



PĀRSKATS
PAR PĒTĪJUMA 2023. GADA REZULTĀTIEM

PĒTĪJUMA NOSAUKUMS: **Algoritmu izstrāde mežsaimniecības
plānošanai**

LĪGUMA NR. 5-5.9.1_007h_101_21_71

PĒTĪJUMA ZINĀTNISKAIS VADĪTĀJS:

Jānis Donis, LVMI Silava pētnieks

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

Salaspils, 2023

Saturs

Kopsavilkums.....	4
Summary	5
Tabulu saraksts.....	6
Attēlu saraksts.....	8
Ziņojumā lietotie simboli un saīsinājumi.....	12
Ievads	14
1. Starpcirtes (krājas kopšanas cirtes) modeļu pilnveidošana.....	15
1.1. Dažādu kopšanas ciršu veidu kopšanas efekta novērtējums 5 gadus pēc kopšanas cirtes. Traucējumu ietekme iekļauta augšanas gaitas vienādojumā koeficienta samazinājuma formā.....	15
1.1.1. Kopšanas ciršu parauglaukumu pārmērīšana.....	15
1.1.2. Datu analīze / pieaugumu aprakstošu vienādojumu koeficientu aproksimācija.....	16
1.2. Kopšanas cirtes ietekmi raksturojoši koeficienti augšanas gaitas vienādojumā E, P, B audzēs ar dažādām retināšanas intensitātēm (45% / 55% / 65%)	20
1.2.1. Faktori, kas nosaka koksnes krājas uzkrāšanās tempu pie dažādām kopšanas intensitātēm. Meža elementu vidējā caurmēra un vidējā augstuma izmaiņas (pirms pēc cirtes, atkarībā no tās intensitātes).....	20
1.2.2. Dažādu apsaimniekošanas programmu finanšu plūsmas prognozēšana.....	24
Secinājumi	24
2. Meža elementu augšanas gaitas modeļi, balstot uz MSI parauglaukumu datiem.....	25
2.1. Meža elementu taksācijas rādītāju izmaiņu (augšanas gaitas modelis), balstot uz 4 MSI ciklu datiem	25
2.1.1. MSI parauglaukumu datu paraugkopas izveide.....	25
2.1.2. Taksācijas rādītāju prognožu modeļu pilnveidošana (vienādojumu aprēķini)	27
Secinājumi	67
3. Individuāla koka augšanas gaitas modeļi.....	68
3.1. Individuāla koka augšanas gaitas modeļi, kas balstīti 4 MSI cikla datos.....	68
3.1.1. Kandidātvienādojumu kopas izveide (literatūras apskats)	68
3.1.2. Netelpiskie (non-spatial) individuāla koka augšanas gaitas modeļu (h, d, g, atmiršanas varbūtība, ieaugšanās varbūtība) (P, E, B, M, A) aproksimācija.....	68
3.1.3. Telpiskie (spatial) individuāla koka augšanas gaitas modeļu (h, d, g, atmiršanas varbūtība, ieaugšanās varbūtība) (P, E, B, M, A) aproksimācija.....	78
Secinājumi	88
3.2. Individuāla koka augšanas gaitas modeļi, kas balstīti uz attālās izpētes metožu pārmērījumu datiem	88
3.2.1. LĢIA LiDAR datu / ortofoto datu apstrāde (KKC parauglaukumi).....	88
3.2.2. Aerofotoainu ieguve izmantojot multispektrālo kameru, kas uzmontēta uz drona	89
3.2.3. Individuāla koka detektēšana KKC parauglaukumos, balstot uz attālās izpētes datiem ...	91
3.2.4. Individuāla koka augšanas gaitas aproksimācija KKC parauglaukumos, balstoties uz attālās izpētes datiem	99

Secinājumi	102
4. Plantāciju mežaudžu augšanas gaitas modeļi.....	103
4.1. Parauglaukumu ierīkošana plantāciju mežaudzēs un koku sākotnējā uzmērīšana.....	103
4.1.1. Parauglaukumi P, E, B audzēs, kuras ir bijušajās lauksaimniecības zemēs ieaudzētas kokaudzes LVM ražošanas objektos	103
4.1.2. Parauglaukumi P, E, B audzēs, kuras ir bijušajās lauksaimniecības zemēs ieaudzētas kokaudzes LVMI Silava agrāk iekārtotos pētījumu objektos.....	104
4.1.3. Pieaugumu uzmērīšana	106
4.1.4. Datu analīze/ pieaugumu aprakstošu vienādojumu koeficientu aproksimācija	106
Secinājumi	112
Literatūra	113
Pielikums 1. Vienādojumu atbilstības izvērtēšanas statistiskie rādītāji	116

Kopsavilkums

Pētījuma trešajā posmā īstenoti sekojoši darba uzdevumi četrās aktivitātēs.

1. Starpcirtes (krājas kopšanas cirtes) modeļu pilnveidošana

Pārmērīti 30 krājas kopšanas ciršu objekti, kopā uzmērīti 304 parauglaukumi (30 m×30 m). Papildus veikta to objektu / vai to daļu uzmērīšana, kurā akciju sabiedrība "Latvijas valsts meži" 2023. gadā bija plānojusi veikt sanitārās cirtes vai citu saimniecisko darbību. Veikta taksācijas rādītāju aprēķināšana, augšanas gaitas analīze, ņemot vērā parauglaukumos konstatētās izmaiņas taksācijas rādītājos. Aprēķinātas krājas diferences 5 gadu periodā pēc kopšanas cirtes. Veikta kopšanas ciršu intensitātes analīze. Lai arī šajā pētījuma posmā notiek galvenokārt informācijas uzkrāšana, tomēr jau konstatēts, ka egļu objektos pēc kopšanas cirtēm, it īpaši parauglaukumos ar augstāku kopšanas intensitāti, ir bijis nepieciešams veikt sanitārās cirtes (5 no 6 objektiem). Priedes audzēs sanitārās cirtes veiktas 1 no 16 objektiem.

2. Meža elementu augšanas gaitas modeļi, balstot uz MSI parauglaukumu datiem

Meža statistiskās inventarizācijas (MSI) parauglaukumu datu bāzē atlasīti un MS Excel datorprogrammā ievadīti dati par 1081 atkārtoti 2022. gadā pārmērītajiem parauglaukumiem, kas tālāk izmantojami augšanas gaitas prognožu modeļu izstrādē un verifikācijā. Veikta taksācijas rādītāju prognožu modeļa parametru precizēšana (H, G) un modeļa pilnveidošana – D priedes, egles, bērza, melnalkšņa, apses un baltalkšņa, oša un blīgznas, kā arī atbilstošajiem otrā stāva meža elementiem.

3. Individuāla koka augšanas gaitas modeļi

Literatūras analīze veikta pētījuma pirmajā posmā. Veikta G, D pieaugumu aproksimācija ar "netelpiskiem" un "telpiskiem" nelineārajiem regresijas vienādojumiem (modeļiem), kā arī aprēķināta koku izdzīvošanas varbūtība. Ar dronu iegūti LiDAR dati un aerofotoattēli 10 KKC objektos. Aprēķinātas augstuma diferences.

4. Plantāciju mežaudžu augšanas gaitas modeļi

Veikta mežaudzēs bijušajās lauksaimniecības zemēs LVMI Silava iepriekš ierīkoto parauglaukumu pārmērīšana 8 objektos, kā arī 16 ražošanas objektos. Veikta gadskārtu platumu mērīšana. Analizēti caurmēra pieaugumi un koku taksācijas parametru izmaiņas.

Summary

During third stage of the study following tasks were implemented in four activities.

Activity 1. Improvement of intermediate (thinning) models

Remeasured 30 sites of thinning experiments. In total 304 sample plots (30 m×30 m) were measured. In addition, the survey of the objects / or parts thereof in which LVM had planned to carry out sanitary felling or other economic activity in 2023 has been carried out. Calculations and analysis of stand inventory, tree growth course equation clarification, considering changes in sample plots inventory values were carried out. Analysis of the intensity of thinnings has been carried out. It has been found that sanitary felling (5 for 6 objects) had to be carried out in spruce objects after thinning, especially in plots with higher thinning intensity. Sanitary felling of pine stand has been carried out in 1 out of 16 objects. Net increment in the period of 5 years after thinning was carried out.

Activity 2. Growth models of the forest elements based on NFI sample plot data

Data on 1081 plots with 27189 sample trees were re-measured in 2023 and have been selected in the database of forest statistical inventory (NFI) plots and entered into the MS Excel, which can be further used in the development and verification of growth forecast models. Inventory value forecast improvement – H, D, G Pinus sylvestris L., Picea abies, Betula pendula, Alnus glutinosa, Populus tremula, Alnus incana, Fraxinus excelsior, Salix caprea, as well as for some species in second-storey.

Activity 3. Single tree growth models

Analysis of literature has been carried out in the first stage of research. G increases approximation with "non-spatial" and "spatial" nonlinear regression equations (models), as well as calculated probability of survival trees was carried out.

Activity 4. Growth models of plantation forests

Remeasurement of Silava's formerly arranged plots on former agricultural lands has been carried out. Field works have been carried out in accordance with the methodology in 8 objects. In addition 16 stands under conventional management were measured.

Measurement of annual tree ring widths has been carried out. Average increases and changes in tree inventory parameters in research objects have been analysed.

Tabulu saraksts

- 1.1. tabula. 2023.g. pārmērīto pētījumu objektu sadalījums pa reģioniem un objektu taksācijas pamatrādītāji 15
- 2.1.1. tabula. Parauglaukumu sadalījums pa I stāva valdošajām koku sugām un vecuma desmitgadēm 25
- 2.1.2. tabula. Parauglaukumu sadalījums pa I stāva valdošajām koku sugām un bonitātēm 25
- 2.1.3. tabula. Parauglaukumu sadalījums pa I stāva valdošajām koku sugām un meža tipiem 26
- 2.1.4. tabula. Ceturtajā ciklā uzmērīto koku sadalījums pa koku sugām un meža tipiem 26
- 2.2.1. tabula. Kokaudzes 1. stāva meža elementa vidējā augstuma augšanas gaitas modeļa (2.1. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji 28
- 2.2.2. tabula. Kokaudzes 2. stāva meža elementa vidējā augstuma augšanas gaitas modeļa (2.1. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji 28
- 2.2.3. tabula. Vidējā augstuma augšanas gaitas vienādojuma (2.1. formula) statistiskie rādītāji ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām I stāva meža elementiem 29
- 2.2.4. tabula. Vidējā augstuma augšanas gaitas vienādojuma (2.1. formula) statistiskie rādītāji ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām II stāva meža elementiem 30
- 2.2.5. tabula. Meža elementa virsaugstuma augšanas gaitas modeļa (2.1. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji 41
- 2.2.6. tabula. Meža elementa virsaugstuma augšanas gaitas modeļa (2.1. formula) prognozētā ikgadējā augstuma pieauguma statistiskie rādītāji ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām 41
- 2.2.7. tabula. I stāva meža elementu vispārinātās algebriskās diferences vidējā caurmēra augšanas gaitas modeļa (2.2. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības 48
- 2.2.8. tabula. II stāva meža elementu vispārinātās algebriskās diferences vidējā caurmēra augšanas gaitas modeļa (2.2. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības 48
- 2.2.9. tabula. I stāva meža elementu vispārinātās algebriskās diferences vidējā caurmēra augšanas gaitas modeļa (2.2. formula) statistiskie rādītāji ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām 49
- 2.2.10. tabula. II stāva meža elementu vispārinātās algebriskās diferences vidējā caurmēra augšanas gaitas modeļa (2.2. formula) statistiskie rādītāji ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām 49
- 2.2.11. tabula. Meža elementa vidējā caurmēra augšanas gaitas modeļa (2.3. formula) prognozētā ikgadējā caurmēra pieauguma statistiskie rādītāji ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām 54
- 2.2.12. tabula. Meža elementa vidējā caurmēra augšanas gaitas modeļa (2.3. formula) aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji 55
- 2.2.13. tabula. Meža elementa šķērslaukuma izmaiņu modeļa (2.5. formula) prognozētā ikgadējā šķērslaukuma pieauguma statistiskie rādītāji 61
- 2.2.14. tabula. Meža elementa šķērslaukuma izmaiņas modeļa (2.5. formula) aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji 62

- 3.1.1. tabula. Netelpiska atsevišķu koku caurmēra augšanas gaitas modeļa (3.1. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji 69
- 3.1.2. tabula. Atsevišķa koka caurmēra augšanas gaitas modeļa (3.1. formula) prognozētā ikgadējā caurmēra pieauguma statistiskie rādītāji 70
- 3.1.3. tabula. Netelpiska atsevišķu koku atmiruma modeļa (3.3. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji 78
- 3.1.4. tabula. Atsevišķa koka caurmēra augšanas gaitas modeļa (3.1. formula) prognozētā ikgadējā caurmēra pieauguma statistiskie rādītāji 79
- 3.1.5. tabula. Telpiska atsevišķu koku caurmēra augšanas gaitas modeļa (3.6. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji 80
- 3.1.6. tabula. Netelpiska atsevišķu koku atmiruma modeļa (3.3. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji 87
- 3.2.1. tabula. KKC parauglaukumi, kuriem veikta 3D attēlu ieguve ar dronu 88
- 3.2.2. tabula. Krājas kopšanas ciršu parauglaukumu dati pēc mērījumiem dabā (2017.g.) un no LĢIA las datiem aprēķinātie 91
- 3.2.2. tabula. Krājas kopšanas ciršu parauglaukumu dati pēc mērījumiem dabā (2022/2023) un no dronu CHM datiem aprēķinātie 96
- 3.2.3. tabula. Krājas kopšanas ciršu parauglaukumu augstuma pieaugumi pēc mērījumiem dabā (2022/2023), no dronu CHM datiem aprēķinātie un no LĢIA .las aprēķinātie 99
- 4.1.1. tabula. Pētniecisko objektu taksācijas apraksti LVM datu bāzē (2022) 103
- 4.1.2. tabula. Pētniecisko objektu taksācijas apraksti pēc lauku mērījumiem 104
- 4.1.3. tabula. Uzmērīto objektu taksācijas rādītāji 105
- 4.1.4. tabula. Čapmana-Ričardsa augstuma augšanas gaitas modeļa prognozētā augstuma pieauguma statistiskie rādītāji 106
- 4.1.5. tabula. Klonu specifiski aproksimētie Čapmana-Ričardsa funkcijas empīriskie koeficienti. 108

Attēlu saraksts

2.2.1. attēls. Priedes uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 100 gadi: 31

2.2.2. attēls. Egles 1. stāva uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 100 gadi: 32

2.2.3. attēls. Bērza uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 50 gadi: 33

2.2.4. attēls. Melnalkšņa uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 50 gadi: 34

2.2.5. attēls. Apses uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 50 gadi: 35

2.2.6. attēls. Baltalkšņa uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 20 gadi: 36

2.2.7. attēls. Platlapju uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 100 gadi: 37

2.2.8. attēls. Citu lapu koku uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 20 gadi: 38

2.2.9. attēls. Vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) ar 2022. un 2023. gada aproksimētajām koeficientu vērtībām: 39

2.2.10. attēls. Priedes uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 100 gadi ($H_{100} = 39; 33; 27; 21; 15; 9$ m). 42

2.2.11. attēls. Egles uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 100 gadi ($H_{100} = 39; 33; 27; 21; 15$ m). 42

2.2.12. attēls. Bērza uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 50 gadi ($H_{50} = 36; 30; 24; 18; 12$ m). 43

2.2.13. attēls. Melnalkšņa uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 50 gadi ($H_{50} = 33; 27; 21; 15; 9$ m). 43

2.2.14. attēls. Apses uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 50 gadi ($H_{50} = 39; 33; 27; 21; 15$ m). 43

2.2.15. attēls. Baltalkšņa uzmērītās virsausgustuma (H) izmaiņas atkarībā no krūsausgustuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsausgustuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūsausgustuma vecumā 20 gadi ($H_{20} = 24; 18; 12; 6$ m). 44

2.2.16. attēls. Platlapju uzmērītās virsausgustuma (H) izmaiņas atkarībā no krūsausgustuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsausgustuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūsausgustuma vecumā 100 gadi ($H_{100} = 39; 33; 27; 21; 15$ m). 44

2.2.17. attēls. Citu lapu koku uzmērītās virsausgustuma (H) izmaiņas atkarībā no krūsausgustuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsausgustuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūsausgustuma vecumā 20 gadi ($H_{20} = 18; 15; 12; 9$ m). 44

2.2.18. attēls. Virsausgustuma (H) izmaiņas atkarībā no krūsausgustuma vecuma (A1.3) ar 2022. un 2023. gada aproksimētajām koeficientu vērtībām: 45

2.2.19. attēls. Priedes uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūsausgustuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūsausgustuma vecumā 50 gadi: 50

2.2.20. attēls. Egles uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūsausgustuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūsausgustuma vecumā 50 gadi: 51

2.2.21. attēls. Bērza uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūsausgustuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūsausgustuma vecumā 50 gadi: 51

2.2.22. attēls. Melnalkšņa uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūsausgustuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūsausgustuma vecumā 50 gadi: 52

2.2.23. attēls. Apses uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūsausgustuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūsausgustuma vecumā 50 gadi: 52

2.2.24. attēls. Baltalkšņa uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūsausgustuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūsausgustuma vecumā 50 gadi: 53

2.2.25. attēls. Platlapju uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūsausgustuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūsausgustuma vecumā 50 gadi: 53

2.2.26. attēls. Citu lapu koku uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūsausgustuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūsausgustuma vecumā 50 gadi: 54

2.2.27. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu priedēm: 56

2.2.28. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu eglēm: 57

2.2.29. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu bērziem: 57

2.2.30. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu melnalkšņiem: 58

2.2.31. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu apsēm: 58

2.2.32. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu baltalkšņiem: 59

2.2.33. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu platlapjiem: 59

2.2.34. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu citiem lapu kokiem: 60

2.2.35. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu priedēm: 63

2.2.36. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu eglēm: 64

2.2.37. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu bērziem: 64

2.2.38. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu melnalkšņiem: 65

2.2.39. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu apsēm: 65

2.2.40. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu baltalkšņiem: 66

2.2.41. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu platlapjiem: 66

2.2.42. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu citiem lapu kokiem: 67

3.1.1. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.1. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu priedēm: 71

3.1.2. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.1. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu eglēm: 72

3.1.3. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.1. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu bērziem: 73

3.1.4. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.1. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu melnalkšņiem: 74

3.1.5. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.1. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu apsēm: 75

3.1.6. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.1. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu baltalkšņiem: 76

3.1.7. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.2. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu priedēm: 81

3.1.8. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.2. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu eglēm: 82

3.1.9. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.2. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu bērziem: 83

3.1.10. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.2. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu melnalkšņiem: 84

3.1.11. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.2. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu apsēm: 85

3.1.12. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.2. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu baltalkšņiem: 86

3.2.1. attēls. Krājas kopšanas ciršu objektu, kuros iegūti dronu attēli, shematisks izvietojums Latvijā 89

3.2.2. attēls. Piemērs pētījumu objektu CHM noteikšanai 101-425-13 objektā. (CHM veidots no LĢIA (c) las datu failiem. 89

3.2.3. attēls. Piemērs pētījumu objektu ortofotomozaīkai 101-425-13 objektā. Mozaīka veidota no drona RGB datu failiem. 90

3.2.4. attēls. Piemērs pētījumu objektu CHM 101-425-13 objektā. (CHM veidots drona LiDAR datiem). 90

Ziņojumā lietotie simboli un saīsinājumi

LVM – akciju sabiedrība “Latvijas valsts meži”

LVMI Silava – Latvijas Valsts mežzinātnes institūts “Silava”

LĢIA – Latvijas ģeotelpiskās informācijas aģentūra

LiDAR – lāzerskenēšanas tehnoloģija

KKC – krājas kopšanas cirte

MSI – meža statistiskā inventarizācija

MT – meža tips

VAC – vienlaidus atjaunošanas cirte

A – vecums

D – vidējais caurmērs

H – vidējais augstums

G – šķērslaukums

Sl - sils

Mr – mētrājs

Ln – lāns

Dm – damaksnis

Vr – vēris

Gr – gārša

Gs – grīnis

Mrs – slapjais mētrājs

Dms – slapjais damaksnis

Vrs – slapjais vēris

Grs – slapjā gārša

Pv – purvājs

Nd – niedrājs

Db – dumbrājs

Lk - liekņa

Av – viršu ārenis

Am – mētru ārenis

As – šaurlapju ārenis

Ap – platlapju ārenis

Kv – viršu kūdrenis

Km – mētru kūdrenis

Ks – šaurlapju kūdrenis

Kp – platlapju kūdrenis

PL – parauglaukums

P – priede

E – egle

B – bērzs

A – apse

M – melnalksnis

Ba – baltalksnis

Os – osis

Bl – blīgzna

VMD – Valsts meža dienests

Zdvp – vidējā periodiskā caurmēra pieaugums

Zdgp – vidējā periodiskā šķērslaukuma pieaugums

DTM – Digitālais zemes virsmas modelis

DTM – Digitālais virsmas modelis

CHM – Vainagu augstuma modelis

Ievads

Mūsdienu mainīgajā vidē mežsaimniecības plānošanā būtiska nozīme ir nodrošināt plānošanas procesu ar aktuālu informāciju par meža elementu augšanas gaitu un mežsaimniecisko darbību ietekmi uz to. Pētījuma “Augšanas gaitas modeļu pilnveidošana” (2016.-2020.g.) priedes, egles un bērzu audzēs iekārtoti 107 pastāvīgo kopšanas ciršu objekti ar 10 - 12 pastāvīgajiem parauglaukumiem katrā, kuros veikta dažādas intensitātes kopšana. Parauglaukumu tīkls ir svarīgs regulāriem un sistemātiskiem turpmākiem mežaudžu parametru mērījumiem, kas būs pamats nozīmīgai datu rindai par kokaudžu augšanas gaitu pēc starpcirtēm. Vispārējo tendenču noteikšanai un augšanas gaitas modeļu precizēšanai izmantojami MSI ceturtā cikla dati. MSI cikli dod iespēju pagarināt novērojumu rindu, tādējādi nodrošinot precīzāku modeļu parametrizāciju.

Arvien lielāku nozīmi mežsaimniecības plānošanā gūst dažādas attālās izpētes metodes. Lielie dati (individuālu koku mērījumi), mitro vietu noteikšana, utt., ļauj šo informāciju izmantot arī augšanas gaitas prognozēšanā un attiecīgi mežsaimniecības pielāgošanai. Kombinējot dažādus attālās izpētes sensoru datus, var iegūt informāciju arī par individuālu koku augšanas gaitu, kas ļautu to izmantot arī darbu plānošanā.

LVM iegādātajos zemes īpašumos daļa no lauksaimniecības zemēs ieaudzētajām mežaudzēm Meža valsts reģistrā reģistrētas kā plantāciju mežaudzes. Novērojumi liecina, ka bijušo lauksaimniecības zemju auglība var nodrošināt kokiem labākus augšanas apstākļus, un koku augšanas gaita ir ātrāka nekā meža zemēs. LVM ilgtermiņa plānošanas rīcībā nav augšanas gaitas modeļu, kas korekti atspoguļotu plantāciju mežaudžu augšanas gaitu, tādēļ nepieciešams izstrādāt priedes, egles, bērza plantāciju mežaudžu augšanas gaitas modeļus.

Pētījumu programmas mērķis ir nodrošināt mežsaimniecības plānošanas procesu ar aktuālu informāciju par meža elementu augšanas gaitu un mežsaimniecisko darbību ietekmi uz to, nodrošinot mežsaimniecības plānošanas iespējas mūsdienu mainīgajā vidē. Programmā plānoti 4 pētījumi (aktivitātes).

1. Starpcirtes (krājas kopšanas cirtes) modeļu pilnveidošana.
2. Meža elementu augšanas gaitas modeļi, balstot uz MSI parauglaukumu datiem.
3. Individuāla koka augšanas gaitas modeļi.
4. Plantāciju mežaudžu augšanas gaitas modeļi.

1. Starpcirtes (krājas kopšanas cirtes) modeļu pilnveidošana

1.1. Dažādu kopšanas ciršu veidu kopšanas efekta novērtējums 5 gadus pēc kopšanas cirtes. Traucējumu ietekme iekļauta augšanas gaitas vienādojumā koeficienta samazinājuma formā

1.1.1. Kopšanas ciršu parauglūkumu pārmērīšana

Materiāls un metodika

Lauka darbu laikā 2023.g. pārmērīti 30 krājas kopšanas ciršu pētījumu objekti: 16 priedes, 6 egles un 8 bērzu audzēs. Ikvienā objektā ierīkoti 8 – 12 30 m×30 m (900 m²) parauglūkumi, kas kopti, saglabājot dažādu biežību (~0,4, ~0,6, ~0,7 ~0,8, kontrole). Objektos veikta vienlaidus koku dastošana, uzmērot caurmēru krūšu augstumā ar 1 mm precizitāti, kā arī katrā parauglūkumā veikti vismaz 12 valdošās koku sugas koku augstumu mērījumi ar 0,1 m precizitāti. Reģistrēts koku stāvoklis – dzīvs, sausoknis, kritala, kā arī koku bojājumi. Objektu saraksts dots 1.1. tabulā.

1.1. tabula. 2023.g. pārmērīto pētījumu objektu sadalījums pa reģioniem un objektu taksācijas pamatrādītāji

Nrpk	Reģions	Objekts	PL skaits	MT	Bon	A	Sastāvs	D, cm	H, m
1	Austrumvidzeme	105_396_6	10	Kp	II	47	10B ats.E	17,4	20,2
2	Austrumvidzeme	105_397_2	10	Ks	I	40	9B1E ats.A	15,0	18,8
3	Austrumvidzeme	105_97_7	10	Vr	Ia	24	10E ats.P;Oz	14,4	12,6
4	Austrumvidzeme	106-497-9	12	Mr	II	37	10P ats.B	13,0	14,0
5	Austrumvidzeme	109-84-7	8	Sl	I	28	10P+B	10,5	11,3
6	Austrumvidzeme	110-74-1	10	Ks	I	48	10P ats.E	17,0	19,5
7	Austrumvidzeme	111_58_2	10	Kp	Ia	24	8B1M1E ats.A	15,9	20,6
8	Austrumvidzeme	111-29-3	10	Kp	Ia	56	9B1A	22,7	28,0
9	Dienvidkurzeme	201_53_11	10	Ln	Ia	22	10P+Oz	16,3	12,8
10	Vidusdaugava	501_400_5	10	Gr	Ia	25	10B+Ba;A ats.Os	13,9	19,3
11	Vidusdaugava	502_226_3	10	Ap	Ia	28	10E+B ats.A;P;Bl	15,5	15,1
12	Vidusdaugava	502-381-4	12	Vr	Ia	50	10E ats.A	27,3	26,4
13	Vidusdaugava	503-345-1	10	Vr	Ia	24	10B+E	12,6	18,1
14	Vidusdaugava	504_300_5	10	Ln	Ia	26	10P ats.E;B	17,1	15,0
15	Vidusdaugava	504-40-7	10	Dm	Ia	22	10P+E;Oz	15,7	12,8
16	Vidusdaugava	509_148_12	10	Ap	Ia	53	10E	28,0	26,8
17	Ziemeļkurzeme	702_106_16	10	Sl	IV	52	10P	11,1	10,7
18	Ziemeļkurzeme	702_118_10	10	Sl	IV	65	10P	16,6	14,8
19	Ziemeļkurzeme	703_14_17	10	Ln	Ia	29	10P ats.E;B	16,1	13,9
20	Ziemeļkurzeme	703_15_33	10	Dm	Ia	30	10P ats.B;Oz	17,9	16,1
21	Ziemeļkurzeme	703_276_10	10	Sl	III	37	10P	11,0	11,5
22	Ziemeļkurzeme	703_276_5	10	Sl	IV	50	10P	12,4	11,6
23	Ziemeļkurzeme	703-407-7	10	Sl	II	33	10P	11,7	10,9
24	Ziemeļkurzeme	703-412-7	10	Sl	II	44	10P	15,0	14,2
25	Ziemeļkurzeme	705-450-9	10	Vrs	Ia	44	7B2M1E ats.Ba	18,5	24,5
26	Ziemeļkurzeme	707_202_33	10	As	I	48	7B2E1M ats.Os	19,2	22,6
27	Ziemeļkurzeme	708_93_5	10	Sl	III	42	10P	13,5	12,7
28	Ziemeļkurzeme	708-262-12	12	Am	Ia	42	10P ats.E	22,3	19,4
29	Ziemeļkurzeme	712_135_15	10	As	Ia	28	10E	20,2	18,0
30	Ziemeļkurzeme	712_169_6	10	As	Ia	30	10E+B ats.M	18,3	16,8

1.1.2. Datu analīze / pieaugumu aprakstošu vienādojumu koeficientu aproksimācija

Atsevišķu parauglūkumu taksācijas rādītāji aprēķināti, izmantojot meža taksācijā vispārpieņemtās metodes un mērvienības (Ozols, 1926, Sarma, 1948, Soest et al., 1965, Liepa, 1996, van Laar, Akça, 2007, West, 2009, Liepa, 2018)¹.

Audžu taksācijas rādītāji pirms un pēc kopšanas

Audžu taksācijas rādītāji aprēķināti pirms cirtes (lielākajā daļā gadījumu mērījumi veikti dažas nedēļas vai dažus mēnešus pirms kopšanas cirtes), iespējami ātri (dažas nedēļas vai mēneši pēc kopšanas cirtes) un piecus veģetācijas periodus (gadus) pēc cirtes. 2023.g. pārmērīto objektu taksācijas rādītāju vidējās vērtības, grupējot audzes pēc valdošās sugas (priede, egle, bērzs) un vecuma grupām (20 – 30 gadi, 31 – 50 gadi, 51 – 70 gadi) atspoguļotas 1.2. tabulā.

¹ Ja LVM darbā nepieciešami atbilstošie rādītāji SI sistēmā, krāju m^3ha^{-1} uz SI sistēmu var pārveidot, izmantojot sakarību $1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$, savukārt taksācijas rādītāju ikgadējo pieaugumu SI sistēmā var pārveidot, pieņemot, ka kalendārajā gadā (pēc Gregora kalendāra) ir 31556952 sekundes (s).

