielu sadalīšanās ātrumu (Jandl et al., 2007; Lutter et al., 2018). Nobiras un sīko sakņu (kas galvenokārt izvietotas augsnes virsējos 10-20 cm) veidošanās un atmiršana nosaka oglekļa ienesi augsnē - nobiru slānim pieaugot, pieaug arī zemsegā uzkrātā oglekļa apjoms, bet sadalīšanās procesā daļa oglekļa organiskajos savienojumos paliek (ieskalojas) augsnē un tiek emitēts atpakaļ atmosfērā. Tādēļ likumsakarīgi, ka lielākā daļa organiskā oglekļa (izņemot organiskās augsnes) konstatējams zemsegā un augsnes virskārtā. Augsne nosaka koku augšanu, līdz ar to arī oglekļa uzkrājuma veidošanos, tomēr pieejami maz dati par oglekļa uzkrājuma dinamiku tajā tieši vecajās audzēs (mežos). Piemēram, vecos parastā dižskābarža mežos konstatēts, ka zemsegas oglekļa krātvē ir vidēji  $7 \pm 0,6 \text{ C t ha}^{-1}$ , bet augsnē (0-75 cm) vidēji  $114 \text{ C t ha}^{-1}$ . Dziļākie augsnes slāņi (50-75 cm;  $18 \text{ C t ha}^{-1}$ ) glabā mazāku apjomu oglekļa, salīdzinot ar seklākajiem augsnes slāņiem (0-10 cm;  $32 \text{ C t ha}^{-1}$ ) (Nord-Larsen et al., 2019).

Oglekļa uzkrājums nobirās (un pastarpināti augsnē) atkarīgs no audzes vecuma. Jaunaudzē (pēc atjaunošanas cirtes vai dabiskā traucējuma) koki veido relatīvi mazu nobiru apjomu, oglekļa uzkrājums zemsegā pieaug, pieaugot audzes vecumam, līdz brīdim, kad audze ir pilnībā nobriedusi un nobiru masa atkal veidojas mazāka, bet to sadalīšanās notiek tikpat ātri (Hansson et al., 2011). Tādēļ ir likumsakarīgi, ka boreālajos un mērenās joslas mežos oglekļa uzkrājuma maksimums zemsegā ir tad, kad visvairāk nobiru un tās mazāk iespējamas sadalīties – vecumā no 71 līdz 120

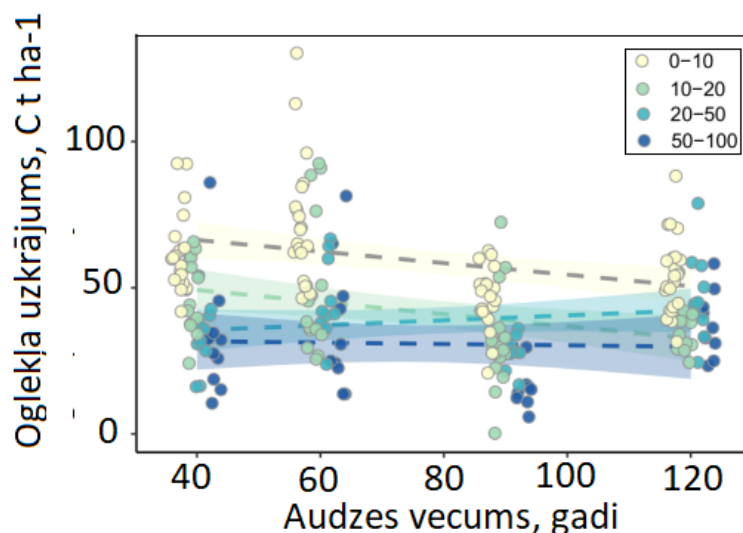
gadiem (Pregitzer & Euskirchen, 2004) (7. att.). Lielākais vidējais oglekļa uzkrājums visā rotācijas periodā konstatēts boreālajos mežos ( $152 \pm 175,2 \text{ C t ha}^{-1}$ ), bet mērenajā joslā un tropu zonā iegūtie rezultāti bija savstarpēji līdzīgi:  $82 \pm 39,5 \text{ C t ha}^{-1}$  un  $84 \pm 49,6 \text{ C t ha}^{-1}$ .



**7. attēls. Oglekļa uzkrājuma izmaiņas atkarībā no mežaudzes vecuma boreālajos, mērenās joslas un tropu mežos minerālaugsnes un organiskajās augsnēs**  
(attēls sagatavots pēc Pregitzer & Euskirchen, 2004)

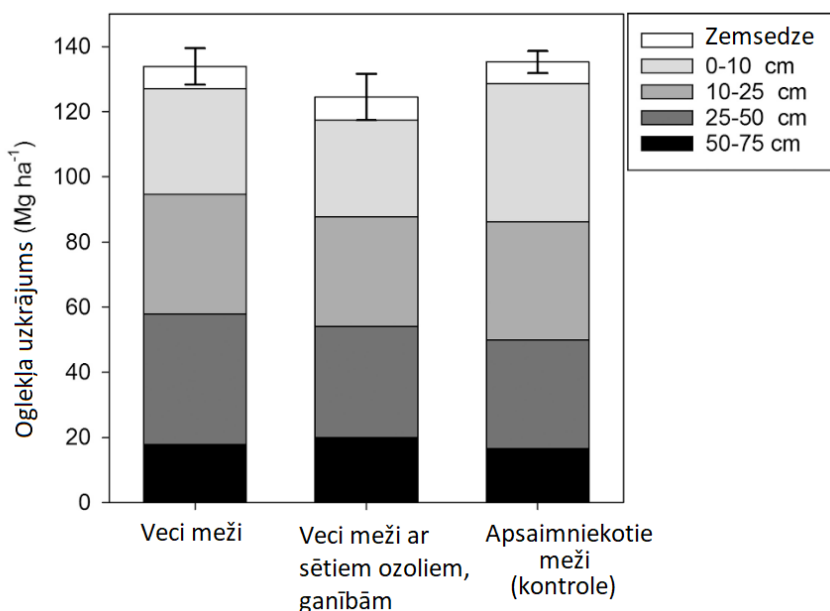
Iegūtie rezultāti ļauj secināt, ka oglekļa krātuves lielums gan zemsegā, gan augsnē ir stipri mainīgs starp klimata joslām, īpaši boreālajos mežos, kur notiek biežāka augšņu atdzišana un piesātināšanās ar ūdeni, kā arī dažādu apstākļu kopums konkrētajā vietā (t.i., augsnes auglība, meža tips, koku sugu sastāvs u.c.) var stipri izmainīt augsnes un zemsegas oglekļa krātuvju lielumu (Pregitzer & Euskirchen, 2004; Jandl et al., 2007). Lielā datu izkliede visās trīs mežu zonās pa vecuma grupām apliecina jau pieminēto augsto heterogenitāti augsnes un zemsegas oglekļa krātuvēs, tādēļ ir nepieciešams ievākt empīriskos datus nacionālā/lokālā līmenī, lai tos varētu izmantot modeļos, un izdarot pamatotus secinājumus par šo krātuvju lielumu un mainību konkrētajā teritorijā.

Vērtējot oglekļa uzkrājumu dažāda dziļuma augsnes slāņos (8. att.) tropu mežos, secināts, ka augsnē uzkrāto oglekļa apjomu neietekmē audzes vecums (Jones et al., 2019). Kopējais oglekļa uzkrājums augsnē (0-100 cm) ir līdzīgs gan 40 gadu (vidēji  $176,2 \text{ C t ha}^{-1}$ ), gan 120 gadu ( $175,6 \text{ C t ha}^{-1}$ ) vecās mežaudzēs (Jones et al., 2019). Tāpat secināts, ka augsnē uzkrātais ogleklis ļoti variēja starp pētāmajiem objektiem, izskaidrojot nebūtiskās atšķirības starp jaunākām un vecām mežaudzēm (8.att.).



**8. attēls. Oglekļa uzkrājums augsnes slāņos (0-10 cm; 10-20 cm; 20-50 cm; 50-100 cm) tropu lietus mežos atkarībā audzes vecuma**  
(attēls sagatavots pēc Jones et al., 2019)

Sakarības oglekļa uzkrājumam dažādā dziļumā augsnē un tā variācijas analizētas arī mērenās joslas mistrotā pāraugušā (*semi-natural*) parastā dižskābarža un parastā ozola audzēs (30-142 gadi) ar minimālu cilvēka saimniecisko darbību pēdējos 200 gados (9. att.). Vidējais oglekļa uzkrājums 0-10 cm dziļumā konstatēts 31,5 C t ha<sup>-1</sup>, 10-25 cm 35,8 C t ha<sup>-1</sup>, 25-50 cm 38,0 C t ha<sup>-1</sup>, bet 50-75 cm 18,5 C t ha<sup>-1</sup> (Nord-Larsen et al., 2019), kas absolūtās vērtībās ir mazāk nekā tropu mežos iegūtie rezultāti. Nav konstatētas statistiski būtiskas atšķirības kopējā oglekļa uzkrājumā augsnē starp veciem un apsaimniekotiemi mežiem (vidēji 82 gadi (30-142 gadi).

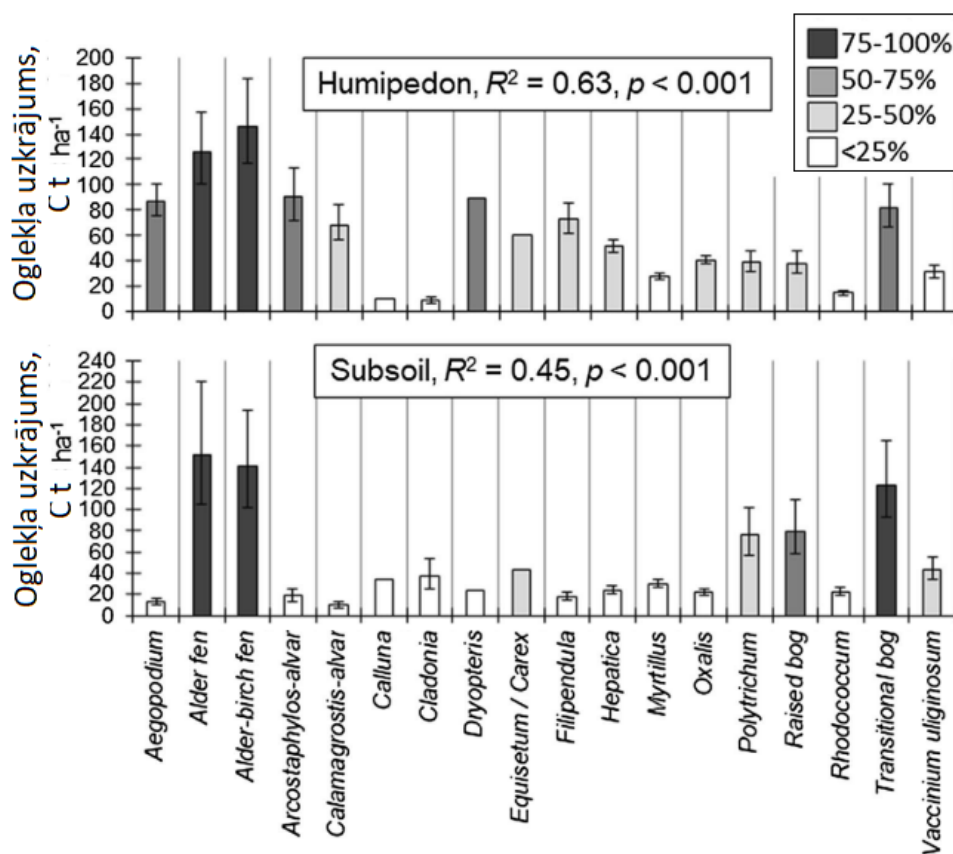


**9. attēls. Oglekļa uzkrājums augsnes slāņos (0-10 cm; 10-20 cm; 20-50 cm; 50-75 cm) dažādos apsaimniekošanas modeļos vecos parastā dižskābarža mežos Dānijā**  
(attēls sagatavots pēc Nord-Larsen et al., 2019)

Uzkrātais oglekļa apjoms un tā izmaiņas dziļākajos augsnes slāņos ir maz pētītas, tomēr pieejamie pētījumi apliecina, ka tieši dziļākajos augsnes slāņos (50-85 cm dziļumā) oglekļa noturības laiks ir būtiski garāks nekā augsnes virskārtā (0-10 cm), kur notiek aktīvi sadalīšanās procesi (Angst et al., 2018). Arī augsnes sastāvs un tās struktūra ir nozīmīgi oglekļa uzkrājumu ietekmējoši faktori, kas ir maz pētīti (Angst et al., 2018; Jones et al., 2019).

Pētījumi, kuros veikta datu ievākšana par oglekli augsnē boreālajos un hemiboreālajos mežos, iekļaujot arī vecus mežus, Eiropā ir vēl retāki. Augsnes oglekļa krātuvju lielumu un tās ietekmējošos faktoros – meža tipu un sugu sastāvu - briestaudzēs un pieaugušās audzēs (70 līdz 139 gadu vecumā) analizēja Igaunijā, hemiboreālajos mežos (Lutter et al., 2018). Analizēti 18 no 25 meža tipiemi Igaunijā, neiekļaujot datus par kūdreņiem (meža tipiemi ar organiskajām augsnēm).

Pētījumā noskaidrots, ka vidējais oglekļa uzkrājums augsnes slānī, ko veido zemsega (A<sub>0</sub> horizonts) un trūdvielu slānis (A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> horizonti), ir 60 C t ha<sup>-1</sup>, bet augsnes slānī, ko veido B, C horizonti, tas ir 51 C t ha<sup>-1</sup>. Kopumā visā pētītajā augsnes slānī (A<sub>0</sub> A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> B, C) oglekļa uzkrājums analizētajos objektos stipri un būtiski variēja no 38 līdz 287 C t ha<sup>-1</sup> (Lutter et al., 2018) (10. att.).



**10. attēls. Oglekļa uzkrājums augsnē atkarībā no meža tipa hemiboreālajos mežos, Igaunijā**

R<sup>2</sup> – determinācijas koeficients. Zemsega (A<sub>0</sub> horizonts) un trūdvielu slānis (A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> horizonti) - ‘humipedon’; augsnes slānis (B, C horizonti) - ‘subsoil’. Procentuālais sadalījums – meža tipa vidējās vērtības īpatsvars no maksimālās oglekļa krātuves vērtības (attēls sagatavots pēc Lutter et al., 2018)

Meža tipam ir būtiska ietekme uz augsnes oglekļa uzkrājumu augsnes slānī, ko veido zemsega (A<sub>0</sub> horizonts) un trūdvielu slānis (A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> horizonti) (10. att.). Tāpat secināts, ka kokaudzes parametri, t.sk., valdošā koku suga (arī pamežā, paaugā augošās koku sugas) ļoti nozīmīgi ietekmē oglekļa uzkrājumu zemsegā auglīgos meža tipos, jo dažādām nobirām ir dažāds

sastāvs un līdz ar to sadalīšanās ātrums (Lutter et al., 2018). Skujkoku audzēs konstatēts lielāks oglekļa uzkrājums, salīdzinot ar lapu koku audzēm, jo lapu koku audzēs notiek straujāka nobiru sadalīšanās un tas nonāk atpakaļ atmosfērā (Hansson et al., 2011). Konstatēts, ka tajās mistraudzēs, kuras ietver koku sugas ar raksturīgu lielu nobiru apjomu un relatīvi lēnāku to sadalīšanos (*Picea mariana*, *Populus tremuloides*), ir salīdzinoši lielāks oglekļa uzkrājums zemsegā – tāpat ne visās mistraudzēs oglekļa uzkrājums ir lielāks nekā tīraudzēs (Laganière et al., 2015).

Oglekļa piesaisti augsnē, kā jau aprakstīts iepriekš, ietekmē nobiru un uzsūcošo sakņu veidošanās un sadalīšanās dinamika. Tāpat augsnes oglekļa uzkrājumu ietekmē arī atmirušās koksnes sadalīšanās, kas var būt īpaši nozīmīga vecos mežos, dominējošā meža elementa nomaiņas laikā. Igaunijā un Polijā veiktajā pētījumā secināts, ka oglekļa koncentrācija augsnē ir augstāka vietās, kur augsnes virskārtā atrodama kritala (4. un 5. sadalīšanās pakāpes), īpaši siltākā klimatā (Polijā), kur to sadalīšanās process ir straujāks (Błońska et al., 2019). Taču kopumā trūkst datu par oglekļa uzkrājumu ne tikai organiskajās, bet arī minerālaugsnēs, kas nepieciešami, lai novērtētu kopējo oglekļa uzkrājumu vecās audzēs un modelētu tā izmaiņu dinamiku audžu sukcesijā.

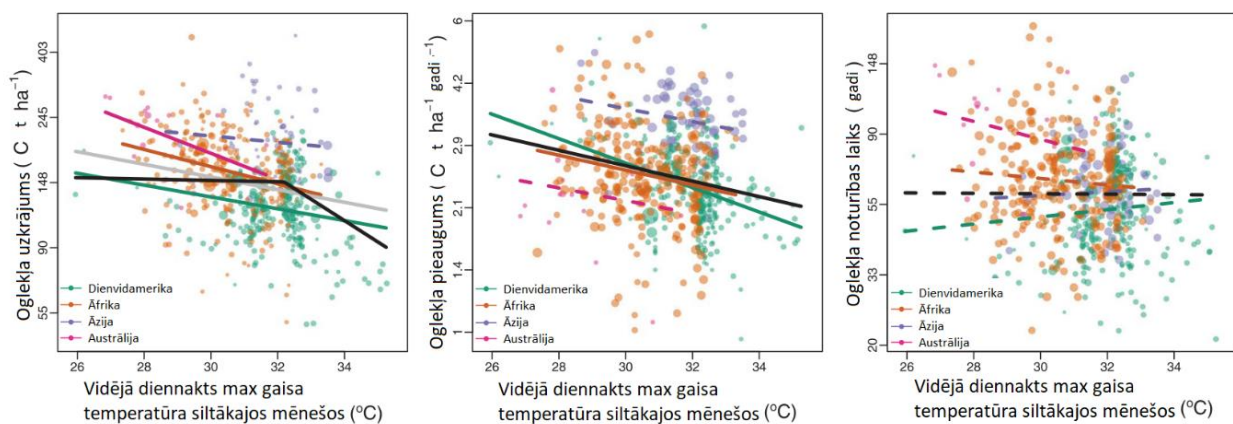
## 1.4. Oglekļa uzkrājuma izmaiņu ietekmējošie faktori vecos mežos

Iepriekšējā desmitgadē veikti vairāki nozīmīgi oglekļa uzkrājuma dinamikas pētījumi, kas balstīti uz hronosekvences pieeju, kā arī vairāki maza mēroga (viena suga, viena/dažas audzes, vienā meža tipā) oglekļa piesaistes pētījumi, vērtējot konkrētu biotisko vai abiotisko faktoru ietekmi (Yuan et al., 2016; Zhu et al., 2017). Visbiežāk analizētie faktori ir klimats, augsne, audzes vecums un mežaudzes struktūra, meža tips, audzes biezums un valdošās koku suga. Papildus tam, lielu ietekmi atstāj arī mežu apsaimniekošanas veids un audzes noturība (meža kā ekosistēmas spēja novērst dažādu ārējo faktoru ietekmi, saglabājot līdzšinējo stāvokli (*resistance*) un akumulēt šo ietekmi, strauji atjaunojoties iepriekšējā vai jaunā līdzsvara stāvoklī (*resilience*)) pret dažādiem dabiskajiem traucējumiem, kā arī dabisko traucējumu biežums. Tieši mežu vitalitāte un audzes produktivitāte ir stabils pamats, lai nodrošinātu ilgtspējīgus ieguvumus klimata pārmaiņu mazināšanai, tajā skaitā nodrošinot lielāku oglekļa apjoma piesaisti. Ņemot vērā, ka oglekļa uzkrājuma potenciāls meža ekosistēmās ir atkarīgs no virknes faktoru un to kombinācijām, kas nozīmīgi atšķiras starp klimata zonām un pat vienas zonas ietvaros (piem., boreālie meži Krievijā, Eiropā, Amerikā), secinājumu izdarīšanai par vecu audžu un mežu attīstības dinamiku un ar to saistītajām oglekļa uzkrājuma izmaiņām nepieciešams ievākt un analizēt iespējami plašu lokālu empīrisku datu materiālu.

### 1.4.1. Klimats un tā pārmaiņas

**Klimats** ir būtiskākais faktors, kas nosaka kā organiskās vielas sadalīšanās ātrumu, tā koku augšanu, līdz ar to arī oglekļa uzkrājuma veidošanās dinamiku (Khan et al., 2019). Gaisa temperatūra un mitrums būtiski maina koka biomasas veidošanos un audzes struktūras attīstību, kā konstatēts, piemēram, tropu lietus mežu pētījumos (Khan et al., 2019; Sullivan et al., 2020) (11. att.).





### 11. attēls. Temperatūras ietekme uz oglekļa uzkrājumu, pieaugumu un noturības laiku dzīvo koku biomasā tropu lietus mežos

Krāsainie punkti – dati no dažādiem kontinentiem – Dienvidamerika, Āfrika, Āzija, Austrālija. Melnā līnija – ciešākā sakarība, pelēkā līnija – ciešākā lineārā sakarība; krāsainās līnijas – katrā kontinentā definētā ciešākā sakarība. Nepārtraukta līnija – statistiski būtiska sakarība. Raustīta līnija – nav statistiski būtiska sakarība.

(attēls sagatavots pēc Sullivan et al., 2020)

Analizētajos tropu mežos maksimālās gaisa temperatūras pieaugums dienas laikā par 1°C būtiski samazina virszemes oglekļa uzkrājuma pieaugumu: tas mainās no 4,0 uz 1,8 %. Oglekļa pieaugums (*carbon gain*) ir oglekļa uzkrājuma apjoms tekošajā koku biomasas pieaugumā. Savukārt, nokrišņu daudzuma pieaugums par 100 mm sausākajā gada ceturksnī paaugstina oglekļa saglabāšanās laiku koksniē no 3,3 līdz 5,7%. Oglekļa noturības laiks (*residence time*) ir oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā pret oglekļa pieaugumu. Respektīvi, vietās, kur ir liels oglekļa uzkrājums mežā, ir arī liels oglekļa pieaugums vai ilgs oglekļa noturības laiks. Pētījumā secināts, ka arī augsnes tips var papildzināt oglekļa noturības laiku augsnē (Sullivan et al., 2020).

Tropu mežos augstai gaisa temperatūrai dienas laikā ir izteiktāka negatīva ietekme uz oglekļa uzkrājumu nekā minimālajām gaisa temperatūrām naktī. Gaisa temperatūras paaugstināšanās no +26°C līdz +35°C dienā samazina CO<sub>2</sub> piesaistes ātrumu, jo respirācija palielinās un/vai atvārsnītes ilgāku laiku ir aizvērtas. Turpretī, oglekļa pieaugums nav viennozīmīgi negatīvi atkarīgs no minimālās gaisa temperatūras. Pētījumā noskaidrots, ka Āzijas tropu mežos, kur novērotas visaugstākās minimālās gaisa temperatūras starp pētāmajiem objektiem, gan oglekļa uzkrājums, gan oglekļa pieaugums salīdzinoši ir vislielākais. Vislielākais oglekļa uzkrājuma samazinājums prognozēts Dienvidamerikas tropu mežos, kur prognozēts vislielākais maksimālās gaisa temperatūras (dienā) pieaugums (Sullivan et al., 2020). Arī mērenās joslas un boreālajos mežos veikti pētījumi, kuros analizēta klimata pārmaiņu ietekme uz oglekļa uzkrājumu. Boreālajos mežos, pieaugot augsnes temperatūrai, ilgtermiņā (1994-2012) nenovēro būtisku dzīvo koku virszemes biomasas pieaugumu, kaut gan var novērot īslaicīgu audžu produktivitātes pieaugumu (Lim et al., 2019). Tāpat pētījumā neapstiprinājās iepriekš izvirzītais apgalvojums, ka palielinoties augsnes temperatūrai, pieaugs emitētais oglekļa daudzums straujākas organisko savienojumu sadalīšanās rezultātā, kā arī - slāpekļa mineralizācija nodrošinās nozīmīgu biomasas pieaugumu (t.i., kompensēs emitēto oglekļa daudzumu ar oglekļa piesaisti) (Lim et al., 2019). Zviedrijas dienvidos analizēti arī ilgtermiņa (1961-2012) upju noteces dati četros lielos parastās priedes un parastās egles meža masīvos, secinot, ka koku evapotranspirācija (auga fizikālā iztvaikošana kopā ar fizioloģisko iztvaikošanu) boreālajos mežos pieaugusi par 31%. Evapotranspirācija paaugstinājusies gan cilvēka darbības ietekmē - meža apsaimniekošanas pozitīvā efekta dēļ

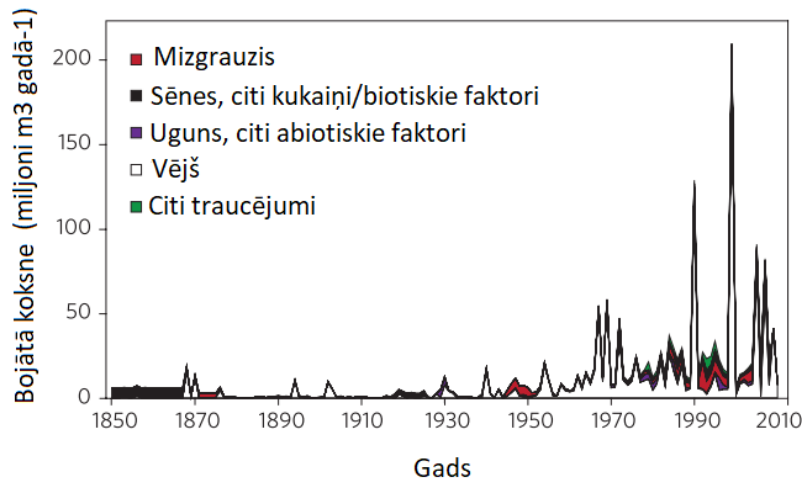
notikušās dzīvo koku biomasas palielināšanās rezultātā, gan arī vecās, neapsaimniekotās mežaudzēs (*old un-managed forests*). Secināts, ka koku evapotranspirācija boreālajos mežos par 18% pieaugusi klimata pārmaiņu rezultātā, jo pieaug nokrišņu daudzums, kamēr temperatūru pieaugums nav būtiski ietekmējis evapotranspirāciju. Mainīgs mitruma režīms mežā klimata pārmaiņu ietekmē (pēc sausuma vai plūdiem) var būtiski ietekmēt metāna un slāpekļa dioksīda apmaiņu gan koksne, gan augsne, kā arī var būtiski palielināt to emisijas, tādējādi palielinot kopējās SEG emisijas mežu ekosistēmās (Schindler et al., 2020). Tas norāda, ka Eiropas boreālo skujkoku mežos nokrišņi un dzīvo koku biomasas pieaugums ir oglekļa piesaisti ietekmējošs faktors (Hasper et al., 2015).

### 1.4.2. Dabiskie traucējumi

Dabiskie traucējumi izraisa vai veicina meža ekosistēmas sukcesiju. Kumulatīvā dabisko traucējumu varbūtība katrā konkrētajā audzē palielinās līdz ar tās vecumu, t. sk. koku dimensijām ilgāku laiku esot tādām, ka tos var ietekmēt piemēram, vējš vai dendrofāgie kukaiņi (Jögiste et al., 2017). Kopējais dabisko traucējumu risks palielinās līdz ar meža platības un krājas pieaugumu, kas raksturīgs kā Eiropai kopumā, tā arī Latvijai. Pieaugot dabisko traucējumu ietekmētajai platībai un krājai, likumsakarīgi, palielinās arī oglekļa emisijas (Šēnhofa et al., 2020).

Vecajos mežos kopumā ir augstāki riski, jo augošu koku krāja ir salīdzinoši liela, tomēr to noturība laika gaitā samazinās, un uzņēmība pret dažādiem dabiskajiem traucējumiem (uguns, vētras, dendrofāgie kukaiņi) pieaug. Rezultātā palielinās bojājumu iespējamība un uzkrātā oglekļa apjoms audzē sāk samazināties – koksne tiek pakļauta sadalīšanās procesam vai uguns ietekmei (Nabuurs et al., 2013). Atmirušī koksne veidojas ne tikai pēc lieliem dabiskajiem traucējumiem (piemēram, vējgāzēm), bet arī atmirstot individuāliem kokiem audzē, un liela šī oglekļa krātuve liecina par drīzu oglekļa uzkrājuma mazināšanos audzē, tai pakāpeniski sadaloties (Kuuluvainen et al., 2018). Pat salīdzinoši nelielās platībās, kur noticis dabiskais traucējums, atmirusās koksnes apjoms palielinās, bet tas nenozīmē, ka tāda mežaudze no oglekļa krātuves (*carbon sink*) noteikti kļūst par oglekļa emisiju avotu (*carbon source*) (Šēnhofa et al., 2020).

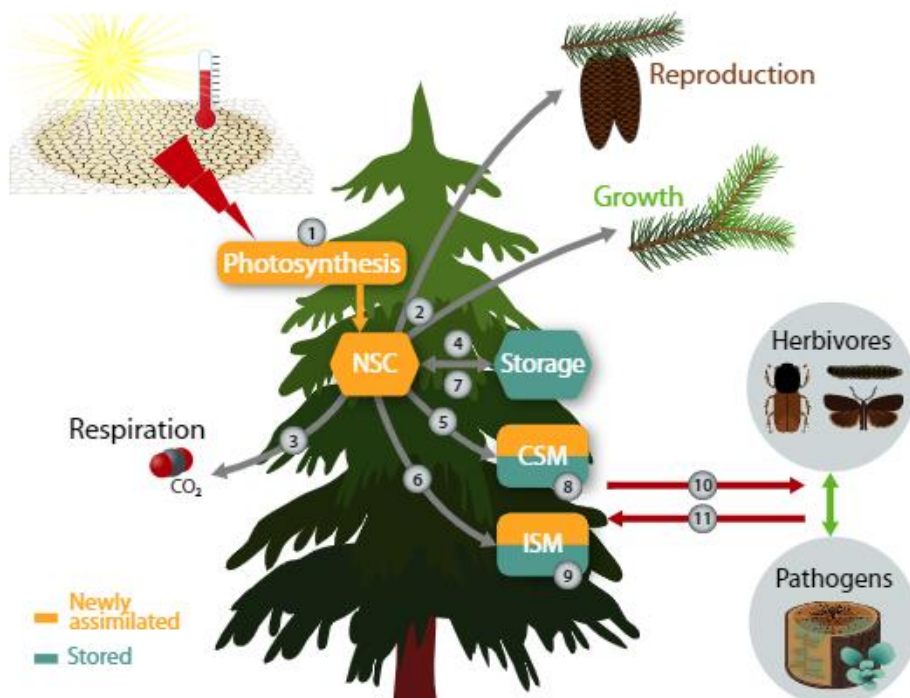
Klimatu pārmaiņu ietekmē dabisko traucējumu biežums un intensitāte strauji pieaug, palielinot atmirusās koksnes apjomus mežaudzēs un būtiski ietekmējot kopējo ekosistēmas oglekļa uzkrājumu un noturību audzē (12. att.) (Nabuurs et al., 2013; Kuuluvainen et al., 2018; Seidl et al., 2020).



**12. attēls. Bojātās stumbra koksnes apjoms ( $m^3 \text{ gadā}^{-1}$ ) dabisko traucējumu ietekmē laika periodā no 1850.-2010.gadam**

(attēls sagatavots pēc Nabuurs et al., 2013)

Ļoti lielas mežu platības Eiropā (apmēram 500 000 ha) katru gadu cieš no mežu ugunsgrēkiem. Tāpat vēju postījumu apmērs palielinās, īpaši skarot mežaudzes, kurās jau bijis kāds cits dabiskais traucējums – ugunsgrēks vai kukaiņu, kā arī slimību ietekme (Nabuurs et al., 2013). Modelējot secināts, ka Eiropā ap 10% no dzīvo koku biomasā uzkrātā oglekļa ir pakļauts dendrofāgo kukaiņu negatīvajai ietekmei (Seidl et al., 2018). Kaut arī vējš, uguns un dendrofāgie kukaiņi ir nozīmīgākie dabiskie traucējumi mežā, ir arī citi dabiski un antropogēni faktori, kas var pastiprināt postījumu apmērus un biežumu mežā (13. att.) (Seidl et al., 2020). Noskaidrots, ka ne tikai ģeogrāfiskie un topogrāfiskie apstākļi (ainavas līmenī audžu fragmentācija, audzes līmenī audzes struktūra, veģetācija, reljefs, audzes vecums u.c.), bet - klimata pārmaiņu kontekstā – arī meteoroloģiskie apstākļi (sausums, karstums, slapjums – nokrišņi, augsts gruntsūdens līmenis, plūdi) var būtiski palielināt traucējuma (vējš, uguns) aktivitāti konkrētajā vietā (Huang et al., 2020; Kosunen et al., 2019; Seidl et al., 2020).



### 13. attēls. Klimata pārmaiņu ietekme uz oglekļa sadalījumu dzīvo koku biomasā un to mijiedarbība ar biotiskajiem faktoriem (dendrofāgajiem kukaiņiem un patogēniem)

NSC – nestrukturālo ogļhidrātu uzglabāšana (glikozes fosfāti – ciete, celuloze); CSM – konstitutīvā sekundārā metabolīta ražošana (nodrošina koku aizsardzību pret kukaiņiem, slimību patogēniem), ISM – izraisīts sekundārais metabolisms (notiek pēc slimību patogēna, kukaiņu bojājuma). Photosynthesis – fotosintēze; Storage – uzkrājums; Respiration – elpošana; Reproduction – vairošanās; Growth – augšana; Herbivores – dendrofāgie kukaiņi; Pathogens - patogēni. Oranžā krāsa – raksturo tikko asimilēto CO<sub>2</sub>; Zilā krāsā – uzkrātais CO<sub>2</sub>.

(attēls sagatavots pēc Huang et al., 2020)

Eiropā pēdējās desmitgadēs klimata pārmaiņu ietekmē dabisko traucējumu īpatsvars pieaug, negatīvi ietekmējot mežu ekosistēmas pakalpojumus, arī šobrīd esošās oglekļa krātuves mežā (Seidl et al., 2020). Dabiskie traucējumi vislielāko ietekmi atstāj tieši uz oglekļa uzkrājumu koksne (izmainot oglekļa krātuvju proporcijas starp dzīvo un nedzīvo koksni, samazinot kopējo ekosistēmas oglekļa uzkrājumu par 39%), tomēr tās nav vienīgās oglekļa krātuves – arī augsnes un zemsegas oglekļa uzkrājums var mainīties pēc dabiskā traucējuma (Thom & Seidl, 2016).

Vērtējot boreālos mežus no 1 līdz 383 gadiem pēc ugunsgrēka, secināts, ka kopējais ekosistēmas oglekļa uzkrājums pēc šī dabiskā traucējuma var sarukt no <10% (daļējs traucējums) līdz >80% (vainaguguns ietekmē pilnībā nopostīta audze), galvenokārt, tieši dzīvo koku virszemes biomasā un zemsegā, augsnes virskārtā (Palviainen et al., 2020). Tāpat secināts, ka oglekļa uzkrājuma maksimums ir pieaugušās audzēs (75 gadus pēc ugunsgrēka), un tas ir atkarīgs galvenokārt no dzīvo koku biomasas pieauguma izmaiņām audzē. Vecākās audzēs ražība samazinās, kā arī citu dabisko traucējumu ietekmē oglekļa uzkrājums saglabājas tādā pašā līmenī ar nelielu tendenci samazināties (Palviainen et al., 2020). Tas saskan ar citu iepriekš aprakstītu pētījumu rezultātiem (Taylor et al., 2014). Somijā pēc vētras un egļu astoņzobu mizgrauža (*Ips typographus*) bojājumiem parastās egles mežaudzēs secināts, ka samazinās augu elpošana (par 18% - 36%), bet emisijas, kas rodas sadalīšanās procesā, pieaug, jo audzē palielināts atmirušās koksnes apjoms (Kosunen et al., 2019). Uzsvērts, ka vecās audzēs, tās ietekmējot dažādas intensitātes dabiskajiem traucējumiem ilgstošā laika periodā, konstatējama ievērojama oglekļa uzkrājuma variācija (Palviainen et al., 2020), tādēļ nozīmīga plaša datu kopa secinājumu izdarīšanai.

Kopumā mežaudzes arī pēc dabisko traucējumu ietekmes turpina būt pozitīva oglekļa krātuve (*carbon sink*), kaut arī novēro atšķirīgu oglekļa plūsmu - pieaug oglekļa emisijas pēc traucējuma visās krātuvēs (dzīvo koku biomasā, augsnē, zemsegā, atmirušajā koksnē), kā arī mainās oglekļa piesaistes apjomi, attīstoties jaunajai kokaudzei. Tomēr trūkst izpratnes par oglekļa plūsmām, pieaugot ne tikai dabisko traucējumu biežumam, bet arī to smagumam, īpaši vecajās mežaudzēs, kur nepārtraukti notiek ainaviskās un strukturālās izmaiņas arī dabiskās sukcesijas procesā (Kuuluvainen et al., 2018; Nord-Larsen et al., 2019; Palviainen et al., 2020).

### 1.4.3. Trupe

Viens no nozīmīgākajiem dabisko traucējumu izraisītājiem (*disturbance agents*) ir patogēnās sēnes, kas būtiski ietekmē oglekļa saturu augošā kokā, līdz ar to arī kopējo oglekļa uzkrājumu mežā. Sakņu un stumbra trupi izraisa daudzas sēņu sugas, ziemeļu reģionos visbiežāk sakņu piepe *Heterobasidion sp.*, celmene *Armillaria sp.*, kas rada ievērojamus ekonomiskos zaudējumus meža apsaimniekotājiem. Ļoti plaši ir pētīta stumbra un sakņu trupe parastās egles audzēs (Woodward et al., 1998; Gaitnieks et al., 2020), kā arī parastās priedes audzēs (Rieksts- Riekstiņš et al., 2020). Sakņu piepe pārsvarā inficē skujkokus, bet tā sastopama arī lapu koku audzēs, īpaši mistraudzēs ar priedi (Arhipova et al., 2010). Kopumā trupe lapu kokiem analizēta retāk, īpaši boreālajos mežos – līdz šim analizēta trupes sēņu izplatība baltalkšņa un melnalkšņa audzēs (Arhipova et al., 2011), kā arī apses audzēs. Apsi galvenokārt bojā divas sēņu sugas – sakņu trupi izraisošā *Armillaria mellea* un stumbra trupe izraisošā *Phellinus tremulae* (Johansson, 2013).

Dažādas trupi izraisošās sēņu sugas iekļūst kokā caur saknēm, stumbra bojājumiem un nokaltušo zaru vietām, un to augšanas ātrums ir atšķirīgs. Trupe palēnina koka augšanu un izraisa priekšlaicīgu koku mirstību, kā rezultātā atstāj ietekmi arī uz oglekļa piesaisti un oglekļa uzkrājumu, kas izpaužas kā augstvērtīgāko koku sortimentu iznākuma samazinājums, līdz ar to mazāks oglekļa uzkrājums koksnes produktos, kam ir ilgāks dzīves cikls. Tāpat trupes ietekmē novēro koksnes pieauguma samazinājumu (Bendz-Hellgren & Stenlid, 1997), kas attiecīgi samazina oglekļa uzkrājumu laika vienībā dzīvo koku biomasā, kā arī rodas tiešs oglekļa uzkrājuma samazinājums sadalīšanās procesā – mainās koksnes blīvums un oglekļa koncentrācijas (Sandström et al., 2007). Šobrīd nav pieejama zinātniskā literatūra par oglekļa uzkrājuma izmaiņām trupes dēļ, tāpēc nepieciešami papildus pētījumi (Rogers et al., 2020). Piemēram, apsei, kam trupe var veidoties jau relatīvi agrā vecumā, aprēķinot biomasu un oglekļa uzkrājumu, netiek ņemts vērā trupes izraisītā koksnes blīvuma samazinājums, rezultātā būtiski pārvērtējot koksnes krāju un oglekļa uzkrājumu apsēs (Schneider et al., 2008; Domke et al., 2011).

Trupes klātbūtnes un apjoma noteikšana un vispārināmu datu iegūšana ir laikietilpīga. Tam izmanto pieauguma urbumus, torsimetri, *Pilodyn* instrumentu, naglas izvilksanas noturības testu, kā arī rezistogrāfu (Gao et al., 2016). Izmantojot rezistogrāfu, iespējams ātri gūt priekšstatu par bojāto koku īpatsvaru audzē, vērtējot mehāniskās pretestības izmaiņas stumbkā, pieņemot, ka mehāniskā pretestība samazinās trupējušā koksne (Johnstone et al., 2007; Kubus 2009). Tomēr papildus nepieciešami laboratoriski mērījumi, saistot tā rādījumus ar faktisko koksnes destrukcijas pakāpi un oglekļa koncentrācijas, apjoma izmaiņām. Tāpat, ja trupes sēnes iekļūst koksne caur nokaltušo zaru vietām (kā bieži ir apsei), nepieciešami paraugkoku dati, lai raksturotu koksnes destrukciju visā stumbkā.

Lai noteiktu trupējušo apšu īpatsvaru mežaudzēs, Somijā ievākti apšu koksnes urbumi mistrotās apsaimniekotās pieaugušās (*mature*, 80-120 gadi) un pāraugušās (*old-growth*, 120 - > 150 gadi) parastās priedes, parastās egles un bērza audzēs. Pētījumā analizētas visa vecuma apses audzes, konstatējot, ka apsaimniekotās mistrandzēs trupe novērota arī jaunās (26 gadi) apsēs otrajā stāvā/pamežā, bet pāraugušās audzēs tik jaunas apses vēl nav trupējušas (jaunākās trupējušās apses konstatētas 53 gadu vecumā). Tāpat konstatēts, ka neapsaimniekotās audzēs trupe apsēs veidojas vēlāk, bet lielākam šīs sugas koku īpatsvaram (Latva-Karjanmaa et al., 2007).

Trupe var nozīmīgi ietekmēt oglekļa uzkrājumu vecās audzēs, jo ar laiku palielinās gan tās izplatība (apjoms) atsevišķā kokā, gan audzē kopumā, turklāt trupes (kā ar stumbra mizas bojājumiem saistītās, tā sakņu) bojājumi nozīmīgi samazina koku vēja noturību (Krisans et al., 2020a; Krisans et al., 2020b), papildus negatīvi ietekmējot oglekļa uzkrājumu. Tomēr par šiem aspektiem pētījumi ir ļoti maz, tādēļ nepieciešami papildus empīriskie dati precīzākai oglekļa uzkrājuma dinamikas vecās audzēs un vecos mežos novērsšanai un modelēšanai.

#### 1.4.4. Mežsaimniecība

Mežsaimnieciskā darbība ietekmē un ir atkarīga no **dažādiem mežaudzi raksturojošiem parametriem** - meža tips, mežaudzes struktūra, koku sugu sastāvs un citiem, kas būtiski ietekmē koku augšanas gaitu, nosakot arī uzkrātā oglekļa apjomu audzē un tas var būt visai atšķirīgs (Yuan et al., 2016). Hemiboreālajos pirmatnējos mežos (*primeval forest*) Igaunijā, kur saimnieciskā darbība nav veikta vairāk kā 90 gadus, mežaudzes struktūru ļoti ietekmē individuālu koku dimensijas, kas atkarīgas ne tikai no koka vecuma, apkārtējo koku konkurences, produktivitātes, bet arī dabisko traucējumu ietekmes (Nigul et al., 2015).

Boreālajos mežos iegūtie rezultāti parastās priedes un parastās egles audzēs parāda, ka **mistrojumam** nav nozīmīgi pozitīva ietekme uz oglekļa uzkrājumu audzē, t.i. abu sugu mistrojumā iegūtie dati ir līdzīgi abu šo sugu tīraudzēs konstatētajam (Blaško et al., 2020).

Tāpat **mežsaimniecība** (piem., kopšanas cirtes, aprites cikla garums, papildus barības vielu ienešana) ir būtiska loma oglekļa uzkrājuma veidošanai un saglabāšanai mežā (Pohjola & Valsta 2007; Framstad et al., 2013; Birdsey & Pan, 2015; Ford & Keeton, 2017), nodrošinot arī stabilu oglekļa uzkrājumu augsne (Jandl et al., 2007; Bravo-Oviedo et al.; 2015). Novērtējot dažādu mežsaimniecības prakšu ietekmi uz oglekļa piesaisti un tā dinamiku mežā, iespējams veikt meža apsaimniekošanu tā, lai paaugstinātu oglekļa uzkrājumu (*carbon forestry*), vienlaikus nodrošinot arī citus ekosistēmas pakalpojumus – bioloģiskās daudzveidības saglabāšanu, koksnes produktu ražošanu (Pukkala, 2018). Audžu struktūras veidošana ir atzīta par vienu no virzieniem, lai nodrošinātu ne tikai lielāku oglekļa piesaisti mežā, bet arī radītu dažādas struktūras (*structural complexity enhancment*), tāda veidā veicinot oglekļa piesaisti vecos mežos un nodrošinot audžu veiksmīgāku pielāgošanos klimata pārmaiņām (Ford & Keeton, 2017). Analizējot dažādas adaptācijas un klimata izmaiņu mazināšanas stratēģijas Zviedrijā konstatēts, ka daļai no tām var būt negatīva ietekme uz bioloģisko daudzveidību, tomēr tās ir izmantojamas, kombinējot ar

specifiskiem papildus dabas aizsardzības pasākumiem. Tāpat norādīts, ka, piemēram, izlases cirtes varētu samazināt dabisko traucējumu (vēja, kukaiņu) postījumus un līdz ar to oglekļa uzkrājuma zudumu, tomēr šajā aspektā vēl nepieciešami pētījumi (Felton et al., 2016). Veicot kopšanas cirtes, atkarībā no kopšanas intensitātes oglekļa uzkrājums audzē var samazināties par 28% (Bravo-Oviedo et al., 2015). Tas apliecina, ka atsevišķos gadījumos meža apsaimniekošanai īstermiņā var nebūt pozitīvas ietekmes uz oglekļa uzkrājumu. Tomēr ir būtiski analizēt ietekmi ilgtermiņā, piemēram, vai pēc šādas cirtes audze kļūs ražīgāka, vai paliks tikpat ražīga un noturīga – tātad samazināsies iespēja, ka tā varētu tikt nopostīta dabisko traucējumu ietekmē, un tādējādi viss ogleklis no koksnes nonāktu atpakaļ atmosfērā. Tāpat nozīmīgi vērtēt alternatīvu – ja atpalikušie koki kopšanas cirtē netiks nozāģēti, kāds būs to tālākais liktenis – cik no tiem un kādā laika periodā atmirs un sadalīsies. Šos aprēķinus var salīdzināt ar novērtējumu, kādu apjomu no kopšanas cirtē nozāģētā izmantos koksnes produktu ražošanai, kuru dzīves cikls būs ilgāks – tātad nodrošinās ilgāku oglekļa saglabāšanos koksnē, nevis nonākšanu atpakaļ atmosfērā.

Meža hidrotehniskā meliorācija ir viens no mežsaimniecības pasākumiem, kas nozīmīgi maina ne tikai ūdens režīmu mežā, nodrošinot skābekļa piekļuvi koku saknēm, bet arī oglekļa uzkrājuma dinamiku. Salīdzinot nosusinātas un nenosusinātas kūdras augsnes Zviedrijas dienvidos (von Arnold et al., 2005a, 2005b), secināts, ka emisijas no mazauglīgas organiskās augsnes skujkoku mežos parasti ir mazākas, un tieši šādos apstākļos ogleklis augsnē turpina uzkrāties arī pēc nosusināšanas (von Arnold et al., 2005a). Turpretī emisijas no auglīgs organiskās augsnes lapu koku mežos ir lielākas, un pēc nosusināšanas būtiski pārsniedz piesaisti augsnē (von Arnold et al., 2005b). Tomēr konkrētajā pētījumā iegūtie rezultāti neļauj izvērtēt meža nosusināšanas ietekmi uz kopējo ekosistēmas oglekļa uzkrājumu ilgtermiņā, jo salīdzināti tikai divu gadu dati. Līdz šim vienīgie Latvijā veiktie pētījumi par oglekļa uzkrājumu meža augsnē apskata mežus ar auglīgām un vidēji auglīgām hidrotehniski meliorētām augsnēm - šaurlapju un platlapju kūdreņus (Lupiķis & Lazdiņš, 2015). Secināts, ka oglekļa uzkrājums mežos ar nosusinātu kūdras augsni ir lielāks nekā nenosusinātās platībās, attiecīgi  $513 \pm 27 \text{ C t ha}^{-1}$  un  $339 \pm 29 \text{ C t ha}^{-1}$ ; nosusināšanas ilgtermiņā atstājusi arī būtisku pozitīvu ietekmi uz oglekļa ikgadējo piesaisti, kas šajās platībās ir  $0,36 \text{ C t ha}^{-1} \text{ gadi}^{-1}$  augstāka (Lupiķis & Lazdiņš, 2015).

Dati par oglekļa uzkrājumu vecās audzēs ir nozīmīgi, lai izvērtētu ar mežu saistīto politiku un mežsaimniecisko pasākumu ietekmi uz kopējā oglekļa uzkrājuma izmaiņām un to efektivitāti klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu sasniegšanas veicināšanai.

## 2. Pētījuma metodika

### 2.1. Empīriskā materiāla ievākšana

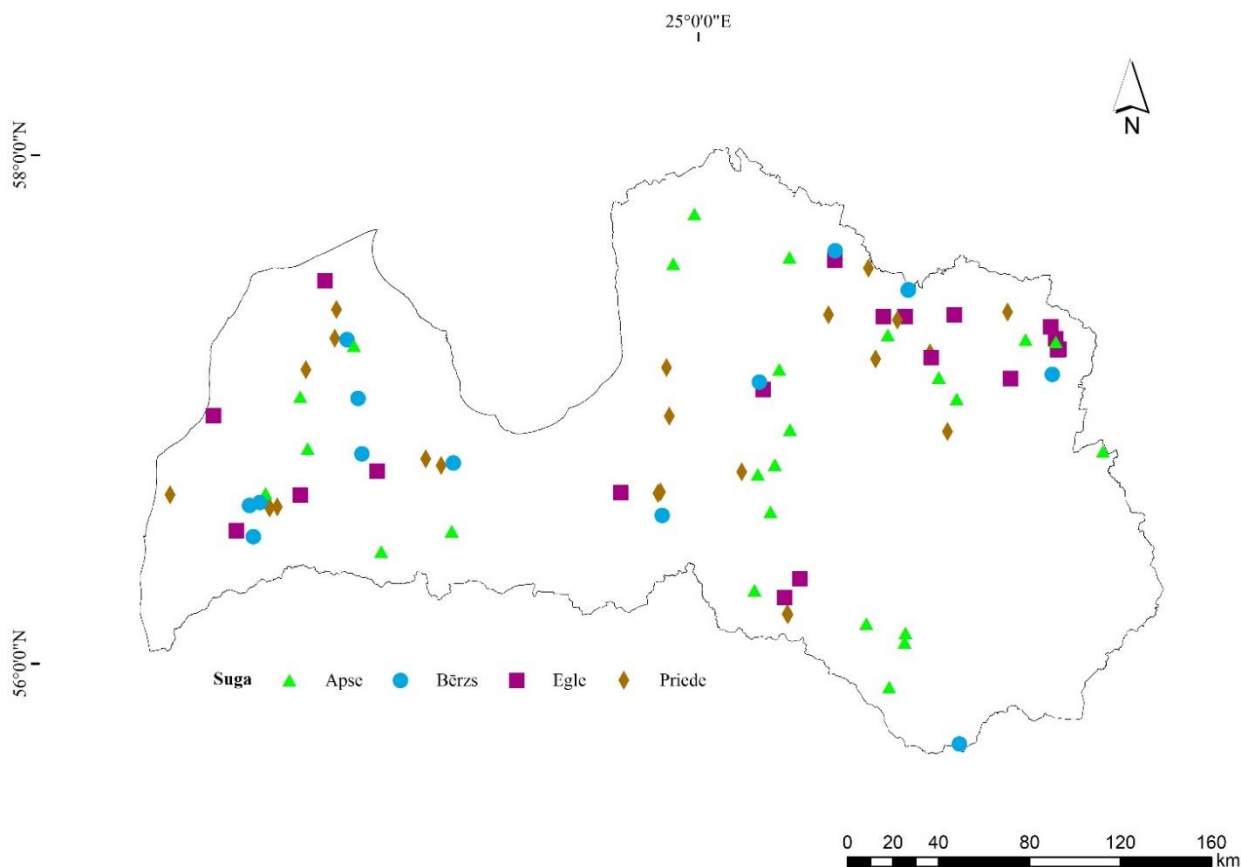
Pētījuma periodā pāraugušo skujkoku (priede un egle) un lapu koku (bērzs un apse) audžu atlase pēc taksācijas datiem un apsekošana. Saskaņā ar projekta metodiku, izvēlētas un kopumā uzskaitītas 117 pāraugušas mežaudzes dažādos meža tipos (MT), kurās, saskaņā ar pieejamo dokumentāciju un novērojumiem dabā, ilgstoši nav veikta saimnieciskā darbība (2. tab.). Šajā pārskatā ietverta analīze par audzēm damaksnī un vērī.