1.2. tabula. Uzmērīto objektu grupu taksācijas rādītāji un to izmaiņas

Suga	Vecuma grupa	Biezība	Pirms cirtes					Pēc cirtes					Pēc 5 gadiem				
			D, cm	H, m	G, m ² ha ⁻¹	M, m ³ ha ⁻¹	N, koki ha ⁻¹	D, cm	H, m	G, m ² ha ⁻¹	M, m ³ ha ⁻¹	N, koki ha ⁻¹	D, cm	H, m	G, m ² ha ⁻¹	M, m ³ ha ⁻¹	N, koki ha ⁻¹
Priede	21-30 gadi	0,38	15,7	13,3	24,4	170	1357	17,2	13,9	12,1	85	570	20,5	16,7	16,9	138	560
		0,53	16,0	13,4	24,0	168	1309	16,9	13,7	16,4	114	815	19,5	16,5	21,4	174	796
		0,68	16,4	13,7	28,4	201	1373	17,0	13,9	21,2	150	950	19,3	17,2	26,5	223	916
		0.53a	15,6	13,3	25,1	175	1415	15,2	13,3	15,9	109	948	17,8	16,1	21,0	169	911
		Kontr	15,5	13,3	25,0	174	1456	15,5	13,3	25,0	174	1456	17,4	16,4	30,0	249	1386
	31-50 gadi	0,38	14,4	13,7	21,0	157	1353	16,3	14,5	12,1	91	641	18,1	15,8	13,6	107	608
		0,53	14,5	13,7	22,6	169	1458	15,8	14,3	15,7	118	878	17,3	15,6	17,0	135	826
		0,68	16,7	16,2	27,3	228	1361	17,4	16,5	21,8	182	1018	19,1	18,1	24,8	224	953
		0,8	17,9	16,2	32,3	272	1475	18,9	16,6	25,7	214	1158	20,6	19,4	29,8	284	1100
		0.53a	14,5	13,7	24,2	181	1574	14,5	13,9	15,4	113	1033	16,2	15,4	18,3	145	968
	Kontr	14,7	13,9	23,7	177	1483	14,7	13,9	23,4	175	1463	16,1	15,5	25,2	207	1313	
	51-70 gadi	0,38	13,8	12,1	21,0	140	1647	15,6	13,0	11,3	77	678	16,9	13,4	13,4	94	678
		0,53	13,9	12,2	22,9	153	1639	15,3	12,9	15,5	105	881	16,4	13,8	17,7	129	876
		0,68	16,5	14,2	26,0	192	1211	17,7	14,7	21,5	161	872	18,7	16,1	23,9	193	867
		0.53a	14,2	12,3	23,3	157	1648	14,7	12,7	15,0	101	964	15,7	14,0	17,2	126	961
Kontr		13,6	12,2	22,1	147	1667	13,6	12,2	22,1	147	1664	14,5	13,1	24,2	171	1603	
Egle	21-30 gadi	0,38	17,3	15,2	29,1	234	1300	19,2	16,0	11,8	95	421	22,8	17,3	14,6	120	375
		0,53	17,0	15,1	29,4	238	1374	18,5	15,7	15,8	127	624	21,3	17,5	19,2	166	575
		0,68	17,2	15,2	29,8	240	1328	18,3	15,6	19,8	159	779	20,8	17,3	23,4	202	726
		0.53a	16,8	15,0	31,0	251	1419	16,3	15,0	15,3	123	767	19,3	16,9	17,7	152	660
		Kontr	17,4	15,2	30,6	248	1332	17,4	15,2	30,6	248	1331	18,9	17,1	33,0	295	1217
	31-50 gadi	0,38	27,1	25,8	31,1	401	539	29,3	26,6	15,9	206	239	31,7	27,0	9,1	119	117
		0,53	26,7	25,6	34,3	443	617	29,6	26,7	21,4	278	311	31,1	28,3	14,8	203	194
		0,68	28,9	26,5	37,6	487	578	29,8	26,9	27,4	355	394	32,6	28,7	22,1	304	267
		0,8	26,1	25,6	38,2	493	711	27,0	25,9	32,0	414	561	28,2	28,0	27,5	384	439
		0.53a	27,8	25,9	34,8	450	583	27,1	25,8	20,3	262	356	29,9	26,7	16,9	222	244
	Kontr	27,4	25,8	36,5	472	617	27,4	25,8	36,5	472	617	28,3	28,6	30,1	442	472	
	51-70 gadi	0,38	28,7	26,5	43,3	563	672	30,9	27,2	27,5	357	367	32,8	28,9	29,0	403	344
		0,53	27,8	26,4	45,9	598	756	29,8	27,0	29,0	377	417	31,7	28,5	24,1	332	306
		0,68	28,3	26,6	48,3	629	767	30,2	27,0	34,1	444	478	31,3	28,6	32,5	451	422
		0.53a	27,9	26,5	47,6	621	778	28,1	26,5	30,9	403	500	30,0	28,3	32,1	447	456
Kontr		27,6	26,3	47,7	621	800	27,6	26,3	47,7	621	800	28,3	28,3	49,0	694	778	

Bērzs	21-30 gadi	0,38	14,3	18,5	20,6	187	1352	16,2	19,7	10,1	94	526	18,8	22,3	13,5	141	520
		0,53	14,0	18,5	20,5	188	1337	15,0	19,1	13,3	123	769	16,9	21,4	16,9	176	763
		0,68	13,9	18,5	21,9	198	1457	14,4	18,9	16,1	147	1017	16,1	20,9	20,0	204	1011
		0.53a	14,2	18,7	21,9	199	1422	14,2	18,7	12,8	116	813	16,1	20,6	16,2	163	807
		Kontr	14,4	18,7	21,2	194	1322	14,4	18,7	21,1	194	1317	15,9	20,8	25,2	261	1293
	31-50 gadi	0,38	17,3	20,7	21,5	217	889	19,5	21,9	11,0	115	361	21,3	23,2	12,7	136	349
		0,53	18,3	21,1	22,5	230	865	20,2	22,1	15,0	155	477	21,7	23,6	16,5	180	459
		0,68	17,3	20,8	25,7	265	1093	18,9	21,8	18,7	196	670	20,6	23,0	20,8	228	637
		0.53a	17,1	20,6	23,6	239	980	17,3	20,9	14,9	149	621	18,7	22,1	16,4	170	587
		Kontr	17,7	20,8	22,1	223	918	17,8	20,9	21,9	222	908	19,3	22,1	24,6	265	878
	51-70 gadi	0,38	23,9	27,8	19,3	252	406	25,6	28,6	12,8	167	250	27,2	29,8	12,3	168	211
		0,53	22,3	27,0	20,1	255	517	23,9	27,6	16,2	209	361	24,8	29,0	15,0	202	311
		0,68	22,6	27,1	23,0	294	567	23,7	27,6	19,3	248	439	25,9	28,6	20,4	270	389
		0.53a	22,0	27,0	22,0	281	550	21,2	26,8	14,0	175	394	23,6	28,2	14,4	188	328
		Kontr	23,0	27,4	23,3	298	561	23,0	27,4	23,3	298	561	24,0	28,5	23,4	309	517

1.1.2.2. Dabiskais atmirums pēc kopšanas cirtes

No 16 pārmērītajām priežu audzēm un 8 bērzu audzēm sanitārās cirtes veiktas tikai vienā priežu audzē (708-262-12). Šajā priežu mistraudzē ar egli mētru ārenī (vecums ciršanas brīdī 42 gadi) sanitārās cirtes 5 gadu laikā veiktas 3 reizes, tikai vienu reizi skarot parauglaukumu teritoriju, un sanitāro ciršu laikā savācot 2 vējgāztas kritalas no parauglaukumiem.

No 6 pārmērītajām egļu audzēm sanitārās cirtes ir bijušas vai gaidāmas tuvākajā laikā 5 audzēs. Sanitārās cirtes bijušas 3 no 4 egļu audzēm vecuma grupā 21-30 gadi. Mizgraužu bojājumu dēļ pēc VMD sanitārā atzinuma paredzēts nocirst kailcirtē visā nogabala platībā 50 gadus vecu egļu audzi (502-381-4) vērī.

1.3. tabula. Atmirušo koku (sausokņu, stumbeņu, kritalu) īpatsvars no kopējās pārmērītās krājas pa valdošajām sugām, vecuma grupām un pēccirtes biežībām, %

Vecuma grupa	Biezība	Priede		Egle		Bērzs	
		vidēji	N	vidēji	N	vidēji	N
21 - 30 gadi	0,38	0,5	6	5,4	4	1,3	3
	0,53	0,7	6	3,8	4	0,7	3
	0,68	1,7	5	2,7	4	0,5	3
	0.53a	1,0	6	6,9	4	0,8	3
	Kontr	1,6	6	4,7	4	1,0	3
31 - 50 gadi	0,38	1,7	8	50,4	1	3,4	4
	0,53	1,1	8	38,8	1	3,8	4
	0,68	1,9	4	27,7	1	4,2	3
	0,8	1,0	2	22,9	1	-	-
	0.53a	2,1	8	25,8	1	4,3	4
	Kontr	2,6	8	24,6	1	2,4	4
51- 70 gadi	0,38	0	2	0	1	14,4	1
	0,53	0,2	2	2,7	1	10,5	1
	0,68	0,1	1	1,6	1	0,9	1
	0.53a	0,2	2	0,4	1	2,9	1
	Kontr	1,0	2	0,7	1	5,7	1
	Vidēji	1,4	76	9,4	31	3,0	39

1.2. Kopšanas cirtes ietekmi raksturojoši koeficienti augšanas gaitas vienādojumā E, P, B audzēs ar dažādām retināšanas intensitātēm (45% / 55% / 65%)

Iepriekšējā pētījuma laikā (2016. – 2021.), iekārtojot kopšanas ciršu eksperimentu, koncepcija bija kopt objektā atsevišķas audzes daļas (parauglaukumus) samazinot tajos augošo koku skaitu līdz saglabājamas kokaudzes biežība (pēc valdošās koku sugas krājas) ir ~0,4, ~0,6, ~0,7 ~0,8, bez tam arī saglabājot kontroles parauglaukumus, kuros koku ciršana netiek veikta.

Tādējādi atkarībā no kokaudzes sākotnējās biežības, lai sasniegtu atbilstošo saglabājamo biežību pēc cirtes, cirtes (retināšanas) intensitāte (tādā izpratnē kā šo terminu lieto Latvijā, proti, izcērtamā krāja % no esošās krājas) ir ievērojami atšķirīga. Dažādos literatūras avotos kopšanas intensitāti klasificē atšķirīgi, piem., kā vāju, vidēju vai stipru, citos gadījumos kā zemu, vidēju vai augstu. Atšķirīgi tiek vērtēti arī izcērtamās krājas īpatsvars, kāds tiek piedēvēts katrai no grupām. Piem., uzņēmums Metsaliitto Latvija, uzskata, ka vāja ciršanas intensitāte ir, ja izcērt līdz 15% no audzes krājas, vidēja, ja izcērt 15-25%, stipra, ja izcērt 25-35% un ļoti stipra - izcērtot virs 35% no audzes². Šeit gan jānorāda, ka citās valstīs, piem., Lielbritānijā ar kopšanas ciršu intensitāti saprot kopšanas cirtēs izcirstās krājas īpatsvaru attiecībā pret vidējo pieaugumu (yield class). Savukārt Vācijā kopšanas intensitāte tiek saistīta ar audzes vecumu, kad kopšana tiek uzsākta, kopšanas ciršu atkārtosanu un koku dimensijām (Pretzsch, 2009).

1.2.1. Faktori, kas nosaka koksnes krājas uzkrāšanās tempu pie dažādām kopšanas intensitātēm. Meža elementu vidējā caurmēra un vidējā augstuma izmaiņas (pirms pēc cirtes, atkarībā no tās intensitātes)

Sadalot datus pa gradācijas klasēm, konstatēts, ka cirtes intensitāte 65% konstatēta tikai divās gradācijas klasēs – valdošā suga egle, vecuma grupa 21-30 gadi un standarta kopšana, kā arī valdošā suga egle, vecuma grupa 31-50 gadi un standarta kopšana.

1.4. tabula. Valdošās koku sugas I stāva vidējā kvadrātiskā caurmēra izmaiņas (cm) pēc cirtes pa sugām, vecuma grupām un kopšanas veidiem atkarībā no cirtes intensitātes

Valdošā suga	Vecuma grupa	Kopšanas veids	Cirtes intensitāte, %						
			5	15	25	35	45	55	65
P	21-30	no augšas	-	-	-0,12	-0,42	-0,32	-	-
P	21-30	standarta	0,04	0,35	0,61	1,14	2,09	2,15	-
P	31-50	no augšas	-	-	0,05	0,03	-0,20	0,04	-
P	31-50	standarta	0,38	0,76	1,21	1,41	2,05	2,84	-
P	51-70	no augšas	-	-	-0,41	-0,03	-0,24	-	-
P	51-70	standarta	0,29	0,96	1,37	1,90	2,57	2,81	-
E	21-30	no augšas	-	-	-	-0,69	-0,12	-0,43	-
E	21-30	standarta	-	0,76	0,72	1,26	1,39	1,95	2,29
E	31-50	no augšas	-	-	-	-0,71	-0,27	0,07	-
E	31-50	standarta	0,20	1,17	1,18	1,66	2,67	2,99	4,04
E	51-70	no augšas	-	-	-	0,14	-1,07	-	-
E	51-70	standarta	-	0,86	1,46	1,99	1,93	-	-
B	21-30	no augšas	-	-	-	-0,02	-0,24	-	-
B	21-30	standarta	-	-	0,67	1,06	2,01	2,09	-
B	31-50	no augšas	-	-	0,30	-0,39	0,45	-0,39	-
B	31-50	standarta	-	0,83	1,76	2,51	2,04	1,89	-

² <https://www.metsaforest.com/lv/Documents/Noderigi/Audz-krajas-kopsanas-cirtes.pdf>

Valdošā suga	Vecuma grupa	Kopšanas veids	Cirtes intensitāte, %						
			5	15	25	35	45	55	65
B	51-70	no augšas	-	-	-	-0,80	-0,85	0,04	-
B	51-70	standarta	-	1,33	1,51	1,87	2,36	3,03	-
		Vidēji	0,23	0,84	0,98	0,99	1,32	1,82	2,59

Analizējot pirmā stāva valdošās koku sugas vidējā augstuma izmaiņas pēc cirtes, novērojama tendence - pie lielākas cirtes intensitātes vidējā augstuma izmaiņa pēc cirtes ir lielāka (1.5. tabula). Salīdzinot kopšanu no augšas ar standarta kopšanu, vērtējot pēc vidējā augstuma izmaiņas - kopjot no augšas vidējais augstums visos gadījumos ir mazāks, bet ne vienmēr mazāks kā pirms cirtes. Šīs sakarības ir izmantojamas kopšanas ciršu rezultātā relatīvā G un relatīvā N izmaiņu precizēšanai un ieviešanai augšanas gaitas simulatorā.

1.5. tabula. Valdošās koku sugas I stāva vidējā augstuma izmaiņas (m) pēc cirtes pa sugām, vecuma grupām un kopšanas veidiem atkarībā no cirtes intensitātes

Valdošā suga	Vecuma grupa	Kopšanas veids	Cirtes intensitāte, %						
			5	15	25	35	45	55	65
P	21-30	no augšas	-	-	0,05	-0,08	0,00	-	-
P	21-30	standarta	0,00	0,14	0,24	0,40	0,57	0,48	-
P	31-50	no augšas	-	-	0,13	0,17	-0,01	0,16	-
P	31-50	standarta	0,22	0,40	0,51	0,62	0,81	0,77	-
P	51-70	no augšas	-	-	-0,06	0,12	0,14	-	-
P	51-70	standarta	0,17	0,39	0,54	0,76	0,99	0,90	-
E	21-30	no augšas	-	-	-	-0,20	-0,01	-0,04	-
E	21-30	standarta	-	0,44	0,30	0,55	0,54	0,76	0,94
E	31-50	no augšas	-	-	-	-0,14	0,09	0,25	-
E	31-50	standarta	0,05	0,49	0,61	0,79	1,24	1,15	1,48
E	51-70	no augšas	-	-	-	-0,01	-0,31	-	-
E	51-70	standarta	-	0,24	0,46	0,72	0,79	-	-
B	21-30	no augšas	-	-	-	0,10	-0,05	-	-
B	21-30	standarta	-	-	0,40	0,56	1,14	1,12	-
B	31-50	no augšas	-	-	0,28	-0,09	0,40	-0,01	-
B	31-50	standarta	-	0,48	1,07	1,36	1,12	0,98	-
B	51-70	no augšas	-	-	-	-0,21	-0,04	0,15	-
B	51-70	standarta	-	0,57	0,79	0,92	1,18	1,76	-
		Vidēji	0,11	0,37	0,44	0,47	0,61	0,70	1,03

Meža elementu koku skaita un šķērslaukuma izmaiņas (pirms un pēc cirtes atkarībā no intensitātes)

Nemot vērā, ka priedei vecuma grupā 51-70 gadi pie standarta kopšanas un cirtes intensitātes 15%; 25%; 35%; 45% novērojumu skaits vienā gradācijas klasē ir vismaz 14, tad analizēti šie dati. Pie cirtes intensitātes 15% I stāva koku skaits pēc cirtes samazinās vidēji par 239 kokiem ha⁻¹, bet pie cirtes intensitātes 45% - vidēji par 646 kokiem ha⁻¹ (1.6.tabula). Savukārt, I stāva koku šķērslaukums pie cirtes intensitātes 15% pēc cirtes samazinās vidēji par 5,2 m² ha⁻¹, bet pie cirtes intensitātes 45% - vidēji par 12,5 m² ha⁻¹ (1.7.tabula).

1.6. tabula. I stāva koku skaita izmaiņas (koki ha⁻¹) pēc cirtes pa sugām, vecuma grupām un kopšanas veidiem atkarībā no cirtes intensitātes

Valdošā suga	Vecuma grupa	Kopšanas veids	Cirtes intensitāte, %						
			5	15	25	35	45	55	65
P	21-30	no augšas	-	-	-389	-397	-643	-	-
P	21-30	standarta	-133	-274	-402	-691	-819	-831	-
P	31-50	no augšas	-	-	-351	-581	-500	-589	-
P	31-50	standarta	-289	-336	-503	-650	-744	-775	-
P	51-70	no augšas	-	-	-172	-386	-411	-	-
P	51-70	standarta	-56	-239	-358	-481	-646	-492	-
E	21-30	no augšas	-	-	-	-411	-859	-744	-
E	21-30	standarta	-	-694	-513	-759	-780	-961	-1168
E	31-50	no augšas	-	-	-	-307	-612	-761	-
E	31-50	standarta	-83	-172	-454	-670	-808	-887	-1311
E	51-70	no augšas	-	-	-	-278	-281	-	-
E	51-70	standarta	-	-186	-265	-322	-397	-	-
B	21-30	no augšas	-	-	-	-497	-581	-	-
B	21-30	standarta	-	-	-417	-698	-711	-843	-
B	31-50	no augšas	-	-	-300	-219	-458	-1039	-
B	31-50	standarta	-	-225	-425	-450	-767	-692	-
B	51-70	no augšas	-	-	-	-156	-347	-472	-
B	51-70	standarta	-	-142	-376	-326	-513	-661	-
		Vidēji	-140	-265	-399	-540	-663	-790	-1192

1.7. tabula. I stāva koku šķērslaukuma izmaiņas (m² ha⁻¹) pēc cirtes pa sugām, vecuma grupām un kopšanas veidiem atkarībā no cirtes intensitātes

Valdošā suga	Vecuma grupa	Kopšanas veids	Cirtes intensitāte, %						
			5	15	25	35	45	55	65
P	21-30	no augšas	-	-	-5,3	-8,2	-15,0	-	-
P	21-30	standarta	-2,0	-3,5	-5,1	-8,8	-12,9	-15,8	-
P	31-50	no augšas	-	-	-5,2	-8,7	-13,7	-19,2	-
P	31-50	standarta	-1,9	-3,7	-6,5	-8,5	-12,0	-18,3	-
P	51-70	no augšas	-	-	-7,8	-9,2	-13,5	-	-
P	51-70	standarta	-1,4	-5,2	-7,5	-9,9	-12,5	-16,5	-
E	21-30	no augšas	-	-	-	-7,7	-13,2	-19,6	-
E	21-30	standarta	-	-5,0	-7,2	-11,1	-13,5	-15,8	-20,5
E	31-50	no augšas	-	-	-	-8,6	-13,4	-20,5	-
E	31-50	standarta	-3,2	-5,5	-7,7	-10,6	-15,0	-15,5	-25,9
E	51-70	no augšas	-	-	-	-16,7	-13,7	-	-
E	51-70	standarta	-	-6,2	-10,7	-14,5	-14,4	-	-
B	21-30	no augšas	-	-	-	-7,6	-9,6	-	-
B	21-30	standarta	-	-	-5,4	-8,3	-8,8	-11,7	-
B	31-50	no augšas	-	-	-5,2	-5,7	-12,1	-14,5	-
B	31-50	standarta	-	-3,1	-6,8	-9,3	-10,8	-11,8	-
B	51-70	no augšas	-	-	-	-8,0	-12,0	-12,1	-
B	51-70	standarta	-	-3,8	-7,4	-8,9	-11,4	-14,8	-
		Vidēji	-2,1	-4,5	-6,9	-9,5	-12,8	-16,1	-21,4

Krājas pieauguma izmaiņas 5 gadus pēc cirtes atkarībā no intensitātes

Var konstatēt, ka I stāva koku tekošā periodiskā krājas diference un tekošās periodiskās krājas diferences procents pie konkrētas cirtes intensitātes jaunākās audzēs ir lielāks (1.8, 1.9. tabula).

1.8. tabula. I stāva koku tekošā periodiskā krājas diference ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) 5 gadus pēc cirtes pa sugām, vecuma grupām un kopšanas veidiem atkarībā no cirtes intensitātes

Valdošā suga	Vecuma grupa	Kopšanas veids	Cirtes intensitāte, %						
			5	15	25	35	45	55	65
P	21-30	no augšas	-	-	43,3	59,8	65,7	-	-
P	21-30	standarta	88,9	54,7	57,8	51,1	59,3	52,2	-
P	31-50	no augšas	-	-	31,2	32,7	54,8	40,5	-
P	31-50	standarta	52,8	38,3	44,0	34,8	25,3	23,5	-
P	51-70	no augšas	-	-	23,7	29,6	31,2	-	-
P	51-70	standarta	35,4	42,7	36,1	29,5	30,4	3,9	-
E	21-30	no augšas	-	-	-	54,7	54,0	37,4	-
E	21-30	standarta	-	35,1	57,4	69,5	51,8	40,6	32,3
E	31-50	no augšas	-	-	-	2,4	-8,7	21,1	-
E	31-50	standarta	21,1	2,8	25,5	1,2	-6,8	0,6	23,8
E	51-70	no augšas	-	-	-	44,4	-18,3	-	-
E	51-70	standarta	-	30,6	15,4	-3,0	-30,9	-	-
B	21-30	no augšas	-	-	-	44,2	42,7	-	-
B	21-30	standarta	-	-	52,7	51,9	52,7	42,6	-
B	31-50	no augšas	-	-	29,4	20,9	15,9	32,4	-
B	31-50	standarta	-	27,0	24,9	40,3	22,6	27,9	-
B	51-70	no augšas	-	-	-	13,2	0,2	19,3	-
B	51-70	standarta	-	7,5	17,8	13,1	16,7	-8,3	-
		Vidēji	49,5	37,8	38,5	32,8	27,0	27,7	30,9

1.9. tabula. I stāva koku tekošās periodiskās krājas diferences procents (Liepa, 1996) 5 gadus pēc cirtes pa sugām, vecuma grupām un kopšanas veidiem atkarībā no cirtes intensitātes

Valdošā suga	Vecuma grupa	Kopšanas veids	Cirtes intensitāte, %						
			5	15	25	35	45	55	65
P	21-30	no augšas	-	-	35,8	43,6	44,7	-	-
P	21-30	standarta	50,1	34,7	39,2	41,1	45,4	46,5	-
P	31-50	no augšas	-	-	27,5	23,7	28,5	20,7	-
P	31-50	standarta	26,8	22,6	24,7	25,1	16,8	12,1	-
P	51-70	no augšas	-	-	10,7	17,7	15,7	-	-
P	51-70	standarta	10,6	15,8	16,3	16,5	20,7	-1,0	-
E	21-30	no augšas	-	-	-	46,4	37,6	22,4	-
E	21-30	standarta	-	17,9	31,9	34,4	30,3	31,7	28,8
E	31-50	no augšas	-	-	-	3,0	-2,7	11,1	-
E	31-50	standarta	6,2	1,5	13,2	3,4	-9,1	0,7	16,9
E	51-70	no augšas	-	-	-	10,5	-9,0	-	-
E	51-70	standarta	-	8,5	5,5	-1,5	-22,3	-	-
B	21-30	no augšas	-	-	-	30,2	30,7	-	-
B	21-30	standarta	-	-	30,4	34,9	41,3	35,9	-
B	31-50	no augšas	-	-	18,7	15,5	9,2	28,2	-
B	31-50	standarta	-	16,6	14,9	19,3	18,0	28,4	-
B	51-70	no augšas	-	-	-	7,3	0,3	15,7	-
B	51-70	standarta	-	2,5	8,3	6,5	12,3	-5,5	-
		Vidēji	23,4	18,5	21,9	21,2	18,0	20,4	26,8

1.2.2. Dažādu apsaimniekošanas programmu finanšu plūsmas prognozēšana

2023. gadā darbs nav paredzēts.

Secinājumi

Palielinoties kopšanas ciršu intensitātei, ievērojami mainās audzes vidējais caurmērs un vidējais augstums, tādēļ modeļos saglabājama izvēlne, ka pirms un pēc cirtes, atkarībā no izvēlētās cirtes metodes “standarta kopšana (galvenokārt no apakšas)” vai “kopšana no augšas” attiecīgi jāpārreķina vidējais caurmērs un vidējais augstums.

Egļu audzēs, atšķirībā no priežu un bērzu audzēm, pēc kopšanas cirtēm būtiski pieaug sanitāro ciršu nepieciešamība.

2. Meža elementu augšanas gaitas modeļi, balstot uz MSI parauglaukumu datiem

2.1. Meža elementu taksācijas rādītāju izmaiņu (augšanas gaitas) modelis, balstot uz 4 MSI ciklu datiem

2.1.1. MSI parauglaukumu datu paraugkopas izveide

Pētījuma gaitā ir paredzēta izstrādāto augšanas gaitas modeļu verifikācija un atsevišķu koku augšanas gaitas modeļu pilnveidošana, tamdēļ ir nepieciešams ievadīt no jauna ceturtā cikla parauglaukumu datus, jau fiksējot ne tikai mežaudzes, katra atsevišķa mežaudzes stāva un katra atsevišķa mežaudzes elementa galvenos taksācijas rādītājus (vecums, vidējais kvadrātiskais caurmērs un tam atbilstošais augstums, šķērslaukums, krāja un koku skaits) kā arī izcirstās un atmirusās koksnes apjomu (krāja), bet arī katra atsevišķa koka stāvu, caurmēru, augstumu, šķērslaukumu, krāju, reprezentatīvo koku skaitu un stāvokli.

Meža statistiskās inventarizācijas (MSI) parauglaukumu datu bāzē atlasīti un MS Excel datorprogrammā ievadīti dati par 1081 atkārtoti 2022. gadā pārmērīto parauglaukumu, kas tālāk izmantojami augšanas gaitas prognožu modeļu izstrādē un verifikācijā.

Galvenie sākotnējie atlasē kritēriji ir: 1) ceturtajā ciklā parauglaukums nav sadalīts sektoros, kas nozīmē, ka viss parauglaukums ir vienas audzes robežās; 2) ceturtajā ciklā zemju kategorija ir mežs (kods 10) vai mežs lauksaimniecības zemē (62).

Atlasīto un ievadīto MSI parauglaukumu sadalījums pa 4. ciklā konstatētajām valdošajām koku sugām, meža tipi, vecuma desmitgadēm un bonitātēm atspoguļots 2.1.1.

– 2.1.3. tabulās.

2.1.1. tabula. Parauglaukumu sadalījums pa I stāva valdošajām koku sugām un vecuma desmitgadēm

Vecuma 10-gade	Priede	Egle	Bērzs	Meln-alksnis	Apse	Balt-alksnis	Citas sugas	Visas sugas
1 - 10	11	19	52	9	21	18	2	132
11 - 20	17	31	55	10	21	19	4	157
21 - 30	13	21	54	4	14	8	4	118
31 - 40	5	23	15	5	6	11	1	66
41 - 50	9	28	26	7	2	7	3	82
51 - 60	17	33	38	6	6	4	2	106
61 - 70	31	12	28	12	6	3		92
71 - 80	36	14	30	8	10	3	3	104
81 - 90	60	18	14	2	3		1	98
91 - 100	35	4	9		1		1	50
101 - 110	14	4					3	21
111 - 120	14	7					2	23
121 - 130	6		1		1			8
131 - 140	9	2						11
141 -	10	2					1	13
Kopā	287	218	322	63	91	73	27	1081

2.1.2. tabula. Parauglaukumu sadalījums pa I stāva valdošajām koku sugām un bonitātēm

Bonitāte	Priede	Egle	Bērzs	Meln-alksnis	Apse	Balt-alksnis	Citas sugas	Visas sugas
Ia	74	101	138	17	66	20	4	420
I	69	55	90	28	11	32	7	292
II	48	39	61	12	10	14	12	196
III	39	18	21	4		2	3	87
IV	22	2	8		1	4	1	38
V	14	1	1	1		1		18
Va	21	2	3	1	3			30
Kopā	287	218	322	63	91	73	27	1081

2.1.3. tabula. Parauglaukumu sadalījums pa I stāva valdošajām koku sugām un meža tipiem

Meža tips	Priede	Egle	Bērzs	Meln-alksnis	Apse	Balt-alksnis	Citas sugas	Visas sugas
Sl	10	-	1	-	-	-	-	11
Mr	31	-	1	-	-	-	-	32
Ln	31	-	5	-	-	-	-	36
Dm	57	43	58	-	13	8	5	184
Vr	1	76	78	9	45	36	11	256
Gr	-	4	5	1	1	7	8	26
Gs	-	-	-	-	-	-	-	0
Mrs	10	-	4	-	-	-	-	14
Dms	22	20	6	2	1	3	-	54
Vrs	-	5	19	11	4	4	1	44
Grs	-	-	-	2	1	-	-	3
Pv	42	-	2	-	-	-	-	44
Nd	10	2	20	2	-	-	-	34
Db	-	2	13	13	1	3	1	33
Lk	-	-	1	-	-	1	-	2
Av	-	-	-	-	-	-	-	0
Am	13	2	-	-	-	-	-	15
As	25	35	29	1	8	5	1	104
Ap	-	5	21	8	12	4	-	50
Kv	3	-	1	-	-	-	-	4
Km	14	1	5	-	-	-	-	20
Ks	18	18	39	4	5	1	-	85
Kp	-	5	14	10	-	1	-	30
Kopā	287	218	322	63	91	73	27	1081

Šogad ievadīta informācija par 27189 IV ciklā uzņēmētajiem kokiem (2.1.4. tabula).

2.1.4. tabula. Ceturtajā ciklā uzņēmēto koku sadalījums pa koku sugām un meža tipiem

Meža tips	Priede	Egle	Bērzs	Meln-alksnis	Apse	Balt-alksnis	Citas sugas	Visas sugas
Sl	251	2	1	-	-	-	-	254
Mr	633	36	28	-	-	-	-	697
Ln	529	160	103	-	-	-	13	805
Dm	929	1812	1149	27	166	186	282	4551
Vr	32	2337	1533	268	889	1116	640	6815
Gr	1	30	103	33	21	171	162	521
Gs	-	-	-	-	-	-	-	0
Mrs	198	75	73	-	1	-	2	349
Dms	322	750	251	33	34	118	31	1539
Vrs	14	345	346	310	70	106	37	1228
Grs	-	10	10	62	4	-	7	93
Pv	1079	5	40	-	-	-	-	1124
Nd	259	169	416	74	4	-	1	923
Db	2	177	434	300	18	129	16	1076
Lk	-	2	9	6	-	55	6	78
Av	-	-	-	-	-	-	-	0
Am	163	80	19	-	-	-	-	262
As	462	1053	575	64	52	135	60	2401
Ap	3	206	357	188	224	126	143	1247
Kv	64	-	15	-	-	-	-	79
Km	263	106	91	3	6	-	1	470
Ks	348	769	691	161	26	12	41	2048
Kp	13	124	258	184	8	7	35	629
Kopā	5565	8248	6502	1713	1523	2161	1477	27189

2.1.2. Taksācijas rādītāju prognožu modeļu pilnveidošana (vienādojumu aprēķini)

2.1.2.1. Vidējais augstums

Metodika

Datu analīzē izmantoja datus par 22059 meža elementiem (par vienu meža elementu uzskata vienas koku sugas vienas paaudzes vienā stāvā esošus kokus) no 3203 MSI parauglaukumiem, kuri atbilst sekojošiem nosacījumiem:

- 1. stāva meža elementi ir priede (3430 meža elementi), egles (3212), bērzs (4001), melnalksnis (975), apse (919), baltalksnis (758), platlapji – ozols, osis, liepa, goba, vīksna, skābardis un dižskābardis, kļava (585) un citi lapu koki (389), un 2. stāva meža elementi ir priede (357), egles (4371), bērzs (1273), melnalksnis (286), apse (69), baltalksnis (306), platlapji (812) un citi lapu koki (316);
- visās uzmērīšanas reizēs zināms meža elementa vecums;
- augstuma izmaiņas ir bioloģiski loģiskas;
- prognozētais augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi; B, M, A 50 gadi; Ba 20 gadi) starp uzmērīšanas cikliem neatšķiras vairāk kā 10% vai 3 m;
- meža elementa piecu gadu augstuma tekošais periodiskais pieaugums neatšķiras vairāk kā divas standartnovirzes no tam atbilstošās vecuma desmitgades un bāzes vecuma augstuma grupas aritmētiski vidējās vērtības.

Analīzē izmanto visus piecu gadu pārmērījuma ciklus, līdz ar to atsevišķs elements var tikt izmantots līdz trim reizēm (I vs II cikls; II vs III cikls, III vs IV cikls). Šādā veidā nav ņemta vērā autokorelācija, bet vienādojumi tiek izstrādāti uz 5 gadu pārmērījuma datiem, kas saskan ar paredzēto vienas modelēšanas perioda garumu.

Papildus izmantoti dati no pētījumā “Atsevišķu koku un to grupu augšanas gaitas mijiedarbības monitorings un novērtēšana” ietvaros pārmērītajiem izlases ciršu parauglaukumiem, kā arī pārmērīto parauglaukumu dati.

Augstuma augšanas gaitas aproksimācijai pilnveidots iepriekš izstrādātais vienādojums (Donis, 2022), kas balstīts uz vispārinātās algebriskās diferences pieeju (GADA - generalized algebraic difference approach).

Meža elementa vidējā augstuma augšanas gaitas aproksimācijai izmantots Hossfeld IV vienādojuma (Кивисте, 1988) vispārinātās algebriskās diferences pieejas modelis (Krumland & Eng, 2005):

$$H_2 = 1.3 + \frac{A_2^{b_1}}{b_2 + 100 \cdot b_3 \cdot X_0 + X_0 \cdot A_2^{b_1}} \quad (2.1)$$

$$X_0 = \frac{\frac{A_1^{b_1}}{H_1 - 1.3} - b_2}{100 \cdot b_3 + A_1^{b_1}} \quad (2.1.1)$$

- kur H_2 – meža elementa vidējais augstums aktualizācijas perioda beigās, m;
 H_1 – meža elementa vidējais augstums aktualizācijas perioda sākumā, m;
 A_1 – meža elementa vecums 1.3 m augstumā aktualizācijas perioda sākumā, gadi;
 A_2 – meža elementa vecums 1.3 m augstumā aktualizācijas perioda beigās, gadi;
 b_1 – koeficienti.

Meža elementa vidējā augstuma augšanas gaitas modelēta datorprogrammā SPSS 14.0 for Windows, izmantojot rīku Non-linear regression un bootstrap funkciju.

Vienādojumu atbilstība izvērtēta izmantojot sekojošus statistiskos rādītājus: vidējā novirze (MRES), procentuālā vidējā novirze (MRES%), vidējā absolūtā novirze (AMRES), standartnovirze (RMSE), variācijas koeficients (RMSE%), vidējā kvadrātiskā kļūda (MSE), modeļa efektivitāte (MEF) un dispersijas attiecība (VR). Šo statistisko rādītāju aprēķināšanas formulas dotas 1. pielikumā.

2.2.1.2. Rezultāti

Papildinot datus ar 2022. gada mērījumiem un rezultātiem aproksimētas jaunas koeficientu vērtības iepriekš izstrādātajiem augšanas gaitas vienādojumiem meža elementa vidējā augstuma izmaiņu prognozēšanai. Aproksimētas atsevišķas koeficientu vērtības kokaudzes 1. un 2. stāva priežu, egļu, bērzu, melnalkšņu, apšu, baltalkšņu, platlapju (ozolu, ošu, liepu, gobu, vīksnu, skābaržu, dižskābaržu, kļavu) un citu lapu koku meža elementa vidējā augstuma izmaiņu prognozēšanai (2.2.1. un 2.2.2. tabulas).

2.2.1. tabula. Kokaudzes 1. stāva meža elementa vidējā augstuma augšanas gaitas modeļa (2.1. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji

Suga	Koeficients	Vērtība	Standart- kļūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
Priede	b1	1.31244	0.02048	1.27630	1.35672
	b2	-75.41484	21.47602	-140.02679	-49.89453
	b3	37.57731	10.06543	25.67715	65.74163
Egļe	b1	1.42542	0.02061	1.37793	1.45891
	b2	-189.04045	82.81753	-478.75297	-130.79786
	b3	82.39876	34.18921	58.47914	202.46580
Bērzs	b1	1.42217	0.01849	1.39552	1.47014
	b2	-63.07046	17.62202	-120.51490	-41.74711
	b3	24.55162	6.43977	16.66381	45.42001
Melnalksnis	b1	1.34294	0.03238	1.29057	1.42521
	b2	-37.29266	44.80654	-99.56266	-19.90577
	b3	14.53185	16.23760	8.32106	37.44477
Apse	b1	1.42504	0.02649	1.37722	1.48692
	b2	-24.20802	8.40281	-51.31940	-16.21277
	b3	11.55170	3.51510	8.10556	23.37865
Baltalksnis	b1	1.36920	0.03548	1.30920	1.44367
	b2	-33.56753	3558.08711	-14499.43596	-17.60036
	b3	9.61640	1007.13025	5.20745	4086.57810
Ozols, osis, liepa, goba, vīksna, dižskābardis, skābardis, kļava	b1	1.33302	0.04458	1.23260	1.42337
	b2	-61.26438	56.43060	-292.42909	-38.04711
	b3	23.41729	20.20695	15.14914	105.57908
Citi lapu koki	b1	1.40059	0.06210	1.27504	1.54921
	b2	-25.14841	63.17107	-353.45579	-13.71206
	b3	7.17456	16.72706	3.96117	91.80479

2.2.2. tabula. Kokaudzes 2. stāva meža elementa vidējā augstuma augšanas gaitas modeļa (2.1. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji

Suga	Koeficients	Vērtība	Standart- kļūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
Priede	b1	1.09479	0.06904	0.93677	1.22035
	b2	-7.95383	8.10360	-37.53219	-2.16631
	b3	2.26990	1.82634	1.00337	8.48730
Egļe	b1	1.09880	0.02178	1.05469	1.15134
	b2	-184.01998	6211.89575	-22452.79763	-57.71044

Suga	Koeficients	Vērtība	Standart- klūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
Bērzs	b3	79.87944	2741.56377	26.28900	10546.41256
	b1	0.86239	0.03482	0.80418	0.95484
	b2	-43.33467	4013.14096	-7954.72998	-4.73381
Melnalksnis	b3	14.27298	1196.92326	1.73798	2486.14308
	b1	1.10546	0.04978	0.98816	1.18728
	b2	-3.16578	2.87408	-11.68404	-0.51477
Apse	b3	1.35033	0.75388	0.63650	3.69059
	b1	1.11530	0.06983	0.98561	1.25284
	b2	-6.48609	42.22144	-30.12022	-0.91193
Baltalksnis	b3	1.86015	10.24680	0.52700	7.93835
	b1	1.08088	0.05864	0.96798	1.17923
	b2	-3.50600	2.09853	-11.57965	-2.40990
Ozols, osis, liepa, goba, vīksna, dižskābardis, skābardis, kļava	b3	0.90792	0.47756	0.68839	2.69648
	b1	0.99136	0.03709	0.91121	1.06588
	b2	-10.71970	8.92102	-37.36846	-3.63358
Citi lapu koki	b3	5.26395	3.67884	2.35472	16.35842
	b1	1.07459	0.06217	0.95613	1.19985
	b2	-11.98623	979.00624	-4234.77591	-5.63116
	b3	3.10734	242.76790	1.53104	1085.28609

Vidējā augstuma augšanas gaitas vienādojumi ar 2023. gadā aproksimētajām vērtībām precīzi raksturo vidējā augstuma izmaiņas piecu gadu laikā. Pārbaudot vienādojumu uz vienādojumu izstrādē izmantoto datu bāzi, statistiskie rādītāji ir augsti un tuvi to ideālajām vērtībām. Piemēram, vidējā periodiskā augstuma pieauguma vidējā novirze gan I stāva, gan II stāva elementiem nepārsniedz 3 cm, kas lielākā daļā gadījumu ir mazāk kā 5% no to vidējās uzmērītās vērtības (2.2.3. un 2.2.4. tabulas).

2.2.3. tabula. Vidējā augstuma augšanas gaitas vienādojuma (2.1. formula) statistiskie rādītāji ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām I stāva meža elementiem

Rādītājs	Suga	VID	MRES	MRES [^]	AMRES	RMSE	RMSE [^]	MSE	VR	R ²
Z _H ^{VP}	P	0.24	0.01	3.7	0.09	0.11	45.9	0.01	0.64	0.51
	E	0.33	0.01	4.1	0.11	0.14	41.2	0.02	0.70	0.49
	B	0.34	0.01	2.4	0.12	0.16	45.8	0.02	0.71	0.64
	M	0.31	0.01	3.4	0.10	0.12	39.0	0.02	0.73	0.60
	A	0.46	0.02	3.8	0.14	0.18	39.7	0.03	0.78	0.65
	Ba	0.38	0.02	5.6	0.12	0.15	40.8	0.02	0.77	0.55
	Plat	0.32	0.02	4.8	0.11	0.14	42.3	0.02	0.77	0.58
	Citi	0.39	0.03	7.2	0.16	0.20	50.7	0.04	0.61	0.39
H	P	21.42	0.04	0.21	0.44	0.56	2.60	0.31	0.99	0.99
	E	20.92	0.07	0.33	0.55	0.69	3.29	0.47	0.99	0.99
	B	20.62	0.04	0.20	0.60	0.78	3.76	0.60	0.98	0.98
	M	19.67	0.05	0.28	0.49	0.61	3.12	0.38	0.99	0.98
	A	23.69	0.09	0.37	0.70	0.91	3.85	0.83	0.99	0.99
	Ba	16.29	0.11	0.65	0.60	0.77	4.74	0.59	0.99	0.97
	Plat	19.80	0.08	0.39	0.55	0.69	3.47	0.47	1.00	0.98
	Citi	15.63	0.14	0.88	0.79	0.98	6.26	0.95	0.91	0.93

Z_H^{VP} – piecu gadu vidējais periodiskais augstuma pieaugums, m; H – augstums piecu gadu perioda beigās, m.

P – priede; E – egle; B – bērzs; M – melnalksnis; A – apse; Ba – baltalksnis; Plat – ozols, osis, liepa, goba, vīksna, dižskābardis, skābardis, kļava; Citi – citi lapu koki.

VID – aritmētiski vidējā uzmērītā vērtība, m; MRES – vidējā novirze, m; MRES[^] – procentuālā vidējā novirze; AMRES – vidējā absolūta novirze, m; RMSE – standartnovirze, m; RMSE[^] – variācijas koeficients; MSE – vidējā kvadrātiskā kļūda, m; VR – dispersijas attiecība; R² – determinācijas koeficients.

2.2.4. tabula. Vidējā augstuma augšanas gaitas vienādojuma (2.1. formula) statistiskie rādītāji ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām II stāva meža elementiem

Rādītājs	Suga	VID	MRES	MRES [^]	AMRES	RMSE	RMSE [^]	MSE	VR	R ²
Z _H ^{VP}	P	0.14	0.00	3.4	0.08	0.10	73.6	0.01	0.46	0.47
	E	0.22	0.01	3.8	0.11	0.14	63.0	0.02	0.34	0.24
	B	0.21	0.01	2.8	0.11	0.14	66.1	0.02	0.29	0.23
	M	0.23	0.01	3.1	0.11	0.14	59.3	0.02	0.46	0.40
	A	0.32	0.02	6.8	0.11	0.15	45.4	0.02	0.71	0.37
	Ba	0.22	0.02	8.1	0.10	0.13	56.2	0.02	0.53	0.33
	Plat	0.28	0.01	2.5	0.12	0.15	53.4	0.02	0.37	0.28
	Citi	0.25	0.03	12.9	0.11	0.14	56.9	0.02	0.47	0.14
H	P	9.59	0.02	0.25	0.40	0.52	5.48	0.27	0.98	0.99
	E	11.10	0.04	0.37	0.55	0.68	6.14	0.46	0.96	0.98
	B	11.56	0.03	0.25	0.54	0.68	5.92	0.47	0.96	0.97
	M	12.15	0.04	0.30	0.53	0.68	5.58	0.46	0.96	0.98
	A	11.51	0.11	0.96	0.57	0.73	6.38	0.53	0.97	0.97
	Ba	11.77	0.09	0.77	0.51	0.63	5.34	0.39	0.94	0.98
	Plat	13.07	0.04	0.27	0.61	0.75	5.74	0.56	0.98	0.97
	Citi	12.20	0.16	1.32	0.56	0.71	5.83	0.50	0.86	0.95

Z_H^{VP} – piecu gadu vidējais periodiskais augstuma pieaugums, m; H –augstums piecu gadu perioda beigās, m.

P – priede; E – egļe; B – bērzs; M – melnalksnis; A – apse; Ba – baltalksnis; Plat – ozols, osis, liepa, goba, vīksna, dižskābardis, skābardis, kļava; Citi – citi lapu koki.

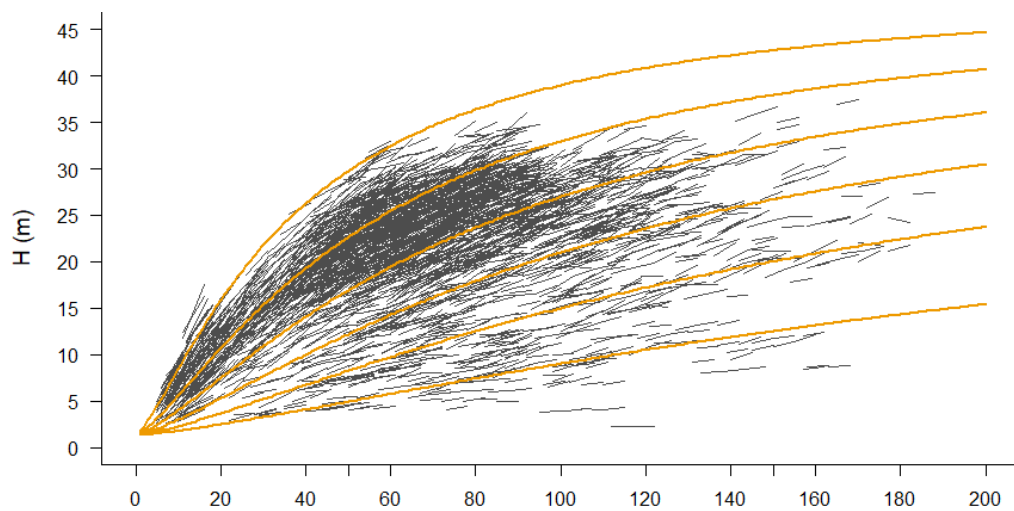
VID - aritmētiski vidējā uzmērītā vērtība, m; MRES - vidējā novirze, m; MRES[^] - procentuālā vidējā novirze; AMRES - vidējā absolūtā novirze, m; RMSE – standartnovirze, m; RMSE[^] - variācijas koeficients; MSE - vidējā kvadrātiskā kļūda, m; VR - dispersijas attiecība; R² - determinācijas koeficients.

Vidējā augstuma augšanas gaitas modeļi ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām prognozē bioloģiski korektas augstuma izmaiņas visām sugām jeb sugu grupām pie dažādām bonitātēm jeb augstumiem bāzes vecumā. Pie tam augstuma izmaiņas bioloģiski loģiskas tiek modelētas arī ārpus modeļu izstrādē iekļauto datu vērtību (vecums un augstums) diapazona (2.2.1. – 2.2.8. attēli).

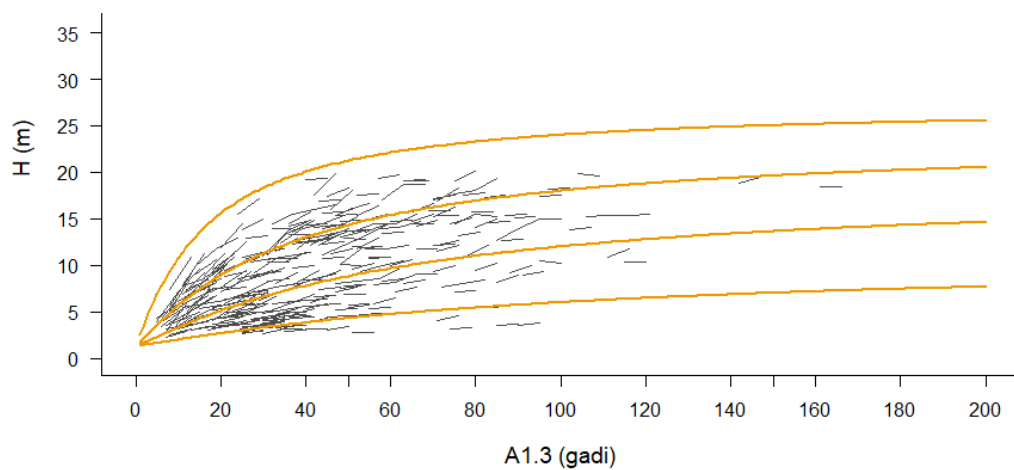
Vidējā augstuma augšanas gaitas modelis ar 2023. gada aproksimētajām koeficientu vērtībām augstuma izmaiņas prognozē līdzīgas, bet nedaudz piesardzīgākas kā ar 2022. gada aproksimētajām koeficientu vērtībām. Starp abiem gadiem izteiktākas izmaiņas ir melnalksnim, baltalksnim un egles 2. stāva meža elementiem, bet pārējiem meža elementiem izmaiņas ir salīdzinoši nelielas (2.2.9. attēls).

Turpmākai meža elementa vidējā augstuma augšanas gaitas modelēšanai ieteicams izmantot Hossfeld IV vienādojuma vispārinātās algebriskās diferences pieejas modeli ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām.

a)



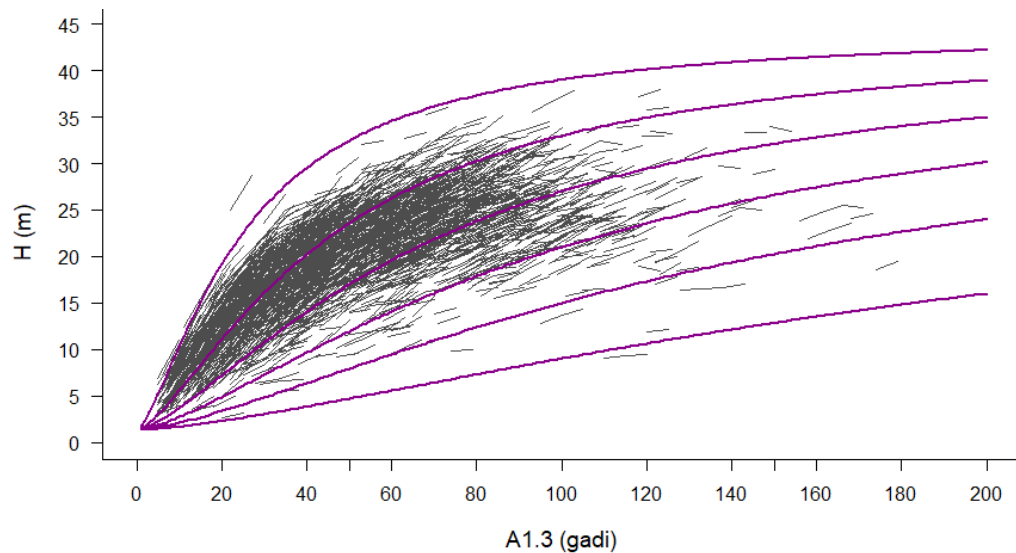
b)



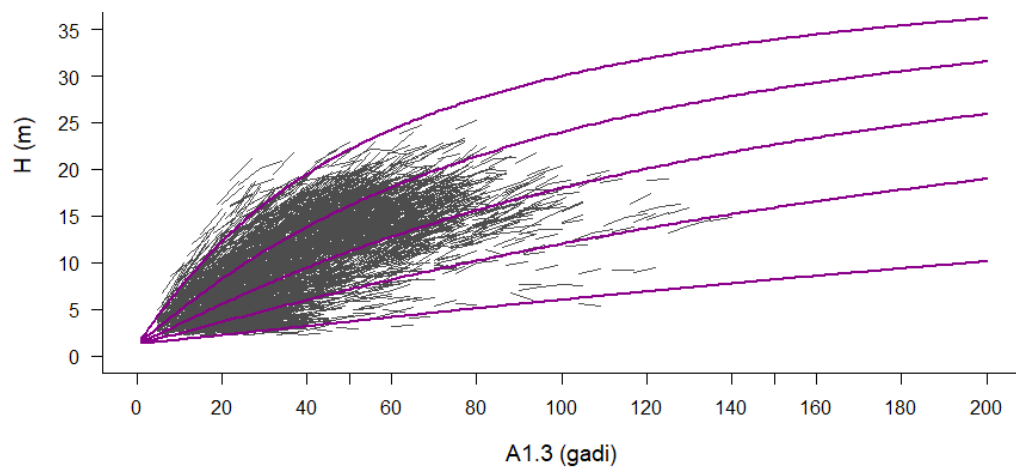
2.2.1. attēls. Priedes uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma ($A_{1.3}$) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 100 gadi:

a) I stāvs ($H_{100} = 39; 33; 27; 21; 15; 9$ m); b) II stāvs ($H_{100} = 24; 18; 12; 6$ m).

a)



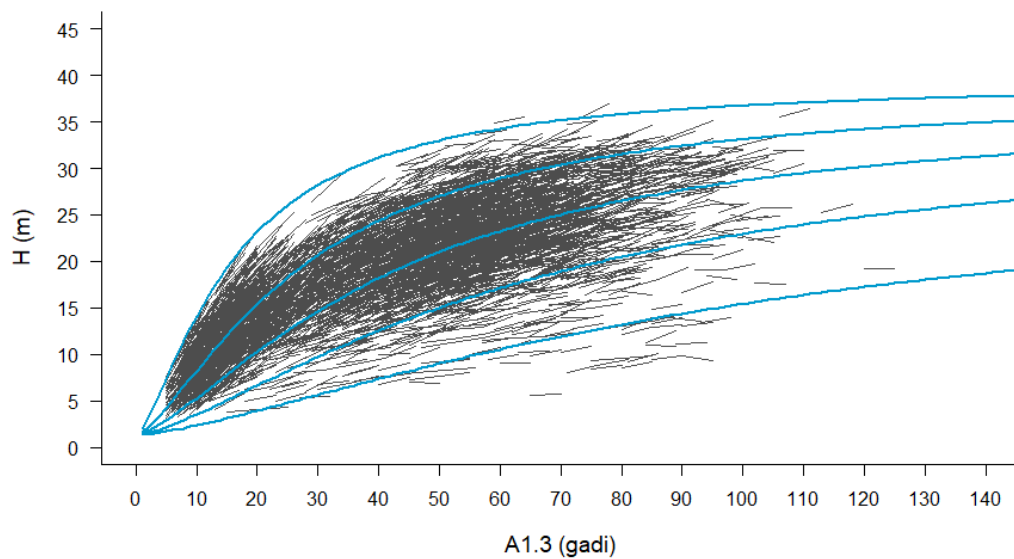
b)



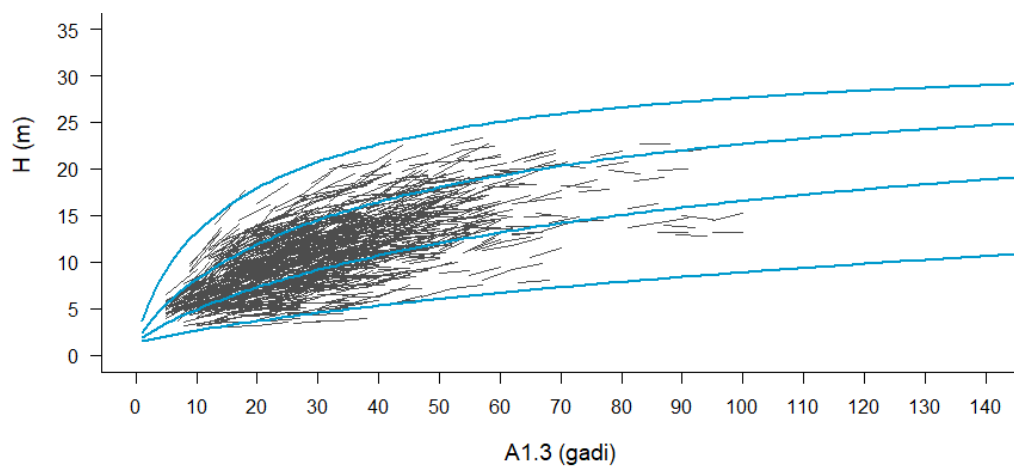
2.2.2. attēls. Egles 1. stāva uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma ($A_{1.3}$) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 100 gadi:

a) I stāvs ($H_{100} = 39; 33; 27; 21; 15; 9$ m); b) II stāvs ($H_{100} = 30; 24; 18; 12; 6$ m).

a)



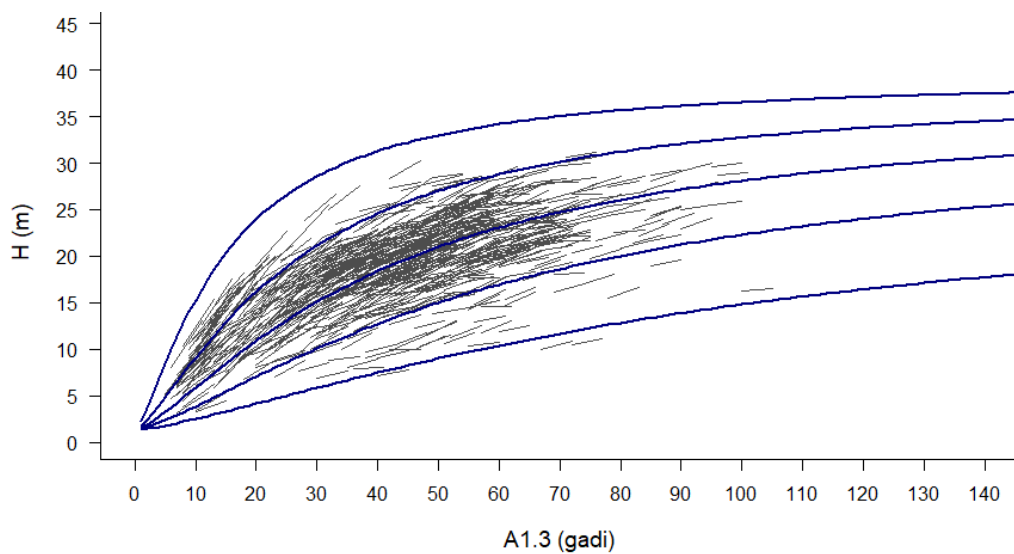
b)



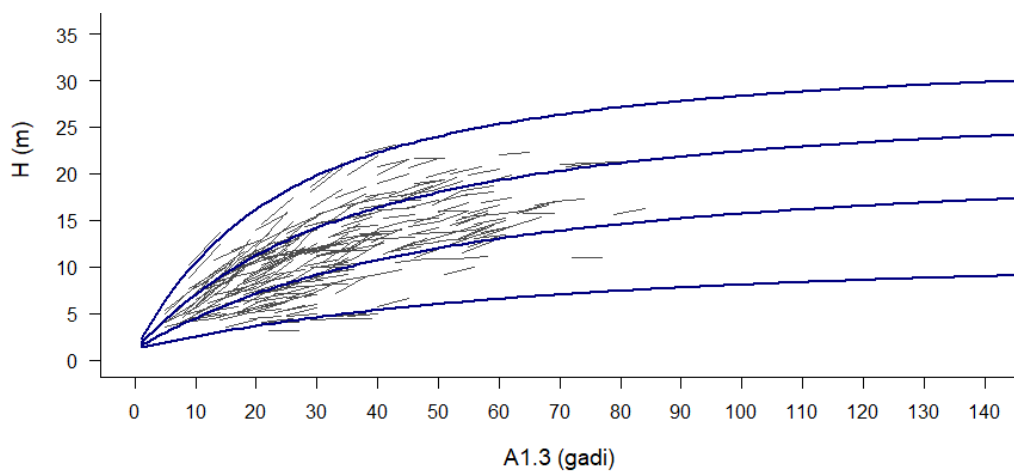
2.2.3. attēls. Bērza uzņēmētās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 50 gadi:

a) I stāvs ($H_{50} = 33; 27; 21; 15; 9$ m); b) II stāvs ($H_{50} = 24; 18; 12; 6$ m).