2. tabula. Pētījumā ievāktie dati pāraugušās dažādu koku sugu audzēs dažādos meža tipos

Objektu skaits (parauglūkumu skaits) pa valdošajām koku sugām				
Meža tips	Priede	Egle	Apse	Bērzs
Mētrājs (Mr)	2 (14)			
Damaksnis (Dm)	25 (164)	9 (64)	3 (17)	5 (21)
Vēris (Vr)	-	10 (67)	22 (131)	8 (44)
Slapjais damaksnis (Dms)	3 (20)	3 (16)		2 (9)
Slapjais vēris (Vrs)		2 (10)		5 (22)
Niedrājs (Nd)	5 (38)			
Šaurlapju ārenis (As)		6 (48)		

Šī pētījuma ietvaros ar jēdzienu **vecā (pāraugusi) kokaudze** apzīmē audzi, kurā valdošās sugas koki pārsnieguši noteikto ciršanas vecumu par vairāk nekā divām vecumklasēm. Savukārt, jēdziens **vecs (pāraudzis) mežs** attiecināms uz ilgstoši (vismaz divas valdošās koku sugas vecumklases) antropogēni maz traucētu mežu. Vecā ('n6 kategorija' - *old-growth forests*, Buchwald, 2005) mežā nav veikta krājas kopšanas un galvenā cirte, un to veido vai nu vecā kokaudze, vai dabisko traucējumu ietekmē (piemēram, vējgāzes, ugunsgrēki, dendrofāgo kukaiņu savairošanās) izveidojusies jauna audze. Tātad, vecā kokaudze var būt vecs mežs, bet ne visi vecie meži sastāv no vecām kokaudzēm.

Datu apstrādē konstatēts, ka atsevišķās audzēs (kopumā 6) tomēr valdošā suga pēc krājas neatbilst pētījuma mērķim un metodikai, tādēļ šīs audzes turpmākā analīzē nav izmantotas. Tālākā analīze iekļauj tikai audzes damaksnī (Dm) un vērī (Vr) – 42 audzes (266 parauglūkumi) Dm meža tipā un 40 audzes (242 parauglūkumi) Vr meža tipā. Pāraugušās audzes izvietotas visā Latvijas teritorijā (14. att.).



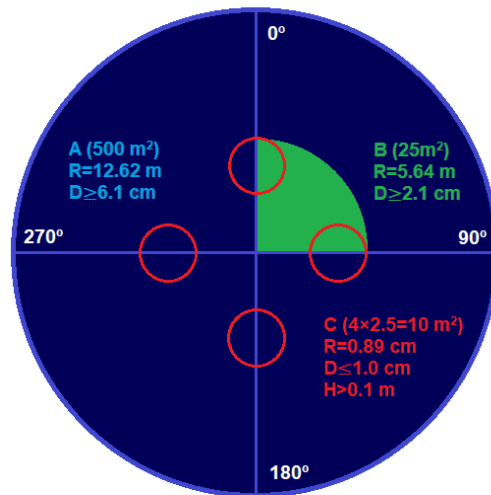
#### 14. attēls. Pētījuma objektu izvietojums Dm un Vr mežaudzēs

Pētījumā analizētās pāraugušās audzes salīdzinātas ar pieaugušām audzēm (priede 101-120 gadi, egļe 81-100 gadi, bērzs 71-90 gadi, apse 41-60 gadi). Dati par šīm mežaudzēm (koku biomasa un atmirusī koksne) iegūti no Latvijas meža resursu statistiskās inventarizācijas (MSI III cikla dati), tie ievākti saskaņā ar Latvijas MSI pamatnostādņēm, savukārt zemsegas un augsnes dati iegūti, ievācot un analizējot paragus šī pētījuma ietvaros. Kopumā salīdzināšanai izmantoti 447 MSI parauglaukumi (sektora platība  $\geq 400\text{m}^2$ ) pieaugušās priedes, egļes, bērza un apses mežaudzēs Dm un Vr meža tipos. Pētījumā pēc MSI parauglaukumos ievāktajiem datiem aprēķināts oglekļa apjoms pieaugušajās priedes audzēs dzīvo koku biomasā pa koka frakcijām (*tree components*) pēc Liepiņš et al. (2017), bet nedzīvajā koksneā pa sadalīšanās pakāpēm (*decay class*) pēc Köster et al. (2015).

Katrā izvēlētajā audzē ierīkoti 6-8 parauglaukumi. Sākotnēji sagatavots regulārs tīkls ar parauglaukumu centriem, ņemot vērā audzes lielumu un konfigurāciju un paredzot vismaz ar 1 m attālumu starp blakus esošu parauglaukumu ārējām robežām un vismaz 10 m attālumu starp parauglaukuma ārējo robežu un blakus nogabalu. Katrā parauglaukuma centrā uz vietas noteikts meža tips – konstatējot neatbilstību meža tipam, konkrētais parauglaukums netika uzmērīts.

Visā parauglaukuma platībā ( $R=12,62\text{ m}$ ;  $S=500\text{ m}^2$ ) ievākts **empīriskais datu materiāls** atbilstoši izstrādātajai metodikai (15. att.):





**15. attēls. Parauglaukuma (PL) shēma**

❖ katram kokam fiksē sugu, uzmēra caurmēru (visiem kokiem, kas sasnieguši 6,1 cm diametru). Daļā parauglaukuma ( $R=5,64$  m;  $S=25$  m<sup>2</sup>; 0°-90° sektorā pēc azimuta, 15.att.B) uzmēra visus kokus, kas sasnieguši 1,3 m augstumu ( $d=2,1-6,0$  cm). Katram uzmērītajam kokam fiksē tā atrašanās punktu, sugu, krūšaugstuma caurmēru ( $D$ ), stāvu, Krafta klasi, bojājumus. Četros mazākos aplveida laukumos ( $R=0,89$  m;  $S=2,5$  m<sup>2</sup>, 15.att.C), kuru centri izvietoti 2 m attālumā no parauglaukuma centra uz katru debespusi, uzskaita visus kokus, kuri zemāki par 1,3 m (nosakot sugu un vidējo augstumu, vidējo caurmēru pie sakņu kakla un vidējo vecumu);

❖ katram meža elementam (t.i., vienai sugai un paaudzei ( $\pm 2$  vecumklases no abstraktas vidējās vērtības) piederošiem kokiem) uzmēra augstumu ( $H$ ), vainaga sākuma augstumu un ievāc pieauguma urbumu (1,3 m augstumā): valdošajam elementam 5, pārējiem - 3 dažādu dimensiju kokiem bez ārējām bojājuma (piemēram, lauza galotne) pazīmēm. Trupējušiem kokiem izurbj visu dzīvo daļu un atzīmē, ka trapes bojāts. Kokiem, kuru caurmērs no 2,1 līdz 6 cm, arī ievāc pieauguma urbumu, bet, ja to nevar izdarīt, tad ievāc pieauguma ripu (nozāgē vienu koku ārpus B sektora parauglaukuma – visvairāk pārstāvētajai koku sugai);

❖ uzmēra ne tikai dzīvos, bet arī sausstāvošos kokus, klasificējot tos kā „sa” – sausoknis – nokaltis koks, kuram vēl ir vismaz 2. pakāpes sānzari, vai „st” – stumbenis – bez sānzariem vai tikai ar 1. pakāpes sānzariem (tai skaitā celms, piezīmējot, ja var noteikt, vai koks nolūzis vai nozāgēts);

❖ veic kritalu „kr” uzskaiti: a) fiksē caurmēru katrā galā un garumu - tikai tām, kam tievgalī  $d>14$  cm ( $d>6$  cm B sektora parauglaukumos ar  $R=5,64$  m) un garums  $>1$  m; b) fiksē – zars vai stumbrs; c) ja izgāzies koks – stumbra caurmēru nosaka 1,3 m attālumā no sakņu kakla; d) ja vairāki nogriežņi – fiksē maksimālo no abu galu diametriem; e) fiksē, ja parauglaukumā ir gan stumbenis / sausoknis, gan tā nolūzusī daļa, ja iespējams noteikt;

❖ visiem nokaltušajiem kokiem nosaka sadalīšanās pakāpi (saskaņā ar Sandström et al., 2007) (3. tab.).

Baltijas valstīs publicētajos pētījumos atmirusī jeb nedzīvā koksne analizēta 5 sadalīšanās pakāpēs (3.tab.).

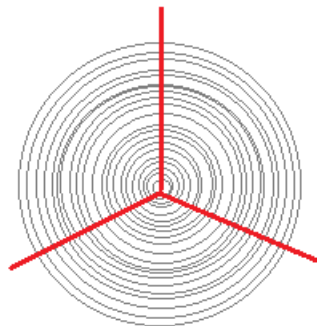
3. tabula. Pētījumam pielāgots sadalīšanās pakāpju raksturojums nedzīvajai koksnei  
(Renvall, 1995; Sandström et al., 2007)

Sadalīšanās pakāpe	Skaidrojums
1	Svaiga koksne, ar mizu, saglabājušās lapas/skujas
2	Cieta atmirusi koksne, stumbram cieta ārējā virsma, bez mizas
3	Koksne nedaudz mīksta (10-25% no stumbra tilpuma), nazi iedur 1-2 cm
4	Mīksta vai ļoti mīksta koksne (26-75% no stumbra tilpuma), trupējusi
5	Ļoti trupējusi koksne (mīksta koksne 76-100% no stumbra tilpuma), drūp

Katrā nogabalā veic **augšnes paraugu ievākšanu** 3 vai 4 parauglaukumos (atkarībā no nogabala platības) ārpus kokaudzes parauglaukuma (A). Augšnes raksturošanai ārpus kokaudzes parauglaukuma rādiusa ierīko profilbedri, ievācot paraugus augšnes tipa noteikšanai/precizēšanai, kā arī 0°, 90°, 180° leņķī no centra ierīko paraugu vākšanas punktus (3 parauglaukumus), to vietas izvēloties vismaz 2 m attālumā no celmiem, mikroreljefa pazeminājumiem vai paaugstinājumiem, netipiskiem mežaudzes elementiem un vismaz 2 m attālumā no lieliem augošiem kokiem:

- katrā paraugu vākšanas punktā ievāc zemsegas paraugu (10x10 cm) (kārtīgi atdalot augšnes slāni);
- katrā paraugu vākšanas punktā izrok 60x120x90 cm bedres augšnes paraugu ievākšanai. Augšnes paraugus (augšnes fizikālo īpašību noteikšanai un ķīmiskajām analīzēm) ievāc 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm un 40-80 cm dziļumā.

Lai veidotu ieskatu par **stumbra trupes īpatsvaru** un tās ietekmi uz kopējo oglekļa uzkrājumu, visās apses audzēs visām I stāva apsēm (kopā 1305 koki) pēc reģistrācijas numura veikti trīs urbumi ar rezistogrāfu. Visus trīs urbumus veic perpendikulāri stumbram, 1,3 m augstumā, aptuveni 0°, 120°, 240° virzienā (16. att.).



#### 16.attēls. Ar rezistogrāfu veikto urbumu izkārtojums I stāva apses stumbūrā

Katrā pāraugušās apses objektā veic trupes izplatības augstuma noteikšanu vienā līdz trijos augstumos (līdz 4-5 m augstumam) 6 kokiem vienā no parauglaukumiem, kuros konstatēta trupe. Kopā 150 kokiem noteikts trupes izplatības augstums.

Trupējušo apšu koksnes paraugiem noteikts mitras un sausas koksnes blīvums ar analītiskajiem svāriem Precisa XB 2020 A, veicot ar ūdeni pilnībā piesātinātu paraugu iegremdēšanu šķidrumā. Paraugus žāvē 105° C temperatūrā līdz nemainīgai absolūti sausiai masai, lai noteiktu absolūti sausas koksnes blīvumu. Kopējā C satura noteikšanai izmantots

elementanalizators Elementar El Cube, ar kuru veic gaissausu sasmalcinātu paraugu sauso dedzināšanu.

Oglekļa koncentrācijas noteikšanai atmirušajā koksņē pa sadalīšanās pakāpēm 26 vecajās audzēs ievākti atmirušās koksnes paraugi – pieci paraugi no katras koku sugas (priede, egle, apse, bērzs) katrā sadalīšanās pakāpē. Cietākai koksnei (1. un 2. sadalīšanās pakāpe) atmirušās koksnes paraugi ņemti ar 13 mm cilindru, un mīkstākai koksnei (3., 4., un 5. sadalīšanās pakāpe) – ar 50 mm cilindru.

Augsnes paraugi, zemsegas un trupējušās koksnes paraugi sagatavoti fizikāli ķīmiskajām analīzēm Latvijas Valsts mežzinātnes institūta „Silava” Meža vides laboratorijā atbilstoši LVS ISO 10694:2006, LVS ISO 11464:2005 standartu prasībām. Atmirušajai koksnei mitras un sausas koksnes blīvumu, kā arī oglekļa koncentrācijas noteica pēc tādas pašas metodikas, kā trupējušo apšu paraugiem.

## 2.2. Oglekļa noteikšanas metodika

Oglekļa dinamikas raksturošanai meža ekosistēmā šī pētījuma ietvaros izmantoti šādi starptautiski pieņemti termini:

- 1) oglekļa **uzkrājums** (*carbon stock*) ir oglekļa masa, kas uzkrāta oglekļa **krātuvē** (*carbon pool*). Oglekļa krātuve (*carbon pool*) ir dalībvalsts teritorijā esošs bioģeokīmiskais veidojums vai sistēma kopumā vai to daļa, kurā ir uzkrāts ogleklis, jebkāds oglekli saturošas siltumnīcefekta gāzes prekursors vai jebkāda oglekli saturoša siltumnīcefekta gāze.
- 2) Oglekļa dinamikas raksturošanai nosaka oglekļa **piesaisti** (*removals/sequestration*), kas ir siltumnīcefekta gāzu antropogēna piesaiste no atmosfēras piesaistītājos. Oglekļa **piesaistītājs** (*sink*) ir jebkurš process, darbība vai mehānisms, kura rezultātā no atmosfēras absorbē siltumnīcefekta gāzi, aerosolu vai siltumnīcefekta gāzes prekursoru.
- 3) Oglekļa bilance (*carbon budget*) ir starpība starp kopējo oglekļa piesaisti (*carbon sequestration*) no atmosfēras un kopējo atmosfērā atgrieztā oglekļa daudzumu (*carbon emissions*). Jāņem vērā, ka oglekļa bilance var būt gan pozitīva (piesaista vairāk oglekli kā emitē), gan negatīva (emisijas ir lielākas par oglekļa piesaisti), un tā dinamiski mainās atkarībā no audzes produktivitātes un dabisko traucējumu ietekmes.

Saskaņā ar šo terminoloģiju un pētījuma metodiku, pētījuma rezultāts ir oglekļa uzkrājuma pāraugušās audzēs raksturojums, nevis tā piesaistes dinamikas novērtējums.

Uzkrātais oglekļa daudzums dzīvo koku biomasā aprēķināts no individuālu koku biomasas (tilpums × blīvums), nevis parauglaukuma krājas, tā iegūstot precīzākus rezultātus (Neumann et al., 2016). Pētījuma ietvaros veikti koka frakciju biomasu aprēķini pēc 1. formulas pa koku sugām, izmantojot Liepiņa et al. (2017) biomasas modeļus Latvijas apstākļiem. Priedes sīko sakņu frakcijas biomasas (2. formula) un bērza pazemes biomasas (3. formula) aprēķiniem Liepiņš et al. (2017) ieteicis atšķirīgas aprēķinu formulas:

$$y = k \times \exp \left( a + b \times \ln \left( \frac{D}{D+m} \right) + c \times H + d \times \ln(H) \right), \quad (1)$$

$$y = k \times \exp \left( a + b \times \ln(D) + c \times \ln(H) \right), \quad (2)$$

$$y = k \times \exp \left( a + b \times \ln(D) \right), \quad (3)$$

kur  $y$  - individuāla koka frakcijas absolūti sausa biomasas, kg;  $D$  - koka caurmērs, cm;  $H$  - koka augstums, m;  $a, b, c, d, m, k$  - parametri (4. tab.) (Liepiņš et al., 2017).

Pētījumā izmantotas Liepiņš et al. (2017) izstrādātās parametru vērtības biomasas aprēķināšanai (4. tab.). Lai nodrošinātu augstāku precizitāti, oglekļa uzkrājums, līdz ar to arī biomasas aprēķinātas nevis, izmantojot apvienotu modeli, bet gan četrām koka frakcijām atsevišķi – stumbra, zaru (+ skuju skuju kokiem), kopējai pazemes un - atsevišķi - sīko sakņu frakcijai ( $d < 2$  mm). Oglekļa uzkrājums dzīvo koku virszemes biomasā aprēķināts, summējot zaru un stumbra frakcijās uzkrāto oglekli,

4. tabula. **Biomasas vienādojumu parametru vērtības pa koku sugām un frakcijām**  
(Liepiņš et al., 2017)

Suga	Frakcija	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>m</i>	<i>k</i>
<i>Priede</i>	SB	-2,8125	7,1368	0,0118	1,1270	15	1,005
	BB	-1,6032	14,7696	0	-1,5888	11	1,042
	BGB	-3,2937	9,0334	0	0,5353	14	1,035
	SRB	-4,1683	1,4686	0,4263	0	0	1,061
<i>Egle</i>	SB	-2,5842	7,0769	0,0232	0,9631	15	1,002
	BB	0,3300	12,0986	0	-1,0682	16	1,012
	BGB	-2,4967	10,8184	0	0	14	1,039
	SRB	-3,3454	7,5401	0	0	9	1,068
<i>Bērzs</i>	SB	-2,9281	8,2943	0,0184	0,7374	11	1,002
	BB	-1,0091	16,9249	0	-2,0462	12	1,075
	BGB	-3,6432	2,5127	0	0	0	1,006
	SRB	-4,1485	8,6630	0	0	7	1,009
<i>Apse</i>	SB	-2,8955	8,3896	0,0226	0,6148	11	1,006
	BB	-2,3703	14,3352	0	-1,0849	12	1,004
	BGB	-2,3114	10,3644	0	0	15	0,992
	SRB	-2,2732	14,1612	0	-1,7449	10	0,994

**SB** - stumbra; **BB** - zaru; **BGB** - pazemes kopējā; **SRB** - sīko sakņu

Koku sugām, kurām nav izstrādāti atsevišķi parametri biomasas aprēķināšanai, izmantoti parametri no tās koku sugas, kurai ir vislīdzīgākais koksnes blīvums. Kaut arī Liepiņš et al. (2017) modeļi izstrādāti uz plašas datu bāzes pamata, ietverot dažāda vecuma audzes, tajos nav ietverti tik veci koki, kā šajā pētījumā analizētie (5. tab.).

5. tabula. **Biomasas vienādojumu izstrādei izmantoto audžu raksturojums**  
(Liepiņš et al., 2017)

Suga	Audzis, skaits	Koku caurmērs, cm	Koku augstums, m	Audzis šķērslaukums, $m^2 ha^{-1}$	Vecums
Priede	34	1,3-40,3	1,4-30,7	0,4-49,7	6-141
Egle	27	1,6-34,1	1,8-27,7	0,6-44,9	8-97
Bērzs	35	2,8-32,3	5,2-29,6	0,9-44,4	8-92
Apse	28	2,1-30,6	3,4-30,4	0,5-45,2	5-76

Oglekļa saturs dzīvo koku biomasā parasti pieņemts kā 50% no koka frakcijas (stumbrs, zari, saknes) biomasas (iegūta, izmantojot biomasas pārrēķina koeficientus vai vienādojumus), un šī

vērtība plaši izmantota siltumnīcefekta gāzu (SEG) bilances aprēķinos (Martin & Thomas, 2011; Neumann et al., 2016).

Kaut arī oglekļa saturs visdrīzāk ir nedaudz atšķirīgs pa koka frakcijām, ņemot vērā detalizētu pētījumu trūkumu, visām koka frakcijām lieto šo standartizēto 0,5 vērtību. Šādu vērtību ir ieteikusi Klimata pārmaiņu starpvaldību padome (IPCC) (Eggleston et al., 2006). Standartizētā vērtība plaši izmantota dažādās valstīs, neatkarīgi no meža apsaimniekošanas veida, vecuma, klimatiskās zonas un citiem faktoriem (Saatchi et al., 2011; Bijak et al., 2013; Jansons et al., 2017). Vairākās valstīs notiek arī pētījumi par faktiskajām oglekļa satura vērtībām, konstatējot, ka oglekļa saturs dzīvo koku virszemes biomasā variē no 47% - 55% atkarībā no koku sugas (Paladinić et al., 2009), biomasas frakcijas (Peichl & Arain, 2006; Jain et al., 2010), kā arī ģeogrāfiskās atrašanās vietas (Vucetich et al., 2000).

Latvijā ir veikti atsevišķi pētījumi par oglekļa saturu koksne dažādās biomasas frakcijās. Piemēram, baltalkšņa audzēs konstatēts, ka oglekļa saturs dzīvo koku virszemes biomasā ir 47% - 52%, bet pazemes biomasā ir ap 47% (Bārdulis u.c., 2011). Priežu jaunaudzēs (8-40 gadi) konstatēts, ka oglekļa saturs pazemes biomasā vidēji ir 49.7%, tas atšķiras dažādām sakņu frakcijām un palielinās, pieaugot koku vecumam (Jansons et al., 2017). Tomēr trūkst plašāku pētījumu dažādu koku sugu vecākās audzēs, lai to rezultātus varētu izmantot oglekļa aprēķinam šī pētījuma ietvaros.

Oglekļa uzkrājuma aprēķins nedzīvajai koksnei veikts, ņemot vērā atmirušās koksnes apjomu, koku sugu un sadalīšanās pakāpi, aprēķinot atmirušās koksnes biomasu pēc 4. formulas un oglekļa uzkrājumu nedzīvajā koksne pēc 5. formulas, izmantojot Köster et al. (2015) parametru vērtības:

$$\beta = e \times M, \quad (4)$$

$$C = \beta \times c_i, \quad (5)$$

kur  $\beta$  - individuāla atmirušās koksnes vienības absolūti sausa biomasas, kg;  $e$  – koksnes blīvums, kg m<sup>-3</sup>;  $M$ - individuālās vienības tilpums, m<sup>3</sup>;  $c_i$  – oglekļa koncentrācija pa sadalīšanās pakāpēm un koku sugām, % (1. tab.) (Köster et al., 2015).

Atmirušajai koksnei pakāpeniski sadaloties, samazinās tās tilpums un palielinās oglekļa koncentrācija. Analizējot dažādu sadalīšanās pakāpju paraugus, konstatēts, ka vidējais oglekļa saturs tajos Latvijā un Igaunijā nav būtiski atšķirīgs, tāpēc pētījuma ietvaros oglekļa apjoma novērtēšanai atmirušajā koksne izmantojamas Köster et al. (2015) iegūtās koksnes blīvuma un oglekļa koncentrācijas vērtības (1.tab.) galvenajām koku sugām pa piecām sadalīšanās pakāpēm.

Apses audzēs oglekļa uzkrājums trupējušajās apsēs aprēķināts, balstoties uz laboratorijā noteiktajām trupējušās koksnes blīvuma un oglekļa koncentrācijas vērtībām. Pārreķināts, ņemot vērā ar rezistogrāfu iegūtās mehāniskās pretestības vērtības. Pētījuma ietvaros veikts eksperiments, kurā iegūtas koksnes blīvuma un oglekļa koncentrācijas vērtības trupējušajai koksnei. Trupējusī koksne iedalīta divās kategorijās – vidēji satrupējusi koksne (atbilst 2. un 3. sadalīšanās pakāpei) un satrupējusi koksne (4. un 5. sadalīšanās pakāpe), kā arī – atsevišķi – dobums.

Uzkrātā oglekļa apjoms paraugušās audzēs aprēķināts gan parauglaukuma līmenī, gan objektu līmenī, jo parauglaukuma līmenī precīzāk novērtēt oglekļa uzkrājumu mainību.