a)



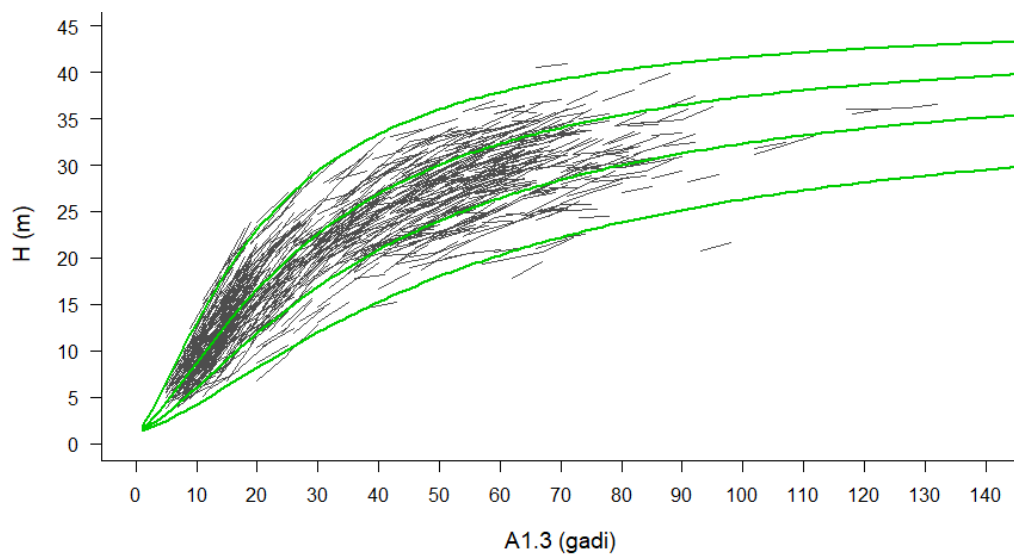
b)



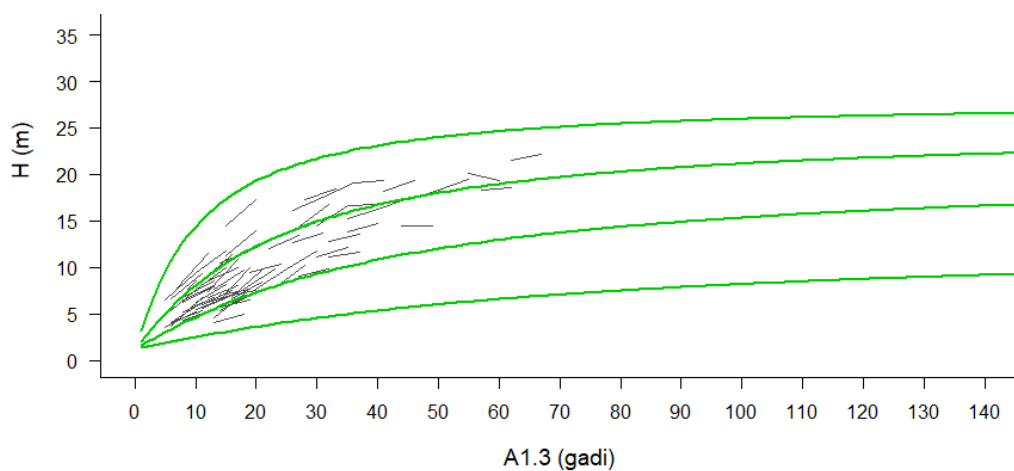
2.2.4. attēls. Melnalkšņa uzņēmētās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 50 gadi:

a) I stāvs ($H_{50} = 33; 27; 21; 15; 9$ m); b) II stāvs ($H_{50} = 24; 18; 12; 6$ m).

a)



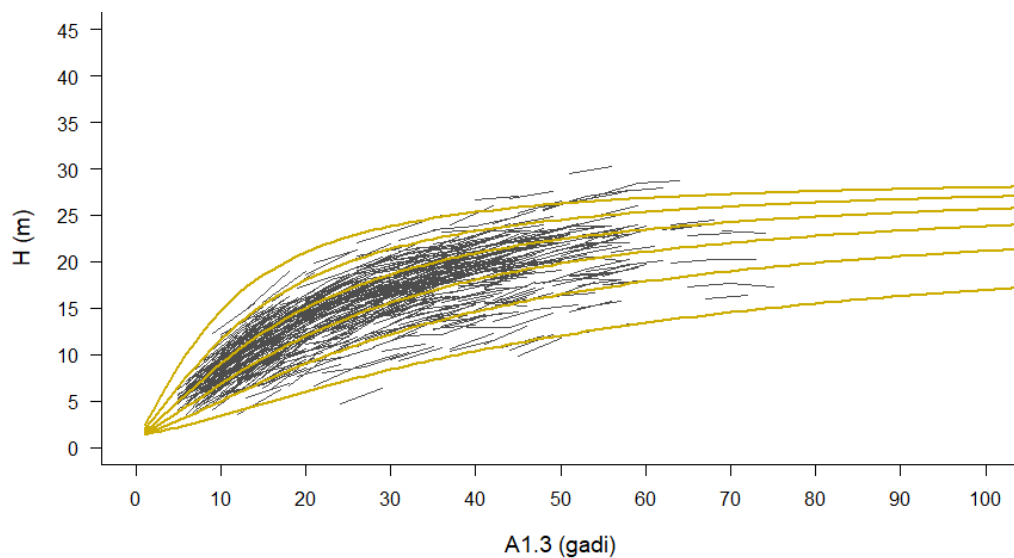
b)



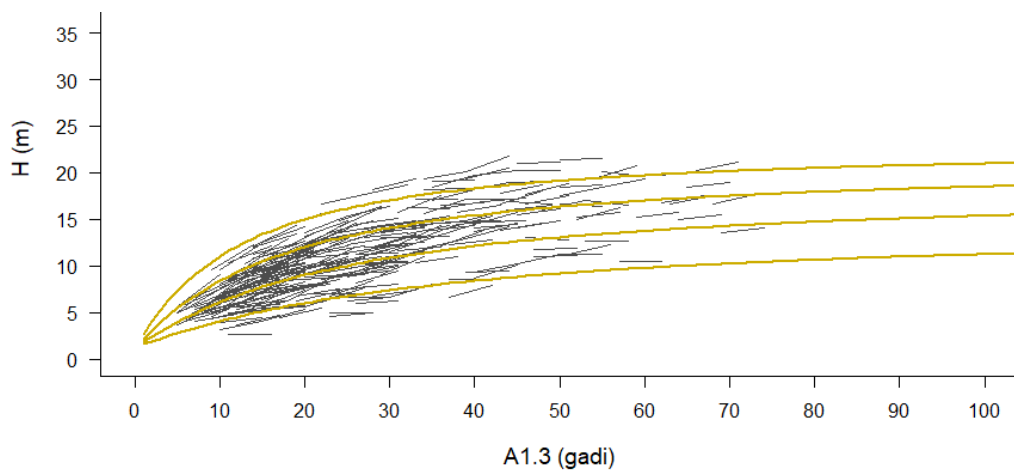
2.2.5. attēls. Apses uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 50 gadi:

a) I stāvs ($H_{50} = 39; 33; 27; 18$ m); b) II stāvs ($H_{50} = 24; 18; 12; 6$ m).

a)



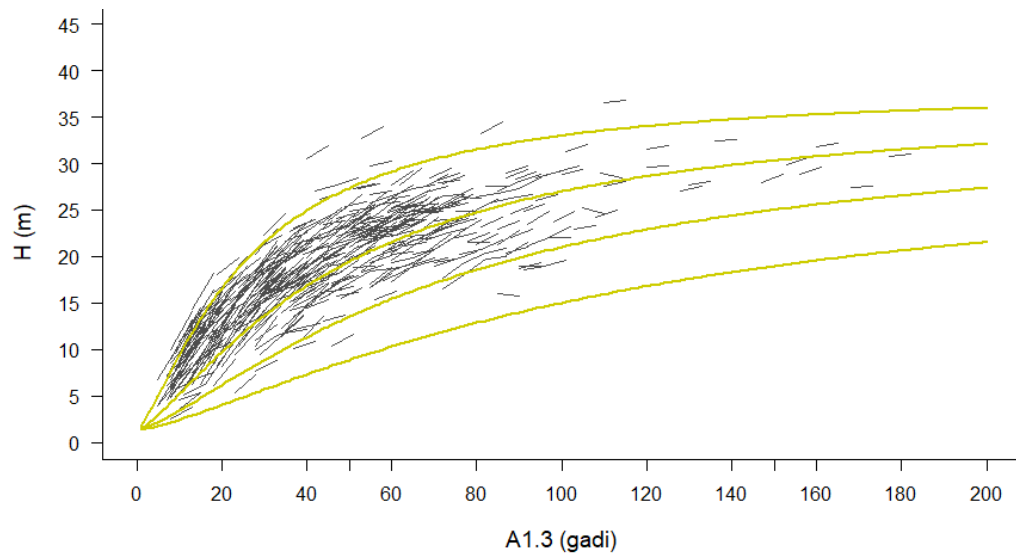
b)



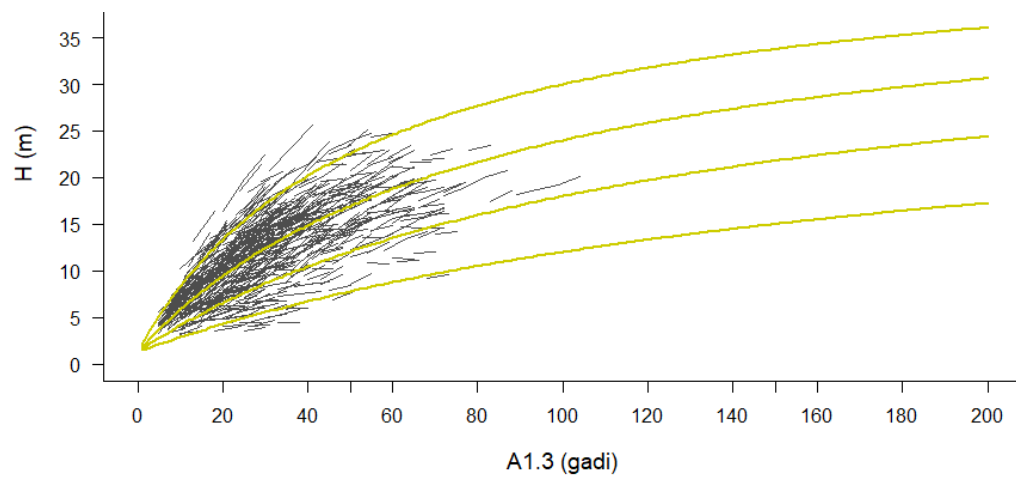
2.2.6. attēls. Baltalkšņa uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma ($A1.3$) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 20 gadi:

a) I stāvs ($H_{20} = 21; 18; 15; 12; 9, 6$ m); b) II stāvs ($H_{20} = 15; 12; 9; 6$ m).

a)



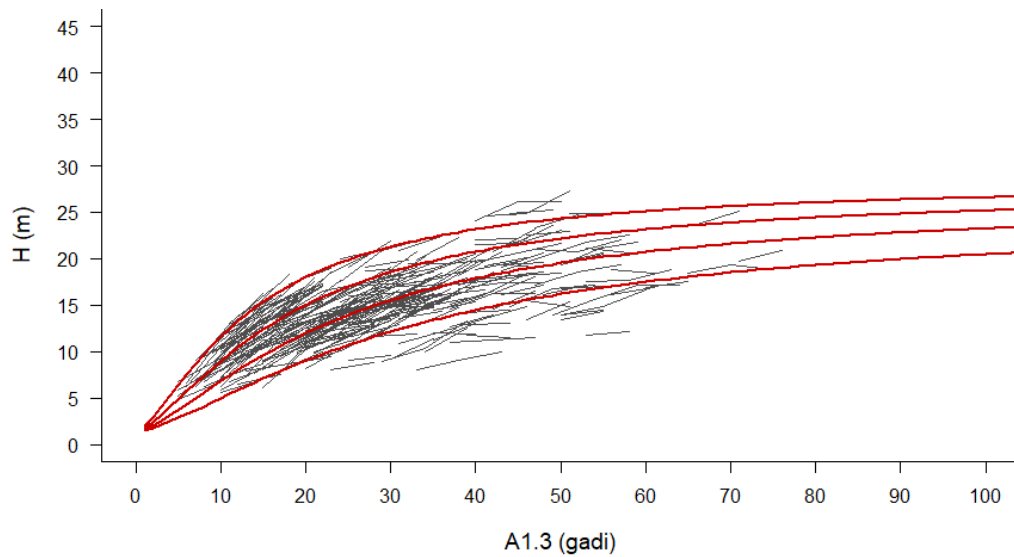
b)



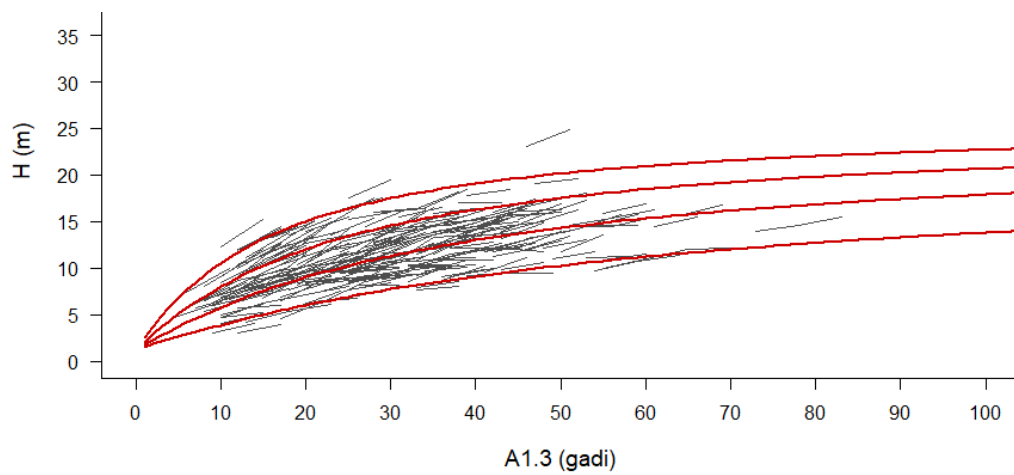
2.2.7. attēls. Platlapju uzmērītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 100 gadi:

a) I stāvs ($H_{100} = 33; 27; 21; 15$ m); b) II stāvs ($H_{100} = 30; 24; 18; 12$ m).

a)

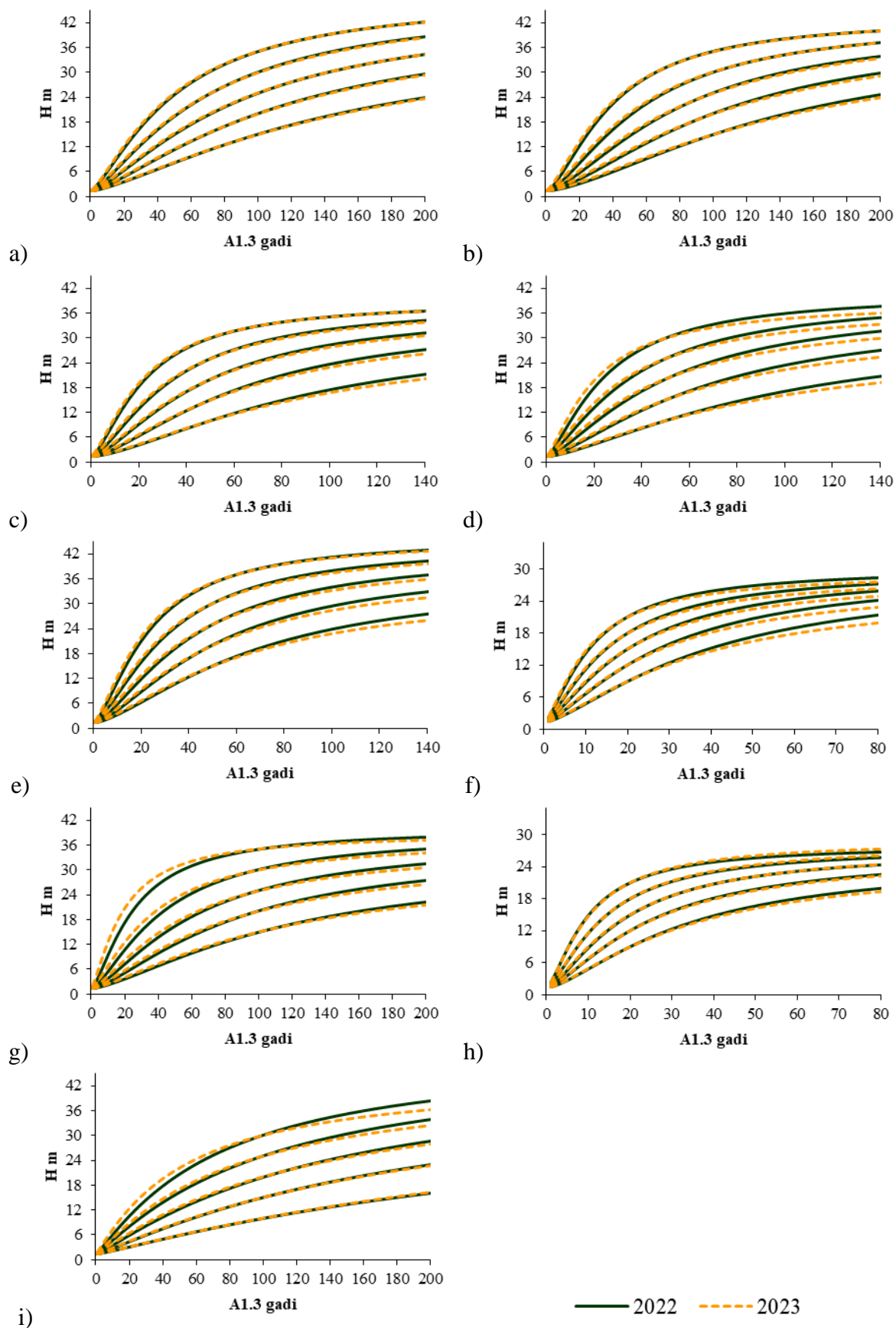


b)



2.2.8. attēls. Citu lapu koku uzņēmītās vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma ($A1.3$) un aproksimētā vidējā augstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 20 gadi:

a) I stāvs ($H_{20} = 18; 15; 12; 9$ m); b) II stāvs ($H_{20} = 15; 12; 9; 6$ m).



2.2.9. attēls. Vidējā augstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) ar 2022. un 2023. gada apromētajām koeficientu vērtībām:

a) priede, b) egle 1. stāvs, c) bērzs, d) melnalksnis, e) apse, f) baltalksnis, g) platlapji, h) citas lapu koku sugas, i) egle 2. stāvs.

2.1.2.2. Virsaugstums

Metodika

Pētījumā par mežaudzes virsaugstumu pieņem 100 uz hektāra vienmērīgi izvietotu resnāko koku aritmētiski vidējo augstumu. Mežaudzes virsaugstuma augšanas gaita modelēta kā atsevišķu virsaugstumam piederošu koku reāli uzmērīto augstumu starpība.

Datu analīzē izmantoja datus par 17554 virsaugstuma kokiem no 3688 MSI parauglaukumiem, kuri atbilst sekojošiem nosacījumiem:

- 1) koku suga ir priede (6448 koki), egle (4038), bērzs (3936), apse (1142), melnalksnis (897), baltalksnis (491), platlapji – ozols, osis, liepa, goba, vīksna, skābardis un dižskābardis, kļava (383) un citi lapu koki (219);
- 2) visās uzmērīšanas reizēs zināms koka (meža elementa) vecums;
- 3) kokam visās uzmērīšanas reizēs nav konstatēti galotnes bojājumi;
- 4) koks ir virsaugstumam piederošs koks (ir starp 100 uz ha resnākajiem kokiem);
- 5) koks ir pirmajā stāvā un ir valdaudzei (I-III Krafta klase) piederošs koks;
- 6) augstuma izmaiņas ir bioloģiski loģiskas
 - a) koka prognozētais augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi; B, M, A 50 gadi; Ba 20 gadi) starp uzmērīšanas cikliem neatšķiras vairāk kā 20% vai 3 m;
 - b) koka augstuma tekošais vidēji periodiskais pieaugums neatšķiras vairāk kā divas standartnovirzes no tam atbilstošās vecuma desmitgades aritmētiski vidējās vērtības.

Analīzē izmanto visus iespējamus piecu gadu pārmērījuma ciklus, līdz ar to atsevišķs koks var tikt izmantots līdz trim reizēm (I vs II cikls; II vs III cikls, III vs IV cikls). Šādā veidā netiek ņemta vērā autokorelācija, bet vienādojumi tiek izstrādāti uz 5 gadu pārmērījuma datiem, kas saskan uz paredzēto viena modelēšanas perioda garumu. Pie tik liela datu apjoma un atkārtotu uzmērījumu maza skaita autokorelācija iegūtos rezultātus neizmaina būtiski.

Virsaugstuma augšanas gaitas aproksimācijai izmanto to pašu Hossfeld IV vienādojuma (Кивисте, 1988) vispārinātās algebriskās diferences pieejas modeli (Krumland & Eng, 2005); ko vidējā augstuma modelēšanai (2.1. formula).

Meža elementa virsaugstuma augšanas gaita modelēta datorprogrammā SPSS 14.0 for Windows, izmantojot rīku Non-linear regression un bootstrap funkciju.

Vienādojumu atbilstība izvērtēta, izmantojot sekojošus statistiskos rādītājus: vidējā novirze (MRES), procentuālā vidējā novirze (MRES%), vidējā absolūtā novirze (AMRES), standartnovirze (RMSE), variācijas koeficients (RMSE%), vidējā kvadrātiskā kļūda (MSE), modeļa efektivitāte (MEF) un dispersijas attiecība (VR). Šo statistisko rādītāju aprēķināšanas formulas dotas 1. pielikumā.

2.2.2.2. Rezultāti

Papildinot datus ar 2022. gada monitoringa mērījumiem un rezultātiem, aproksimētas jaunas koeficientu vērtības iepriekš izstrādātajiem augšanas gaitas vienādojumiem meža elementa virsaugstuma izmaiņu prognozēšanai. Aproksimētas atsevišķas koeficientu vērtības priežu, egļu, bērzu, melnalkšņu, apšu, baltalkšņu, platlapju (ozolu, ošu, liepu, gobu, vīksnu, skābaržu, dižskābaržu, kļavu) un citu lapu koku meža elementa virsaugstuma izmaiņu prognozēšanai (2.2.5. tabulas).

2.2.5. tabula. Meža elementa virsaugstuma augšanas gaitas modeļa (2.1. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji

Suga	Koeficients	Vērtība	Standart- klūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
Priede	b1	1.12279	0.01139	1.09655	1.14900
	b2	-26.98256	0.18280	-27.63484	-26.88277
	b3	14.79936	0.12960	14.75947	15.17792
Egle	b1	1.31453	0.01134	1.28223	1.33480
	b2	-85.14231	0.16194	-85.63269	-85.08162
	b3	39.37722	0.26636	38.71318	40.22024
Bērzs	b1	1.35635	0.01284	1.33395	1.38219
	b2	-15.66434	2.18546	-20.07477	-11.63746
	b3	7.70491	0.90418	6.04335	9.57523
Melnalksnis	b1	1.22465	0.03119	1.16935	1.30685
	b2	-71.61945	4347.62730	-20543.40084	-17.95911
	b3	29.49692	1684.24939	8.47992	7975.13649
Apse	b1	1.41576	0.02551	1.35933	1.46205
	b2	-54.27682	259.90099	-400.86249	-24.51159
	b3	26.60355	117.22545	12.65416	187.65720
Baltalksnis	b1	1.20053	0.03478	1.14395	1.26665
	b2	-31.31527	0.09174	-31.53750	-31.20330
	b3	9.90327	0.22999	9.51425	10.37867
Ozols, osis, liepa, goba, vīksna, dižskābardis, skābardis, kļava	b1	1.28796	0.04051	1.20444	1.37657
	b2	-26.37577	0.14837	-26.72489	-26.16676
	b3	12.84531	0.32160	12.42503	13.63485
Citi lapu koki	b1	1.61465	0.10062	1.42333	1.81582
	b2	-22.26913	11.79521	-55.25705	-10.72637
	b3	5.56366	2.58463	2.90131	12.45255

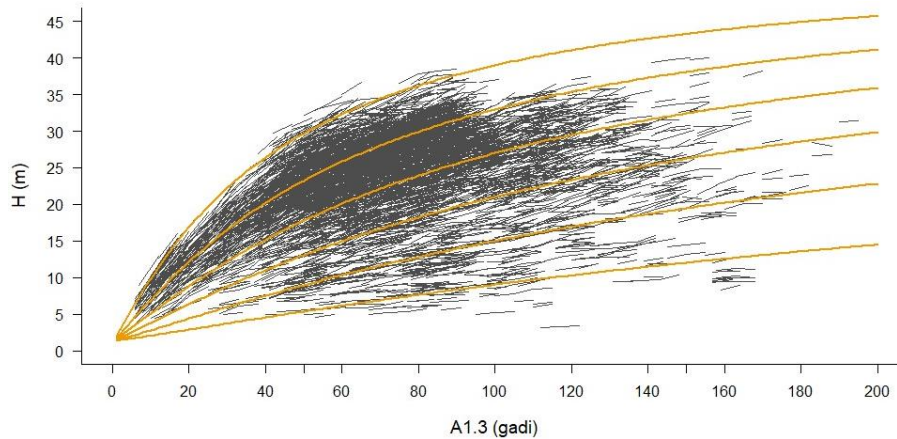
Izstrādātais vienādojums virsaugstuma augšanas gaitas prognozēšanai (2.1. formula) ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām precīzi raksturo augšanas gaitas izmaiņas (2.2.6. tabula). Piemēram, vidējā novirze starp uzmērīto un prognozēto piecu gadu vidējo periodisko virsaugstuma pieaugumu nevienai no sugām vai sugu grupām nepārsniedz 2 cm gadā.

2.2.6. tabula. Meža elementa virsaugstuma augšanas gaitas modeļa (2.1. formula) prognozētā ikgadējā augstuma pieauguma statistiskie rādītāji ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām

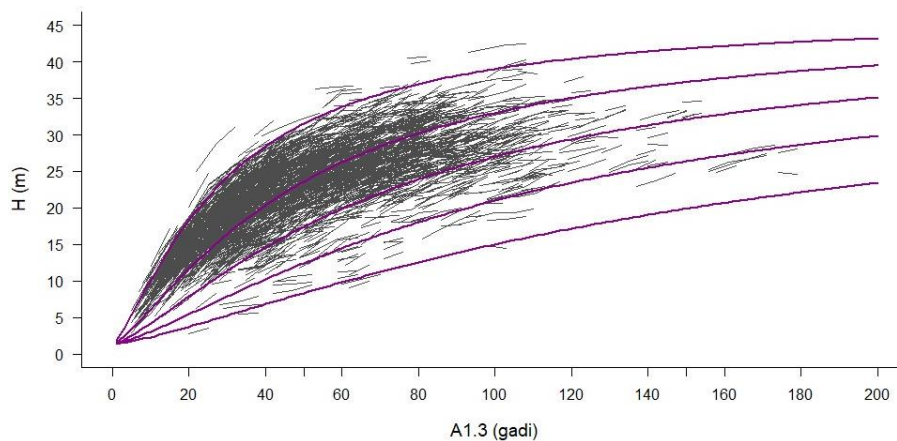
Rādītājs	Suga	Vid	MRES	MRES%	AMRES	RMSE	RMSE%	MSE	VR	R2	N
Z _{Hvp}	Priede	0.21	0.00	0.7	0.09	0.11	53.5	0.01	0.46	0.45	6448
	Egle	0.33	0.01	1.8	0.11	0.13	39.8	0.02	0.67	0.58	4038
	Bērzs	0.31	0.00	0.2	0.11	0.13	42.2	0.02	0.69	0.68	3936
	Melnalksnis	0.30	0.00	0.0	0.10	0.12	40.0	0.01	0.62	0.63	897
	Apse	0.38	0.00	0.2	0.12	0.14	38.3	0.02	0.74	0.74	1142
	Baltalksnis	0.33	0.00	0.9	0.11	0.13	40.4	0.02	0.64	0.61	491
	Platlapji	0.26	0.01	2.9	0.11	0.13	48.0	0.02	0.60	0.54	383
	Citi lapu koki	0.28	0.02	7.5	0.12	0.15	52.6	0.02	0.64	0.39	219
H	Priede	23.34	0.01	0.03	0.44	0.55	2.36	0.30	0.99	0.99	6448
	Egle	23.60	0.03	0.13	0.54	0.65	2.77	0.43	0.99	0.99	4038
	Bērzs	24.64	0.00	0.01	0.55	0.66	2.68	0.43	0.98	0.99	3936
	Melnalksnis	21.94	0.00	0.00	0.49	0.60	2.72	0.36	0.99	0.98	897
	Apse	28.83	0.00	0.01	0.60	0.72	2.50	0.52	0.99	0.98	1142
	Baltalksnis	18.54	0.01	0.08	0.56	0.67	3.63	0.45	0.99	0.98	491
	Platlapji	23.37	0.04	0.16	0.53	0.64	2.72	0.40	1.00	0.99	383
	Citi lapu koki	16.00	0.11	0.66	0.61	0.74	4.62	0.54	0.90	0.93	219

Z_{Hvp} – vidējais periodiskais virsaugstuma pieaugums, m gadā; H – prognozētais augstums piecu gadu perioda beigās, m. Vid - aritmētiski vidējā uzmērītā vērtība, m; MRES - vidējā novirze, m; MRES% - procentuālā vidējā novirze; AMRES - vidējā absolūtā novirze, m; RMSE – standartnovirze, m; RMSE% - variācijas koeficients; MSE - vidējā kvadrātiskā kļūda, m; MEF - modeļa efektivitātes indekss; VR - dispersijas attiecība; R2 - determinācijas koeficients; N - elementu skaits.

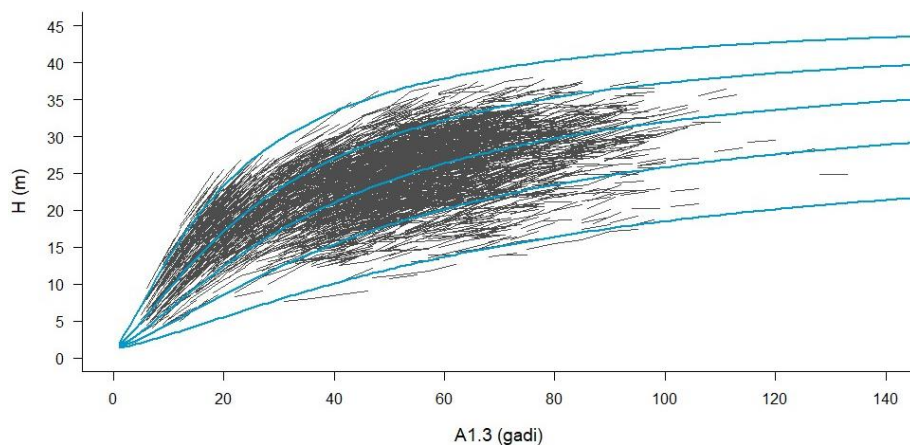
Virsaugstuma augšanas gaitas modeļi ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām prognozē bioloģiski korektas augstuma izmaiņas visām sugām jeb sugu grupām pie dažādām bonitātēm jeb augstumiem bāzes vecumā. Pie tam augstuma izmaiņas bioloģiski loģiskas tiek modelētas arī ārpus modeļu izstrādē iekļauto datu vērtību (vecums un augstums) diapazona (2.2.10. – 2.2.17. attēli).



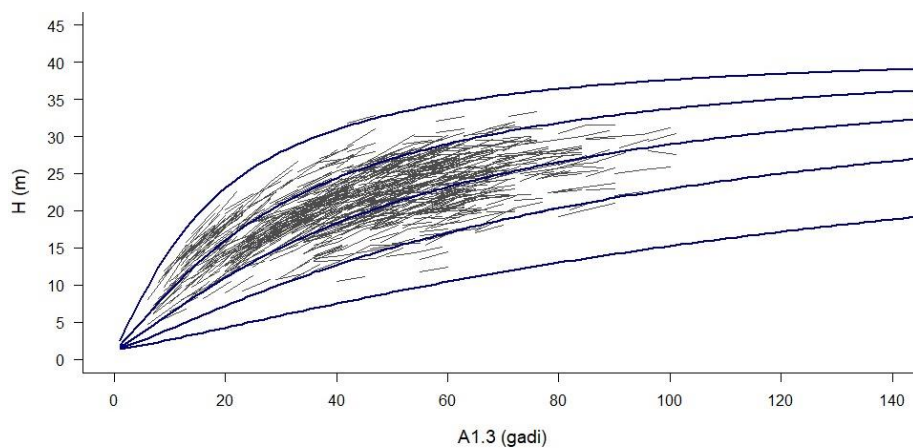
2.2.10. attēls. Priedes uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 100 gadi ($H_{100} = 39; 33; 27; 21; 15; 9$ m).



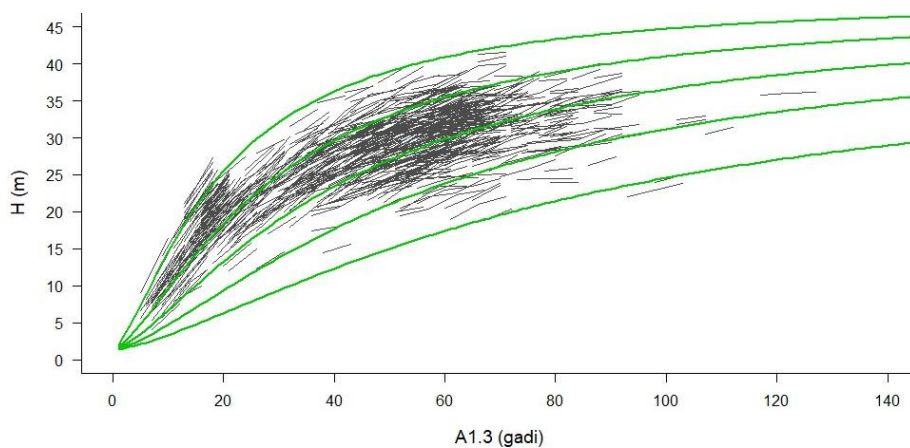
2.2.11. attēls. Egles uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 100 gadi ($H_{100} = 39; 33; 27; 21; 15$ m).



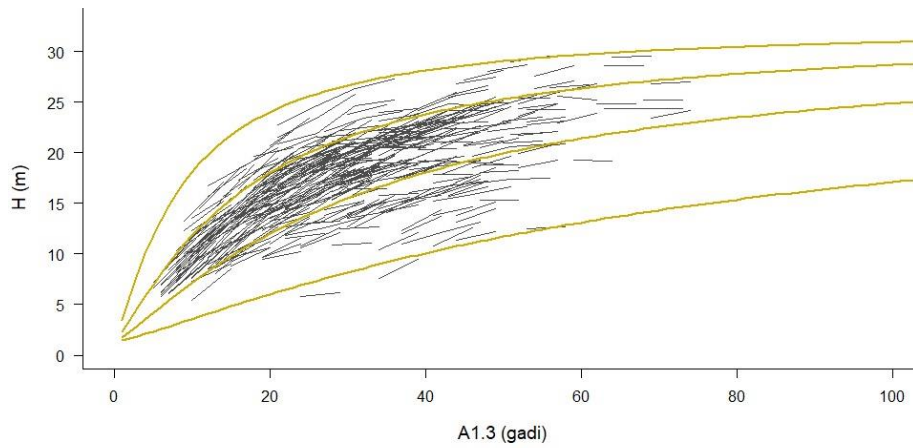
2.2.12. attēls. Bērza uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 50 gadi ($H_{50} = 36; 30; 24; 18; 12$ m).



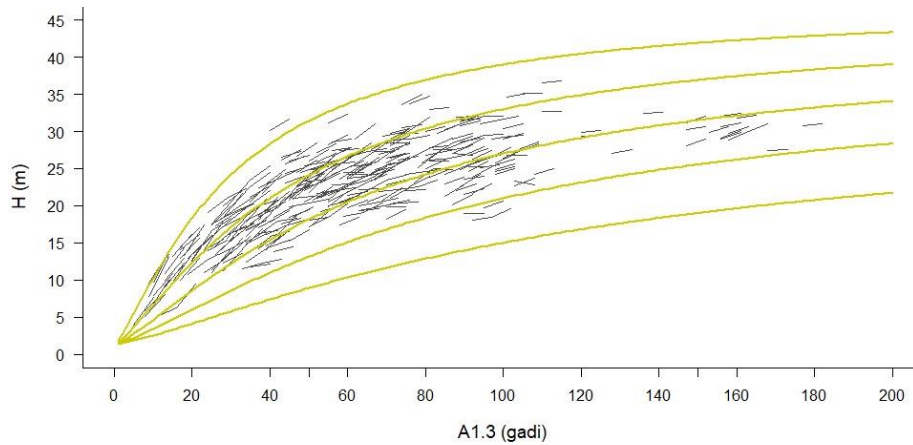
2.2.13. attēls. Melnalkšņa uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 50 gadi ($H_{50} = 33; 27; 21; 15; 9$ m).



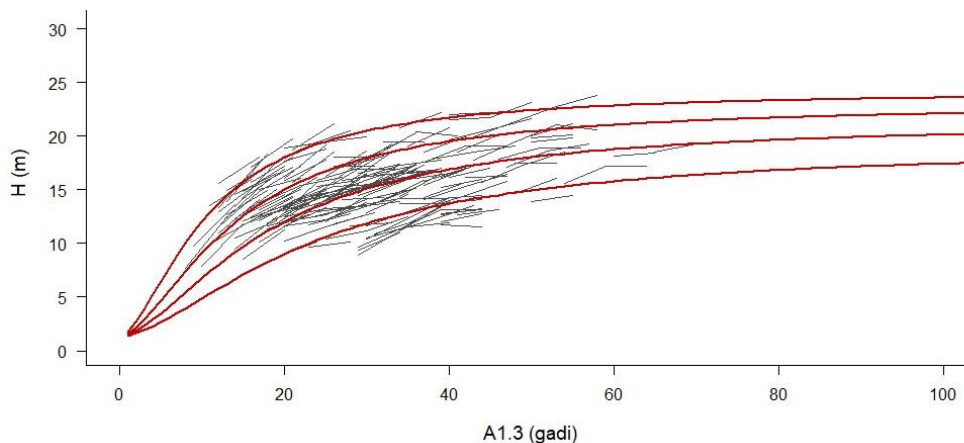
2.2.14. attēls. Apses uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 50 gadi ($H_{50} = 39; 33; 27; 21; 15$ m).



2.2.15. attēls. Baltalkšņa uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 20 gadi ($H_{20} = 24; 18; 12; 6$ m).

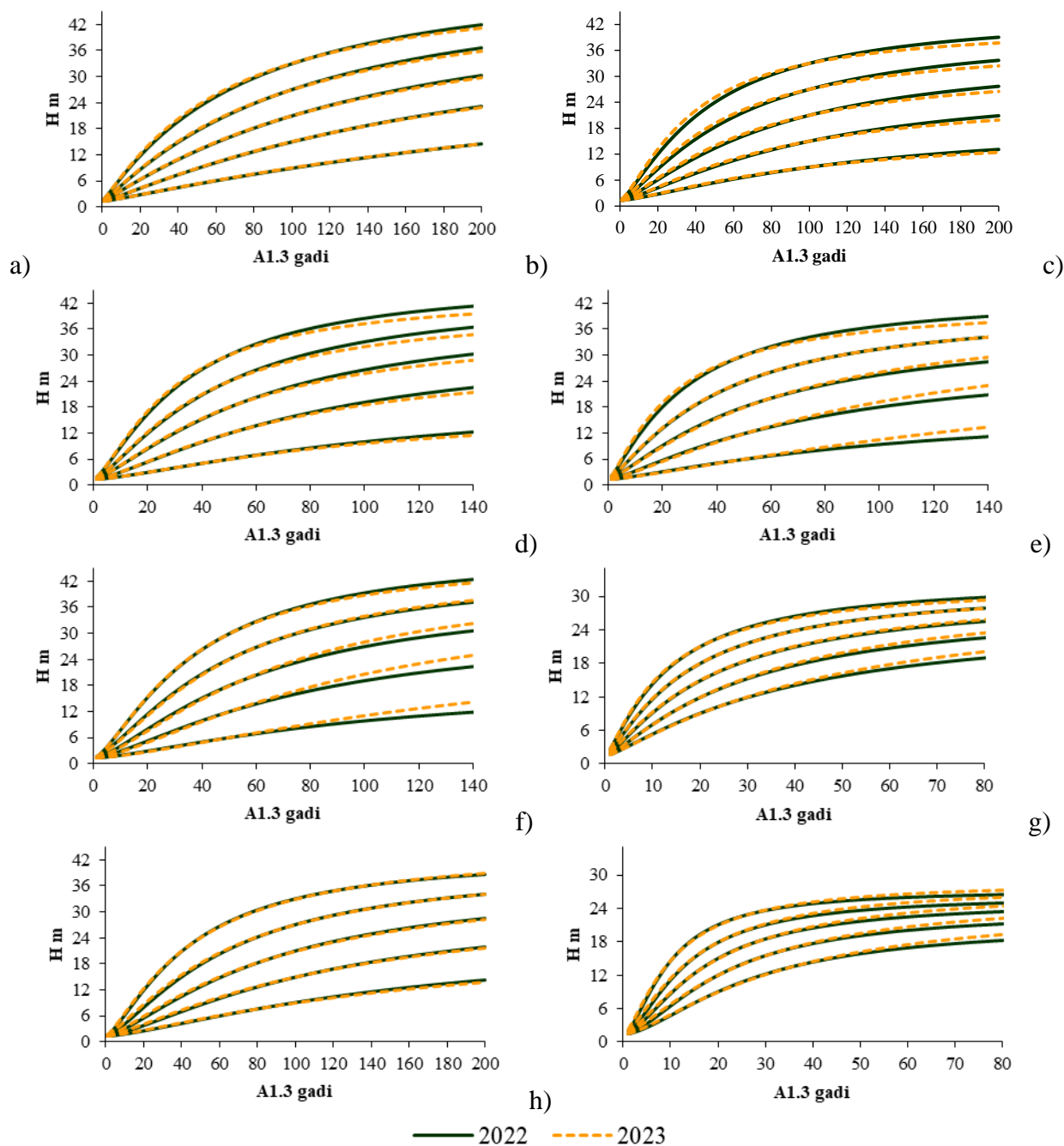


2.2.16. attēls. Platlapju uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 100 gadi ($H_{100} = 39; 33; 27; 21; 15$ m).



2.2.17. attēls. Citu lapu koku uzmērītās virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā virsaugstuma augšanas gaita (2.1. formula) atkarībā no augstuma krūšaugstuma vecumā 20 gadi ($H_{20} = 18; 15; 12; 9$ m).

Virsaugstuma augšanas gaitas modelis ar 2023. gada aproksimētajām koeficientu vērtībām augstuma izmaiņas prognozē līdzīgas, bet pamatā nedaudz piesardzīgākas kā ar 2022. gada aproksimētajām koeficientu vērtībām (2.2.18. attēls).



2.2.18. attēls. Virsaugstuma (H) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) ar 2022. un 2023. gada aproksimētajām koeficientu vērtībām:

a) priede, b) egle, c) bērzs, d) melnalksnis, e) apse, f) baltalksnis, g) platlapji, h) citas lapu koku sugas
 priedei, eglei, platlapjiem $H_{100}=33, 27, 21, 15$ un 9 m; bērzam, melnalksnim un apsei $H_{50}=30, 24, 18, 12$ un 6 m;
 baltalksnim un citām lapu koku sugām $H_{20}=21, 18, 15, 12$ un 9 m;

Turpmākai meža elementa virsaugstuma augšanas gaitas modelēšanai ieteicams izmantot Hossfeld IV vienādojuma vispārinātās algebriskās diferences pieejas modeli ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām.

2.1.2.3. Vidējais caurmērs

Metodika

Meža elementa vidējā kvadrātiskā caurmēra izmaiņu modelēšanai aproksimēti divi iepriekš izstrādāti vienādojumi.

Viens vienādojums balstīts uz vispārinātās algebriskās diferences pieeju. Algebriskās diferences vienādojums ir papildināts vēl ar audzes I stāva biežības rādītāju, kas raksturo koku savstarpējo konkurenci (Donis et al., 2022). Caurmēra augšanas gaitas aproksimācijai pārbaudīts iepriekš izstrādātais Hossfeld IV vienādojuma (Кивисте, 1988) vispārinātās algebriskās diferences pieejas modelis (Krumland & Eng, 2005), kurš modificēts, iekļaujot papildus audzes relatīvo biežību:

$$D_2 = 1.3 + \frac{A_2^{b_1}}{b_2 \cdot \frac{N_1}{N_{max}} + 100 \cdot b_3 \cdot X_0 + X_0 \cdot A_2^{b_1}} \quad (2.2)$$

$$X_0 = \frac{\frac{A_1^{b_1}}{D_1 - 1.3} - b_2 \cdot \frac{N_1}{N_{max}}}{100 \cdot b_3 + A_1^{a_1}} \quad (2.2.1)$$

$$N_{max} = \sum ip_i \cdot n_{max\ i} \quad (2.2.2)$$

$$n_{max} = \beta_1 \cdot D_1^{\beta_2} \cdot H_1^{\beta_3} \quad (2.2.3)$$

kur	D_2	– meža elementa vidējais caurmērs aktualizācijas perioda beigās, cm;
	D_1	– meža elementa vidējais caurmērs aktualizācijas perioda sākumā, cm;
	A_1	– meža elementa vecums 1.3 m augstumā aktualizācijas perioda sākumā, gadi;
	A_2	– meža elementa vecums 1.3 m augstumā aktualizācijas perioda beigās, gadi;
	N_1	– kokaudzes I stāva koku skaits aktualizācijas perioda sākumā, ha ⁻¹ ;
	N_{max}	– kokaudzes I stāva maksimālais koku skaits aktualizācijas perioda sākumā, ha ⁻¹ ;
	n_{max}	– atsevišķa I stāva meža elementa maksimālais koku skaits aktualizācijas perioda sākumā, ha ⁻¹ ;
	ip	– atsevišķa I stāva meža elementa īpatsvars;
	H_1	– meža elementa vidējais augstums aktualizācijas perioda sākumā, m;
	$b_{1-3}; \beta_{1-3}$	– koeficienti.

Otrs vienādojums paredzēts vidējā caurmēra koka šķērslaukuma pieauguma modelēšanai nākamo piecu gadu periodam:

$$i_{g5} = \exp(b_0 + b_1 \cdot \ln(A) + b_2 \cdot \ln(D) + b_3 \ln(G) + b_4 \cdot BAL + b_5 \cdot c_{0-5}) \quad (2.3)$$

kur	i_{g5}	– koka nākošo 5 gadu šķērslaukuma pieaugums, cm ² ;
	A	– meža elementa krūšaugstuma vecums, gadi
	D	– koka krūšaugstuma caurmērs, cm;
	G	– mežaudzes šķērslaukums, m ² ha ⁻¹ ;
	BA	– meža elementu šķērslaukuma summa, kas lielāki par konkrēto meža
	L	elementu (I stāvam 0, II stāvam I stāva šķērslaukums, paaugai I un II stāva šķērslaukuma summa), m ² ha ⁻¹ ;

- c_{0-5} – fiktīvais mainīgais, kas raksturo vai pēdējo 5 gadu laikā mežaudzē ir veikta koku ciršana, (nav - 0, ir - 1);
 b_{0-5} – koeficienti.

Izmantojot 2.3. formulu, meža elementa nākošā perioda caurmērs aprēķināms ar sekojošu vienādojumu:

$$D_2 = \sqrt{D_1^2 + \frac{4 \cdot i_{g5}}{\pi}} \quad (2.4)$$

- kur D_2 – koka krūšaugstuma caurmērs perioda beigās (pēc 5 gadiem), cm;
 i_{g5} – koka nākošo 5 gadu šķērslaukuma pieaugums, cm^2 ;
 D – koka krūšaugstuma caurmērs perioda sākumā, cm;

Meža elementa vidējā kvadrātiskā caurmēra šķērslaukuma pieauguma izmaiņas modelētas datorprogrammā SPSS 14.0 for Windows. Aproximējot 2.2. formulu, izmantots rīks Non-linear regression un bootstrap funkcija, bet aproximējot 2.3. formulu, izmantots rīks *Mixed models*, kur kā nejaušais faktors ir izmantots parauglaukums, jo tiek izmantoti atkārtoti uzmērīti meža elementi, kas savā starpā ir saistīti.

Vienādojumu atbilstība izvērtēta, izmantojot sekojošus statistiskos rādītājus: vidējā novirze (MRES), procentuālā vidējā novirze (MRES%), vidējā absolūtā novirze (AMRES), standartnovirze (RMSE), variācijas koeficients (RMSE%), vidējā kvadrātiskā kļūda (MSE), modeļa efektivitāte (MEF) un dispersijas attiecība (VR). Šo statistisko rādītāju aprēķināšanas formulas dotas 1. pielikumā.

Analīzē izmantoja datus par 20365 meža elementiem (par vienu meža elementu uzskata vienas koku sugas vienas paaudzes vienā stāvā esošus kokus) no 3632 MSI parauglaukumiem, kuri atbilst sekojošiem nosacījumiem:

- I stāva meža elementi ir priede (2970 meža elementi), egle (2764), bērzs (3622), apse (855), melnalksnis (903), baltalksnis (726), platlapji – ozols, osis, liepa, goba, vīksna, skābardis un dižskābardis, kļava (523) un citi lapu koki (342), un II stāva meža elementi ir priede (340), egle (4144), bērzs (1434), apse (94), melnalksnis (334), baltalksnis (306), platlapji (707) un citi lapu koki (301);
- visās uzmērīšanas reizēs zināms meža elementa vecums;
- starp inventarizācijas periodā parauglaukumā nav cirsti koki;
- meža elementa aprēķinātais caurmēra tekošais ikgadējais pieaugums neatšķiras vairāk kā divas standartnovirzes no meža elementa vecuma desmitgades aritmētiski vidējā caurmēra tekošā ikgadējā pieauguma.

Papildus izmantoti dati no pētījumā “Atsevišķu koku un to grupu augšanas gaitas mijiedarbības monitorings un novērtēšana” ietvaros pārmērītajiem izlases ciršu parauglaukumiem.

Rezultāti

Papildinot datus ar 2022. gada mērījumiem un rezultātiem, aproksimētas jaunas koeficientu vērtības iepriekš izstrādātajiem augšanas gaitas algebriskās diferences vienādojumam (2.2. formula)

meža elementa vidējā caurmēra izmaiņu prognozēšanai. Aproximētas atsevišķas koeficientu vērtības kokaudzes 1. un 2. stāva priežu, egļu, bērzu, melnalkšņu, apšu, baltalkšņu, platlapju (ozolu, ošu, liepu, gobu, vīksnu, skābaržu, dižskābaržu, kļavu) un citu lapu koku meža elementa vidējā augstuma izmaiņu prognozēšanai (2.2.7. un 2.2.8. tabulas).

2.2.7. tabula. I stāva meža elementu vispārinātās algebriskās diferences vidējā caurmēra augšanas gaitas modeļa (2.2. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības

Suga	Koeficient s	Vērtība	Standart- klūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
Priede	b1	0.81996	0.01291	0.79985	0.84421
	b2	-1.38440	0.23876	-1.95462	-0.97846
	b3	1.37187	0.11400	1.19399	1.63627
Egle	b1	0.97337	0.01402	0.94798	0.99837
	b2	-14.34371	4.23693	-26.19917	-8.07720
	b3	8.13089	1.88207	4.26221	11.99957
Bērzs	b1	1.12526	0.01186	1.10327	1.15043
	b2	-2.71272	0.33765	-3.32498	-2.16669
	b3	1.46707	0.07049	1.35539	1.58861
Melnalksnis	b1	1.00157	0.02869	0.95503	1.05473
	b2	-3.03307	0.72645	-4.84314	-2.08943
	b3	1.46799	0.17279	1.24621	1.91817
Apse	b1	1.16003	0.01885	1.11767	1.19582
	b2	-3.38418	0.84979	-4.97369	-1.96568
	b3	4.11218	0.40156	3.43508	4.87950
Baltalksnis	b1	1.04874	0.02511	1.00800	1.10552
	b2	-1.18575	0.31120	-2.02290	-0.62212
	b3	0.53745	0.04012	0.47079	0.63443
Ozols, osis, liepa, goba, vīksna, dižskābardis, skābardis, kļava, ķirsis	b1	1.06769	0.02916	1.01518	1.11797
	b2	-6.10092	2.39568	-10.94971	-3.00742
	b3	3.55676	0.82977	2.66448	5.56077
Citi lapu koki	b1	1.11899	0.05329	1.03021	1.22964
	b2	-2.30646	0.79279	-3.97859	-1.25069
	b3	0.99161	0.12387	0.81784	1.27418

2.2.8. tabula. II stāva meža elementu vispārinātās algebriskās diferences vidējā caurmēra augšanas gaitas modeļa (2.2. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības

Suga	Koeficient s	Vērtība	Standart- klūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
Priede	b1	0.81563	0.09449	0.69888	1.08083
	b2	-0.27243	0.30969	-0.97675	0.24813
	b3	0.17809	0.03876	0.11983	0.27647
Egle	b1	0.76036	0.01018	0.74442	0.79183
	b2	-23.31949	1.89702	-25.11053	-17.93684
	b3	18.10135	2.11943	14.86090	23.15761
Bērzs	b1	0.44283	0.02065	0.40375	0.49008
	b2	-41.24705	113.66559	-41.64120	-1.66800
	b3	8.48160	24.51178	0.38385	19.69415
Melnalksnis	b1	0.83671	0.09098	0.64939	1.01109
	b2	-0.31721	0.51397	-1.47671	0.57937
	b3	0.20288	0.04646	0.14100	0.33357
Apse	b1	0.40157	0.07640	0.33686	0.62553
	b2	-24.83976	12.26310	-69.94872	-24.83980
	b3	15.60326	3.73696	2.88924	15.60318
Baltalksnis	b1	0.87270	0.04769	0.79130	0.96444
	b2	-1.60606	0.55052	-3.24089	-0.78379
	b3	0.31432	0.05000	0.23460	0.47879
	b1	0.71143	0.03534	0.68717	0.82055

Suga	Koeficient s	Vērtība	Standart- kļūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
Ozols, osis, liepa, goba, vīksna, dižskābardis, skābardis, kļava, ķirsis	b2	-18.95410	8.61578	-19.02166	1.17046
	b3	22.69125	9.77756	0.65886	28.94227
	b1	0.68051	0.03183	0.61657	0.74718
Citi lapu koki	b2	-31.42715	0.13174	-31.63664	-31.17890
	b3	6.51745	0.67745	5.47003	7.83175

Vispārinātās algebriskās diferences vidējā caurmēra augšanas gaitas vienādojumi (2.2. formula) ar 2023. gadā aproksimētajām vērtībām precīzi raksturo vidējā caurmēra izmaiņas piecu gadu laikā. Pārbaudot vienādojumu uz vienādojumu izstrādē izmantoto datu bāzi, statistiskie rādītāji ir augsti un tuvi to ideālajām vērtībām. Piemēram, vidējā periodiskā caurmēra pieauguma novirze gan I stāva, gan II stāva elementiem nepārsniedz 1 mm, kas visos gadījumos ir mazāk kā 5% no to vidējās uzņēmētās vērtības (2.2.9. un 2.2.10. tabulas).

2.2.9. tabula. I stāva meža elementu vispārinātās algebriskās diferences vidējā caurmēra augšanas gaitas modeļa (2.2. formula) statistiskie rādītāji ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām

Rādītājs	Suga	Vid	MRES	MRES%	AMRES	RMSE	RMSE%	MSE	VR	R2
Z _{Dvp}	Priede	0.24	0.01	2.3	0.08	0.10	41.5	0.01	0.64	0.50
	Egle	0.37	-0.01	-3.1	0.12	0.14	39.0	0.02	0.62	0.51
	Bērzs	0.31	0.00	-0.1	0.10	0.13	42.0	0.02	0.64	0.64
	Melnalksnis	0.32	0.00	0.6	0.10	0.12	38.9	0.02	0.57	0.53
	Apse	0.58	0.00	0.5	0.15	0.18	31.2	0.03	0.59	0.55
	Baltalksnis	0.33	0.01	2.9	0.11	0.14	42.1	0.02	0.65	0.47
	Platlapji	0.45	0.00	1.1	0.13	0.16	34.7	0.02	0.64	0.57
	Citi lapu koki	0.44	0.00	-0.2	0.16	0.19	43.7	0.04	0.48	0.49
D	Priede	26.85	0.03	0.10	0.39	0.51	1.89	0.26	1.01	1.00
	Egle	25.15	-0.06	-0.23	0.58	0.72	2.88	0.52	1.01	0.99
	Bērzs	21.13	0.00	-0.01	0.52	0.65	3.08	0.42	0.99	0.99
	Melnalksnis	21.69	0.01	0.05	0.51	0.62	2.86	0.39	0.99	0.99
	Apse	28.07	0.02	0.05	0.73	0.90	3.22	0.82	1.00	1.00
	Baltalksnis	15.48	0.05	0.31	0.56	0.70	4.51	0.49	1.03	0.98
	Platlapji	25.42	0.02	0.09	0.65	0.78	3.09	0.61	1.00	0.99
	Citi lapu koki	18.27	0.00	-0.02	0.79	0.96	5.23	0.91	0.98	0.98

Z_{Dvp} – vidējā caurmēra tekošais vidēji periodiskais pieaugums, cm gadā; D – caurmērs perioda beigās, cm; Vid - aritmētiski vidējā uzņēmētā vērtība, m; MRES - vidējā novirze, m; MRES% - procentuālā vidējā novirze; AMRES - vidējā absolūtā novirze, m; RMSE – standartnovirze, m; RMSE% - variācijas koeficients; MSE - vidējā kvadrātiskā kļūda, m; VR - dispersijas attiecība; R2 - determinācijas koeficients.