Pētījuma ietveros vidējais audzes (meža elementa) krūšaugstuma (1,3 m augstumā virs sakņu kakla) caurmērs aprēķināts kā vidējais kvadrātiskais caurmērs (6. formula), kas ir vidējam šķērslaukumam atbilstošais koka caurmērs:

$$Dg = \sqrt{\frac{40000 \times G}{\pi \times N}}, \quad (6)$$

kur  $Dg$  ir vidējais kvadrātiskais caurmērs, cm;  $G$  ir šķērslaukums,  $m^2 \text{ ha}^{-1}$ ;  $N$  ir koku skaits, gab  $\text{ha}^{-1}$ .

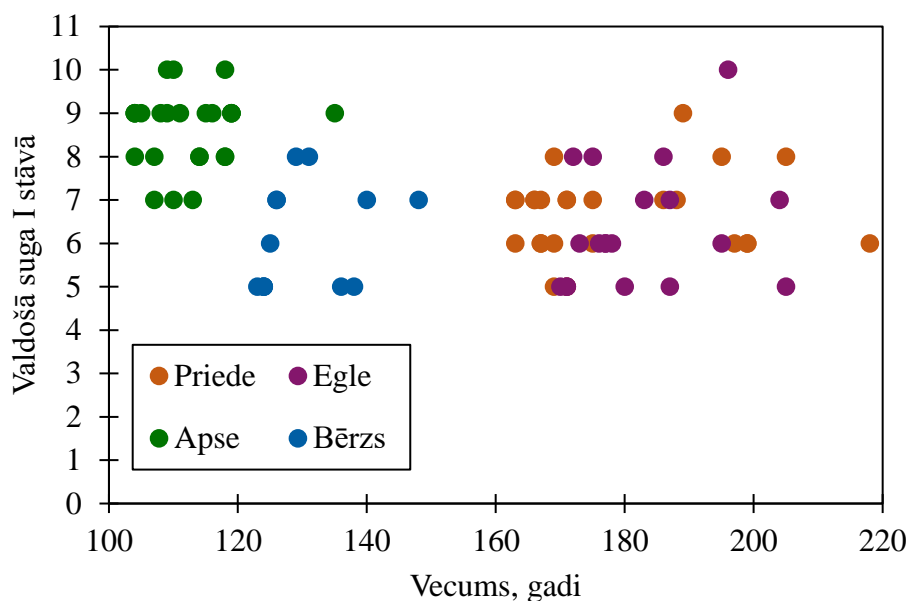
Attiecīgi arī vidējais koku augstums audzē noteikts kā vidējā kvadrātiskā caurmēra kokam atbilstošais augstums pēc augstumlīknes. Rezultātos aprēķinātas vidējās vērtības  $\pm 95\%$  ticamības intervāls ( $\pm 95\%$  C.I.).

Tā kā MSI pieejami dati par atmirušās koksnes krāju trijās sadalīšanās pakāpēs, tad pētījuma ietvaros aprēķins pielāgots pēc šādas shēmas: SV – 1. un 2. sadalīšanās pakāpe, aprēķins pēc 2. sadalīšanās pakāpes; VI – 3. sadalīšanās pakāpe, aprēķins pēc 3. sadalīšanās pakāpes; VE – 4. un 5. sadalīšanās pakāpe, aprēķins pēc 4. sadalīšanās pakāpes.

### 3. Rezultāti

#### 3.1. Pāraugušo mežaudžu dendrometriskais raksturojums

Turpmākai datu analīzei šī pārskata ietvaros izmantotas tikai audzes damakšņa (Dm) un vēra (Vr) meža tipos - 25 apses, 13 bērza, 19 egles un 25 priedes audzes (kopumā 82 mežaudzes, 507 parauglaukumi). Priedes audžu vecums ir no 163 līdz 218 gadiem (vidēji  $179 \pm 7$  gadi) ar priedi sastāva formulā 5-9 vienības, kam nav saistības ar audzes vecumu (17. att.). Pētījumā analizēto egles audžu vecums variē no 170 līdz 205 gadiem (vidēji  $182 \pm 5$  gadi) ar egli sastāva formulā 5- 10 vienības (17. att.).

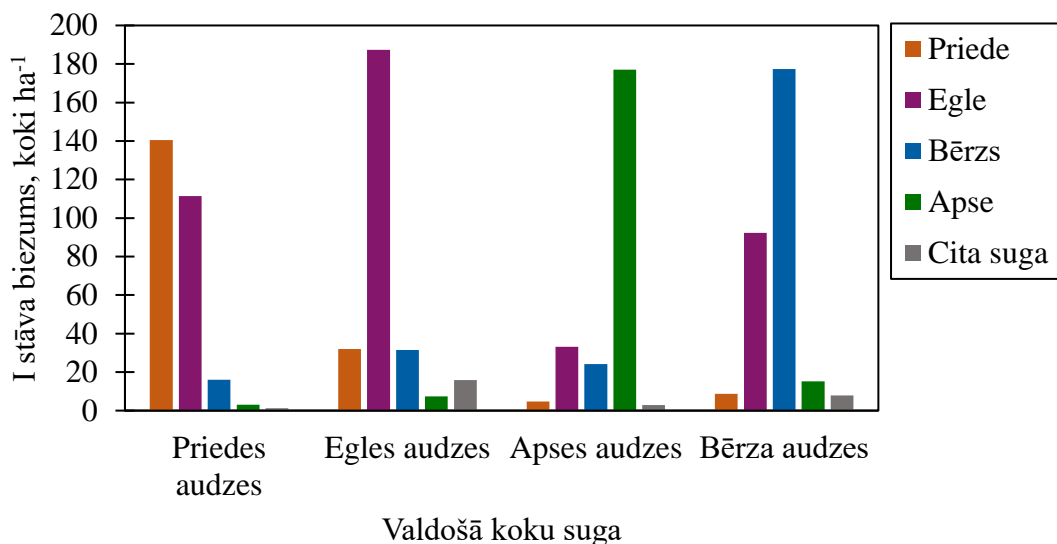


17. attēls. Valdošās sugas (priede, egle, bērzs, apse) sastāva vienība analizētajos objektos pa vecumiem Dm un Vr meža tipos

Vecums apses mežaudzēs variē no 104 līdz 135 gadiem (vidēji  $112 \pm 3$  gadi) un bērza mežaudzēs no 123 līdz 148 gadiem (vidēji  $130 \pm 5$  gadi). Apse sastāva formulā vecajās apses audzēs veido 7-10 vienības, un bērzs – 5-8 vienības bērza mežaudzēs (17. att.).

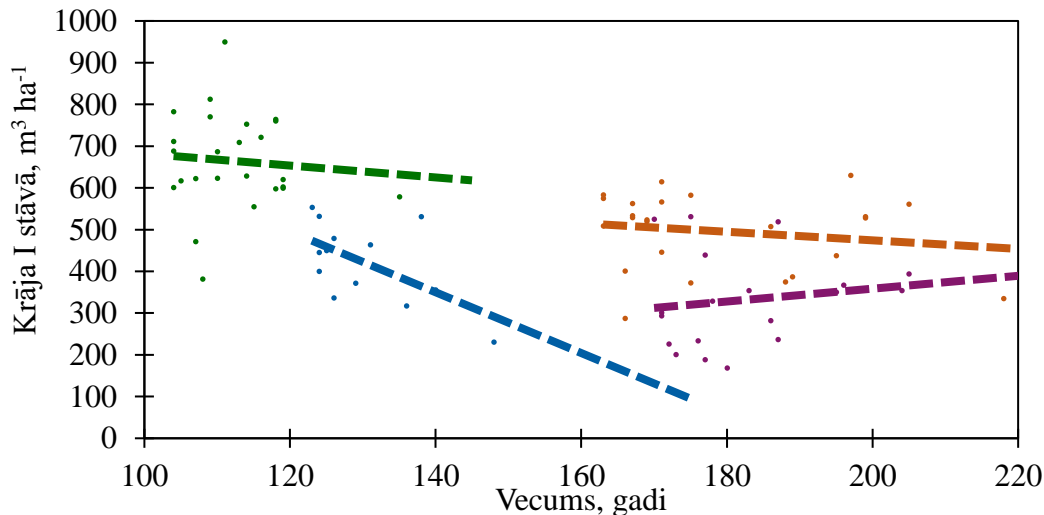
Salīdzinot I stāva koku skaitu pa koku sugām starp objektiem, konstatēts, ka priedes audzēs, kur I stāvā priedes vidēji ir  $141 \pm 26$  koki  $ha^{-1}$ , ir novērots liels egles īpatsvars (vidēji  $111 \pm 18$  koki  $ha^{-1}$ ) (18.att.). Audžu I stāva biežums plaši variē starp parauglaukumiem, bet vidēji audzēs tas ir līdzīgs (vidēji  $260 \pm 14$  koki  $ha^{-1}$ ) – priedes audzēs  $272 \pm 29$  koki  $ha^{-1}$ , egles audzēs  $243 \pm 33$  koki  $ha^{-1}$ , apses audzēs  $242 \pm 23$  koki  $ha^{-1}$ , bērza audzēs  $299 \pm 29$  koki  $ha^{-1}$  (18. att.).

Priedes audzēs konstatēts būtiski lielāks vidējais II stāva biežums ( $1087 \pm 179$  koki  $ha^{-1}$ ), kuru lielākoties veido egle. Kopējais audzes biežums plaši variē starp objektiem un vidēji priedes audzēs ir  $1359 \pm 182$  koki  $ha^{-1}$ , apses audzēs  $1143 \pm 253$  koki  $ha^{-1}$ , bērza audzēs  $1211 \pm 289$  koki  $ha^{-1}$ . Būtiski lielāks ( $p < 0,001$ ) kopējais audzes biežums konstatēts egles audzēs ( $2127 \pm 536$  koki  $ha^{-1}$ ), kur nozīmīgu īpatsvaru veido paauga un pamežs. Pāraugušās audzēs I stāva vidējais caurmērs (Dg)  $43 \pm 1,7$  cm un tas ir būtiski atšķirīgs starp audzēm ar dažādām valdošajām koku sugām – vidēji  $35 \pm 3,0$  cm egles audzēs,  $47 \pm 2,3$  cm priedes audzēs,  $37 \pm 2,5$  cm bērza un  $49 \pm 1,8$  cm apses audzēs.



**18. attēls. I stāva biežums pāraugušās audzēs pa koku sugām**

Vidējā mežaudzes krāja pāraugušajās audzēs ir  $578 \pm 40,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (no 212 līdz  $1040 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ); šķērslaukums no 14 līdz  $51 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , vidēji  $41 \pm 2,0 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ . Salīdzinot ar citām pāraugušo audžu grupām, I stāva krāja apses audzēs ir būtiski lielāka (vidēji  $664 \pm 48,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ;  $p < 0,001$ ; šķērslaukums  $39 \pm 2,4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ), kaut arī I stāva biežums audzēs ar dažādām valdošajām sugām ir līdzīgi (19. att.). Tas liecina, ka konstatēto krājas pārākumu nosaka tieši koku dimensijas. Pāraugušās egles audzēs konstatēta būtiski mazāka I stāva krāja, vidēji  $331 \pm 54,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (vidējais šķērslaukums  $24,9 \pm 3,3 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ).



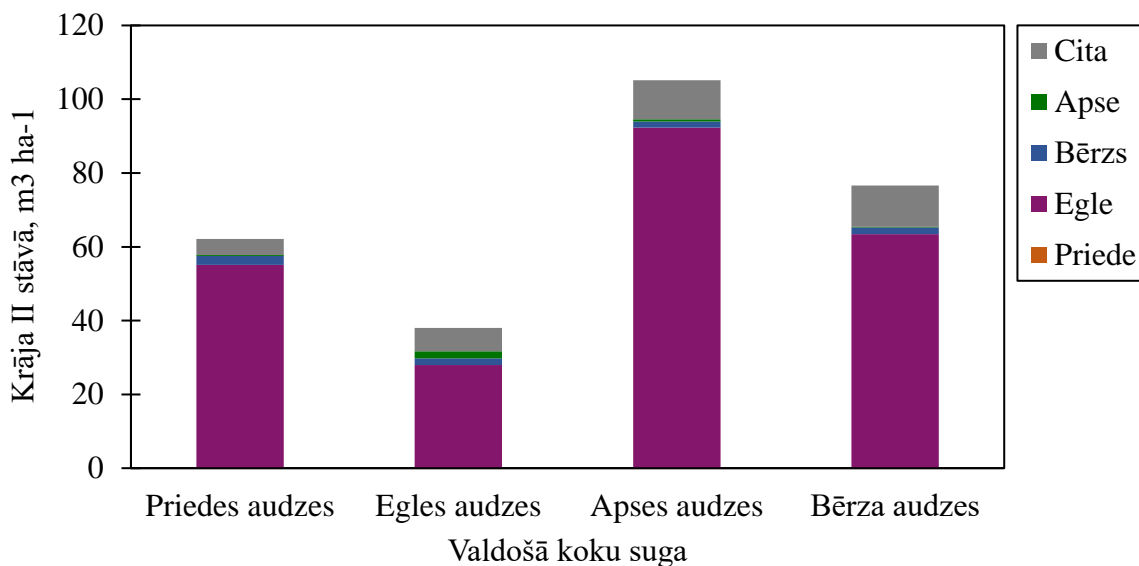
**19. attēls. I stāva krāja pāraugušās audzēs**

Apzīmējumi: Oranžs – priede; Violeti – egle; Zaļš – apse; Zils – bērzs.

Nav konstatēta statistiski būtiskas pāraugušo audžu kopējās vai I stāva krājas saikne ar to vecumu, izņemot I stāva krāju bērzam, kur šo saikni nosaka viena, vecākā audze (148 gadi, kas tika izņemta no turpmākas oglekļa analīzes). Tātad pāraugušās audzes uzskatāmas par vienotu kopu un kā tādas visas kopā izmantojamas analīzē, piemēram, salīdzinot to vidējos rādītājus ar jaunākām audzēm.



Audzēs II stāvā konstatēti visos objektos un visos parauglaukumos. Otrā stāva vidējā krāja pētījuma objektos ir  $75 \pm 8,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (t.i., 13% no kopējās audzes krājas); vidējais šķērslaukums  $6 \pm 0,9 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  (20. att.). Analizējot valdošās koku sugas krāju I un II stāvā, secināts, ka II stāvā neienāk I stāva dominējošā koku suga pāraugušajās audzēs, izņemot egles (ēncietīga koku suga) audzes, kur II stāvā egles veido 73% no II stāva krājas.



#### 20. attēls. II stāva koku krāja pāraugušajās mežaudzēs pēc I stāva valdošās koku sugas

Izvērtējot koku krāju II stāvā, kā arī paaugā un pamežā, konstatēts, ka egles audzēs II stāvā ir mazāks ( $36,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ; šķērslaukums vidēji  $4,9 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ) kā citās audzēs ( $62,1$  līdz  $105,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ; šķērslaukums no  $0,2$  līdz  $14,4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ). Pāraugušās audzēs pameža un paaugas koku krāja ir neliela (vidēji 2% no I stāva krājas).

Analizētajās pāraugušajās audzēs atmirusī koksne kopā sastāda vidēji  $90 \pm 10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , no kuras lielāko apjomu veido izgāztie koki jeb **kriticalas** ar  $56 \pm 8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , un mazāko – nokaltušie sausstāvošie koki, t.i., **sausokņi** ( $25 \pm 4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) un **stumbeni** ( $9 \pm 2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ). Atsevišķos objektos kopējais atmirušās koksnes apjoms variē no  $20$  līdz  $201 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (parauglaukumu līmenī variē pat no  $0$  līdz  $487 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ). Vērtējot proporcionāli, kriticalas veido 62%, stumbeni 28% un sausokņi 10% no kopējās atmirušās koksnes apjoma.

Analizējot atmirušo koksni pa sadalīšanās pakāpēm vidēji starp visiem objektiem, konstatēts, ka lielāko daļu veido vidēji sadalījušies koki (2. un 3. sadalīšanās pakāpes). Atmirušās koksnes apjoms starp audzēm ar dažādām valdošajām sugām statistiski būtiski neatšķiras. Apses audzēs konstatēts lielākais vidējais atmirušās koksnes apjoms ( $100 \pm 17,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ). Priedes mežaudzēs vidējā atmirušās koksnes krāja ir  $95 \pm 20,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , bet egles audzēs  $87 \pm 18,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Vismazākais vidējais atmirušās koksnes apjoms konstatēts bērza audzēs ( $68 \pm 23,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ).

#### Pāraugušo mežaudžu dendrometrisko rādītāji - kopsavilkums

Valdošā koku suga statistiski būtiski ietekmēja vidējo I stāva un II stāva krāju. Augstākā tā bija apses audzēs (vidēji par 37% lielāka nekā citām valdošajām koku sugām); šo pārākumu nosaka koku dimensiju, nevis I stāva biezuma atšķirības. Pāraugušo audžu kopā netika konstatēta kopējās krājas izmaiņu tendence saistībā ar vecumu, liecinot, ka tās analizējamās kā viena kopa un, saglabājoties vecajiem kokiem kā dominējošajam meža elementam, līdzīga krāja potenciāli iespējama plašā vecuma diapazonā (skujkokiem 163 līdz 218 gadi, lapu kokiem 104 līdz 140 gadi).

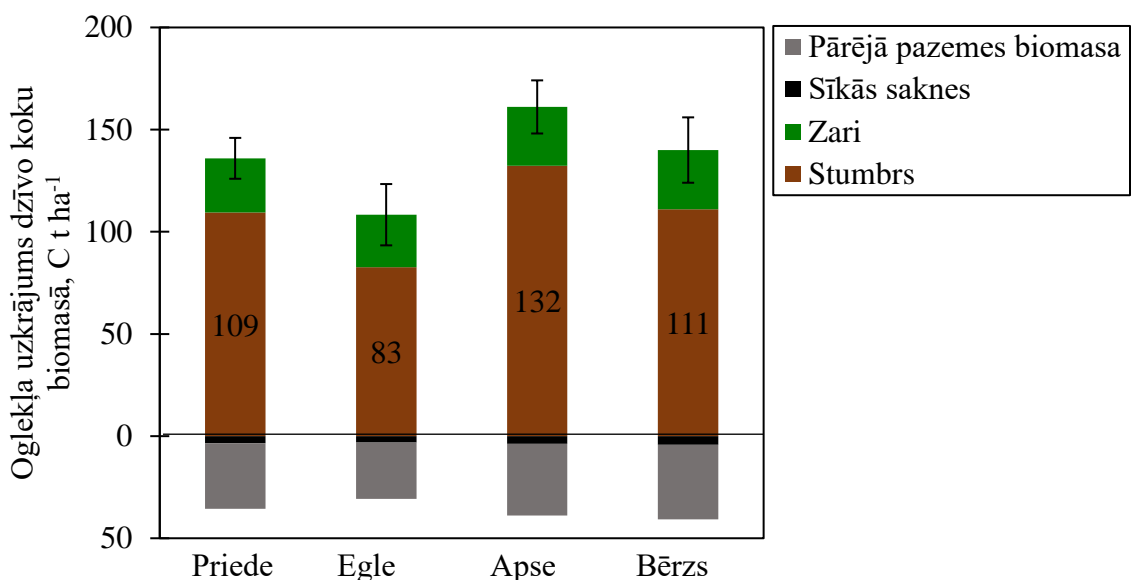
Pāraugušās audzēs konstatēts augsts vidējais I stāva šķērslaukums, liecinot, ka šādās audzēs ir liela koku biomasa – tāpat bijusi maza dabisko traucējumu ietekme.

Konstatēts, ka pāraugušajās audzēs notiek sukcesija, ko būtiski ietekmē valdošā koku suga. Priedes un bērza audzēs I stāvā ir augsts egles īpatsvars, tomēr egles ir būtiski tievākas nekā valdošās sugas koki. Visu valdošo sugu audzēs konstatēts egles II stāvs (lielākā krāja – lapu koku audzēs). Tas liecina, ka teorētiski ir iespējama pakāpeniska veco audžu nomaiņa nākotnē, ja audze netiek pakļauta augstas intensitātes dabisko traucējumu ietekmei. Valdošajai koku sugai nav konstatēta statistiski būtiska ietekme uz atmirušās koksnes apjomu (no 15% līdz 26% no I stāva krājas); lielāko daļu atmiruma veido vidēji sadalījušies koki (2. un 3. sadalīšanās pakāpes), kas liecina par relatīvi nesenu zemas intensitātes dabisko traucējumu ietekmi.

### 3.2. Oglekļa uzkrājums pāraugušās mežaudzēs

Pētījuma ietvaros pāraugušajām mežaudzēm aprēķināts dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksne uzkrātais ogleklis parauglaukuma un audzes līmenī. Iegūtie rezultāti parauglaukumu līmenī norāda uz augsto heterogenitāti audzēs šajā vecuma grupā. Pētījumā izvēlētas tikai tādas pāraugušās audzes, kurās vecie koki vēl joprojām ir dominējošais meža elements, un kurās ilgstoši nav veikta saimnieciskā darbība. Līdz ar to pētījumā izmantota relatīvi homogēna paraugkopa, nevērtējot tos gadījumus, kad veco mežu jau veido jaunāka audze.

Vislielākais oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā ir pāraugušās apses mežaudzēs –  $200 \pm 13,3 \text{ C t ha}^{-1}$  (variē no 98 līdz 252  $\text{C t ha}^{-1}$ ). Līdzīgi pāraugušās priedes un bērza mežaudzēs ir augsts oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā, attiecīgi,  $172 \pm 9,5 \text{ C t ha}^{-1}$  un  $181 \pm 15,6 \text{ C t ha}^{-1}$ . Arī šo sugu audzēs, tāpat kā apsei, oglekļa uzkrājumam dzīvo koku biomasā ir liela variācija starp objektiem – priedes audzēs tas variē no 116 līdz 202  $\text{C t ha}^{-1}$  un bērza audzēs – no 151 līdz 228  $\text{C t ha}^{-1}$ . Būtiski mazāks ( $p < 0,001$ ) oglekļa uzkrājums dzīvajā biomasā ir egles mežaudzēs ( $139 \pm 15,3 \text{ C t ha}^{-1}$ , variē no 90 līdz 203  $\text{C t ha}^{-1}$ ) (21. att.). Pāraugušās Dm un Vr mežaudzēs vidēji oglekļa uzkrājums dzīvo koku virszemes biomasā ir  $138 \pm 6,6 \text{ C t ha}^{-1}$ , bet pazemes biomasā  $36 \pm 1,4 \text{ C t ha}^{-1}$ . Oglekļa uzkrājums dzīvo koku virszemes biomasā (t.i., stumbrā un zaros) pāraugušās audzēs būtiski atšķiras starp analizētajām sugām – apses audzēs ( $161 \pm 11,0 \text{ C t ha}^{-1}$ , variē no 78 līdz 207  $\text{C t ha}^{-1}$ ) tas ir būtiski lielāks nekā pārējo sugu audzēs, bet egles audzēs oglekļa uzkrājums dzīvo koku virszemes biomasā ir būtiski mazāks ( $108 \pm 12,5 \text{ C t ha}^{-1}$ , variē no 70 līdz 163  $\text{C t ha}^{-1}$ ). Priedes un bērza audzēs vidējais oglekļa uzkrājums dzīvo koku virszemes biomasā ir līdzīgs, tas ir  $136 \pm 7,7 \text{ C t ha}^{-1}$  un  $140 \pm 12,7 \text{ C t ha}^{-1}$ . Oglekļa uzkrājums pazemes biomasā ir būtiski mazāks egles audzēs, sastādot  $31 \pm 3,0 \text{ C t ha}^{-1}$ .



**21. attēls. Oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā pāraugušās mežaudzēs Dm un Vr meža tipos ( $\pm 95\%$  C.I.)**

Vērtējot oglekļa uzkrājumu dzīvo koku biomasas frakcijās, konstatēts, ka lielākā oglekļa krātuve ir stumbrs (59 - 66% no kopējā oglekļa apjoma dzīvajā biomasā pa sugām).

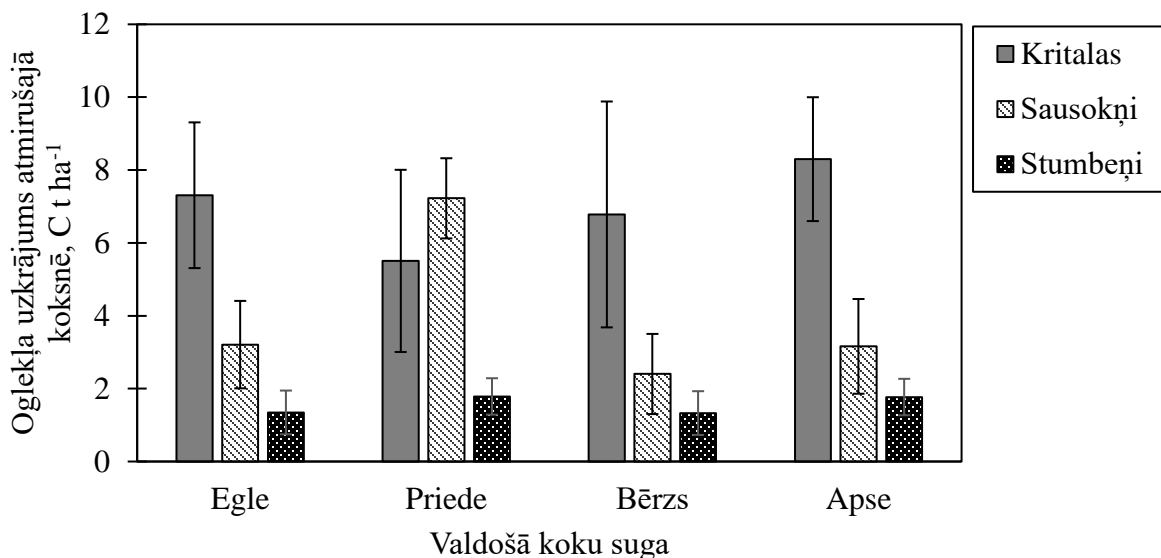
Oglekļa uzkrājums pārējā pazemes biomasā, kurā ietilpst balstsaknes, uzsūcošās saknes un celms, veido 18-20%, bet sīkajās saknēs – tikai 2% no kopējā dzīvajā biomasā uzkrātā oglekļa apjoma (21. att.).

Pāraugušās apses audzēs oglekļa uzkrājums stumbru biomasā ir būtiski lielāks nekā pārējās analizētās sugu mežaudzēs, tomēr, ņemot vērā, ka apses mežaudzes ir pakļautas trupes ietekmei, pētījumā analizētas koksnes blīvuma izmaiņas I stāvā, lai gūtu priekšstatu par trupes īpatsvaru un tās ietekmi uz oglekļa uzkrājumu stumbra biomasā. Ar rezistogrāfu iegūtie dati sniedz ieskatu par trupes izplatību līdz 4-5 m augstumam, tāpēc, izmantojot šādu paņēmieni, nav iespējams novērtēt trupes ietekmi pilnā stumbra garumā. Pētījuma ietvaros analizētas visas I stāva apses pāraugušās apses mežaudzēs, konstatējot, ka vidēji katrā objektā vismaz 73% no kopējā apšu skaita I stāvā (kopā analizēti 1305 koki) konstatēta stumbra trupe (variē no 39% līdz 96%) līdz 4-5 m augstumam. Pēc iegūtajiem datiem izdalītas divas trupes kategorijas un dobums. Pēc tam laboratorijā, veicot ierobežota skaita paraugu testēšanu, noteikts koksnes blīvums un oglekļa koncentrācijas izdalītajām trupes kategorijām. Konstatēts, ka pirmajai trupes kategorijai (vidēji satrupējusi koksne, atbilst 2. un 3. sadalīšanās pakāpei) koksnes blīvums ir līdzīgs netrupējušas apses koksnes blīvumam (samazinājums par 17%), bet otrās kategorijas (satrupējusi koksne, atbilst 4. un 5. sadalīšanās pakāpei) koksnes blīvums ir 5 reizes mazāks nekā veselai apses koksnei. Laboratorijā noteikts, ka pirmās trupes kategorijas koksnes oglekļa koncentrācija neatšķiras no veselās koksnes oglekļa koncentrācijas vērtības. Otrās trupes kategorijas oglekļa koncentrācija ir par 4% augstāka – jo, pieaugot sadalīšanās pakāpei, koksne samazinās ogļhidrāti, bet relatīvi pret ogļhidrātu samazinājumu pieaug lignīna saturs atmirušajā koksne (Sandström et al., 2007).

Pēc datu analīzes secināts, ka kopumā trupes ietekme uz oglekļa uzkrājumu I stāva apses nav liela - vidējais oglekļa samazinājums I stāva apses starp pētījuma objektiem variē no 2% līdz 9% (vidēji 6%). Proporcioniāli vislielāko tilpumu aizņēma pirmā trupes kategorija, kuras koksnes blīvums un oglekļa koncentrācija ir līdzīga netrupējušas apses koksnes parametriem. Taču, tā kā nav skaidrs, cik strauji stumbra trupe attīstās, nav iespējams prognozēt, cik ilgi oglekļa uzkrājums

stumbrā paliks stabils. Turklāt šobrīd nav pieejami dati par stumbra trupes bojājumu īpatsvaru pilnā stumbra garumā apsēm, kā arī nav izpratnes par trupes mainību, tātad var uzskatīt, ka šajā posmā iegūtie rezultāti raksturo minimālo stumbra trupes ietekmi uz oglekļa uzkrājumu pāraugušās apses audzēs. Arī Eiropas un pasaules mērogā, tā kā apse netiek uzskatīta par mērķa sugu, nav pieejama zinātniskā literatūra par oglekļa uzkrājuma izmaiņām trupes dēļ apses audzēs (Rogers et al., 2020).

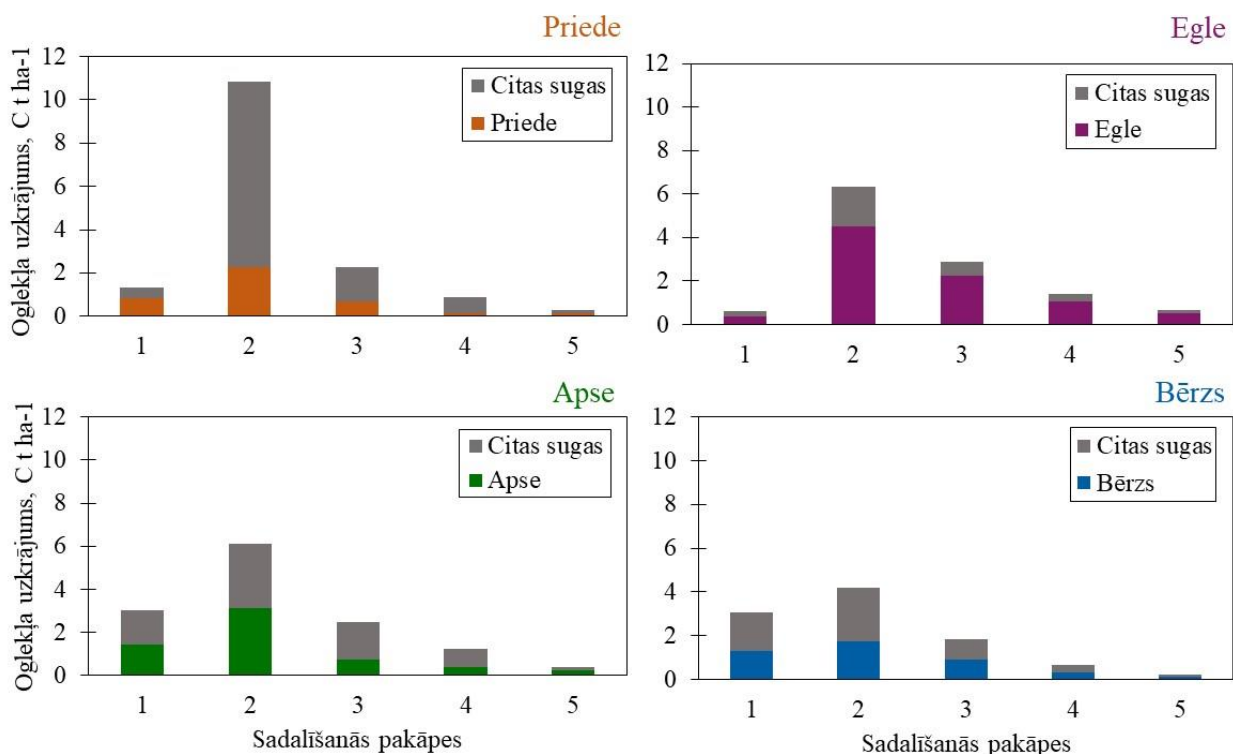
Pētījumā analizētajās pāraugušajās mežaudzēs konstatēts ievērojams apjoms atmirušās koksnes. Kopumā uzkrātais ogleklis atmirušajā koksne (kritalās, sausokņi, stubeņi) pētāmajos objektos vidēji ir  $13 \pm 1,4 \text{ C t ha}^{-1}$ , un tas nav būtiski atšķirīgs starp dažādu koku sugu audzēm, bet stipri variē pa objektiem (no 4 līdz  $29 \text{ C t ha}^{-1}$ ). Vērtējot oglekļa uzkrājumu pa atmiruma veidiem, secināts, ka kritalās un stubeņos uzkrātais ogleklis ir līdzīgs dažādu koku sugu audzēs (t.i., vidēji  $7 \pm 1,1 \text{ C t ha}^{-1}$  kritalās ( $p=0,3$ ) un  $2 \pm 0,3 \text{ C t ha}^{-1}$  stubeņos ( $p=0,4$ )) (22. att.).



**22. attēls. Oglekļa uzkrājums atmirušajā koksne pāraugušajās mežaudzēs pa atmiruma veidiem ( $\pm 95\%$  C.I.)**

Pāraugušās priedes audzēs konstatēts būtiski lielāks ( $p < 0,001$ ) oglekļa uzkrājums sausokņos ( $7 \pm 1,1 \text{ C t ha}^{-1}$ ), salīdzinot ar pārējām pāraugušajām mežaudzēm, kurās vidējais uzkrājums sausokņos sastāda  $3 \text{ C t ha}^{-1}$  (22. att.). Oglekļa uzkrājums sadalījumā pa atmiruma veidiem bija šāds: kritalās 56%, sausokņos 32% un stubeņos 12% no kopējā oglekļa uzkrājuma nedzīvajā koksnes biomasā.

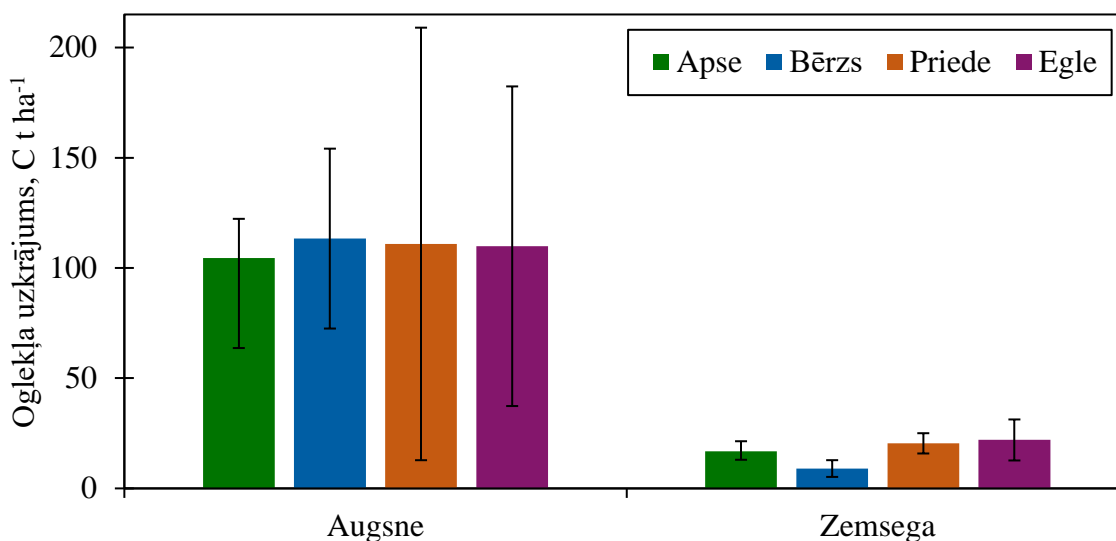
Vērtējot oglekļa uzkrājumu pa atmiruma veidiem pāraugušās audzēs, secināts, ka egles, bērza un apses audzēs kritalās konstatēts būtiski lielāks oglekļa uzkrājums nekā sausokņos un stubeņos, kur tas ir mazāks un līdzīgs. Priedes audzēs novērots atšķirīgs oglekļa uzkrājums starp atmiruma veidiem – stubeņos novērots būtiski mazāks oglekļa uzkrājums nekā abās pārējās atmirušās koksnes grupās (22. att.). Iegūtie rezultāti apliecina, ka nepieciešams iegūt padziļinātu izpratni par atmiruma veidošanās cēloņiem un atšķirībām. Visās pāraugušajās audzēs vislielākais atmirušās koksnes apjoms, līdz ar to arī lielākais oglekļa uzkrājums ir 2. sadalīšanās pakāpē (atmirusī koksne cieta) (23. att.).



**23. attēls. Oglekļa uzkrājums atmirušajā koksnes biomasā pāraugušās mežaudzēs Dm un Vr meža tipos ( $\pm 95\%$  C.I.)**

Novērtēts arī valdošās sugas īpatsvars atmirušās koksnes oglekļa uzkrājumā pāraugušajās audzēs – egles audzēs novērots visaugstākais uzkrājums atmirušās eglēs (vidējais oglekļa uzkrājums atmirušās eglēs ir 67 % no kopējā oglekļa uzkrājuma nedzīvajā koksnē), bet priedes audzēs oglekļa uzkrājums atmirušā priedes koksnē ir procentuāli vismazākais – tikai 32% no kopējā oglekļa uzkrājuma atmirušajā koksnē. Šāds procentuālais sadalījums apstiprina, ka priede sadalās salīdzinoši ilgākā laika periodā nekā egļe pāraugušās egles audzēs līdzīgā vecuma grupā. Ņemot vērā, ka priedes bioloģiskais vecums ir lielāks kā pārējām koku sugām, priedes mūžs audzē ir nozīmīgi ilgāks, kā arī atmirušās priedes, ņemot vērā sugu īpatnības, sadalās lēnāk nekā pārējās analizētās valdošās koku sugas. Bērzs veido 49% no kopējā oglekļa uzkrājuma nedzīvajā koksnē pāraugušās bērza audzēs, bet apse – 44% apses audzēs (23. att.).

Augsne ir ļoti nozīmīga oglekļa krātuve mežā. Pētījumā analizēts augsnē uzkrātais ogleklis visās pāraugušās mežaudzēs, izvērtējot arī oglekļa sadalījumu pa augsnes slāņiem (0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 40-80 cm). Vidējais oglekļa uzkrājums augsnē (0-80 cm) apses un bērza audzēs ir, attiecīgi,  $105 \pm 17,8$  C t ha<sup>-1</sup> un  $113 \pm 40,8$  C t ha<sup>-1</sup> (24. att.).



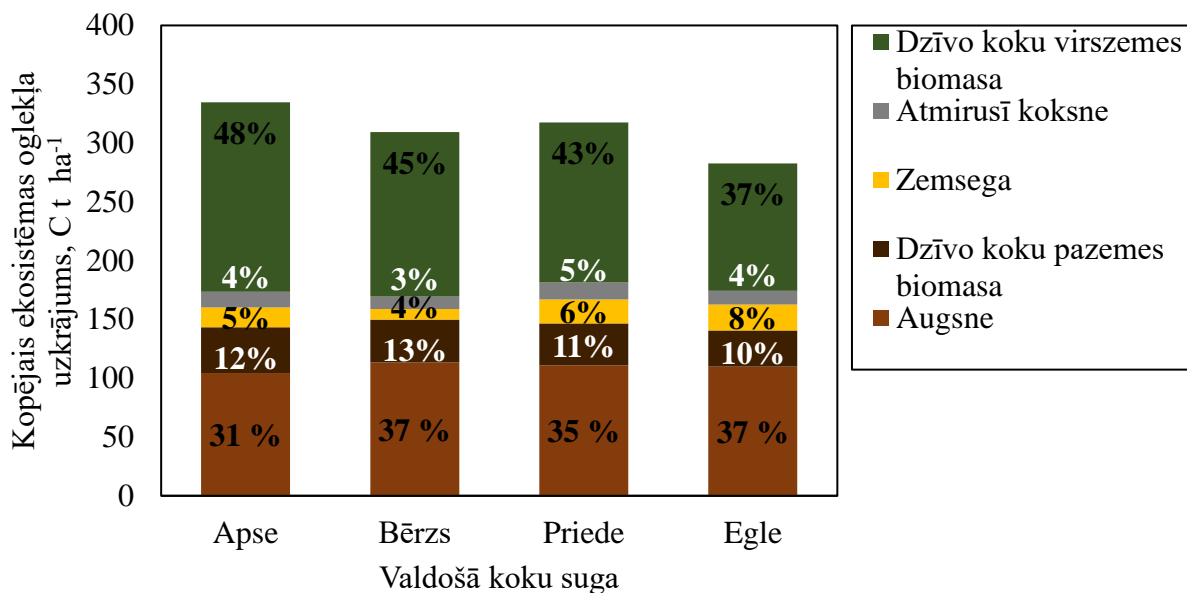
**24. attēls. Oglekļa uzkrājums augsnē (0-80 cm) un zemsegā pāraugušās mežaudzēs Dm un Vr meža tipos ( $\pm 95\%$  C.I.)**

Vidējais augsnes oglekļa uzkrājums egles audzēs ir  $110 \pm 72,5$  C t ha<sup>-1</sup>, bet priedes audzēs  $111 \pm 98,1$  C t ha<sup>-1</sup>. Kaut arī vidējās vērtības ir ļoti līdzīgas starp visām četrām sugām, ievāktajiem datiem par augsnes oglekļa koncentrāciju un aprēķinātajiem oglekļa uzkrājumiem novērota ļoti augsta variācija, īpaši skujkoku audzēs (24. att.). Papildus tam, tikai 40% no ievāktajiem paraugiem priedes audzēs iegūti rezultāti (t.i., nevarēja noteikt kādu rādījumu, nebija pareizi ievākts paraugs, laboratorijas kļūda u.tml.). Lielā variācija, iespējams, ir skaidrojama arī ar sugu daudzveidību un strukturālo dažādību pāraugušās audzēs. Lielāks oglekļa uzkrājums bieži novērots ne tikai auglīgākās audzēs, bet arī tādās audzēs, kur konstatēta lielāka sugu daudzveidība, kā arī ir izteikts audzes otrais stāvs, īpaši to var novērot egles un bērza audzēs (Hansson et al., 2013; Laganière et al., 2015). Tas, iespējams, izskaidro, kāpēc egles un bērza audzēs ir plašāks ticamības intervāls, kā apses audzēs, kur lielākā daļa audžu bija ļoti homogēnas, t.i., apse vidēji sastāda 9 sastāva vienības. Tāpat pētījumos uzsvērts, ka oglekļa uzkrājums mežaudzēs ar minerālaugsnī starp dažādām koku sugām var nebūt īpaši atšķirīgs, tomēr variācija gan iespējama ļoti augsta (Cindy & Vesterdal, 2013). Iepriekšējos pētījumos novērota sakarība, ka audzēs, kur konstatēts neliels zemsegas slānis, augsnē uzkrātā oglekļa apjoms ir augstāks (Cindy & Vesterdal, 2013).

Izteiktākas oglekļa uzkrājuma atšķirības novērotas zemsegas slānī (24. att.). Skujkoku audzēs vidējais oglekļa uzkrājums zemsegā ir lielāks nekā lapu koku audzēs. Vidējais zemsegā uzkrātais oglekļa uzkrājums vislielākais konstatēts egles audzēs ( $22 \pm 9,3$  C t ha<sup>-1</sup>) un priedes audzēs ( $20 \pm 4,6$  C t ha<sup>-1</sup>), bet mazāks tas ir apses ( $17 \pm 4,6$  C t ha<sup>-1</sup>) un bērza ( $9 \pm 3,8$  C t ha<sup>-1</sup>) audzēs. Oglekļa uzkrājums zemsegā starp dažādu koku sugu audzēm variē no 1 līdz 62 C t ha<sup>-1</sup>. Iespējams, ka atšķirības zemsegā starp priedes un egles audzēm ir tāpēc, ka ir atšķirīgi skuju sadalīšanās ātrumi abām sugām (priedēm līdz 2 gadiem, eglēm līdz 6 gadiem), tāpēc egles audzēs uzkrātais oglekļa apjoms zemsegā ir lielāks (Hansson et al., 2011). Tā kā kopumā priedes audzēs kopējā dzīvo koku biomasa bija būtiski lielāka, kā arī priedes audzēs novērots nozīmīgs egles biomasas īpatsvars, šīs atšķirības zemsegas slānī nav tik izteiktas, salīdzinot ar iepriekšējiem pētījumiem (Hansson et al., 2013). Iegūtie rezultāti par augsnes un zemsegas atšķirībām starp skuju koku un lapu koku audzēm vēl joprojām ir neviennozīmīgi, un tie bieži ir pretrunīgi (Lutter et al.,

2018). Kā arī veiktie pētījumi lielākoties ir par konkrēto sugu tīraudzēm, neņemot vērā, ka mistraudzēs šīs atšķirības nav tik izteiktas (Laganière et al., 2015; Hansson et al., 2013).

Kopējo ekosistēmas oglekļa uzkrājumu veido dažādas oglekļa krātuves (*carbon pools*): dzīvo koku biomasa (kurā ir stumbrs, zari, sīkās saknes, pārējā pazemes biomasa), atmirusī koksne (sausokņi, stumbeņi, kritālas), augsne un nedzīvā zemsega (25. att.).



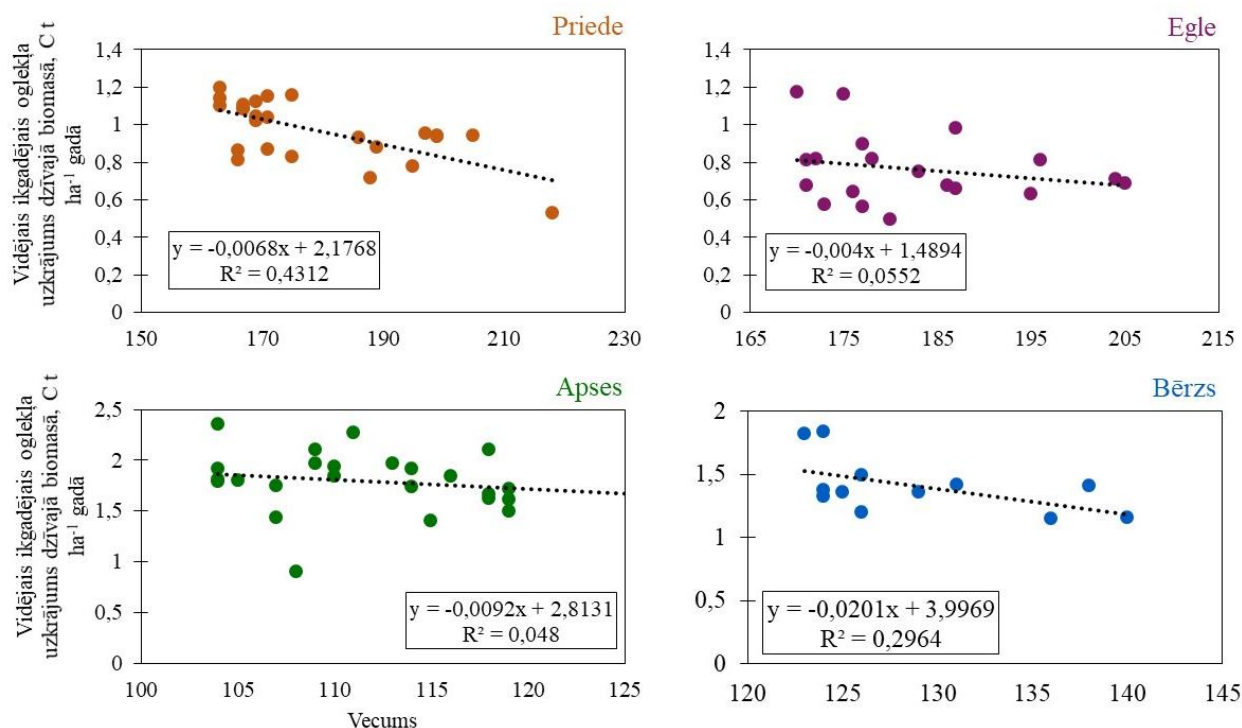
**25. attēls. Kopējais ekosistēmas oglekļa uzkrājums pāraugušās mežaudzēs Dm un Vr meža tipos**

Vidēji pusi no kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājuma pāraugušās skujkoku audzēs (priede - 54%; egļe - 47%) veido dzīvā koku biomasa, kas ir lielākā oglekļa krātuve. Arī pāraugušās lapu koku audzēs lielākā krātuve kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājumā ir dzīvo koku biomasa (apse - 59%; bērzs - 58%). Minerālaugsne ir otra lielākā oglekļa krātuve (31% līdz 37% no kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājuma), kam seko nedzīvā zemsega (vidēji 6% no kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājuma) un atmirusī koksne (vidēji 4% no kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājuma) (25. att.). Analizējot atšķirības starp dažādām oglekļa krātuvēm pāraugušās audzēs, secināts, ka oglekļa uzkrājums koksne (dzīvo koku biomasa + atmirusī koksne) būtiski ( $p < 0,01$ ) atšķiras starp audzēm ar dažādu valdošo koku sugu, izņemot priedes un bērza audzes, starp kurām atšķirība nav statistiski būtiska. Pāraugušās audzēs oglekļa uzkrājums augsnē un zemsegā būtiski neatšķiras dažādu koku sugu audzēs. Rezultāti apliecina, ka pāraugušās mežaudzēs koksne, īpaši dzīvo koku virszemes biomasa ir pati nozīmīgākā oglekļa krātuve, kas nosaka kopējo ekosistēmas oglekļa uzkrājumu mežaudzēs ar līdzīgiem augšanas apstākļiem, bet atšķirīgu sugu sastāvu. Tātad, valdošās koku sugas ļoti nozīmīgi ietekmē oglekļa uzkrājumu un tā dinamiku pāraugušās audzēs.

Vērtējot iegūtos datus parauglaukumu līmenī, secināts, ka ir ļoti liela audžu strukturālā heterogenitāte pāraugušās mežaudzēs. Vērtējot kopējo ekosistēmas oglekļa uzkrājumu pāraugušajās mežaudzēs, jāņem vērā, ka ir iekļauta tikai tāda paraugkopa, kurā iekļautās audzēs priede, egļe, bērzs un apse ir valdošā koku suga pētījuma veikšanas brīdī. Šādā gadījumā netiek izvirzīti apgalvojumi par to, cik lielā daļā gadījumu šāds stāvoklis būtu konstatējams arī lielākā vecumā, un netiek vērtētas tās audzes, kurās šāds stāvoklis noteiktajā vecuma grupā vairs nav konstatējams (jo ir liels atmirušās koksnes īpatsvars). Tāpēc īpaši būtiskus rezultātus var mainīt dažādi neprognozējami faktori – dabiskie traucējumi (vētras, ugunsgrēki u.tml.) un klimata pārmaiņas (atšķirīga audzes dabiskā sukcesija).