2.2.10. tabula. II stāva meža elementu vispārinātās algebriskās diferences vidējā caurmēra augšanas gaitas modeļa (2.2. formula) statistiskie rādītāji ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām

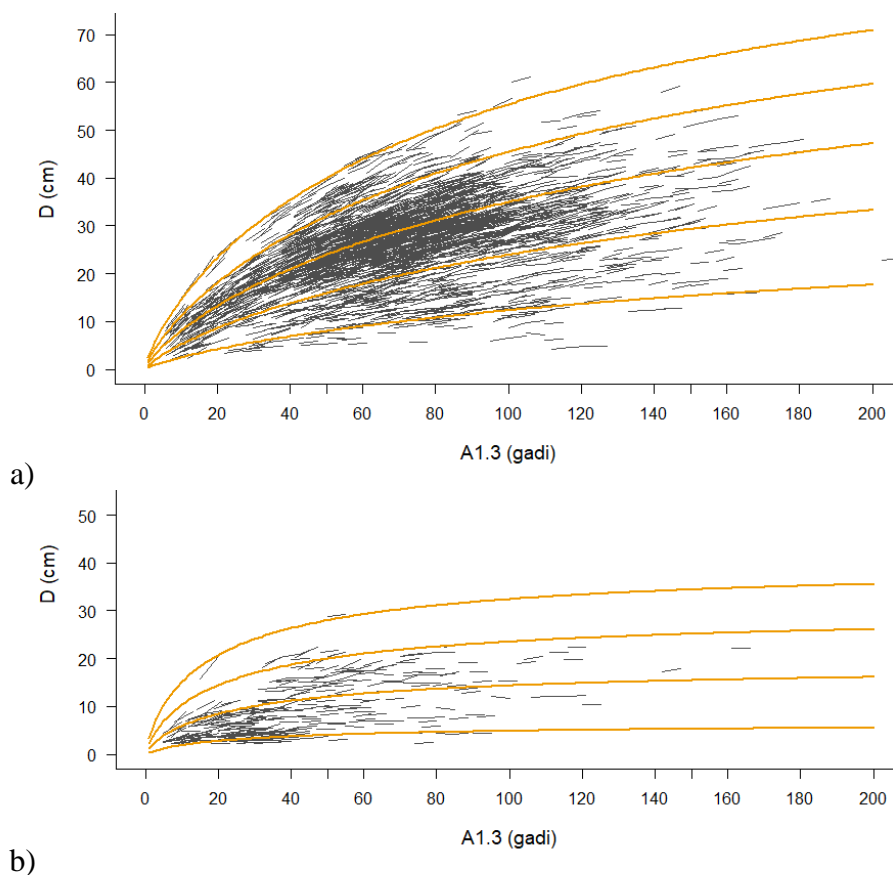
Rādītājs	Suga	Vid	MRES	MRES %	AMRES	RMSE	RMSE %	MSE	VR	R2
Z _{Dvp}	Priede	0.10	0.00	-2.6	0.07	0.09	97.3	0.01	0.39	0.42
	Egle	0.22	0.00	-0.5	0.10	0.13	58.0	0.02	0.34	0.39
	Bērzs	0.11	0.00	-0.5	0.08	0.10	98.8	0.01	0.12	0.13
	Melnalksnis	0.15	0.00	-2.3	0.10	0.12	80.6	0.02	0.26	0.31
	Apse	0.14	0.00	2.0	0.09	0.12	84.3	0.01	0.13	0.04
	Baltalksnis	0.18	0.00	-0.5	0.08	0.11	57.8	0.01	0.40	0.42
	Platlapji	0.27	0.00	1.0	0.11	0.13	49.1	0.02	0.35	0.37
	Citi lapu koki	0.23	0.00	-0.4	0.10	0.13	55.7	0.02	0.35	0.37
D	Priede	9.57	-0.01	-0.13	0.34	0.47	4.93	0.22	0.98	0.99
	Egle	11.82	-0.01	-0.05	0.51	0.63	5.34	0.40	0.97	0.99
	Bērzs	8.58	0.00	-0.03	0.40	0.52	6.07	0.27	0.98	0.99
	Melnalksnis	10.81	-0.02	-0.16	0.49	0.62	5.75	0.38	0.97	0.99

Rādītājs	Suga	Vid	MRES	MRES %	AMRES	RMSE	RMSE %	MSE	VR	R2
	Apse	7.29	0.01	0.19	0.44	0.58	7.97	0.33	1.10	0.98
	Baltalksnis	10.76	0.00	-0.04	0.41	0.53	4.95	0.28	0.99	0.99
	Platlapji	13.17	0.01	0.10	0.56	0.67	5.12	0.45	0.98	0.99
	Citi lapu koki	13.36	0.00	-0.03	0.52	0.65	4.89	0.43	0.98	0.99

z_{Dvp} – vidējā caurmēra tekošais vidēji periodiskais pieaugums, cm gadā; D – caurmērs perioda beigās, cm;
 Vid - aritmētiski vidējā uzmērītā vērtība, m; MRES - vidējā novirze, m; MRES% - procentuālā vidējā novirze;
 AMRES - vidējā absolūtā novirze, m; RMSE – standartnovirze, m; RMSE% - variācijas koeficients; MSE - vidējā kvadrātiskā kļūda, m; VR - dispersijas attiecība; R2 - determinācijas koeficients.

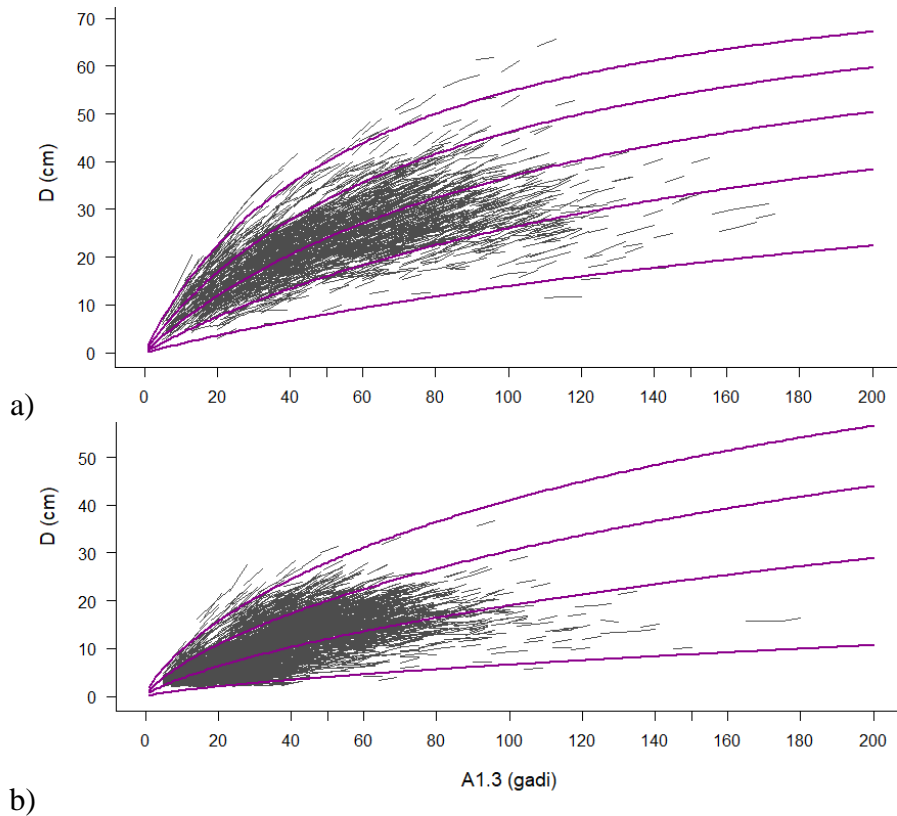
Vidējā caurmēra augšanas gaitas algebriskās diferences vienādojums ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām prognozē bioloģiski korektas caurmēra izmaiņas visām sugām jeb sugu grupām pie dažādiem caurmēriem bāzes vecumā. Pie tam caurmēra izmaiņas bioloģiski loģiskas tiek modelētas arī ārpus modeļu izstrādē iekļauto datu vērtību (vecums un augstums) diapazona (2.2.19. – 2.2.26. attēli). Tomēr II stāva meža elementiem vienādojuma forma nav īsti atbilstoša, ja izmaiņas prognozētās pie konstantas I stāva relatīvās biežības un neņemot vērā II stāva biežību.

Turpmākai meža elementa vidējā caurmēra augšanas gaitas modelēšanai, izmantojot vispārinātās algebriskās diferences vienādojumu (2.2. formula), ieteicams izmantot 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības.



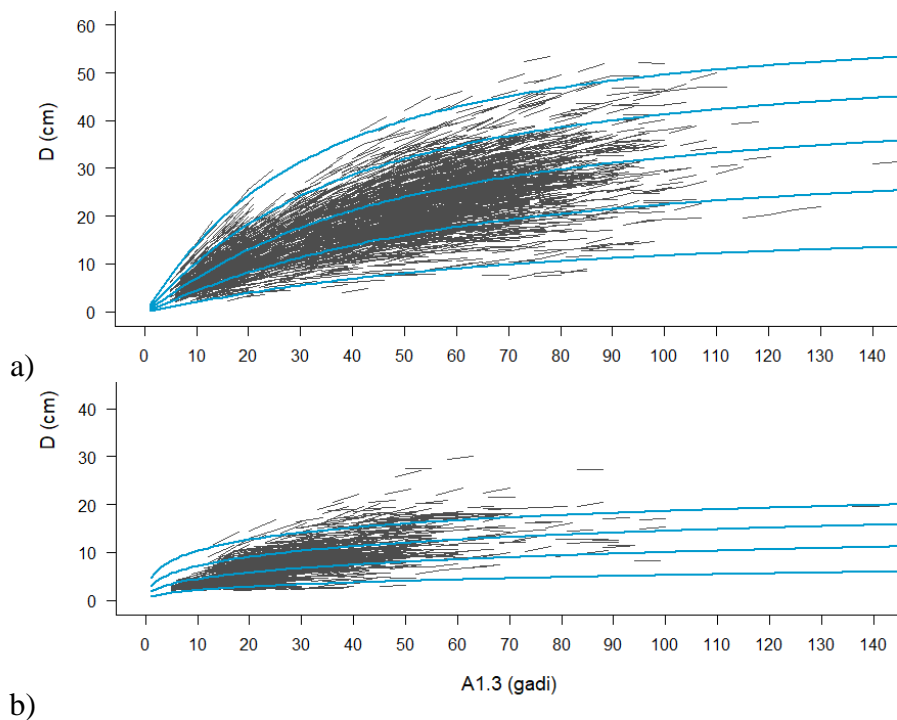
2.2.19. attēls. Priedes uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūšaugstuma vecumā 50 gadi:

a) I stāvs ($D_{50} = 40; 32; 24; 16; 8$ cm); b) II stāvs ($D_{50} = 28; 20; 12; 4$ cm); Relatīvā biežība (RB) konstanta – 0.60.



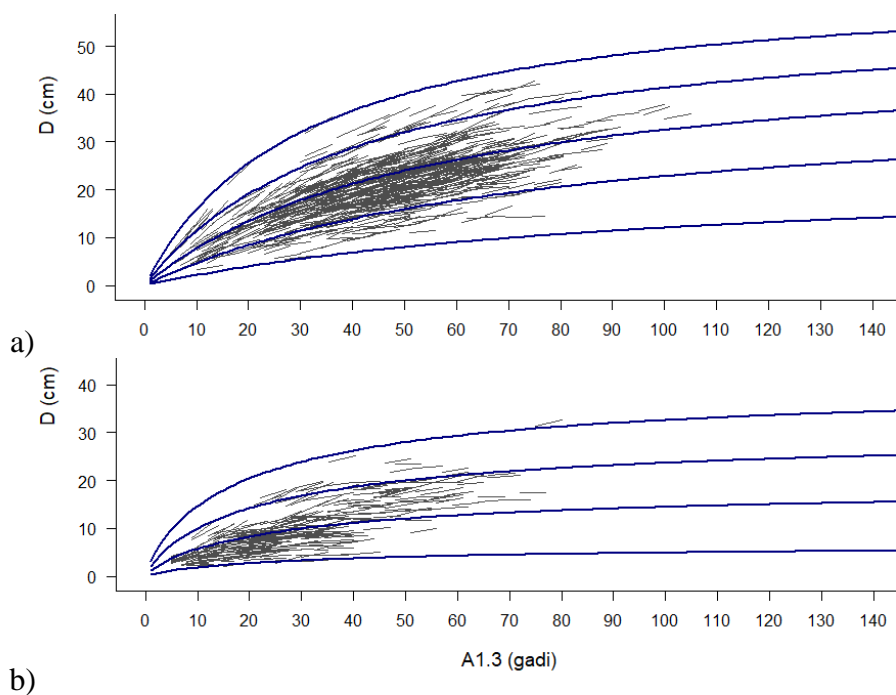
2.2.20. attēls. Egles uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūšaugstuma vecumā 50 gadi:

a) I stāvs ($D_{50} = 40; 32; 24; 16; 8$ cm); b) II stāvs ($D_{50} = 28; 20; 12; 4$ cm); Relatīvā biežība (RB) konstanta – 0.60.



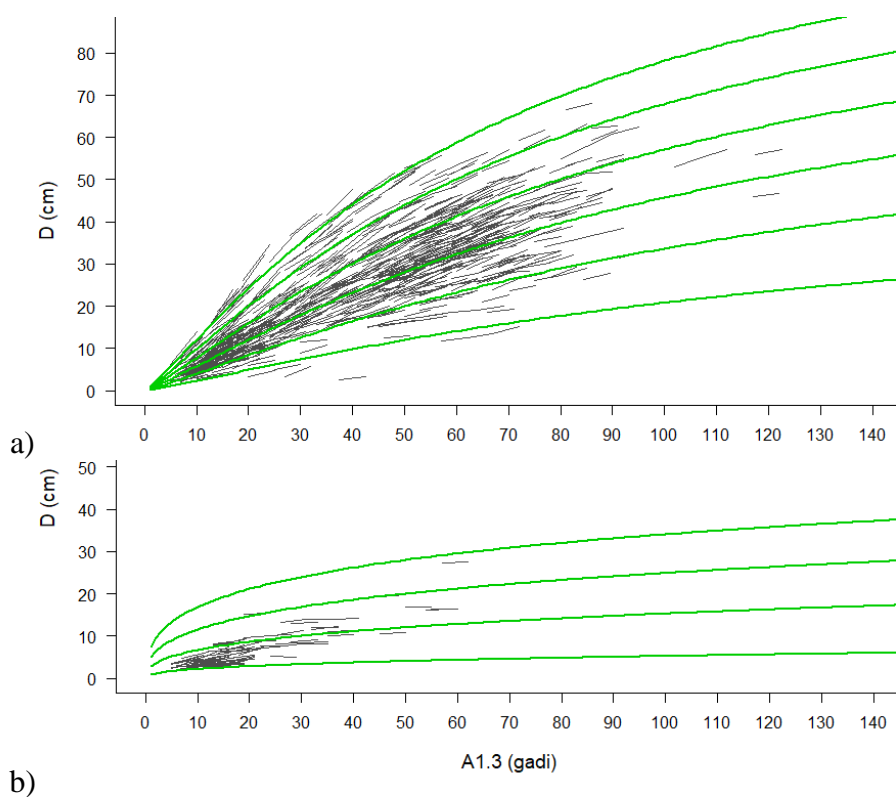
2.2.21. attēls. Bērza uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūšaugstuma vecumā 50 gadi:

a) I stāvs ($D_{50} = 40; 32; 24; 16; 8$ cm); b) II stāvs ($D_{50} = 16; 12; 8; 4$ cm); Relatīvā biežība (RB) konstanta – 0.60.



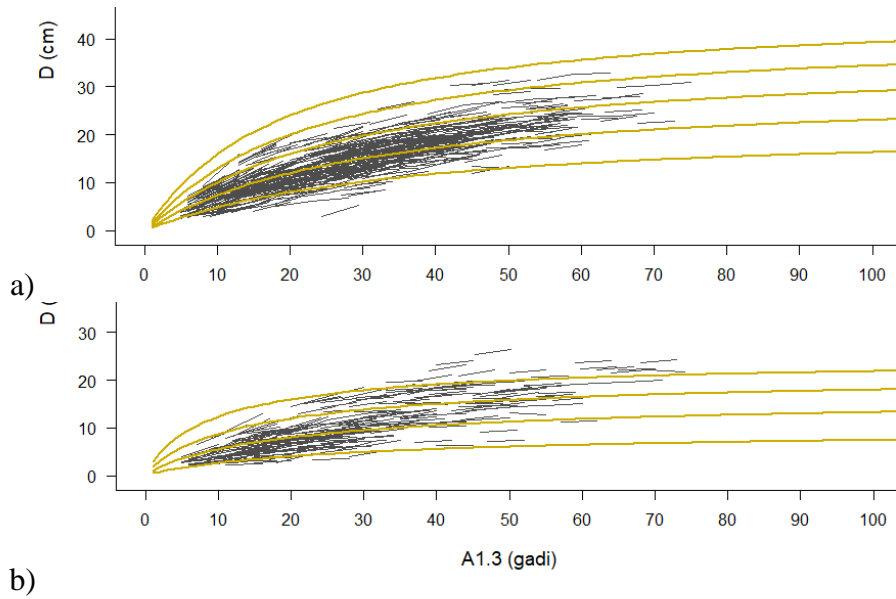
2.2.22. attēls. Melnalkšņa uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma ($A1.3$) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūšaugstuma vecumā 50 gadi:

a) I stāvs ($D_{50} = 40; 32; 24; 16; 8$ cm); b) II stāvs ($D_{50} = 28; 20; 12; 4$ cm); Relatīvā biežība (RB) konstanta – 0.60.



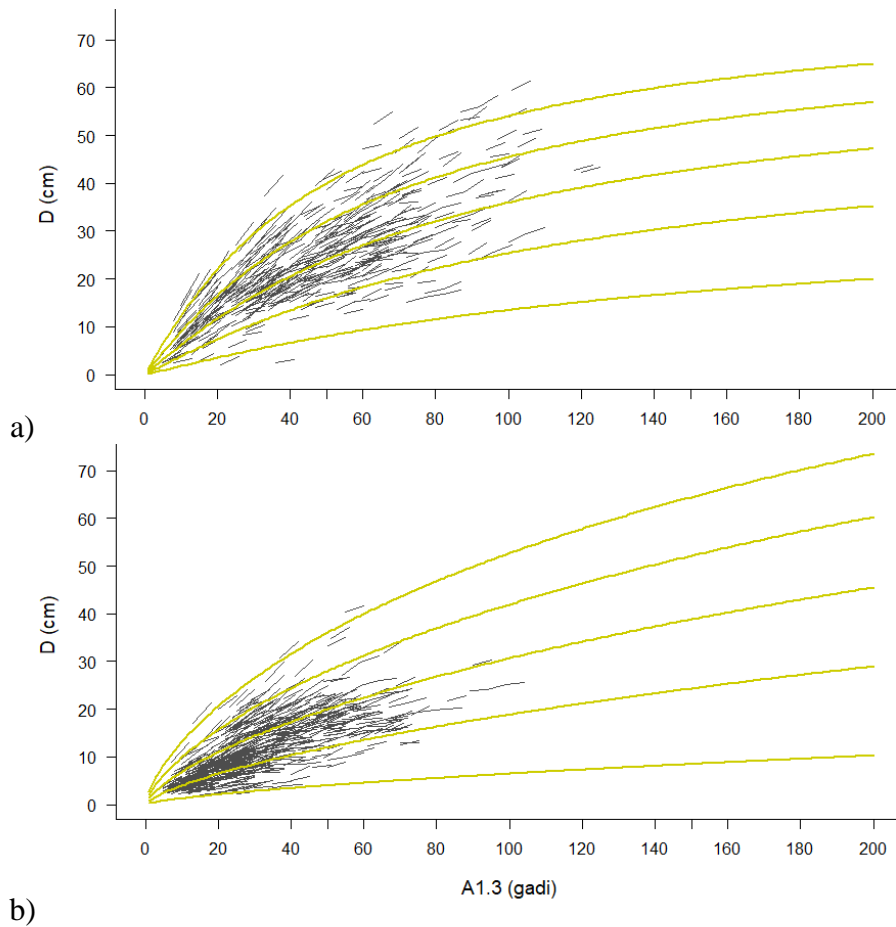
2.2.23. attēls. Apses uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma ($A1.3$) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūšaugstuma vecumā 50 gadi:

a) I stāvs ($D_{50} = 52; 44; 36; 28; 20; 12$ cm); b) II stāvs ($D_{50} = 28; 20; 12; 4$ cm); Relatīvā biežība (RB) konstanta – 0.60.



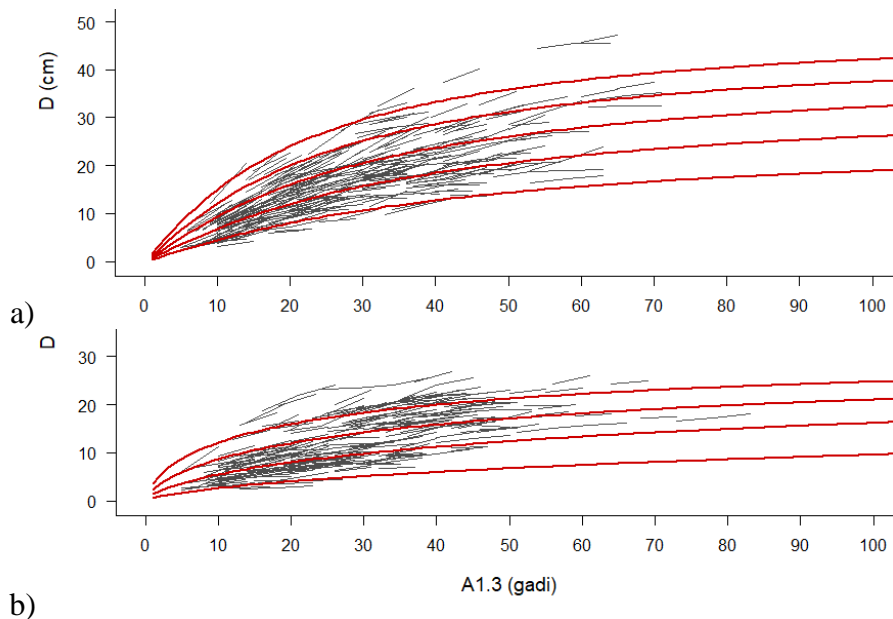
2.2.24. attēls. Baltalkšņa uzņēmētās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma ($A_{1.3}$) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūšaugstuma vecumā 50 gadi:

a) I stāvs ($D_{20} = 24; 20; 16; 12; 8$ cm); b) II stāvs ($D_{20} = 16; 12; 8; 4$ cm); Relatīvā biežība (RB) konstanta – 0.60.



2.2.25. attēls. Platlapju uzņēmētās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma ($A_{1.3}$) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūšaugstuma vecumā 50 gadi:

a) I stāvs ($D_{50} = 40; 32; 24; 16; 8$ cm); b) II stāvs ($D_{50} = 36; 28; 20; 12; 4$ cm); Relatīvā biežība (RB) konstanta – 0.60.



2.2.26. attēls. Citu lapu koku uzmērītās vidējā caurmēra (D) izmaiņas atkarībā no krūšaugstuma vecuma (A1.3) un aproksimētā vidējā caurmēra augšanas gaita (2.2. formula) atkarībā no caurmēra krūšaugstuma vecumā 50 gadi:

a) I stāvs ($D_{20} = 24; 20; 16; 12; 8$ cm); b) II stāvs ($D_{20} = 16; 12; 8; 4$ cm); Relatīvā biežība (RB) konstanta – 0.60.
0.60.

Aproksimētas jaunas koeficientu vērtības 2.3. vienādojumam, kas paredzēts vidējā caurmēra koka šķērslaukuma izmaiņu modelēšanai (2.2.12. tabula). Vienādojums paredzēts priedes, egles, bērza, apses, melnalkšņa, baltalkšņa, platlapju (ozola, oša, liepas, vīksnas, gobas, kļavas) un citu mīksto lapu koku meža elementu vidējā caurmēra izmaiņu modelēšanai.

2.2.11. tabula. Meža elementa vidējā caurmēra augšanas gaitas modeļa (2.3. formula) prognozētā ikgadējā caurmēra pieauguma statistiskie rādītāji ar 2023. gadā aproksimētajām koeficientu vērtībām

Rādītājs	Suga	Vid	MRES	MRES%	AMRES	RMSE	RMSE%	MSE	VR	R2
Z _{Dvp}	Priede	0.23	0.00	-1.5	0.08	0.10	42.3	0.01	0.61	0.57
	Egle	0.28	-0.01	-4.4	0.10	0.13	46.3	0.02	0.52	0.56
	Bērzs	0.25	-0.01	-2.2	0.10	0.12	48.9	0.02	0.71	0.66
	Melnalksnis	0.27	-0.01	-2.0	0.09	0.11	42.2	0.01	0.63	0.62
	Apse	0.52	0.01	2.5	0.13	0.17	32.4	0.03	0.61	0.61
	Baltalksnis	0.29	-0.01	-2.9	0.10	0.12	42.5	0.01	0.68	0.57
	Platlapji	0.34	-0.01	-3.4	0.12	0.15	42.4	0.02	0.60	0.53
	Citi lapu koki	0.33	-0.01	-2.2	0.13	0.16	49.1	0.03	0.62	0.53
D	Priede	25.09	-0.02	-0.07	0.38	0.48	1.93	0.23	0.99	1.00
	Egle	17.16	-0.06	-0.36	0.52	0.64	3.75	0.41	0.98	1.00
	Bērzs	17.57	-0.03	-0.16	0.48	0.62	3.50	0.38	0.99	1.00
	Melnalksnis	18.82	-0.03	-0.14	0.46	0.57	3.05	0.33	0.99	0.99
	Apse	26.14	0.07	0.25	0.67	0.85	3.25	0.72	1.01	1.00
	Baltalksnis	14.08	-0.04	-0.29	0.49	0.61	4.33	0.37	0.97	0.99
	Platlapji	18.23	-0.06	-0.32	0.59	0.73	3.99	0.53	0.98	1.00
	Citi lapu koki	15.93	-0.04	-0.23	0.66	0.82	5.16	0.68	0.97	0.99

Z_{Dvp} – vidējā caurmēra tekošais vidēji periodiskais pieaugums, cm gadā; D – caurmērs perioda beigās, cm;

Vid - aritmētiski vidējā uzmērītā vērtība, m; MRES - vidējā novirze, m; MRES% - procentuālā vidējā novirze; AMRES - vidējā absolūtā novirze, m; RMSE – standartnovirze, m; RMSE% - variācijas koeficients; MSE - vidējā kvadrātiskā kļūda, m; VR - dispersijas attiecība; R2 - determinācijas koeficients.

2.2.12. tabula. Meža elementa vidējā caurmēra augšanas gaitas modeļa (2.3. formula) aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji

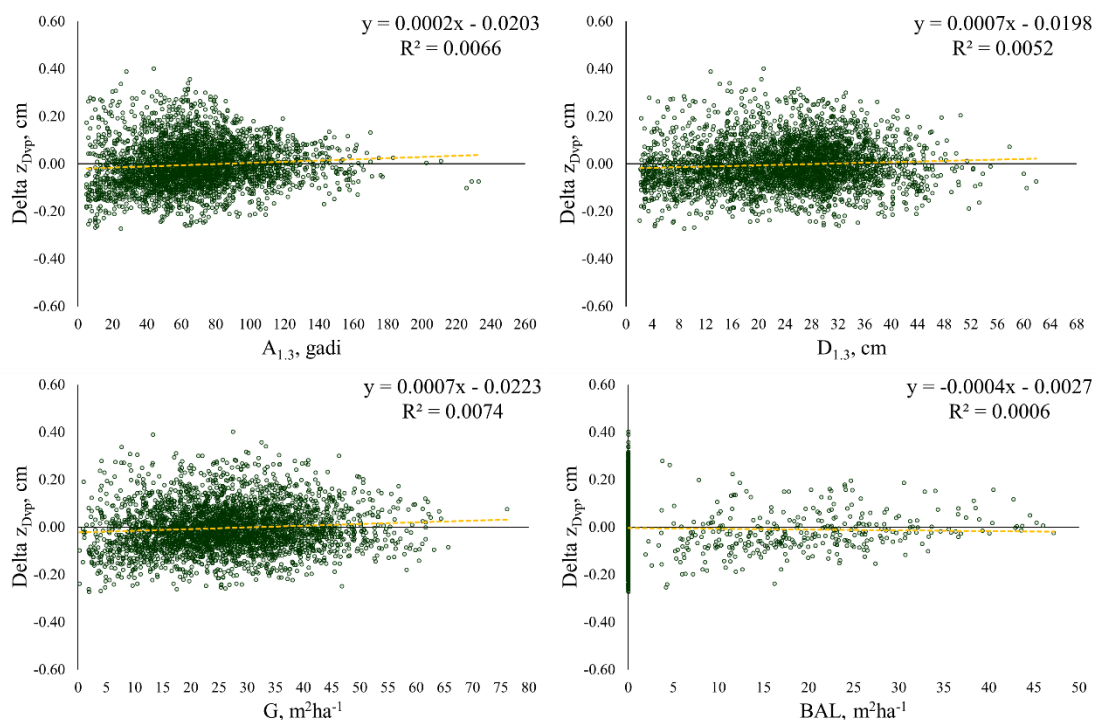
Suga	Koeficients	Vērtība	Standart- kļūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
Priede	b0	2.78898	0.06857	2.65453	2.92344
	b1	-0.97049	0.02134	-1.01232	-0.92865
	b2	1.74546	0.03125	1.68419	1.80672
	b3	-0.16502	0.01708	-0.19850	-0.13154
	b4	-0.03637	0.00671	-0.04953	-0.02320
	b5	0.07387	0.01777	0.03902	0.10871
Egle	b0	2.84671	0.04000	2.76829	2.92512
	b1	-0.85052	0.01493	-0.87979	-0.82124
	b2	1.73532	0.01975	1.69660	1.77405
	b3	-0.24970	0.00928	-0.26789	-0.23151
	b4	-0.00323	0.00063	-0.00446	-0.00199
	b5	0.06640	0.01263	0.04165	0.09116
Bērzs	b0	3.31184	0.03901	3.23536	3.38831
	b1	-1.28028	0.02062	-1.32070	-1.23986
	b2	1.94376	0.02539	1.89399	1.99352
	b3	-0.15154	0.01100	-0.17310	-0.12998
	b4	-0.03860	0.00336	-0.04519	-0.03200
	b5	0.02381	0.01617	-0.00789	0.05551
Melnalksnis	b0	3.01233	0.08734	2.84098	3.18368
	b1	-0.90225	0.04302	-0.98666	-0.81784
	b2	1.72400	0.05028	1.62536	1.82265
	b3	-0.27978	0.02117	-0.32130	-0.23825
	b4	-0.02664	0.00360	-0.03370	-0.01958
	b5	0.08434	0.03220	0.02117	0.14751
Apse	b0	2.99436	0.10747	2.78343	3.20528
	b1	-1.10281	0.06995	-1.24010	-0.96553
	b2	1.90804	0.06172	1.78692	2.02916
	b3	-0.10786	0.04223	-0.19075	-0.02498
	b4	-0.07696	0.00366	-0.08414	-0.06979
	b5	0.03998	0.06248	-0.16260	0.08264
Baltalksnis	b0	3.39727	0.07421	3.25165	3.54289
	b1	-0.91692	0.05244	-1.01983	-0.81401
	b2	1.36236	0.06163	1.24141	1.48330
	b3	-0.16223	0.02483	-0.21096	-0.11350
	b4	-0.02280	0.00310	-0.02889	-0.01672
	b5	0.08863	0.03905	0.01200	0.16527
Ozols, osis, liepa, goba, vīksna, dižskābardis, skābardis, kļava, ķirsis	b0	3.10183	0.08203	2.94088	3.26277
	b1	-0.94966	0.03853	-1.02525	-0.87407
	b2	1.75041	0.04489	1.66233	1.83849
	b3	-0.20555	0.02176	-0.24825	-0.16286
	b4	-0.00861	0.00149	-0.01153	-0.00569
	b5	0.00286	0.03431	-0.06446	0.07018
Citi lapu koki	b0	3.43823	0.13127	3.18045	3.69601
	b1	-1.16457	0.06930	-1.30066	-1.02847
	b2	1.74750	0.07677	1.59674	1.89826
	b3	-0.17342	0.03243	-0.23711	-0.10973

Suga	Koeficients	Vērtība	Standart- klūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
		b4	-0.01876	0.00302	-0.02469
	b5	0.19356	0.05855	0.07858	0.30854

Šim modelim nozīmīgākā priekšrocība, salīdzinājumā ar vispārinātās algebriskās diferences pieejas modeli, ir tas, ka šajā modelī tiek ņemts vērā vai pirms prognozes perioda ir veikta koku ciršana. Tāpat šis modelis lietojams kā I stāva, tā arī II stāva meža elementiem. Šis vienādojums salīdzinājumā ar 2.2. vienādojumu nav pārbaudīts ilgtermiņa prognozēs, modelējot mežaudzes izmaiņas ilgākā (100 gadu) periodā.