Šādā situācijā, kad vecā mežā vēl joprojām ir veca kokaudze kā dominējošais meža elements (dati ir hronosekvence), audzes vecumam nav būtiskas ietekmes uz kopējo koku biomasas oglekļa uzkrājumu pāraugušās audzēs. Tātad kopējais biomasas un oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā šādās pāraugušās mežaudzēs ir stabils. Vispārīgā gadījumā, pieaugot audzes vecumam, kopējais ekosistēmas oglekļa uzkrājums pieaug, un tas ir cieši saistīts ar audzes produktivitāti. Tomēr īpaši pāraugušās mežaudzēs oglekļa krātuvju lielums ir atkarīgs no dažādu faktoru kopuma, un tās mainās atkarībā no mežaudzes attīstības stadijas, dabisko traucējumu ietekmes un augšanas apstākļiem.

Lai novērtētu oglekļa uzkrājuma izmaiņas, pētījumā aprēķināts ikgadējais oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā. Audzes vecumam palielinoties, visās pāraugušajās mežaudzēs (neatkarīgi no valdošās sugas) ikgadējais oglekļa uzkrājums samazinās, t.i., lai arī audzes krāja līdz ar vecumu turpina pieaugt, tomēr tas notiek ievērojami lēnāk nekā jaunākās audzēs. Vidējais ikgadējais oglekļa uzkrājums statistiski būtiski atšķiras starp audzēm, apses audzēs veidojot  $1,8 \pm 0,12$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup>, bērza audzēs  $1,4 \pm 0,17$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup>, priedes audzēs  $1,0 \pm 0,07$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup> un egles audzēs  $0,8 \pm 0,09$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup>.



**26. attēls. Vidējais ikgadējais oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā pāraugušās mežaudzēs Dm un Vr meža tipos.**

Ikgadējais oglekļa uzkrājums priedes audzēs būtiski ( $p < 0,01$ ) samazinās no  $1,1$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup> 163 gadus vecā audzē līdz  $0,5$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup> 218 gadus vecā priedes audzē, bet egles audzēs ( $p = 0,6$ ) šādu tendenci nenovēro (26. att.). Vērtējot iegūtos rezultātus pāraugušās lapu koku audzēs, secināts, ka ikgadējais oglekļa uzkrājums apses audzēs līdz ar vecuma palielināšanos būtiski ( $p < 0,01$ ) samazinās, tomēr samazinājumu ietekmē arī citi faktori, jo mazākais ikgadējais pieaugums konstatēts 108 gadus vecā apses audzē ( $0,9$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup>), bet vecākajā (135 gadi) audzē tas ir  $1,6$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup> (26. att.). Arī bērza audzēs novērojams straujš ikgadējā oglekļa uzkrājuma samazinājums (variē no  $1,4$  līdz  $1,8$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup>) vecumā no 123 līdz 138 gadiem ( $p = 0,06$ ) (26.att.).



### **Oglekļa uzkrājumu pāraugušās audzēs - kopsavilkums**

Pāraugušajām audzēm raksturīga augsta heterogenitāte, to atspoguļo ievērojama oglekļa uzkrājuma variācija dažādos meža ekosistēmas komponentos starp parauglaukumiem.

Vidēji pusi (47-59% atkarībā no valdošās sugas) no kopējā oglekļa uzkrājuma pāraugušās audzēs veido koku biomasā. Koku biomasā ir nozīmīgākā oglekļa krātuve, kas tieši ietekmē arī oglekļa uzkrājumu atmirušajā koksni un zemsegā. Tas, ka oglekļa uzkrājuma izmaiņas koku biomasā nebija saistītas ar pāraugušo audžu vecumu (kas atšķiras par 31-55 gadiem), liecina, ka šīs grupas audzēs liels oglekļa uzkrājums saglabājas tikai tik ilgi, kamēr vecā kokaudze ir dominējošais meža elements, t.i., līdz tā iet bojā regulāru un/vai intensīvu dabisko traucējumu rezultātā. Analizētajā audžu grupā šādu traucējumu ilgstoši ir bijis maz, par ko liecina ļoti vāja korelācija starp oglekļa apjomu biomasā un atmirušajā koksni, kā arī salīdzinoši nelielais oglekļa uzkrājums atmirušajā koksni – tikai 8% no koku biomasā konstatētā. Atmirušās koksnes relatīvi lielais apjoms un vienlaikus tā nelielā ietekme uz kopējo oglekļa uzkrājumu norāda, ka tā ir īslaicīga un dinamiska oglekļa krātuve, un ir efektīvāk nodrošināt pienesumu klimata pārmaiņu mazināšanai, izmantojot koksni produktos ar ilgu dzīves ciklu.

Valdošā koku suga maz ietekmē oglekļa uzkrājumu minerālaugsni, kas ir otra lielākā oglekļa krātuve (31-37% no kopējā oglekļa uzkrājuma), taču ietekmē oglekļa uzkrājumu zemsegā: skujkoku audzēs vidējais oglekļa uzkrājums zemsegā ir lielāks nekā lapu koku audzēs. Kopumā zemsega ir relatīvi neliela oglekļa krātuve – vidēji vidēji 6% no kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājuma.

Pāraugušās audzēs oglekļa uzkrājumu samazina arī patogēnās sēnes. Šajā pētījumā trupe analizēta tikai apsēs, to konstatējot lielākajai daļai (73%) koku. Tomēr trupes ietekme bija relatīvi neliela: vidējais oglekļa uzkrājuma samazinājums 6%. Iespējamais izskaidrojums ir tieši vitālāko, trupes mazāk skarto apses audžu saglabāšanās līdz pāraugušās audzes vecumam – tāpat relatīvi nesens bojājuma sākums. Tomēr šo aspektu nepieciešamas detalizētāk analizēt turpmākajos pētījumos.

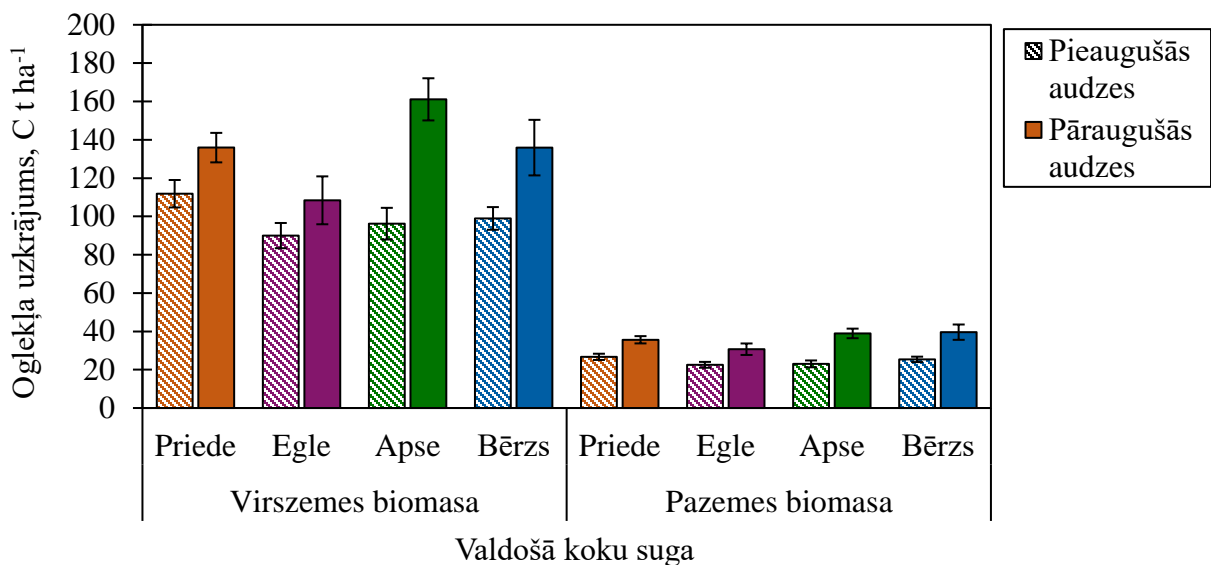
### **3.3. Oglekļa uzkrājuma salīdzinājums pieaugušās un pāraugušās mežaudzēs**

Lai gūtu priekšstatu par oglekļa uzkrājumu jaunākās mežaudzēs, izmantoti MSI parauglaukumu dati pieaugušās priedes, egles, apses un bērza mežaudzēs. Ņemot vērā, ka otrā pieaugušo audžu vecumklase MSI datus ir maz (tikai 25%), tādēļ faktiski salīdzinājums veikts ar pirmo vecumklasi (priede 101-120 gadi, egle 81-100 gadi, bērzs 71-90 gadi, apse 41-60 gadi).

Pieaugušās audzēs vidējā kopējā krāja ir  $375 \pm 13,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , bet I stāva krāja ir  $325 \pm 12,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  visās MSI audzēs. Pieaugušās bērza audzēs vidējā I stāva krāja ir būtiski ( $p < 0,01$ ) mazāka ( $290 \pm 18,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) nekā pārējās pieaugušajās audzēs, kur tā ir savstarpēji līdzīga. Savukārt, pāraugušās mežaudzēs vidējā I stāva krāja egles audzēs ir būtiski mazāka nekā pārējo valdošo koku sugu audzēs. Pieaugušās priedes, pieaugušās apses un pieaugušās bērza audzēs I stāva krāja ir būtiski ( $p < 0,001$ ) mazāka nekā pāraugušās šo koku sugu audzēs. Taču I stāva krāja pieaugušās un pāraugušās egles audzēs ir līdzīga ( $p = 0,9$ ).

Vidējais I stāva biezums visās pieaugušās audzēs ir  $384 \pm 50 \text{ koki ha}^{-1}$ , un tas ir līdzīgs visās pieaugušajās audzēs – apses audzēs  $354 \pm 50 \text{ koki ha}^{-1}$ , bērza audzēs  $369 \pm 27 \text{ koki ha}^{-1}$ , priedes audzēs  $398 \pm 34 \text{ koki ha}^{-1}$  un egles audzēs  $396 \pm 31 \text{ koki ha}^{-1}$ . Salīdzinoši, visās pāraugušajās audzēs I stāva biezums ir mazāks nekā pieaugušajās audzēs, turklāt pāraugušās apses un pāraugušās egles audzēs samazinājums ir būtisks ( $p < 0,001$ ). Vidējais I stāva caurmērs ( $D_g$ ) pieaugušās audzēs ir  $32 \pm 0,7 \text{ cm}$  un tas ir būtiski mazāks kā pāraugušajās audzēs.

Pēc vienotas aprēķina metodikas pieaugušajās audzēs aprēķināts oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksnes biomasā. Konstatēts, ka pieaugušās audzēs oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā ir līdzīgs ( $p=0,7$ ) priedes un bērza mežaudzēs, un tas ir būtiski ( $p<0,0001$ ) lielāks nekā apses un egles mežaudzēs. Savukārt, pāraugušo audžu grupā apses audzēs konstatēts būtiski lielāks oglekļa uzkrājums dzīvajā koku biomasā. Vērtējot sīkākās frakcijās, pieaugušās priedes audzēs vidējais oglekļa uzkrājums dzīvo koku virszemes biomasā ( $112 \pm 7,2 \text{ C t ha}^{-1}$ ) ir būtiski ( $p<0,01$ ) lielāks nekā visās pārējās pieaugušajās audzēs – apses audzēs vidēji  $96 \pm 8,3 \text{ C t ha}^{-1}$ , bērza audzēs  $99 \pm 5,9 \text{ C t ha}^{-1}$ , egles audzēs  $90 \pm 6,6 \text{ C t ha}^{-1}$  (27. att.).

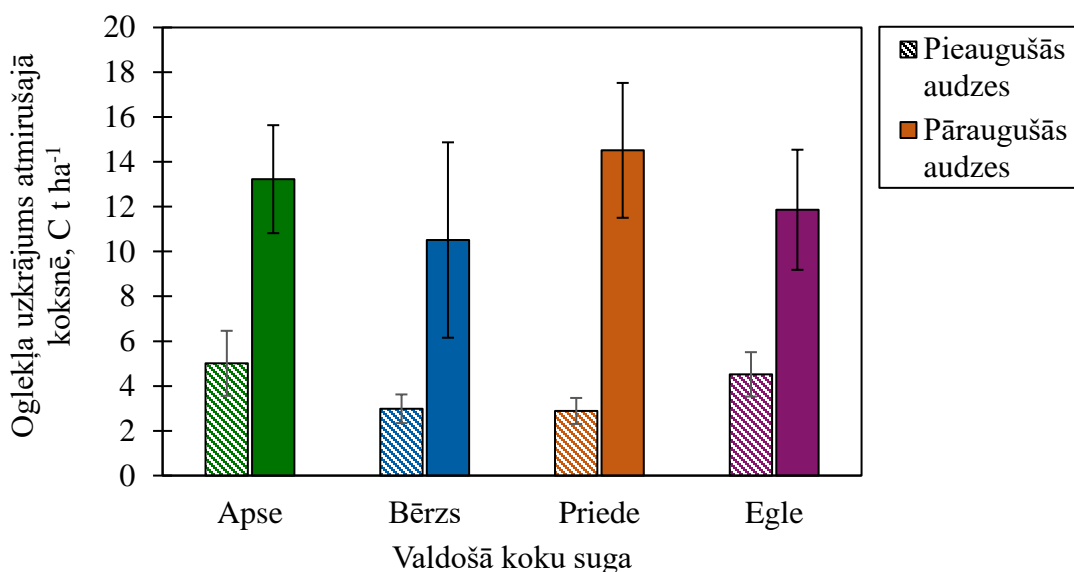


**27. attēls. Oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā pieaugušās (MSI III cikla dati) un pāraugušās mežaudzēs Dm un Vr meža tipos ( $\pm 95\%$  C.I.)**

Pieaugušās audzēs lielākā oglekļa krātuve ir stumbrs (67% - 70% no oglekļa uzkrājuma dzīvo koku biomasā pa sugām), kas ir procentuāli lielāka krātuve nekā pāraugušās audzēs, kur stumbra biomasā uzkrāts 59 - 66% no oglekļa uzkrājuma dzīvo koku biomasā. Pieaugušās audzēs pazemes biomasā uzkrāts 19 - 20% no kopējā oglekļa uzkrājuma dzīvo koku biomasā (27. att.).

Analizētajās pieaugušajās mežaudzēs konstatēts neliels apjoms atmirušajā koksne. Kritālas ir lielākā atmirušās koksnes oglekļa krātuve pieaugušajās audzēs. Vislielākais vidējais oglekļa uzkrājums kritālās ir pieaugušās apses ( $4 \pm 1,3 \text{ C t ha}^{-1}$ ) un pieaugušās egles ( $3 \pm 0,7 \text{ C t ha}^{-1}$ ) audzēs. Būtiski mazāks ( $p<0,01$ ) oglekļa uzkrājums kritālās, salīdzinot ar pieaugušām apses audzēm, ir pieaugušās bērza un pieaugušās priedes audzēs, attiecīgi,  $2 \pm 0,5 \text{ C t ha}^{-1}$  un  $2 \pm 0,4 \text{ C t ha}^{-1}$ . Sausokņi ir otra lielākā atmirušās koksnes oglekļa krātuve (vidēji  $1 \pm 0,2 \text{ C t ha}^{-1}$  no visām pieaugušajām audzēm), kura ir līdzīga starp valdošajām koku sugām. Pieaugušās egles audzēs ( $1,1 \pm 0,39 \text{ C t ha}^{-1}$ ) konstatēts lielākais, bet pieaugušās bērza audzēs ( $0,6 \pm 0,20 \text{ C t ha}^{-1}$ ) mazākais oglekļa uzkrājums sausokņos, kas ir būtiski atšķirīgs ( $p=0,05$ ). Mazākais oglekļa uzkrājums visās pieaugušajās audzēs konstatēts stubņos, veidojot  $0,6 \pm 0,10 \text{ C t ha}^{-1}$  lielu oglekļa krātuvi.

Vidējais oglekļa uzkrājums atmirušajā koksne (kritālas, sausokņi, stubņi) pieaugušajās MSI audzēs vidēji ir  $3 \pm 0,5 \text{ C t ha}^{-1}$ , kas ir gandrīz četras reizes mazāk nekā vidējais oglekļa uzkrājums pāraugušajās audzēs (28. att.).

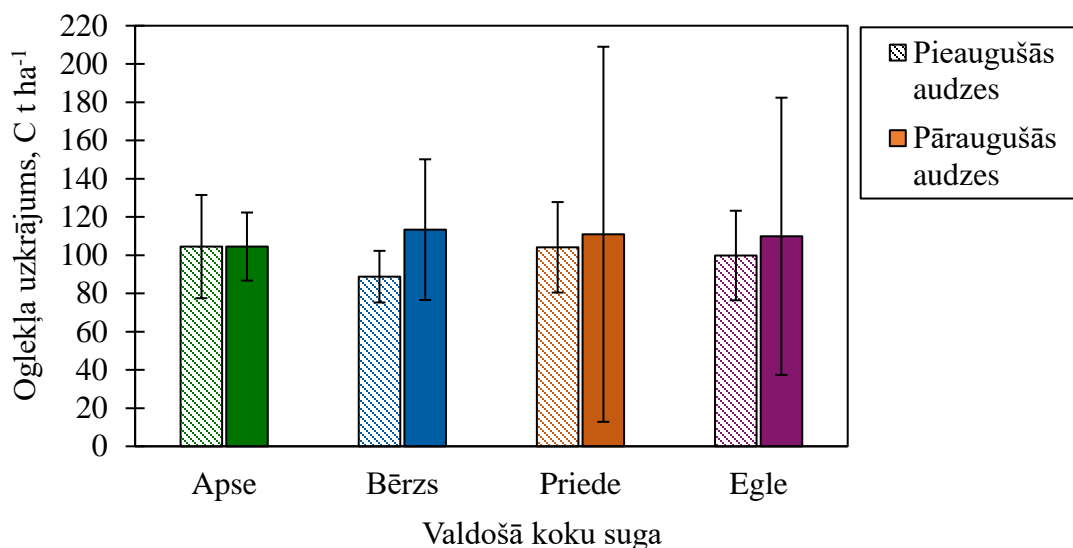


**28. attēls. Oglekļa uzkrājums atmirušajā koksne pieaugušās (MSI III cikla dati) un pāraugušās mežaudzēs Dm un Vr meža tipos ( $\pm 95\%$  C.I.)**

Visticamāk, atšķirības var izskaidrot ar dažādu saimnieciskās darbības režīmu audžu grupās (MSI nevar atlasīt audzes bez saimnieciskās darbības pēdām), īpaši meža tipos ar normāla mitruma minerālaugsnēm (Dm, Vr), kur sausās koksnes izvākšana, t.sk., sanitārajās cirtēs, ir izplatīta prakse. Pāraugušās audzēs oglekļa uzkrājumam atmirušajā koksne vērojama samērā liela datu kopas izkliede, salīdzinot ar pieaugušām audzēm, kur tā stipri mazāka. Šāda situācija ir iespējama, jo pāraugušās audzes nav viendabīgas, un atmirušās koksnes veidošanos daudz nozīmīgāk ietekmē dabiskie traucējumi (vētra, uguns, slimības, kaitēkļi), kā arī atšķirīgi izveidojušās audzes struktūras pāraugušajās mežaudzēs, kas nosaka atmirušās koksnes sadalīšanās ātrumu. Tomēr pētījuma ietvaros parauglaukumi ierīkoti tikai tādās pāraugušajās mežaudzēs, kurās vecā mežā vēl joprojām veca kokaudze ir dominējošais meža elements.

Lai iegūtu datus par oglekļa uzkrājumu pieaugušās audzēs, pētījuma ietvaros vidēji 20 audzēs katrai sugai veikta augsnes un nobiru paraugu ievākšana un analīze pēc tādas pašas metodikas, kā pāraugušās audzēs.

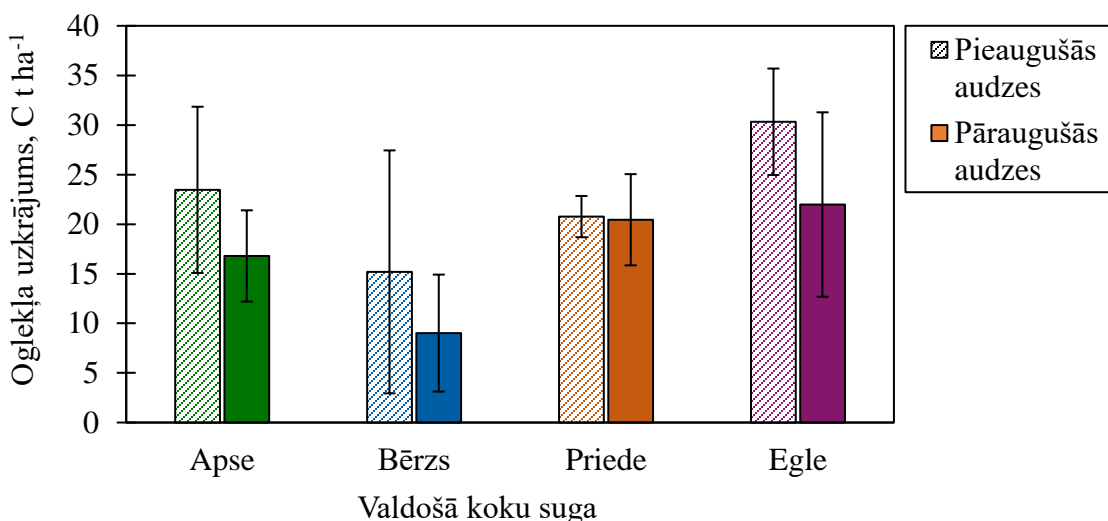
Vidējais augsnes oglekļa uzkrājums pieaugušās apses audzēs ir  $105 \pm 27,0$  C t ha<sup>-1</sup> un pieaugušās bērza audzēs  $89 \pm 13,5$  C t ha<sup>-1</sup>. Pieaugušās priedes un pieaugušās egles audzēs vidējais augsnes oglekļa uzkrājums ir  $104 \pm 23,7$  C t ha<sup>-1</sup> un  $100 \pm 23,4$  C t ha<sup>-1</sup>. Secināts, ka oglekļa uzkrājums pieaugušās audzēs ir līdzīgs visās analizētajās valdošo koku sugu audzēs.



**29. attēls. Oglekļa uzkrājums augsnē (0-80 cm) pieaugušās (MSI III cikla dati) un pāraugušās mežaudzēs Dm un Vr meža tipos ( $\pm 95\%$  C.I.)**

Oglekļa uzkrājums augsnē nav būtiski atšķirīgs starp pieaugušām un pāraugušām audzēm visu valdošo koku sugu audžu grupās (29. att.). Pieaugušās un pāraugušās audzēs var nenovērot krāsas atšķirības augsnes oglekļa uzkrājumā, jo notiek aktīva virszemes un pazemes biomasas veidošanās, kā rezultātā arī zemsegas slānis turpina aktīvi veidoties, nodrošinot sadalīšanās procesus, tādā veidā neļaujot augsnes augšējiem slāņiem sadalīties (Jandl et al., 2007).

Tāpat kā pāraugušajās audzēs, arī pieaugušajās audzēs novērojamas lielākas atšķirības zemsegas slānī esošajā oglekļa uzkrājumā. Vislielākais vidējais oglekļa uzkrājums zemsegā ir pieaugušās egles ( $30 \pm 5,4$  C t ha<sup>-1</sup>) un pieaugušās apses ( $24 \pm 8,4$  C t ha<sup>-1</sup>) audzēs. Pieaugušās priedes ( $21 \pm 2,1$  C t ha<sup>-1</sup>) un pieaugušās bērza ( $15 \pm 12,3$  C t ha<sup>-1</sup>) audzēs vidējais oglekļa uzkrājums zemsegā ir būtiski ( $p=0,01$ ) mazāks nekā pieaugušajās egles audzēs (30. att.).



**30. attēls. Oglekļa uzkrājums zemsegā pieaugušās (MSI III cikla dati) un pāraugušās mežaudzēs Dm un Vr meža tipos ( $\pm 95\%$  C.I.)**

Oglekļa uzkrājums zemsegā nav būtiski atšķirīgs starp pieaugušām un pāraugušām audzēm visu valdošo koku sugu audžu grupās. Pieaugušās lapu koku audzēs var novērot plašākus ticamības intervālus aprēķinātām vidējām zemsegas vērtībām, kas parāda, ka ir lielāka rezultātu variācija nekā skujkoku audzēs.

Līdzīgi kā pāraugušās audzēs, pusi no kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājuma pieaugušajās audzēs vidēji veido dzīvo koku biomasa (priede - 52%; egle - 46%; apse - 45%; bērzs - 54%). Otra lielākā oglekļa krātuve pieaugušajās mežaudzēs ir minerālaugsne (38% līdz 44 % no kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājuma). Pieaugušajās audzēs nedzīvā zemsega aizņem 8% līdz 12 % no kopējā ekosistēmas oglekļa uzkrājuma, bet atmirusī koksne tikai vidēji 2% (6. tab.).

Kopumā kopējais ekosistēmas oglekļa uzkrājums līdz ar vecuma palielināšanos ir pieaudzis gan dzīvo koku biomasā (vidēji no 124 līdz 172 C t ha<sup>-1</sup>), gan atmirušajā koksnes biomasā (no 4 līdz 12 C t ha<sup>-1</sup>) (6. tab.).

6. tabula. Vidējais oglekļa uzkrājums oglekļa krātuvēs pieaugušās un pāraugušās mežaudzēs Dm un Vr meža tipos

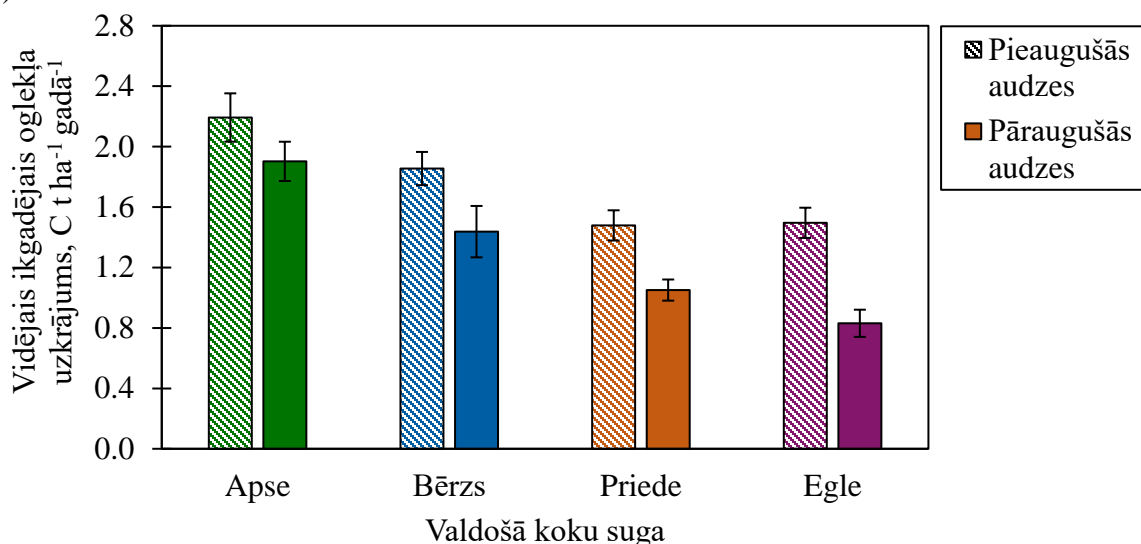
Oglekļa krātuve	Suga		Bērzs		Egle		Priede	
	PA MSI	PĀ audzes	PA MSI	PĀ audzes	PA MSI	PĀ audzes	PA MSI	PĀ audzes
Koku biomasa	119,2	200,0	124,2	180,7	112,5	139,0	138,6	171,6
Atmirušās koksnes biomasa	5,0	13,2	3,0	10,5	4,5	11,9	2,9	14,5
Augsne *	104,5	104,5	88,7	113,3	99,8	109,9	104,1	110,9
Zemsega *	23,5	16,8	15,2	9,0	30,3	22,0	20,8	20,4
Kopējais ekosistēmas oglekļa uzkrājums *	252,2	337,8	231,1	309,1	247,2	293,9	266,3	317,4

PA MSI- Pieaugušās audzes (MSI III cikla dati); PĀ- Pāraugušās audzes; \* - vidējās vērtības aprēķinātas tikai objektiem, kuros bija iespējams iegūt kvalitatīvus rezultātus

Vislielākais oglekļa uzkrājuma palielinājums no pieaugušās uz pāraugušu vecuma grupu konstatēts lapu koku mežaudzēs – īpaši dzīvo koku biomasā apses audzēs (apses audzēs oglekļa uzkrājuma dzīvo koku biomasā īpatsvars pieaug no 45% līdz 59 %). Tomēr, apšu piepes (*Fomes igniarius f. Tremulae (Phellinus tremulae Bond. Et. Boriss)*) izraisītās stumbra trapes dēļ, pāraugušās apses mežaudzes ir pakļautas trapes ietekmei, kas samazina ne tikai mežaudzes vērtību līdz pat 50% (Līpiņš u.c., 2009), tātad iespēju uzkrāto oglekli koksnes produktos ar ilgu dzīves ciklu. Tāpat trupe ietekmē oglekļa uzkrājumu lielajās un vecajās apsēs.

Priedes audzēs novērots straujākais atmirušās koksnes palielinājums no pieaugušās un pāraugušu audzes vecuma grupu. Zemsegas oglekļa uzkrājums pieaugušajās audzēs konstatēts lielāks nekā pāraugušajās mežaudzēs. Oglekļa uzkrājums zemsegā ir ļoti dinamisks. Pēc vētras, atjaunošanas cirtes vai meža ugunsgrēka oglekļa uzkrājums zemsegā krītas, uzkrātajam slānim sadaloties un jaunajiem kokiem radot maz papildus nobiru. Pēc šīs stadijas oglekļa uzkrājums zemsegā pieaug, pieaugot audzes vecumam, līdz brīdim, kad audze ir pilnībā nobriedusi un nobiru masa atkal veidojas mazāka, un tā nespēj kompensēt sadalīšanos – tātad uzkrātā oglekļa apjoms zemsegā krītas. Ir pētījumi, kuros secināts, ka skujkoku audzēs notiek lēnāka zemsegas sadalīšanās nekā lapu koku mežaudzēs – tas varētu būt izskaidrojums, kāpēc pieaugušās egles audzēs ir būtiski lielāks oglekļa uzkrājums zemsegā nekā pārējo valdošo koku sugu pieaugušajās audzēs (Hansson et al., 2011) (6. tab.).

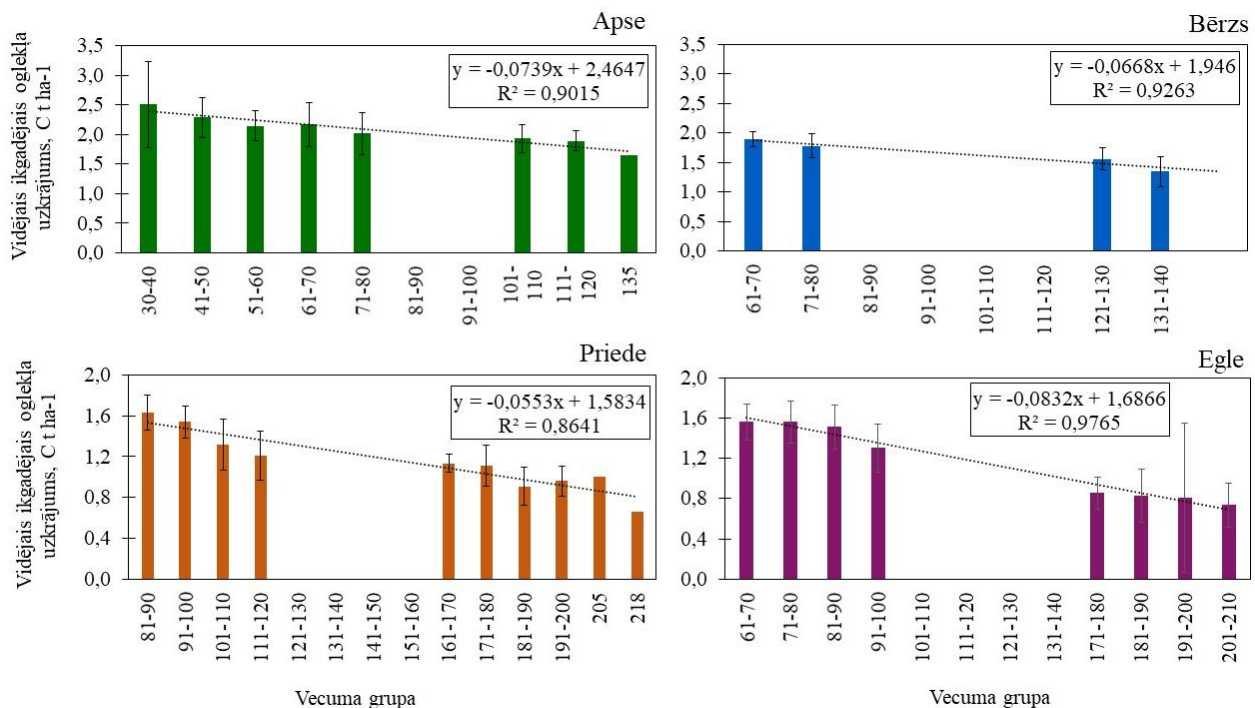
Vidējais ikgadējais oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksne būtiski atšķiras starp gandrīz visām pieaugušajām audzēm – apses audzēs tas ir vislielākais –  $2,2 \pm 0,16$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup>, bērza audzēs – mazāks –  $1,9 \pm 0,11$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup>, bet priedes audzēs ( $1,5 \pm 0,10$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup>) un egles audzēs ( $1,5 \pm 0,10$  C t ha<sup>-1</sup> gadā<sup>-1</sup>) vēl mazāks, un savstarpēji būtiski neatšķiras (31. att.).



**31. attēls. Vidējais ikgadējais oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksne pieaugušās (MSI III cikla dati) un pāraugušās mežaudzēs Dm un Vr meža tipos ( $\pm 95\%$  C.I.)**

Vidējais ikgadējais oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksne pieaugušās audzēs samazinās pieaugot audzes vecumam; apses un egles audzēs šīs atšķirības bija statistiski būtiskas ( $p < 0,01$ ). Ikgadējais oglekļa uzkrājums koksne (dzīvie koki un atmirums) ir lielāks lapu koku sugu audzēs, bet mazāks skuju koku audzēs, kas nav tik ātraudzīgas. Šīs atšķirības saglabājas gan pieaugušās, gan pāraugušās audzēs (31. att.).

Izmantojot MSI datus par pieaugušām un pētījumā ievāktos datus par pāraugušām audzēm, aprēķināts vidējais ikgadējais oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksne. Konstatēts, ka pāraugušajās audzēs vidējais ikgadējais oglekļa uzkrājums ir nozīmīgi un būtiski mazāks, nekā pieaugušajās (32. att.). Interpretējot datus jāņem vērā, ka lielākā daļa no MSI parauglaukumiem ir saimnieciskajos mežos, tātad tajos daļa koksnes jau ir izmantota koksnes produktu ražošanā un neparādās šajā salīdzinājumā ne dzīvo biomasā, ne atmirušajā koksne uzkrāts ogleklis. Tātad faktiskā ikgadējā oglekļa uzkrājuma starpība būtu vēl lielāka.



**32. attēls. Vidējā ikgadējā oglekļa uzkrājuma dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksnē izmaiņas mežaudzēs Dm un Vr meža tipos ( $\pm 95\%$  C.I.)**

Pētījuma rezultāti parāda, ka vecās (pāraugušās) audzēs ikgadējais oglekļa uzkrājums ir būtiski mazāks nekā jaunākās audzēs (32. att.). Ņemot vērā, ka lielāko daļu šīs starpības nosaka uzkrājums koku biomasā, sagaidāms, ka nākotnē atšķirība būs vēl lielāka:

1) kļūstot biežākiem dabiskajiem traucējumiem (t.sk., meteoroloģisko apstākļu ekstrēmiem) klimata pārmaiņu ietekmē un ar tiem saistītajiem sekundārajiem faktoriem, kā dendrofāgo kukaiņu masu savairošanās, vecie koki ātrāk ies bojā un pāraugušās audzes pašizretināsies (vai īsākā laika posmā mainīsies dominējošā meža elementa vecums);

2) Latvijā jau vairāk nekā 50 gadus realizēta un joprojām turpinās meža selekcija, nodrošinot sēkļu materiālu lielākajai daļai stādu ražošanas meža atjaunošanai. Audzēs, kas atjaunotas ar selekcionētu materiālu, ir lielāks pieaugums, tātad arī augstāks piesaistītā oglekļa apjoms gadā. Tāpat ir labāka koku stumbra kvalitāte – tātad lielāka to daļa izmantojama koksnes produktos ar ilgu dzīves ciklu. Arī pētījumi kaimiņvalstīs liecina, ka selekcijas rezultāta efektīva izmantošana (t.sk., veģetatīvi pavairojot augstvērtīgākos genotipus) nodrošinās nozīmīgu papildus ieguvumu oglekļa piesaistē (Ahtikoski et al., 2020). Tāpat meža selekcijā tiek veikta tādu genotipu atlase, kam piemīt augsta fenotipiskā plasticitāte, noturība pret sagaidāmo meteoroloģisko rādītāju amplitūdu (ekstrēmiem) un spēja efektīvi izmantot klimata pārmaiņu nodrošinātus augšanas apstākļu uzlabojumus (piemēram, garāks veģetācijas periods). Tas papildus paaugstinās stādīto mežaudžu oglekļa uzkrāšanas kapacitāti.

### **Oglekļa uzkrājuma salīdzinājums pieaugušās un pāraugušās mežaudzēs – kopsavilkums**

Laika periodā starp pieaugušo (MSI III cikla dati) un pāraugušo audžu stadiju (pētījumā ievāktie dati), kas skujkokiem bija vidēji 93 gadi un lapu kokiem vidēji 58 gadi, oglekļa uzkrāšanās mežaudzēs turpinājusies. Lielāko papildu oglekļa uzkrājumu šajā laika periodā nodrošina izmaiņas

dzīvo koku biomasā (skujkoku audzēs vidēji 61%, lapu koku audzēs 82% no kopējā oglekļa uzkrājuma pieauguma). Tātad mežaudzes bez mežsaimnieciskās darbības konkrētajā laika posmā turpina uzkrāt oglekli tikmēr, kamēr koku vecuma un/vai dabisko traucējumu ietekmē nemainās dominējošais meža elements (veca kokaudze).

Konstatēts, ka pāraugušās audzēs ikgadējais oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksne ir būtiski mazāks nekā pieaugušās audzēs, turklāt tas samazinās ( $r=0,87 - 0,98$ ) līdz ar šo audžu vecuma palielināšanos pat tad, ja attiecīgās sugas un vecuma koki joprojām saglabājas kā dominējošais meža elements. Interpretējot datus, jāņem vērā, ka lielākā daļa no MSI parauglaukumiem ir saimnieciskajos mežos, tātad tajos daļa koksnes jau ir izmantota koksnes produktu ražošanā un neparādās šajā salīdzinājumā ne kā biomasā, nedz atmirusī koksne. Tātad faktiskā ikgadējā oglekļa uzkrājuma starpība būtu vēl lielāka.

Papildinot analīzi, konstatēts, ka briestaudzēs ir augstākais ikgadējais oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksne, liecinot, ka tas būtu atbilstošs laiks, kad, veicot koksnes izmantošanu produktos, tiktu maksimizēta pozitīvā ietekme uz klimata pārmaiņām. Ilgstoša koksnes uzkrājuma veidošana (pēc pieauguša vecuma sasniegšanas) mazina zemes resursu izmantošanas klimata pārmaiņu mazināšanai efektivitāti.



## Secinājumi

1. Kopējais oglekļa uzkrājums vecās, saimnieciskās darbības ilgstoši neietekmētās mežaudzēs auglīgās minerālaugsnēs (damaksnī un vērī), kur vecie koki ir dominējošais meža elements, ir nozīmīgi atšķirīgs pat starp vienas valdošās sugas audzēm un būtiski lielāks nekā pieaugušās audzēs (vidēji par 20%).
2. Lielākā oglekļa krātuve kā pāraugušas, tā pieaugušās audzēs ir dzīvo koku biomasa, kas atkarībā no valdošās koku sugas veido attiecīgi 47-59% un 45-54% no kopējā oglekļa uzkrājuma. Tātad oglekļa ikgadējā uzkrājuma maksimizēšanai nozīmīgi nodrošināt augstu audzes ražību.
3. Audzes vecums un valdošā koku suga statistiski būtiski ietekmē vidējo ikgadējo oglekļa uzkrājumu meža tipos ar auglīgām minerālaugsnēm (pāraugušās audzēs tas ir mazāks nekā pieaugušās audzēs). Lielākais ikgadējais uzkrājums un mazākā starpība starp vecuma grupām konstatēta apsei un bērzam (ikgadējais oglekļa uzkrājums samazinās no pieaugušām uz pāraugušām audzēm vidēji par 18%), mazāks uzkrājums un lielāka starpība (samazinājums par 37%) – priedei un eglei. Tātad zemes resursu izmantošana oglekļa uzkrājuma maksimizēšanai efektīvāk nodrošināma ar īsāku aprites ciklu.
4. Laika periodā starp pieaugušo (MSI III cikla dati) un pāraugušo audžu stadiju (pētījumā ievāktie dati), kas skujkokiem bija vidēji 93 gadi un lapu kokiem vidēji 58 gadi, oglekļa uzkrāšanās mežaudzēs turpinājusies. Lielāko papildu oglekļa uzkrājumu šajā laika periodā nodrošina izmaiņas dzīvo koku biomasā (skujkoku audzēs vidēji 61%, lapu koku audzēs 82% no kopējā oglekļa uzkrājuma pieauguma). Tātad mežaudzes bez mežsaimnieciskās darbības konkrētajā laika posmā, lai arī lēni, bet turpina uzkrāt oglekli, kamēr koku vecuma un/vai dabisko traucējumu ietekmē nemainās dominējošais meža elements (veca kokaudze).
5. Valdošā koku suga statistiski būtiski ietekmēja vidējo I stāva un II stāva krāju un šķērslaukumu pāraugušās audzēs. Pāraugušās apses audzēs krājas pārākumu nosaka tieši koku dimensijas, jo I stāva biezums ir līdzīgs, kā audzēs ar citu valdošo koku sugu. Tādēļ pāraugušās audzes ir ievērojama, bet nestabila oglekļa krātuve, jo pat nelielas daļas koku bojāeja nozīmīgi samazinās to kopējo oglekļa uzkrājuma apjomu.

## Rekomendācijas

➤ Būtiski veicināt atjaunošanu stādot (kombinējot meža selekciju un mežkopību) un veidot iespējami ražīgas un pret sagaidāmajiem nozīmīgākajiem dabiskajiem traucējumiem noturīgas audzes, pielietojot tādu mežsaimniecības modeli, kas veicina oglekļa uzkrājuma palielināšanos laika vienībā, jo gan pāraugušās, gan pieaugušās audzēs dzīvo koku biomasa ir pati nozīmīgāka oglekļa krātuve.

➤ Turpināt pētījumus plašāk pārstāvētajām koku sugām pāraugušās audzēs ar organiskām augsnēm (prioritāri – egle un bērzs, sekundāri – priede, melnalksnis), kur oglekļa uzkrājuma dinamika var būt nozīmīgi atšķirīga, prioritāri analizējot kūdreņus.

➤ Turpināt pētījumus, novērtējot oglekļa uzkrājumu vecā mežā: raksturot audžu bojāejas varbūtības dinamiku, ņemot vērā dažāda mēroga dabisko traucējumu ietekmi, oglekļa uzkrājuma izmaiņu dinamiku patogēno sēņu ietekmē, modeļu kalibrēšanai un validēšanai izmantot empīriskos datus no veciem mežiem.

➤ Sistemātiski paplašināt pieejamo datu kopu par oglekļa uzkrājumu augsnē, kur konstatējama lielākā šī elementa apjoma variācija.

## Literatūras saraksts

- Ahtikoski A., Ahtikoski R., Haapanen M., Hynynen J., Kärkkäinen K. 2020. Economic performance of genetically improved reforestation material in joint production of timber and carbon sequestration: A case study from Finland. *Forests*, 11(8), 1-12. <https://doi.org/10.3390/F11080847>.
- Angst G., Messinger J., Greiner M., Häusler W., Hertel D., Kirfel K., Kögel-Knabner I., Leuschner C., Rethemeyer J., Mueller C.W. 2018. Soil organic carbon stocks in topsoil and subsoil controlled by parent material, carbon input in the rhizosphere, and microbial-derived compounds. *Soil Biology and Biochemistry*, 122, 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.026>.
- Arhipova N., Gaitnieks T., Donis J., Stenlid J., Vasaitis R. 2011. Decay, yield loss and associated fungi in stands of grey alder (*Alnus incana*) in Latvia. *Forestry*, 84(4), 337-348. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr018>.
- Arhipova, N., Donis, J., Gaitnieks, T., Liepa, I. 2010. Sakņu un stubbra trupi izraisīto sēņu sugu sastopamība egļu audzēs – lapu koku piemistrojuma ietekme uz *Heterobasidion* spp. izplatību. *Mežzinātne*, 22(55), 70-87.
- Badalamenti E., Battipaglia G., Gristina L., Novara A., Ruhl J., Sala G., Sapienza L., Valentini R., La Mantia T. 2019. Carbon stock increases up to old growth forest along a secondary succession in Mediterranean island ecosystems. *PLoS ONE*, 14(7), e0220194. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220194>.
- Baders E., Senhofa S., Purina L., Jansons A. 2017. Natural succession of Norway spruce stands in hemiboreal forests: case study in Slitere national park, Latvia. *Baltic Forestry*, 23(2), 522-528.
- Bārdulis A., Daugaviete M., Lazdiņš A., Bārdule A., Liepa, I. 2011. Biomasas struktūra un oglekļa uzkrāšanās virszemes un sakņu biomasā baltalkšņa *Alnus incana* (L.) Moench. jaunaudzēs lauksaimniecības zemēs. *Mežzinātne*, 23(56), 71–88.
- Bardulis A., Jansons A., Liepa I. 2012. Below-ground biomass production in young stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on abandoned agricultural land. In: Proceedings of the 18th Annual International Scientific Conference “Research for Rural Development” (Treija S, Skuja I eds). Jelgava (Latvia) 16-18 May 2012. LLU, Jelgava, Latvia, pp. 49-54.
- Bārdulis A., Jansons Ā., Bārdule A., Zeps M., Lazdiņš A. 2017. Assessment of carbon content in root biomass in Scots pine and Silver birch young stands of Latvia. *Baltic Forestry*, 23(2), 482-489.
- Bendz-Hellgren M. & Stenlid J. 1997. Decreased volume growth of *Picea abies* in response to *Heterobasidion annosum* infection. *Canadian Journal of Forest Research*, 27(10), 1519-1524.
- Bernaldez F. 2017. Old-growth forests: characteristics and conservation value. LIFE RED BOSQUES. 52 lpp.
- Bijak S., Zasada M., Bronisz A., Brinisz K., Czajkowski M., Ludwisiak Ł., Tomusiak R., Wojtan R. 2013. Estimating coarse roots biomass in young silver birch stands on post-agricultural lands in central Poland. *Silva Fennica*, 47(2), id. 962. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.963>.
- Birdsey R. & Pan Y. 2015. Trends in management of the world's forests and impacts on carbon stocks. *Forest Ecology and Management*, 355, 83-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.031>

- Blaško R., Forsmark B., Gundale M., Lundmark T., Nordin A. 2019. Impacts of tree species identity and species mixing on ecosystem carbon and nitrogen stocks in a boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 458, 117783. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117783>.
- Błońska E., Lasota J., Tullus A., Lutter R., Ostonen I. 2019. Impact of deadwood decomposition on soil organic carbon sequestration in Estonian and Polish forests. *Annals of Forest Science*, 76,102. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0889-9>.
- Bravo-Oviedo A., Ruiz-Peinado R., Modrego P., Alonso R., Montero G. 2015. Forest thinning impact on carbon stock and soil condition in Southern European populations of *P. sylvestris* L. *Forest Ecology and Management*, 357, 259-267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.005>.
- Buchwald E. 2005. A hierarchical terminology for more or less natural forests in relation to sustainable management and biodiversity conservation. In: Third expert meeting on harmonizing forest-related definitions for use by various stakeholders Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 17-19 January 2005.
- Carey E.V., Sala A., Keane R., Callaway R.M. 2001. Are old forests underestimated as global carbon sinks? *Global Change Biology*, 7, 339-344. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2001.00418.x>.
- Cindy E.P. & Vesterdal L. 2013. Tree species effects on soils in temperate and boreal forests: Emerging themes and research needs. Preface/ *Forest Ecology and Management*, 309, 1-3. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.042>.
- Daugaviete M., Gaitnieks T., Kļaviņa D., Teliševa G. 2008. Oglekļa akumulācija virszemes un sakņu biomasā bērza, baltalkšņa, priedes un egles jaunaudzēs lauksaimniecības zemēs. *Mežzinātne*, 18, 35–52.
- Di Cosmo L., Gasparini P., Paletto A., Nocetti M. 2013. Deadwood basic density values for national-level carbon stock estimates in Italy. *Forest Ecology and Management*, 295, 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.010>
- Didion M., Frey B., Rogiers N., Thurig E. 2014. Validating tree litter decomposition in the Yasso07 carbon model. *Ecology Modelling*, 291, 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.07.028>.
- Domke G.M., Woodall C.W., Smith J.E. 2011. Accounting for density reduction and structural loss in standing dead trees: Implications for forest biomass and carbon stock estimates in the United States. *Carbon Balance and Management*, 6(14), 22115425. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-6-14>.
- Donis J., Kitenberga M., Šņepsts G., Matisons R., Zariņš J., Jansons Ā. 2017. The forest fire regime in Latvia during 1922–2014. *Silva Fennica*, 51(5), id 7746. <https://doi.org/10.14214/sf.7746>.
- Donis J., Kitenberga M., Šņepsts G., Dubrovskis E., Jansons Ā. 2018. Factors affecting windstorm damage at the stand level in hemiboreal forests in Latvia: case study of 2005 winter storm. *Silva Fennica*, 52(4), id 10009. <https://doi.org/10.14214/sf.10009>
- Eggleston S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Kiyoto T. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, Forestry and Other Land Use. In: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Vol. 4). Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 678 lpp.
- Eiropas Parlamenta un Padomes 2018. gada 30. maija Regula (ES) 2018/841 par zemes izmantošanā, zemes izmantošanas maiņā un mežsaimniecībā radušos siltumnīcefekta gāzu emisiju un piesaistes iekļaušanu klimata un enerģētikas politikas satvarā laikposmam līdz 2030. gadam, un ar tās pieņemšanu tiek grozīta Regulu (ES) Nr. 525/2013 un Lēmums Nr. 529/2013/ES. *ES Oficiālais Vēstnesis* 156/1, 25 lpp.