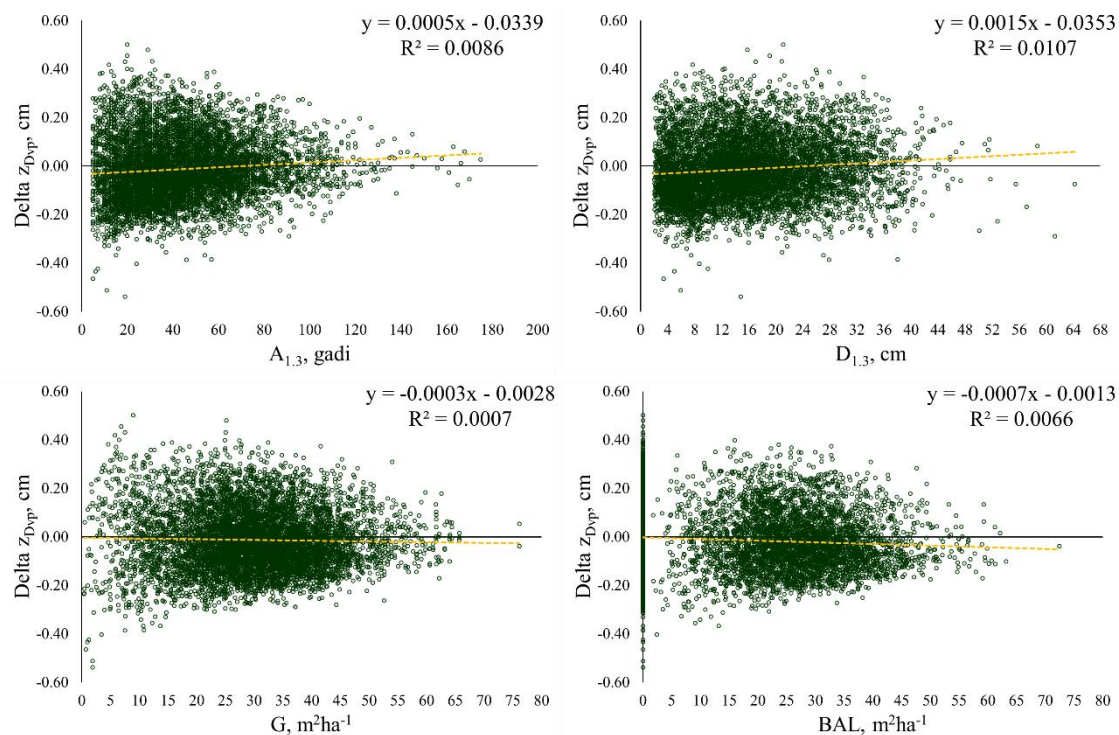
Ar 2.3. vienādojumu vidējā caurmēra izmaiņas apsēm tiek prognozētas sistemātiski lielākas, bet pārējām koku sugām sistemātiski mazākas. Bet nevienai sugai vai sugu grupai sistemātiskā novirze, pārbaudot to uz vienādojumu izstrādē izmantoto datu kopas, prognozētajam piecu gadu vidējam periodiskajam caurmēra pieaugumam nav lielāka par 0.1 mm vai 5% (2.2.11. tabula).

Starpībai starp uzņēmīto un prognozēto piecu gadu vidējo periodisko meža elementa vidējo caurmēra pieaugumu nav konstatētas korelatīvas sakarības ar meža elementa krūšaugstuma vecumu un vidējo caurmēru, mežaudzes šķērslaukumu un meža elementu, kas lielāki par konkrēto meža elementu, šķērslaukuma summu, (2.2.27. – 2.2.34. attēli).



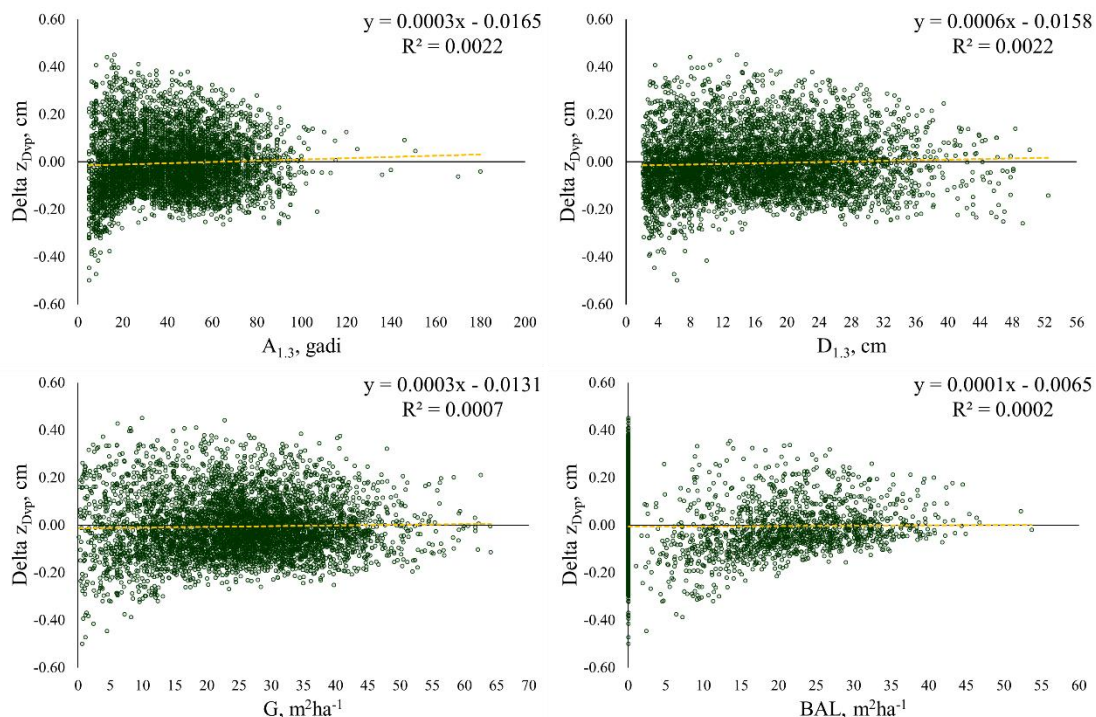
2.2.27. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu priedēm:

Delta Z_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), A_{1,3} – meža elementa krūšaugstuma vecums, D_{1,3} – meža elementa vidējais kvadrātiskais caurmērs, G – mežaudzes šķērslaukums, BAL – meža elementu, kas lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



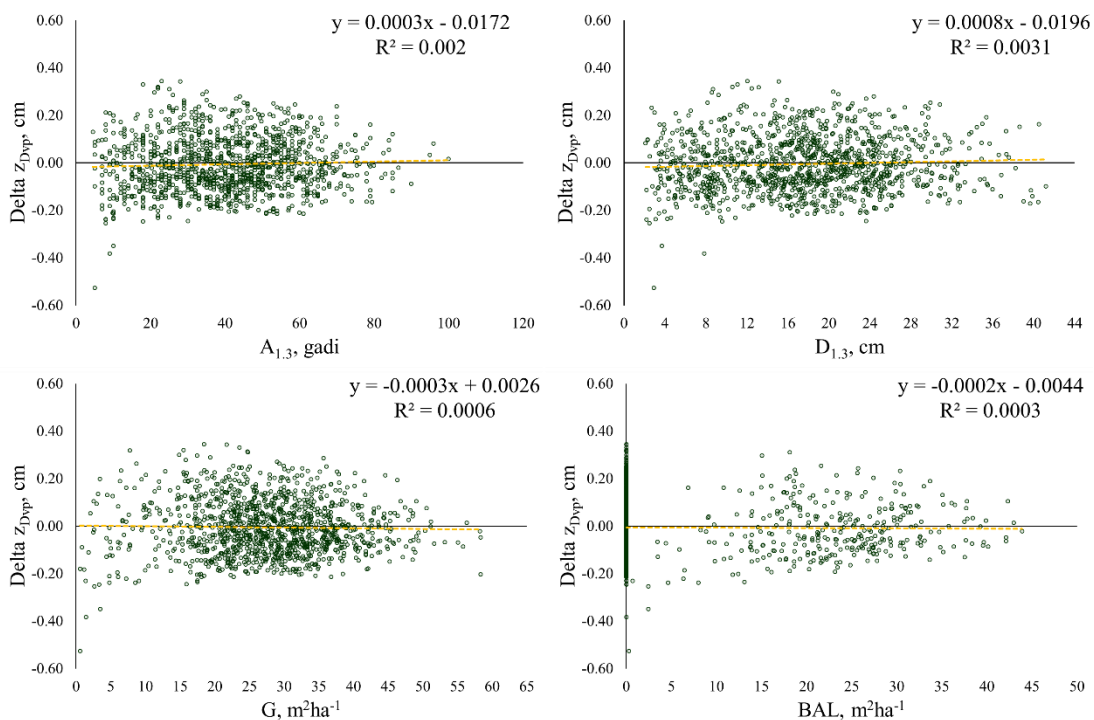
2.2.28. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu eglēm:

ΔZ_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – meža elementa krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – meža elementa vidējais kvadrātiskais caurmērs, G – mežaudzes šķērslaukums, BAL – meža elementu, kas lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



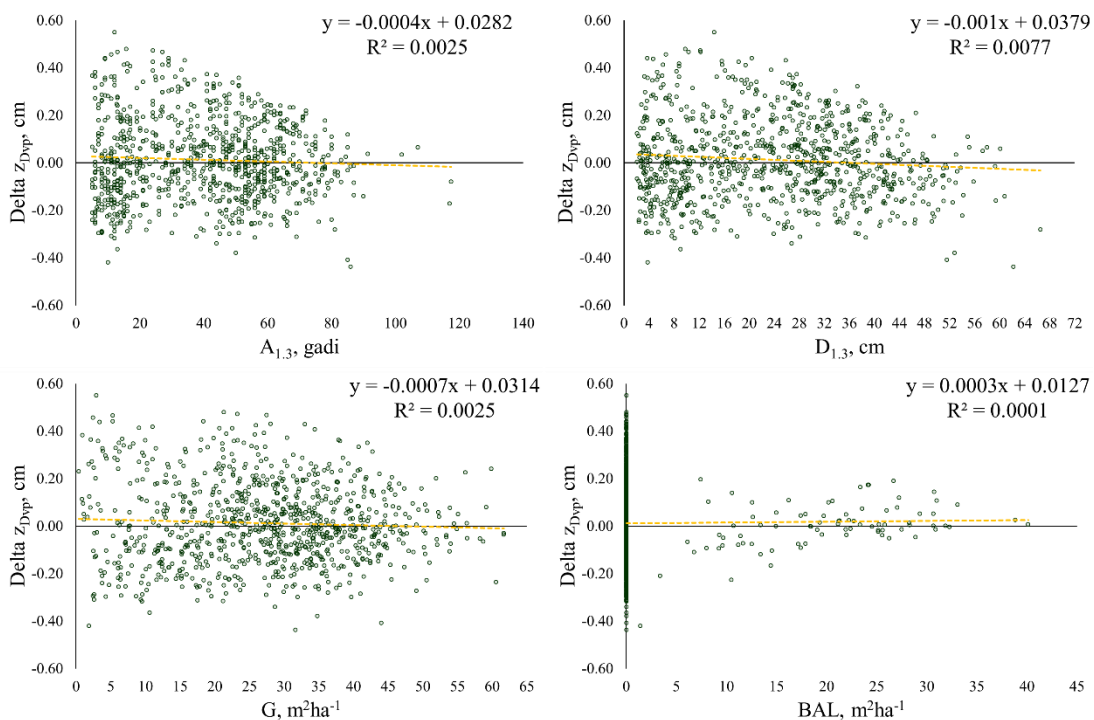
2.2.29. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu bērziem:

ΔZ_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – meža elementa krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – meža elementa vidējais kvadrātiskais caurmērs, G – mežaudzes šķērslaukums, BAL – meža elementu, kas lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



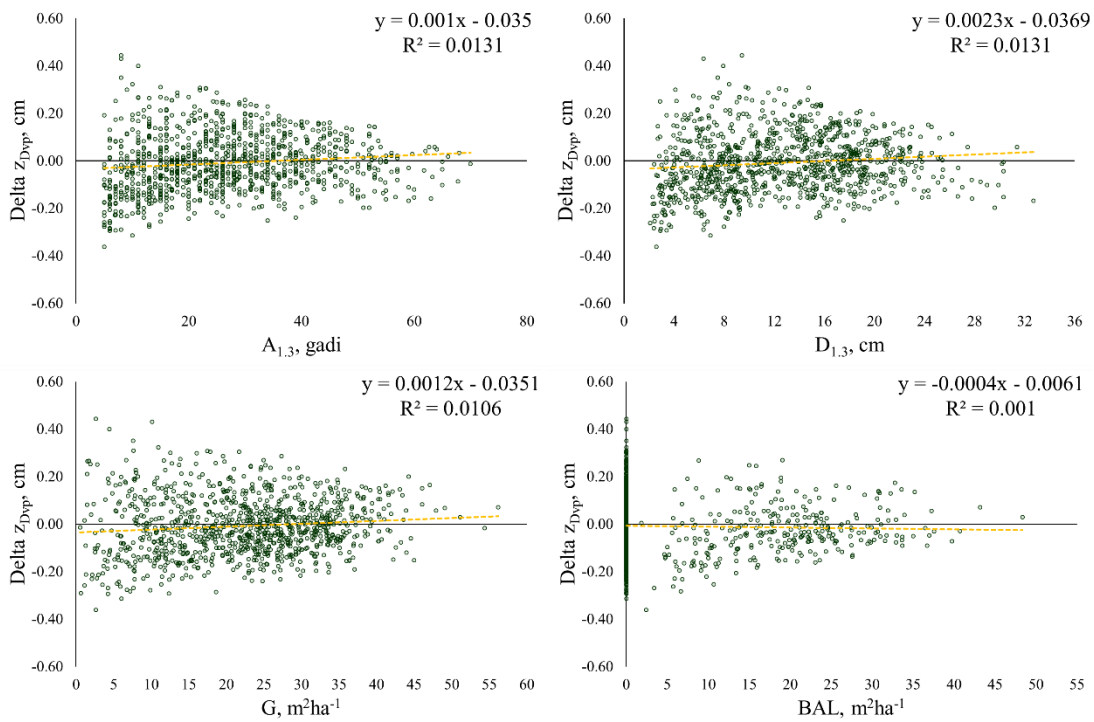
2.2.30. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu melnalkšņiem:

ΔZ_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – meža elementa krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – meža elementa vidējais kvadrātiskais caurmērs, G – mežaudzes šķērslaukums, BAL – meža elementu, kas lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



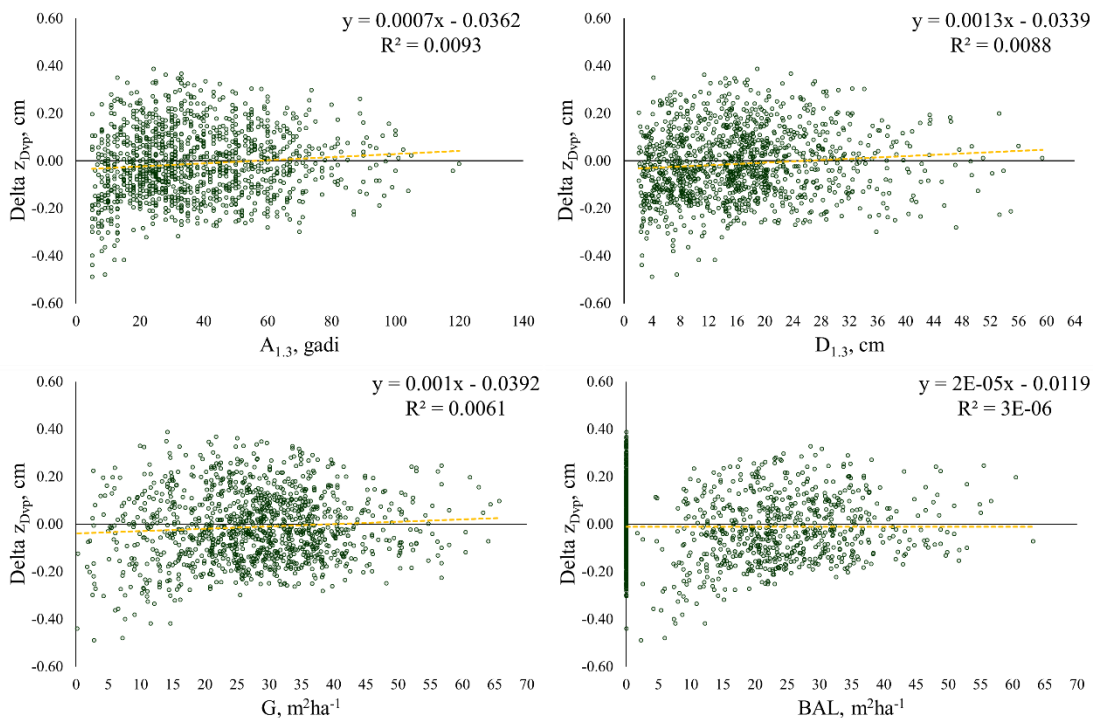
2.2.31. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu apsēm:

ΔZ_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – meža elementa krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – meža elementa vidējais kvadrātiskais caurmērs, G – mežaudzes šķērslaukums, BAL – meža elementu, kas lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



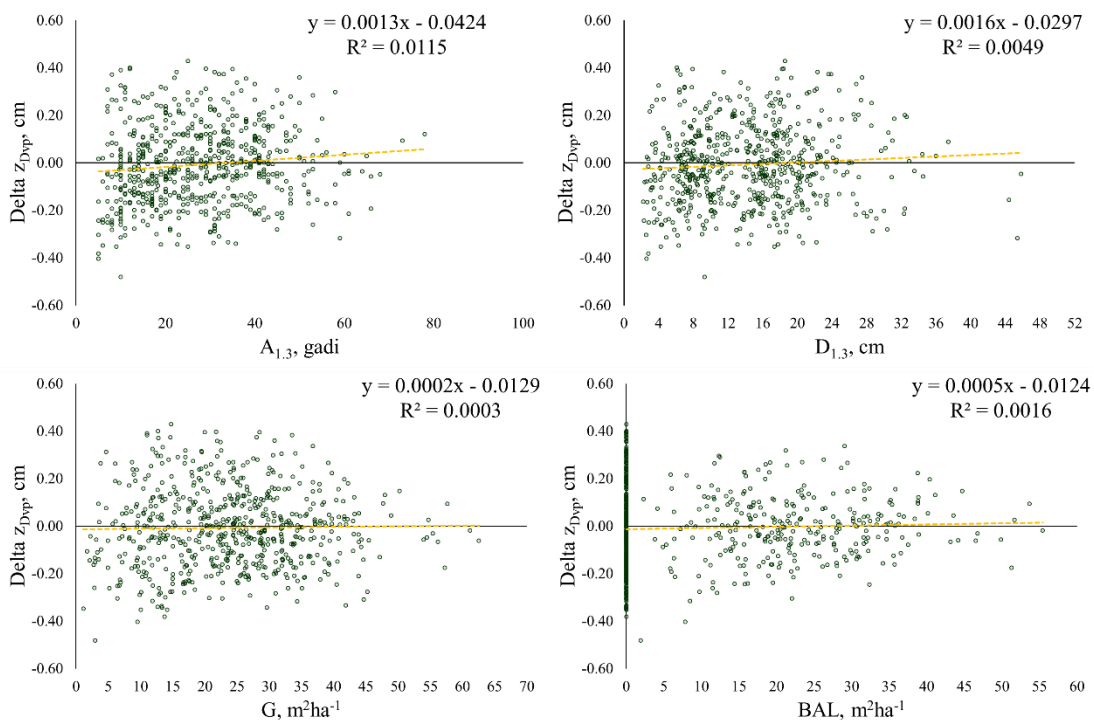
2.2.32. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu baltalkšņiem:

ΔZ_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – meža elementa krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – meža elementa vidējais kvadrātiskais caurmērs, G – meža audzes šķērslaukums, BAL – meža elementu, kas lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



2.2.33. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu platlapjiem:

ΔZ_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – meža elementa krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – meža elementa vidējais kvadrātiskais caurmērs, G – meža audzes šķērslaukums, BAL – meža elementu, kas lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



2.2.34. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto caurmēra vidējo periodisko pieaugumu citiem lapu kokiem:

Delta Z_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzmērīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), A_{1,3} – meža elementa krūšaugstuma vecums, D_{1,3} – meža elementa vidējais kvadrātiskais caurmērs, G – mežaudzes šķērslaukums, BAL – meža elementu, kas lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.

2.1.2.4. Šķērslaukums

Metodika

Datu analīzē izmantoja datus par 23044 meža elementiem (par vienu meža elementu uzskata vienas koku sugas vienas paaudzes vienā stāvā esošus kokus) no 3690 MSI parauglaukumiem, kuri atbilst sekojošiem nosacījumiem:

- meža elementi ir priede (3562 meža elementi), egļe (7695), bērzs (5641), apse (1141), melnalksnis (1452), baltalksnis (1159), platlapji – ozols, osis, liepa, goba, vīksna, skābardis un dižskābardis, kļava (1609) un citi lapu koki (785);
- visās uzmērīšanas reizēs zināms meža elementa vecums;
- starp inventarizācijas periodā parauglaukumā nav cirsti koki;
- meža elementa aprēķinātais šķērslaukuma tekošais vidēji periodiskais pieaugums neatšķiras vairāk kā divas standartnovirzes no meža elementa vecuma desmitgades aritmētiski vidējā šķērslaukuma tekošā vidēji periodiskā pieauguma.

Atšķirībā no iepriekšējiem gadiem, šoreiz analīzē iekļauj ne tikai tos elementus, kas derīgi bija caurmēra izmaiņu modelēšanai, bet visus, kas atbilst iepriekš aprakstītajiem kritērijiem.

Meža elementa šķērslaukuma izmaiņu modelēšanai aproksimēts iepriekš izveidotais vienādojums (Donis et al., 2022), kas papildināts ar koku ciršanas faktoriālo pazīmi:

$$G_2 = G_1 + \left(b_0 + b_1 \cdot \frac{A_1}{100} + b_2 \cdot A_1^{-2} + b_3 \cdot \frac{G_1}{A_1} + b_4 \cdot \frac{GL}{A_1} + b_5 \cdot \frac{SI}{A_1} + b_6 \cdot c_{0-5} \right) \cdot (A_2 - A_1) \quad (2.5)$$

kur G_2 – meža elementa šķērslaukums perioda beigās, m²ha⁻¹;

- G₁ – meža elementa šķērslaukums perioda sākumā, m²ha⁻¹;
- A₁ – meža elementa krūšaugstuma vecums perioda sākumā, gadi;
- A₂ – meža elementa krūšaugstuma vecums perioda beigās, gadi;
- GL – šķērslaukuma summa perioda sākumā meža elementiem, kas vienādi vai lielāki par konkrēto meža elementu (ja 1. stāva meža elements, tad 1. stāva šķērslaukums, ja 2. stāva meža elements, tad 1. un 2. stāva šķērslaukuma summa), m²ha⁻¹;
- SI – pēc 2.1. formulas prognozētais vidējais augstums krūšaugstuma bāzes vecumā (P, E un platlapji 100 gadi; B, M, A 50 gadi; Ba un citi lapu koki 20 gadi), m;
- c₀₋₅ – fiktīvais mainīgais, vai pēdējo 5 gadu laikā mežaudzē ir veikta koku ciršana, (0 vai 1);
- b₀₋₆ – koeficienti.

Meža elementa šķērslaukuma pieauguma izmaiņas modelētas datorprogrammā SPSS 14.0 for Windows, izmantojot rīku *Mixed models*, kur kā nejaušais faktors ir izmantots parauglaukums, jo tiek izmantoti atkārtoti uzmērīti meža elementi, kas savā starpā ir saistīti.

Vienādojumu atbilstība izvērtēta izmantojot sekojošus statistiskos rādītājus: vidējā novirze (MRES), procentuālā vidējā novirze (MRES%), vidējā absolūtā novirze (AMRES), standartnovirze (RMSE), variācijas koeficients (RMSE%), vidējā kvadrātiskā kļūda (MSE), modeļa efektivitāte (MEF) un dispersijas attiecība (VR). Šo statistisko rādītāju aprēķināšanas formulas dotas 1. pielikumā.

Rezultāti

Papildinot datu bāzi, aproksimētas jaunas koeficientu vērtības šķērslaukuma pieauguma modelim (2.5. formula). Lai atvieglotu modeļa praktisku lietošanu, tajā ir saglabāti arī koeficienti, kas nav statistiski būtiski, bet to vērtības ir bioloģiski loģiskas (2.2.14. tabula).

Izstrādātais vienādojums pārbaudot uz vienādojumu izstrādē izmantotajiem datiem nav vērojamas sistemātiskas novirzes (2.2.13. tabula). Starpībai starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu nav konstatētas korelatīvas sakarības ar meža elementa krūšaugstuma vecumu, bonitātes rādītāju jeb prognozēto augstumu bāzes vecumā, meža elementa šķērslaukumu un meža elementu, kas vienādi vai lielāki par konkrēto meža elementu, šķērslaukuma summu, (2.2.35. – 2.2.42. attēli).

2.2.13. tabula. Meža elementa šķērslaukuma izmaiņu modeļa (2.5. formula) prognozētā ikgadējā šķērslaukuma pieauguma statistiskie rādītāji

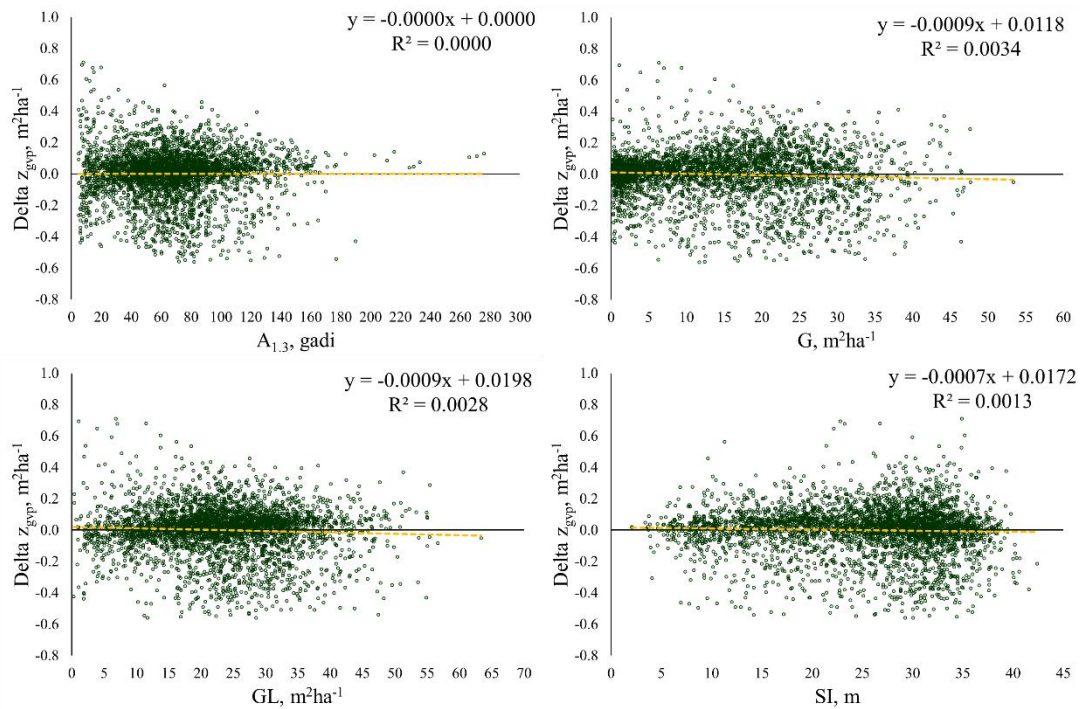
Rādītājs	Suga	Vid	MRES	MRES%	AMRES	RMSE	RMSE%	MSE	VR	R2
Z _{gvp}	Priede	0.18	0.00	0.0	0.11	0.16	85.6	0.02	0.58	0.58
	Egle	0.15	0.00	0.0	0.10	0.16	104.5	0.03	0.62	0.62
	Bērzs	0.14	0.00	0.0	0.11	0.17	117.7	0.03	0.60	0.60
	Melnalksnis	0.14	0.00	0.0	0.10	0.15	102.0	0.02	0.59	0.59
	Apse	0.28	0.00	0.0	0.11	0.18	63.3	0.03	0.77	0.77
	Baltalksnis	0.17	0.00	0.0	0.15	0.21	120.5	0.04	0.67	0.67
	Platlapji	0.07	0.00	0.0	0.05	0.09	135.6	0.01	0.42	0.42
	Citi lapu koki	0.07	0.00	0.0	0.07	0.12	163.0	0.01	0.43	0.43
G	Priede	14.56	0.00	0.0	0.56	0.79	5.4	0.62	1.00	1.00
	Egle	5.98	0.00	0.0	0.51	0.80	13.3	0.64	1.00	0.99
	Bērzs	6.31	0.00	0.0	0.56	0.83	13.1	0.68	1.01	0.98
	Melnalksnis	6.70	0.00	0.0	0.48	0.73	10.9	0.54	1.00	0.99
	Apse	7.36	0.00	0.0	0.57	0.88	12.0	0.77	1.01	0.99
	Baltalksnis	5.94	0.00	0.0	0.75	1.03	17.4	1.07	1.01	0.98
	Platlapji	2.35	0.00	0.0	0.27	0.47	20.2	0.22	0.98	0.98
	Citi lapu koki	2.08	0.00	0.0	0.37	0.59	28.4	0.35	0.94	0.94

Rādītājs	Suga	Vid	MRES	MRES%	AMRES	RMSE	RMSE%	MSE	VR	R2
Z_{gvp} – meža elementa šķērslaukuma tekošais vidēji periodiskais pieaugums, m^2ha^{-1} gadā; G – meža elementa šķērslaukums, m^2ha^{-1} ; Vid - aritmētiski vidējā uzmērītā vērtība, m; MRES - vidējā novirze, m; MRES% - procentuālā vidējā novirze; AMRES - vidējā absolūtā novirze, m; RMSE – standartnovirze, m; RMSE% - variācijas koeficients; MSE - vidējā kvadrātiskā kļūda, m; VR - dispersijas attiecība; R2 - determinācijas koeficients.										