- Emissions Gap Report, 2019. United Nations Environment Programme, UNEP, Nairobi. Pieejams: <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019>.
- European forest ecosystems – State and trends. 2016. EEA Report No 5/2016. 123 lpp.
- Feyen L., Ciscar J.C., Gosling S., Ibarreta D., Soria A. 2020. Climate change impacts and adaptation in Europe. JRC PESETA IV final report. EUR 30180EN. <https://doi.org/10.2760/171121>, JRC119178.
- Felton A., Gustafsson L., Roberge J. M., Ranius T., Hjältén J., Rudolphi J., Lindbladh M., Weslien, J., Rist L., Brunet J. 2016. How climate change adaptation and mitigation strategies can threaten or enhance the biodiversity of production forests: Insights from Sweden. *Biological Conservation*, 194, 11-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2015.11.030>.
- Finér L., Mannerkoski H., Piirainen S., Starr M. 2003. Carbon and nitrogen pools in an old-growth, Norway spruce mixed forest in eastern Finland and changes associated with clear-cutting. *Forest Ecology and Management*, 174, 51-63.
- Ford S.E. & Keeton W.S. 2017. Enhanced carbon storage through management for old-growth characteristics in northern hardwood-conifer forests. *Ecosphere*, 8(4), 1-20. <http://dx.doi.org/e01721>. 10.1002/ecs2.1721.
- Framstad E., de Wit H., Mäkipää R., Larjavaara M., Vesterdal L., Karlton E. 2013. Biodiversity, carbon storage and dynamics of old northern forests. Nordic Council of Ministers. 134 lpp.
- Gaitnieks T., Zaļuma A., Kenigšvalde K., Brūna L., Kļaviņa D., Burņeviča N., Stenlid J., Jankovský L., Vasaitis R. 2020. Natural infection and colonization of pre-commercially cut stumps of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* by *Heterobasidion* rot and its biocontrol fungus *Phlebiopsis gigantea*. *Biological Control*, 143, 104208. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104208>.
- Gao S., Wang X., Wiemann M.C., Brachaw B.K., Ross R.J., Wang L. 2017. A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees. *Annals of Forest Science*, 74, 27. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0623-4>.
- Gower S.T., Vogel J.G., Norman J.M., Kucharik C.J., Steele T.K. 1997. Carbon distribution and aboveground net primary production in aspen, jack pine, and black spruce stands in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Journal of geophysical research*, 102, 29029-29041. <https://doi.org/10.1029/97JD02317>.
- Grassi G., House J., Dentener F., Federici S., Den Elzen M., Penman J. 2017. The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. *Nature and Climate Change*, 7, 220-226. <https://doi.org/10.1038/nclimate3227>.
- Gregow H., Laaksonen A., Alper M.E. 2017. Increasing large scale windstorm damage in Western, Central and Northern European forests, 1951–2010. *Scientific Reports*, 7, id 46397. <https://doi.org/10.1038/srep46397>.
- Hansson K., Olsson B.A., Olsson M., Johansson U., Kleja D.B. 2011. Differences in soil properties in adjacent stands of Scots pine, Norway spruce and silver birch in SW Sweden. *Forest Ecology and Management*, 262, 522-530. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.021>.
- Hansson K., Fröberg M., Helmisaari H.S., Kleja D.B., Olsson B.A., Olsson M., Persson T. 2013. Carbon and nitrogen pools and fluxes above and below ground in spruce, pine and birch stands in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 309, 28-35. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.029>.
- Harmon M.E., Ferrell W.K., Franklin J.F. 1990. Effects on carbon storage of conversion of old-growth forests to young forests. *Science*, 247, 699-702.
- Hasper T.B., Wallin G., Lamba S., Hall M., Jaramillo F., Laudon H., Linder S., Medhurst J.L., Rantfors M., Sigurdsson B.D., Uddling J. 2016. Water use by Swedish boreal forests in a changing climate. *Functional Ecology*, 30, 690-699. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12546>.

- Heinonen T., Pukkala T., Asikainen A. 2020. Variation in forest landowners' management preferences reduces timber supply from Finnish forests. *Annals of Forest Science*, 77, id 31. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00939-z>.
- Huang J., Kautz M., Trowbridge A.M., Hammerbacher A., Raffa K.F., Adams H.D., Goodsman D.W., Xu C., Meddens A.J.H., Kandasamy D., Gershenson J., Seidl R., Hartmann H. 2020. Tree defence and bark beetles in a drying world: carbon partitioning, functioning and modelling. *New Phytol*, 225, 26-36. <https://doi:10.1111/nph.16173>.
- Jacob M., Bade C., Calvete H., Dittrich S., Leuschner C., Hauck M. 2013. Significance of over-mature and decaying trees for carbon stocks in a Central European natural spruce forest. *Ecosystems*, 16, 336-346.
- Jain T.B., Graham R.T., Adams D. 2010. Carbon Concentrations and Carbon Pool Distributions in Dry, Moist, and Cold Mid-Aged Forests of the Rocky Mountains. In Jaun, T.B., Graham, R.T., Sandquist, J. (eds): *Proceedings of the 2009 National Silviculture Workshop. Proceedings RMRS-P-61*. Fort Collins, CO, Rocky Mountain Research Station, U.S. pp. 39-59.
- Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Johnson D.W., Minkkinen K., Byrne K.A. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137, 253-268.
- Jansons Ā., Bārdulis A., Kēniņa L., Lazdiņa D., Džeriņš E., Kāpostiņš R. 2017. Carbon content of belowground biomass of young Scots pines in Latvia. *Agronomy Research*, 15(5), 1897-1905.
- Johansson T. 2013. Discolored stems of 12-63-year-old European aspen (*Populus tremula* L.). Report, SLU. ISSN 1654-9406.
- Johnstone D.M., Ades P.K., Moore G.M., Smith W. 2007. Predicting Wood Decay in Eucalypts Using an ExpertSystem and the IML-Resistograph Drill. *Arboriculture & Urban Forestry*, 33(2), 76-82.
- Jones I.L., DeWalt S.J., Lopez O.R., Bunnefeld L., Pattison Z., Dent D.H. 2019. Above- and belowground carbon stocks are decoupled in secondary tropical forests and are positively related to forest age and soil nutrients respectively. *Science of the Total Environment*, 697, 133987. <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2019.133987>.
- Jögiste K., Korjus H., Stanturf J.A., Frelich L.E., Baders E., Donis J., Jansons A., Kangur A., Köster K., Laarmann D., ..., Vodde F. 2017. Hemiboreal forest: Natural disturbances and the importance of ecosystem legacies to management. *Ecosphere*, 8(2), 1-20. <https://doi:10.1002/ecs2.1706>.
- Jögiste K., Frelich L.E., Laarman D., Vodde F., Baders E., Donis J., Jansons A., Kangur A., Köster K., Kusmin J., Kuuluvainen T., ..., Stanturf A. 2018. Imprints of management history on hemiboreal forest ecosystems in the Baltic States. *Ecosphere*, 9(11), id e02503. <https://doi:10.1002/ecs2.2503>.
- Khan D., Munner M.A., Nisa Z.U., Shah S., Amir M., Saeed S., Uddin S., Munir M.Z., Lushuang G., Huang H. 2019. Effect of Climatic Factors on Stem Biomass and Carbon Stock of *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla* in Daxing'anling Mountain of Inner Mongolia, China. *Hindawi*.
- Köster K., Metslaid M., Engelhart J., Köster E. 2015. Dead wood basic density, and the concentration of carbon and nitrogen for main tree species in managed hemiboreal forests. *Forest Ecology and Management* 354: 35-42. [https://doi:10.15666/aer/1706\\_1394513959](https://doi:10.15666/aer/1706_1394513959).
- Kosunen M., Lyytikäinen-Saarenmaa P., Ojanen P., Blomqvist M., Starr M. 2019. Response of soil surface respiration to storm and *Ips typographus* (L.) disturbance in boreal Norway spruce stands. *Forests*, 10(4), 307. <https://doi:10.3390/f10040307>.

- Krisans O., Matisons R., Rust S., Burnevica N., Bruna L., Elferts D., Kalvane L., Jansons A. 2020a. Presence of root rot reduces stability of Norway spruce (*Picea abies*): results of static pulling tests in Latvia. *Forests*, 11, 416. <https://doi.org/10.3390/f11040416>.
- Krisans O., Saleniece R., Rust S., Elferts D., Kapostins R., Jansons A., Matisons R. 2020b. Effect of bark-stripping on mechanical stability of Norway spruce. *Forests*, 11, 357. <https://doi.org/10.3390/f11030357>.
- Kubus M. 2009. The evaluation of using resistograph when specifying the health condition of a monumental tree. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 37(1), 157-164.
- Kuuluvainen T. & Gauthier S. 2018. Young and old forest in the boreal: critical stages of ecosystem dynamics and management under global change. *Forest Ecosystems*, 5, 26. <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0142-2>.
- Ķēniņa L., Bardulis A., Matisons R., Kapostins R., Jansons A. 2018a. Belowground biomass models for young oligotrophic Scots pine stands in Latvia. *iForest*, 11, 206-211. <http://doi.org/10.3832/ifor2553-010>.
- Ķēniņa L., Elferts D., Bāders E., Jansons Ā. 2018b. Carbon pools in a hemiboreal over-mature Norway Spruce stands. *Forests*, 9, 435. <https://doi.org/10.3390/f9070435>.
- Ķēniņa L., Jaunslaviete I., Liepa L., Zute D., Jansons Ā. 2019a. Carbon pools in old-growth Scots pine stands in hemiboreal Latvia. *Forests*, 10, 911. <https://doi.org/10.3390/f10100911>.
- Ķēniņa L., Mača S., Jaunslaviete I., Jansons A. 2019b. Carbon pools in old-growth Scots pine stands on organic soils and its concentration in deadwood: case study in Latvia. In: *Proceedings of the 9th International Scientific Conference Rural Development 2019*, 284-288, doi: 10.15544/RD.2019.054.
- Laganière J., Cavard X., Brassard W. B., Paréa D., Bergeron Y, Chen H.Y.H. 2015. The influence of boreal tree species mixtures on ecosystem carbon storage and fluxes. *Forest Ecology and Management*, 354, 199-129. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.029>.
- Latva-Karjanmaa T., Penttilä R., Siitonen J. 2007. The demographic structure of European aspen (*Populus tremula*) populations in managed and old-growth boreal forests in eastern Finland. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(6), 1070–1081. <https://doi.org/10.1139/x06-289>.
- Latvia's National Inventory Report 1990-2017. 2019. Submission under UNFCCC and the Kyoto Protocol. Pieejams: <https://unfccc.int/documents/194812>.
- Lazdiņš A. & Lupiķis A. 2019. Results of GHG emission measurements in differently managed peatlands in Latvia – the basis for new national GHG emission factors. *Sustainable and Responsible Management and Re-Use of Degraded Peatlands in Latvia*, 24-26.
- Lee J., Tolunay D., Mäkinen E., Çömez A., Son Y.M., Kim R., Son Y. 2016. Estimating the age-dependent changes in carbon stocks of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Turkey. *Annals of Forest Science*, 73, 523-531. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0546-5>.
- Liepiņš J., Lazdiņš A., Liepiņš K. 2017. Equations for estimating above- and belowground biomass of Norway spruce, Scots pine, birch spp. and European aspen in Latvia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33(1),1-43. <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1337923>.
- Lim H., Oren R., Näsholm T., Stömgren M., Lundmark T., Grip H., Linder S. 2019. Boreal forest biomass accumulation is not increased by two decades of soil warming. *Nature Climate Change*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0373-9>.
- Liski J., Ilvesniemi H., Mäkelä A., Westman C. J. 1999. CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to climatic warming are overestimated: the decomposition of old soil organic matter is tolerant of temperature. *Ambio*, 28(2), 171–74.

- Liski J., Perruchoud D., Karjalainen T. 2002. Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *Forest Ecology and Management*, 169, 159-175. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00306-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00306-7).
- Lībiete Z., Matisons R., Rieksts-Riekstiņš J., Priedītis A., Jansons J. 2017. Above-ground Biomass Models of 40-year-old Norway Spruce in Latvia. *Baltic Forestry*, 23(2), 515–521.
- Līpiņš L., Drēska A., Sarmulis Z. 2009. Mīksto lapkoku stumbra koksnes dimensionālais un kvalitatīvais raksturojums. Lapu koku audzēšanas un racionālas izmantošanas pamatojums, jauni produkti un tehnoloģijas Valsts pētījumu programma, 2005 –2009. Rakstu krājums. 75-79 lpp.
- Luyssaert S., Schulze E.D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P., Grace J. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455,213-215.
- Lupiķis A. & Lazdiņš A. 2015. Soil carbon balance on drained and afforested transitional bog in forest research station Vesetnieki in Latvia. *Geophysical Research Abstracts* 17, EGU2015-955, 2015, General Assembly 2015. Pieejams: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-955.pdf>.
- Lutter R., Kõlli R., Tullus A., Tullus H. 2018. Ecosystem carbon stocks of Estonian premature and mature managed forests: effects of site conditions and overstorey tree species. *European Journal of Forest Research*, 138(1), 125-142. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1158-4>.
- Mäkinen H., Hynynen J., Siitonen J., Sievänen R. 2006. Predicting the decomposition of Scots pine, Norway spruce and birch stems in Finland. *Ecological Applications*, 16, 1865-1879. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[1865:ptdosp\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[1865:ptdosp]2.0.co;2).
- Martin M., Fenton N., Morin H. 2018. Structural diversity and dynamics of boreal old-growth forests case study in Eastern Canada. *Forest Ecology and Management*, 422, 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.007>.
- Martin A.R. & Thomas S.C. 2011. A Reassessment of Carbon Content in Tropical Trees. *PLOS ONE*, 6(8), e23533. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023533>.
- Moreno-Fernández D., Díaz-Pinés E., Barbeito I., Sánchez-González M., Montes F., Rubio A., Cañellas I. 2015. Temporal carbon dynamics over the rotation period of two alternative management systems in Mediterranean mountain Scots pine forests. *Forest Ecology and Management*, 348,186–195. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.043>.
- Mund M., Kummetz E., Hein M., Bauer G. A., Schulze E. D. 2002. Growth and carbon stocks of a spruce forest chronosequence in central Europe. *Forest Ecology and Management*, 171(3), 275-296. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00788-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00788-5).
- Nabuurs G. J., Lindner M., Verkerk P. J., Gunia K., Deda P., Michalak R., Grassi G. 2013. First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change*, 3(9), 792-796. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1853>.
- Neumann M., Moreno A., Mues V., Härkönen S., Mura M., Bouriaud O., Lang M., Achten W.M.J., Thivolle-Cazat A., Bronisz K., Merganič J., Decuyper M., ..., Hasenauer, H. 2016. Comparison of carbon estimation methods in European forests. *Forest Ecology and Management* 361, 397–420.
- Nigul K., Kangur A., Korjus H., Laarmann D., Sims A., Metslaiden M., Kiviste A. 2015. Assessment of tree diameter distributions for describing structural legacies in hemiboreal forest , in Estonia. *Book of Abstracts: Sustaining ecosystem services in forest landscapes, IUFRO Landscape Ecology Conference, 23-30 August 2015 Tartu, Estonia.* 199–199. <https://doi.org/10.13140/2.1.1834.0641>.
- Nilsson S.G.; Niklasson M.; Hedin J.; Aronsson G.; Gutowski J.M.; Linder P.; Ljungberg H.; Mikusinski G.; Ranius T. 2002. Densities of large living and dead trees in old-growth temperate and boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 161, 189-204.

- Nord-Larsen T.; Vesterdal L.; Bentsen N.S.; Larsen J.B. 2019. Ecosystem carbon stocks and their temporal resilience in a semi-natural beech-dominated forest. *Forest Ecology and Management*, 447, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.038>.
- Oberle B., Ogle K., Zanne A.E., Woodall C.W. 2018. When a tree falls: Controls on wood decay predict standing dead tree fall and new risks in changing forests. *PLOS ONE*, 13(5), e0196712. <https://doi:10.1371/journal.pone.0196712>.
- Paladinić E., Vuletić D., Martinić I., Marjanocić H., Indir K., Benko M., Novotny V. 2009. Forest biomass and sequestered carbon estimation according to main tree components on the forest stand scale. *Periodicum Biologorum*, 111(4), 459-466.
- Parisi, F., Pioli, S., Lombardi, F., Fravolini, G., Marchetti, M., Tognetti, R. 2018. Linking deadwood traits with saproxylic invertebrates and fungi in European forests-a review. *iForest*, 11, 423–436.
- Peichl M. & Arain M.A. 2006. Above– and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age–sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140, 51–63.
- Pohjola J., Valsta L. 2007. Carbon credits and management of Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Forest Policy and Economics*, 9, 789-798. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2006.03.012>.
- Pouska V., Svoboda M., Lepšová A. 2010. The diversity of wood-decaying fungi in relation to changing site conditions in an old-growth mountain spruce forest, Central Europe. *European Journal of Forest Research*, 129, 219–231.
- Pregitzer K. S. & Euskirchen E. S. 2004. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology*, 10, 2052-2077.
- Pukkala T. 2018. Carbon forestry is suprising. *Forest Ecosystems*, 5(11). <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0131-5>.
- Pukkala T. 2017. Does management improve the carbon balance of forestry? *Forestry*, 90, 125-135.
- Pulviainen M., Laurén A., Pumpanen J., Bergeron Y., Bond-Lamberty B., Larjavaara M., Kashian D.M., Köster K., Prokushkin A., Chen H.Y.H., Seedre M., Wardle D.A., ..., Birninger F. 2020. Decadal-Scale Recovery of Carbon Stocks After Wildfires Throughout the Boreal Forests. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(8), 10-15. <https://doi.org/10.1029/2020GB006612>
- Renvall P. 1995. Community structure and dynamics of wood-rotting Basidiomycetes on decomposing conifer trunks in northern Finland. *Karstenia*, 35, 1-51.
- Rieksts-Riekstiņš R., Zeltiņš P., Baliuckas V., Brūna L., Zaļuma A., Kāpostiņš R. 2020. *Pinus sylvestris* breeding for resistance against natural infection of the fungus *Heterobasidion annosum*. *Forests*, 11(1), 23. <https://doi.org/10.3390/f11010023>.
- Rogers P.C., Pinno B.D., Šebesta J., Albrechtsen B.R., Li G., Ivanova N., Kusbach A., Kuuluvainen T., Landhäusser S.M., Liu H., Myking T., Pulkkinen P., ..., Kulakowski D. 2020. A global view of aspen: Conservation science for widespread keystone systems. *Global Ecology and Conservation*, 21, e00828. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00828>.
- Ruel J. & Gardiner B. 2019. Mortality patterns after different levels of harvesting of old-growth boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 448, 346-354. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.029>.
- Saatchi S.S., Harris N.L., Brown S., Lefsky M., Mitchard E.T.A., Salas W., Zutta B.R., Buermann W., Lewis, S.L., Hagen S., Petrova S., White L., ..., Morel A. 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(24), 9899–9904.



- Sabatini F. M., Burrascano S., Keeton W. S., Levers C., Lindner M., Pötzschner F., Verkerk P. J., Bauhus J., Buchwald E., Chaskovsky O., Debaive N., Horváth F., ..., Kuemmerle T. 2017. Where are Europe's last primary forests? Diversity and Distributions, 24(10), 1426-1439. <https://doi.org/10.1111/ddi.12778>.
- Sabatini F.M., Keeton W.S., Lindner M., Svoboda M., Verkerk P.J., Bauhus J., Bruelheide H., Burrascano S., Debaive N., Duarte I., Garbaeino M., Grigoriadis N., ..., Kuemmerle T. 2020. Protection gaps and restoration opportunities for primary forests in Europe. Diversity and Distributions, 26, 1646-1662. <https://doi.org/10.1111/ddi.13158>.
- Sandström F., Petersson H., Kruys N., Ståhl G. 2007. Biomass conversion factors (density and carbon concentration) by decay classes for dead wood of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula* spp. in boreal forests of Sweden. Forest Ecology and Management, 243(1), 19-27.
- San-Miguel-Ayanz J., Torres G.D., Schuck A., Parviainen J., Winkel G., Sotivor M., Bozzano M., Caudullo G., Estreguil C., Koskela J., Krumm F., Lier M., ..., Vitková L. 2015. Criterion 4: Maintenance, Conservation and Appropriate Enhancement of Biological Diversity in Forest Ecosystems. In: Forest Europe 2015: State of Europe's Forests. 133-164.
- Schindler T., Mander Ü., Machacova K., Espenberg M., Krasnov D., ..., Soosaar K. 2020. Short-term flooding increases CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from trees in a riparian forest soil-stem continuum. Scientific Report 10, 3204. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60058-7>.
- Seedre M. & Chen H. 2010. Carbon dynamics of aboveground live vegetation of boreal mixedwoods after wildfire and clearcutting. Canadian Journal of Forest Research, 40(9), 1826-1869. <https://doi.org/10.1139/X10-120>.
- Seedre M., Kopáček J., Janda P., Bače R., Svoboda M. 2015. Carbon pools in a montane old-growth Norway spruce ecosystem in Bohemian Forest: Effects of stand age and elevation. Forest Ecology and Management, 346, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.034>.
- Seidl R., Klonner G., Rammer W., Essl F., Moreno A., Neumann M., Dullinger S. 2018. Invasive alien pests threaten the carbon stored in Europe's forests. Nature Communications, 9(1), 1-10. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-04096-w>.
- Seidl R., Honkaniemi J., Aakala T., Aleinikov A., Angelstam P., Bouchard M., Boulanger Y., Burton P. J., De Grandpré L., Gauthier S., Hansen W.D., Jepsen J. U., Jørgiste K., ..., Senf C. 2020. Globally consistent climate sensitivity of natural disturbances across boreal and temperate forest ecosystems. Ecography, 43, 1-12. <https://doi.org/10.1111/ecog.04995>.
- Sousa W.P. 1984. The role of disturbance in natural communities. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 15(1), 353-391. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.15.110184.002033>.
- Stakėnas V., Varnagirytė-Kabašinkienė I., Sirgedaitė-Šėžienė V., ..., Žemaitis P. 2020. Dead wood carbon density for the main tree species in the Lithuanian hemiboreal forest. European Journal of Forest Research. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01306-3>.
- Sullivan M. J.P., Lewis S. L., Affum-Baffoe K., Castilho C., Costa F., Sanchez A. C., Ewango C. E. N., Hubau W., Marimon B., Monteagudo-Mendoza A., Qie, L., ..., Phillips O. L. 2020. Long-term thermal sensitivity of Earth's tropical forests. Science, 268, 6493. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7578>.
- Šėnhofa 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. <https://doi.org/10.3390/f11050536>.
- Taylor A.R., Seedre M., Brassard B.W., Chen H.Y. 2014. Decline in net ecosystem productivity following canopy transition to late-succession forests. Ecosystems, 17(5), 778-791.

- The State of the World's Forests. Forests, Biodiversity and People. 2020. FAO and UNEP. Rome. 214 p. <https://doi.org/10.4060/ca8642en>.
- Thom D. & Seidl E. 2016. Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 91(3), 760-781. <https://doi.org/10.1111/brv.12193>.
- Uri V., Kukumägi M., Aosaar J., Varik M., Becker H., Morozov G., Karoles K. 2017. Ecosystems carbon budgets of differently aged downy birch stands growing on well-drained peatlands. *Forest Ecology and Management*, 399, 82-93. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.012>.
- Uri V., Kukumägi M., Aosaar J., Varik M., Becker H., Aun K., Krasnova A., Morozov G., Ostonen I., Mander Ü., Lõhmus K., Rosenvald K., Kriiska K., Soosaar K. 2019. The carbon balance of a six-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) ecosystem estimated by different methods. *Forest Ecology and Management*, 433, 248-262. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.05.023>.
- Vilén T., Gunia K., Verkerk P. J., Seidl R., Schelhaas M. J., Lindner M., Bellassen V. 2012. Reconstructed forest age structure in Europe 1950–2010. *Forest Ecology and Management*, 286, 203-218. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.048>.
- von Arnold K., Weslien P., Nilsson M., Svensson B. H., Klemedtsson L. 2005.a Fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from drained coniferous forests on organic soils. *Forest Ecology and Management*, 210(1), 239-54. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.031>.
- von Arnold K., Nilsson M., Hånell B., Weslien P., Klemedtsson L. 2005.b Fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from Drained Organic Soils in Deciduous Forests. *Soil Biology and Biochemistry* 37(6), 1059-71. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.11.004>.
- Vucetich J.A., Reed D.D., Breymeyer A., Degórski M., Mroz G.D., Solon J., Roo–Zielinska E., Noble R. 2000. Carbon pools and ecosystem properties along a latitudinal gradient in northern Scots pine (*Pinus sylvestris*) forests. *Forest Ecology and Management*, 136, 135-145.
- Wei Y., Li M., Chen H., Lewis B. J., Yu D., Zhou L., Zhou W., Fang X., Zhao W., Dai, L. 2013. Variation in carbon storage and its distribution by stand age and forest type in boreal and temperate forests in northeastern China, *PLoS ONE*, 4, 4062. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072201>.
- Worrall J. J. & Fairweather M. L. 2009. Decay and discoloration of aspen. *Forest Insect & Disease Leaflet* 149.1-9.
- Woodward S., Stenlid J., Karjalainen R., Hüttermann A. (Editors). 1998. *Heterobasidion annosum: biology, ecology, impact and control*. CAB International, Wallingford, UK. ISBN-0- 85199-275-7.
- Yatskov M., Harmon M. E., Krankina O. N. 2003. A chronosequence of wood decomposition in the boreal forests of Russia. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, 1211-1226.
- Yuan Z., Gazol A., Wang X., Lin F., Ye J. Zhang Z. (2016) Pattern and dynamics of biomass stock in old growth forests: The role of habitat and tree size. *Acta Oecologica*, 75, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2016.06.007>.
- Zhou G., Liu S., Li Z., Zhang D., Tang X., Zhou C., Yan J., Mo J. 2006. Old-growth forests can accumulate carbon in soils, *Science*, 314, 1417. <https://doi.org/10.1126/science.1130168>.
- Zhu Y., Hogan J. A., Cai H., Xun Y., Jiang F., Jin G. 2017 Biotic and abiotic drivers of the tree growth and mortality trade-off in an old-growth temperate forest. *Forest Ecology and Management*, 404, 354-360.