2.2.14. tabula. Meža elementa šķērslaukuma izmaiņas modeļa (2.5. formula) aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji

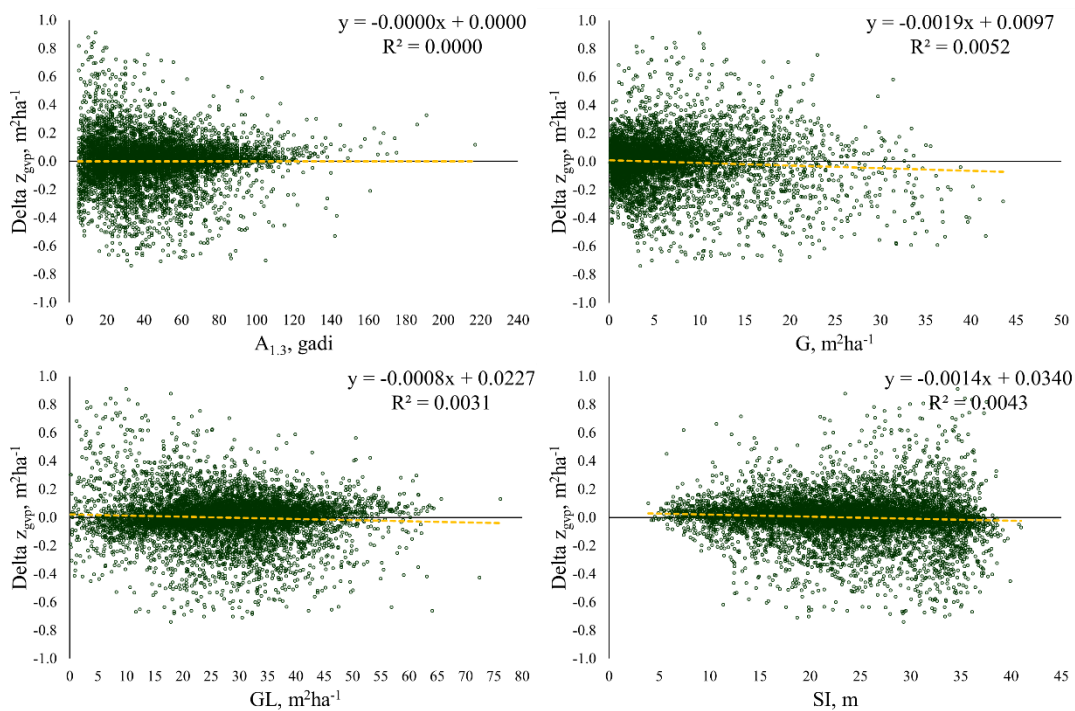
Suga	Koeficients	Vērtība	Standart- kļūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
Priede	b0	0.05510	0.01232	0.03095	0.07924
	b1	-0.05290	0.01108	-0.07462	-0.03117
	b2	6.58212	1.65859	3.33023	9.83401
	b3	0.87003	0.01547	0.83970	0.90036
	b4	-0.19094	0.01234	-0.21513	-0.16676
	b5	0.07562	0.00904	0.05789	0.09335
	b6	0.03922	0.00837	0.02282	0.05563
Egle	b0	0.06687	0.00919	0.04886	0.08488
	b1	-0.06120	0.01090	-0.08256	-0.03984
	b2	8.65696	1.10054	6.49960	10.81431
	b3	1.05480	0.01146	1.03234	1.07726
	b4	-0.09296	0.00389	-0.10059	-0.08534
	b5	0.03626	0.00622	0.02407	0.04844
	b6	0.04376	0.00586	0.03226	0.05525
Bērzs	b0	0.05329	0.01105	0.03163	0.07496
	b1	-0.13338	0.01512	-0.16302	-0.10374
	b2	-5.90083	0.92962	-7.72324	-4.07841
	b3	0.87166	0.01400	0.84421	0.89910
	b4	-0.12620	0.00498	-0.13597	-0.11644
	b5	0.13314	0.00698	0.11946	0.14682
	b6	0.04875	0.00750	0.03404	0.06346
Melnalksnis	b0	0.09180	0.02027	0.05204	0.13157
	b1	-0.12980	0.03136	-0.19132	-0.06828
	b2	4.07900	1.81233	0.52393	7.63407
	b3	0.88401	0.02193	0.84100	0.92702
	b4	-0.09845	0.00846	-0.11504	-0.08186
	b5	0.03656	0.01401	0.00908	0.06405
	b6	0.02155	0.01476	-0.00740	0.05050
Apse	b0	0.14578	0.03029	0.08634	0.20521
	b1	-0.12741	0.04108	-0.20801	-0.04682
	b2	5.73418	2.13217	1.55075	9.91762
	b3	1.35612	0.02602	1.30506	1.40717
	b4	-0.17458	0.01305	-0.20019	-0.14897
	b5	0.04423	0.01423	0.01632	0.07214
	b6	0.01773	0.01615	-0.01396	0.04942
Baltalksnis	b0	0.13197	0.03162	0.06992	0.19401
	b1	-0.37162	0.06476	-0.49868	-0.24456
	b2	5.91005	1.90523	2.17194	9.64816
	b3	0.89883	0.02238	0.85492	0.94274
	b4	-0.15640	0.01107	-0.17811	-0.13468
	b5	0.05397	0.02893	-0.00280	0.11074
	b6	0.04730	0.01905	0.00992	0.08468
Ozols, osis, liepa, goba, vīksna, dižskābardis, skābardis, kļava, ķirsis	b0	0.01839	0.01098	-0.00315	0.03992
	b1	-0.02014	0.01493	-0.04942	0.00914
	b2	-0.68839	1.11950	-2.88423	1.50745
	b3	1.09730	0.03516	1.02833	1.16627
	b4	-0.02542	0.00364	-0.03256	-0.01828
	b5	0.02073	0.00740	0.00621	0.03524
	b6	0.01138	0.00777	-0.00386	0.02662
Citi lapu koki	b0	0.04006	0.02369	-0.00645	0.08656

Suga	Koeficients	Vērtība	Standart- klūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
	b1	-0.05778	0.04823	-0.15246	0.03691
	b2	-0.54735	1.97302	-4.42042	3.32573
	b3	0.93486	0.04602	0.84452	1.02521
	b4	-0.06390	0.00765	-0.07892	-0.04889
	b5	0.05891	0.02350	0.01279	0.10503
	b6	0.03152	0.01507	0.00193	0.06111



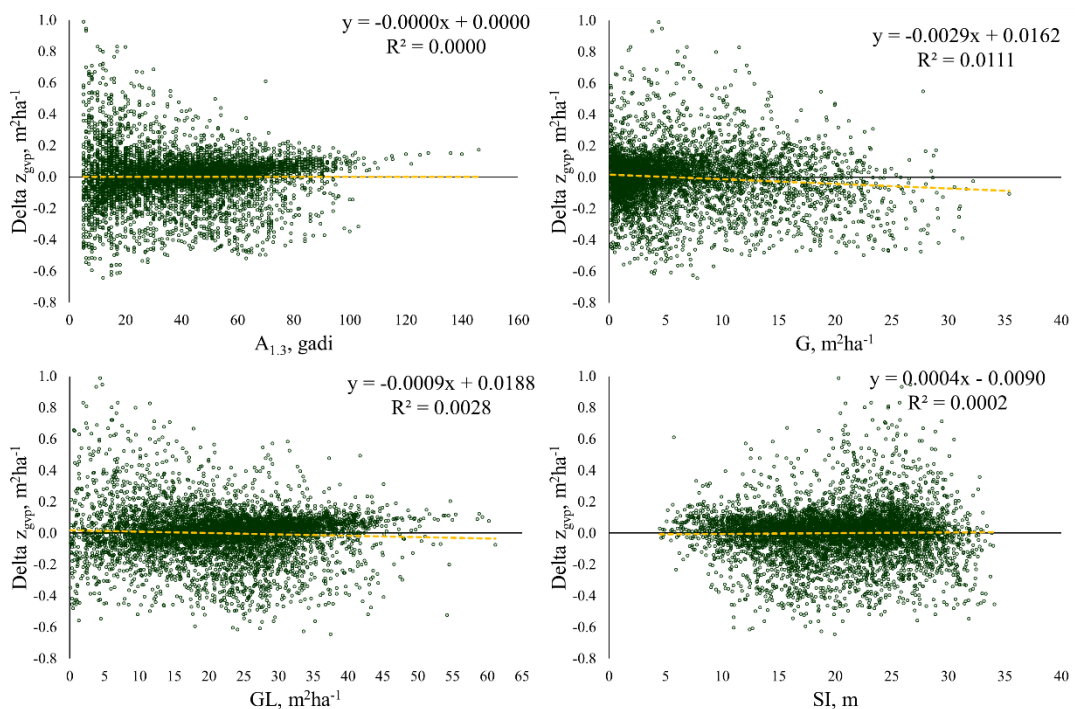
2.2.35. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu priedēm:

Delta Z_{gvp} – vidējā periodiskā šķērslaukuma pieauguma starpība starp uzmērīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), A_{1,3} – meža elementa krūšaugstuma vecums, SI – meža elementa augstums bāzes vecumā (priede, egļe platlapji – 100 gadi, bērzs, apse, melnalksnis 50 gadi, baltalksnis un citi lapu koki 20 gadi), G – meža elementa šķērslaukums, GL – meža elementu, kas vienādi un lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



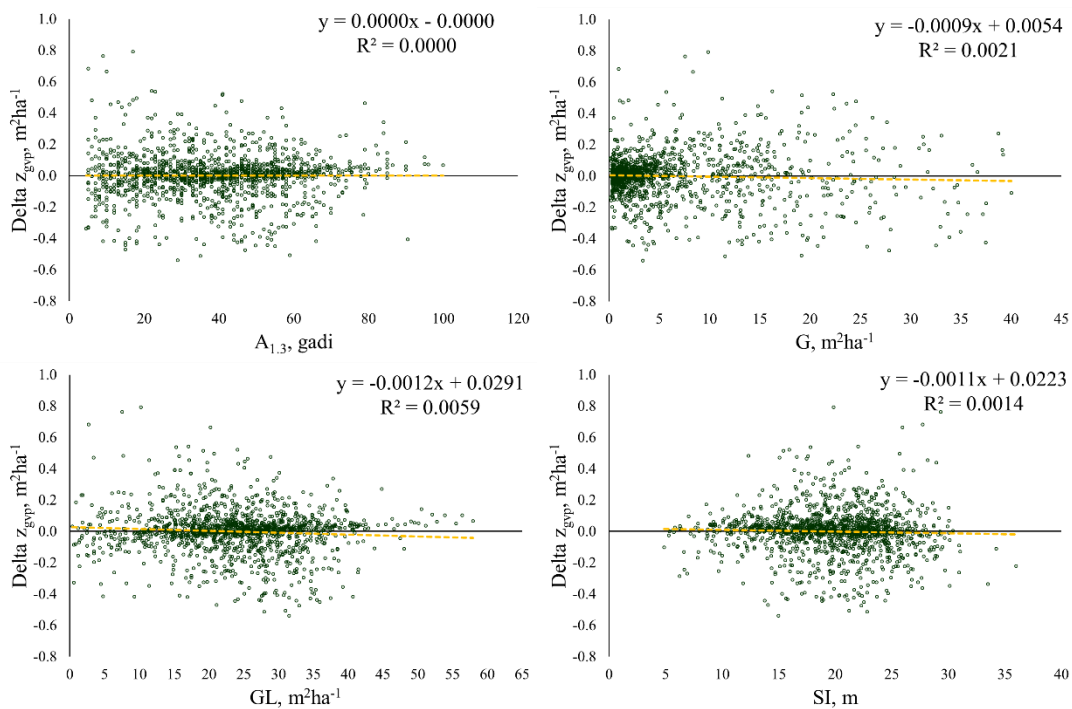
2.2.36. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu eglēm:

ΔZ_{gvp} – vidējā periodiskā šķērslaukuma pieauguma starpība starp uzmērīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – meža elementa krūšaugstuma vecums, SI – meža elementa augstums bāzes vecumā (priede, egļu platlapji – 100 gadi, bērzs, apse, melnalksnis 50 gadi, baltalksnis un citi lapu koki 20 gadi), G – meža elementa šķērslaukums, GL – meža elementu, kas vienādi un lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



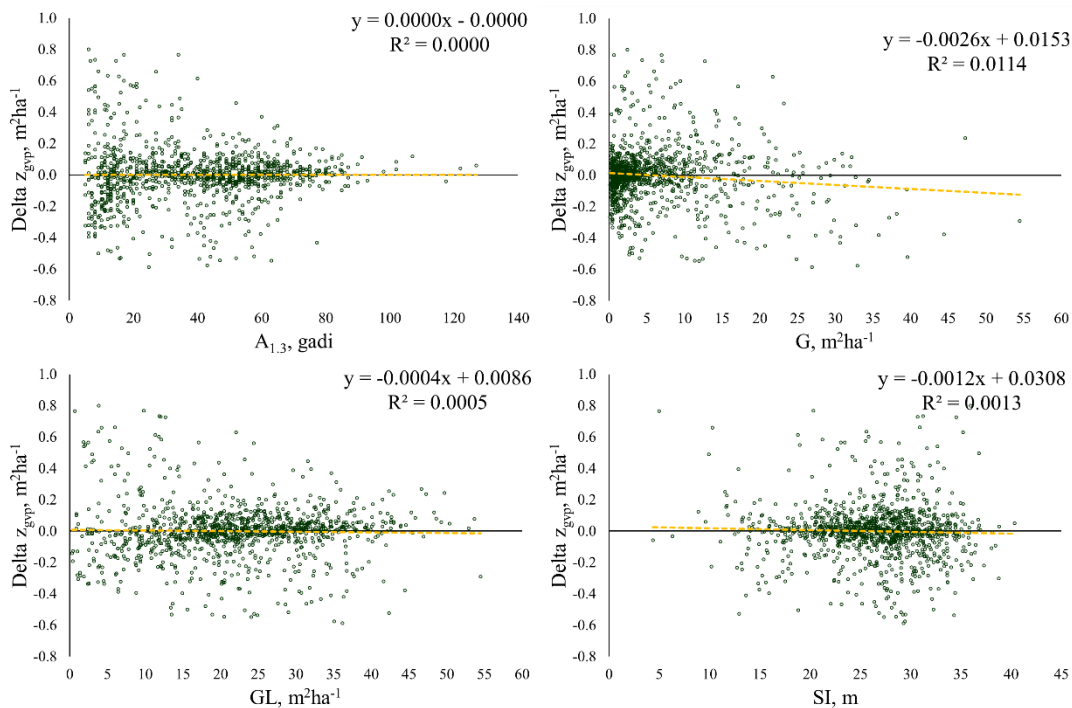
2.2.37. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu bērziem:

ΔZ_{gvp} – vidējā periodiskā šķērslaukuma pieauguma starpība starp uzmērīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – meža elementa krūšaugstuma vecums, SI – meža elementa augstums bāzes vecumā (priede, egļu platlapji – 100 gadi, bērzs, apse, melnalksnis 50 gadi, baltalksnis un citi lapu koki 20 gadi), G – meža elementa šķērslaukums, GL – meža elementu, kas vienādi un lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



2.2.38. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu melnalkšņiem:

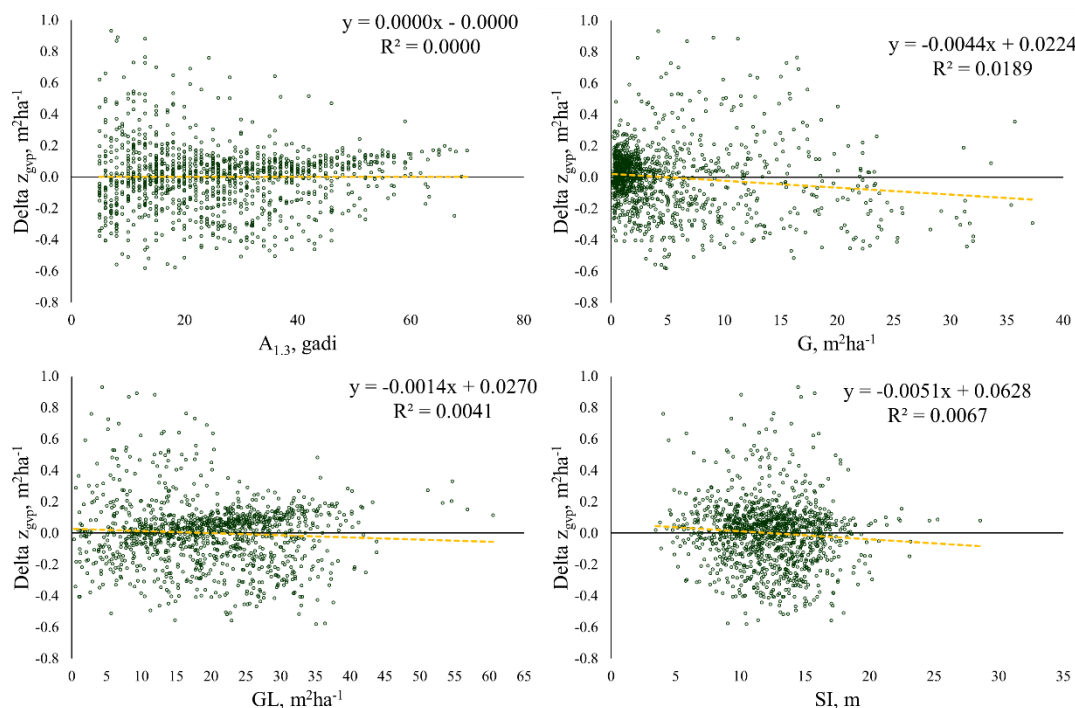
ΔZ_{gvp} – vidējā periodiskā šķērslaukuma pieauguma starpība starp uzmērīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – meža elementa krūšaugstuma vecums, SI – meža elementa augstums bāzes vecumā (priede, egļu platlapji – 100 gadi, bērzs, apse, melnalksnis 50 gadi, baltalksnis un citi lapu koki 20 gadi), G – meža elementa šķērslaukums, GL – meža elementu, kas vienādi ir lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



2.2.39. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu apšēm:

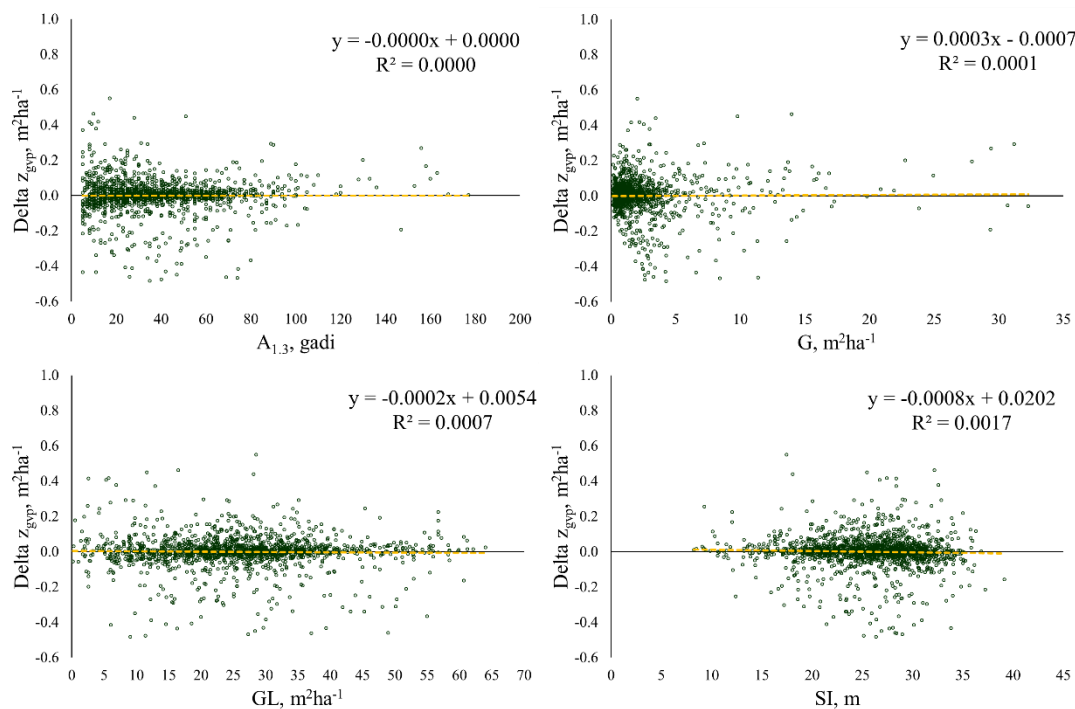
ΔZ_{gvp} – vidējā periodiskā šķērslaukuma pieauguma starpība starp uzmērīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – meža elementa krūšaugstuma vecums, SI – meža elementa augstums bāzes vecumā (priede, egļu platlapji – 100 gadi, bērzs, apse,

melnalksnis 50 gadi, baltalksnis un citi lapu koki 20 gadi), G – meža elementa šķērslaukums, GL – meža elementu, kas vienādi un lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



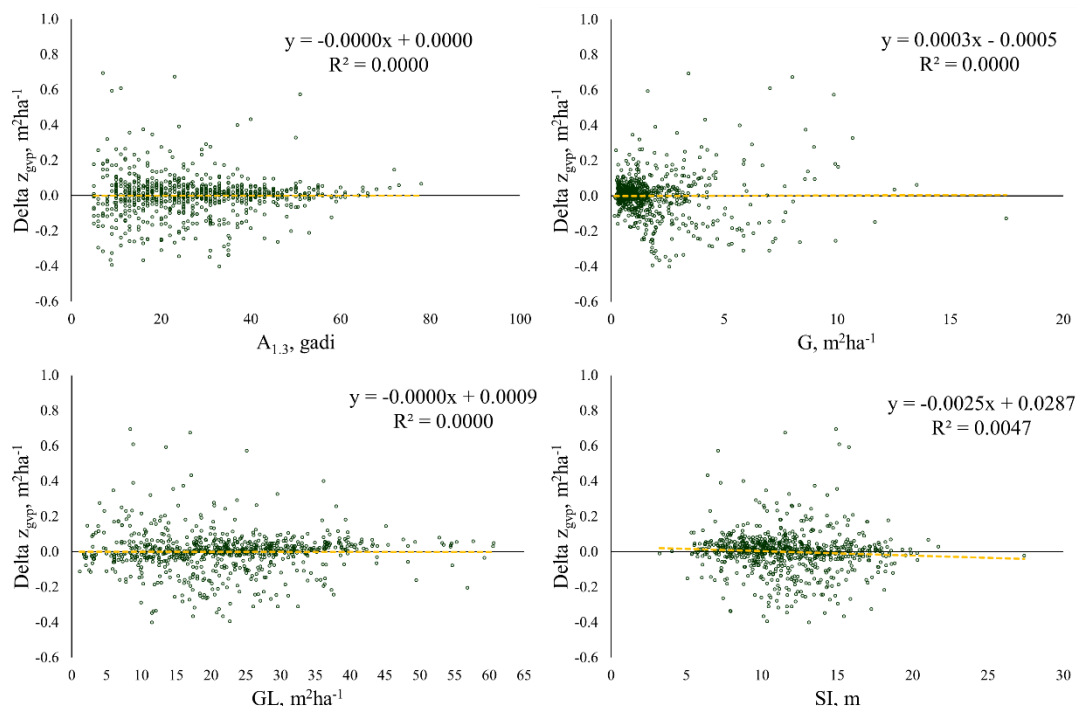
2.2.40. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu baltalkšņiem:

Delta Z_{gvp} – vidējā periodiskā šķērslaukuma pieauguma starpība starp uzmērīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), A_{1,3} – meža elementa krūšaugstuma vecums, SI – meža elementa augstums bāzes vecumā (priede, egle platlapi – 100 gadi, bērzs, apse, melnalksnis 50 gadi, baltalksnis un citi lapu koki 20 gadi), G – meža elementa šķērslaukums, GL – meža elementu, kas vienādi un lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.



2.2.41. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu platlapiem:

Delta Z_{dgp} – vidējā periodiskā šķērslaukuma pieauguma starpība starp uzmērīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), A_{1,3} – meža elementa krūšaugstuma vecums, SI – meža elementa augstums bāzes vecumā (priede, egļu platlapji – 100 gadi, bērzs, apse, melnalksnis 50 gadi, baltalksnis un citi lapu koki 20 gadi), G – meža elementa šķērslaukums, GL – meža elementu, kas vienādi un lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa



2.2.42. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto šķērslaukuma vidējo periodisko pieaugumu citiem lapu kokiem:

Delta Z_{dgp} – vidējā periodiskā šķērslaukuma pieauguma starpība starp uzmērīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), A_{1,3} – meža elementa krūšaugstuma vecums, SI – meža elementa augstums bāzes vecumā (priede, egļu platlapji – 100 gadi, bērzs, apse, melnalksnis 50 gadi, baltalksnis un citi lapu koki 20 gadi), G – meža elementa šķērslaukums, GL – meža elementu, kas vienādi un lielāki par konkrēto elementu, šķērslaukuma summa.

Secinājumi

Ar papildinātajiem datiem sagatavotie vienādojumi augšanas gaitas (vidējā augstuma, virsaugstuma, šķērslaukuma, vidējā caurmēra modeļi ir izmantojami augšanas gaitas prognozēšanai stratēģiskā līmenī, bet atsevišķu nogabalu (parauglaukumu) līmenī var būt ievērojamas atšķirības starp prognozēto un faktisko taksācijas parametru lielumu.

Vienādojumu kopa papildināta ar vidējā augstuma un caurmēra pieaugumu vienādojumiem II stāva koku augšanas aproksimācijai.

Ieteicams modelēšanas sistēmā izmantot jaunākos vienādojumu koeficientus.

3. Individuāla koka augšanas gaitas modeļi

3.1. Individuāla koka augšanas gaitas modeļi, kas balstīti 4 MSI cikla datos

3.1.1. Kandidātvienādojumu kopas izveide (literatūras apskats)

Literatūras apskats par individuāla koka augšanas gaitas modeļiem ir iekļauts pētījuma pirmā posma (2021.g.) pārskatā. Tajā apkopota informācija par Zviedrijā (Heureka³), Somijā (MOTTI) un Vācijā (SILVA) (Pretzsch et al., 2002) izstrādātajiem individuāla koka augšanas gaitas modeļiem (vienādojumu sistēmām). Tādēļ tie šajā pārskatā vairs nav iekļauti.

3.1.2. Netelpiskie (non-spatial) individuāla koka augšanas gaitas modeļu (h, d, g, atmiršanas varbūtība, ieaugšanās varbūtība) (P, E, B, M, A) aproksimācija

Caurmēra pieaugums

Materiāls un metodika

Datu analīzē izmantoja datus par 180801 kokiem (priedes – 50848, egles – 56678, bērzi – 42587, melnalkšņi – 11367, apses – 6874, baltalkšņi – 12447) no 3964 MSI 2014. – 2022. gadā atkārtoti uzmērītajiem parauglaukumiem. Datu analīzē izmanto tikai tos koku datus, kas atkārtotajā uzmērīšanas reizē ir dzīvi koki.

Caurmēra augšanas gaitas raksturošanai izmanto atsevišķu koku šķērslaukuma pieauguma modeli, kas paredzēts nākamo 5 gadu caurmēra pieauguma aprēķināšanai:

$$i_{g5} = \exp \left(b_0 + b_1 \cdot \frac{SI_i}{10} + b_2 \cdot \frac{10}{H_{\text{vald}}} + b_3 \cdot \frac{10}{H_{\text{vald}}^2} + b_4 \cdot \ln(d) + \alpha_5 \cdot \left(\frac{d}{100} \right)^2 + b_6 \cdot \ln(\text{RDF} + 1) + b_7 \cdot \text{RDFL} + b_8 \cdot \frac{T_{\text{sum}}}{1000} + b_9 \cdot c_{0-5} \right) \quad (3.1)$$

- kur*
- i_{g5} – koka nākošo 5 gadu šķērslaukuma pieaugums, cm^2 ;
 - SI_i – koka augstums bāzes vecumā (p, e – 100 gadi; b, m, a – 50 gadi; ba – 20 gadi), m;
 - H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), m;
 - d – koka krūšaugstuma caurmērs, cm;
 - RDF – mežaudzes relatīvās biežības faktors;
 - RDFL – relatīvās biežības faktors kokiem, kas resnāki par konkrēto koku;
 - T_{sum} – aktīvās veģetācijas ($t^\circ > 5^\circ\text{C}$) temperatūru summa, $^\circ\text{C}$;
 - c_{0-5} – fiktīvais mainīgais, kas raksturo vai pēdējo 5 gadu laikā mežaudzē ir veikta koku ciršana, (0 vai 1);
 - b_{0-9} – koeficienti.

Atsevišķu koku caurmēra augšanas gaita modelēta datorprogrammā SPSS 14.0 for Windows, izmantojot Mixed Linear Model rīku. Analizējot pieaugumu audzes līmenī vieta jeb parauglaukums ir izmantots kā Subject variable, līdz ar to tiek ņemts vērā, ka koki vienā parauglaukumā ir saistīti un ka koki ir atkārtoti pārmērīti.

³ [Category:Model - Heureka Wiki \(heureka.wiki.se\)](https://heureka.wiki.se/).

Rezultāti

Balstoties uz MSI 2014. – 2022. gadā atkārtoti uzmērītajiem parauglaukum datiem aproksimētas koeficientu vērtības atsevišķu koku caurmēra augšanas gaitas modelim (3.1.1. tabula). Vienādojumā atstāti visi bioloģiski loģiskie faktori, lai arī atsevišķos gadījumos tie nav būtiski bet faktori, kas ir nebūtiski un ir bioloģiski neloģiski (koeficientam pretēja zīme) vienādojumos nav atstāti.

Netelpiskajam atsevišķa koka caurmēra prognožu modelim statistiskie rādītāji, pārbaudot to uz izstrādē izmantoto paraugkopu, ir augsti. Piemēram, vidējā periodiskā caurmēra pieauguma vidējā novirze nevienam no meža elementiem nepārsniedz 0,01 cm gadā, kas attiecinot to pret vidējo pieaugumu svārstās no -2,3% līdz 0,5% (3.1.2. tabula).

Atsevišķa koka šķērslaukuma pieauguma modelim, salīdzinot uzmērīto un prognozēto vidējo periodisko caurmēra pieaugumu, nav konstatētas korelatīvas novirzes ar koka vecumu, caurmēru, koka un audzes bonitāti jeb ražību un audzes biežību (3.1.1. – 3.1.6. attēli).

3.1.1. tabula. Netelpiska atsevišķu koku caurmēra augšanas gaitas modeļa (3.1. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji

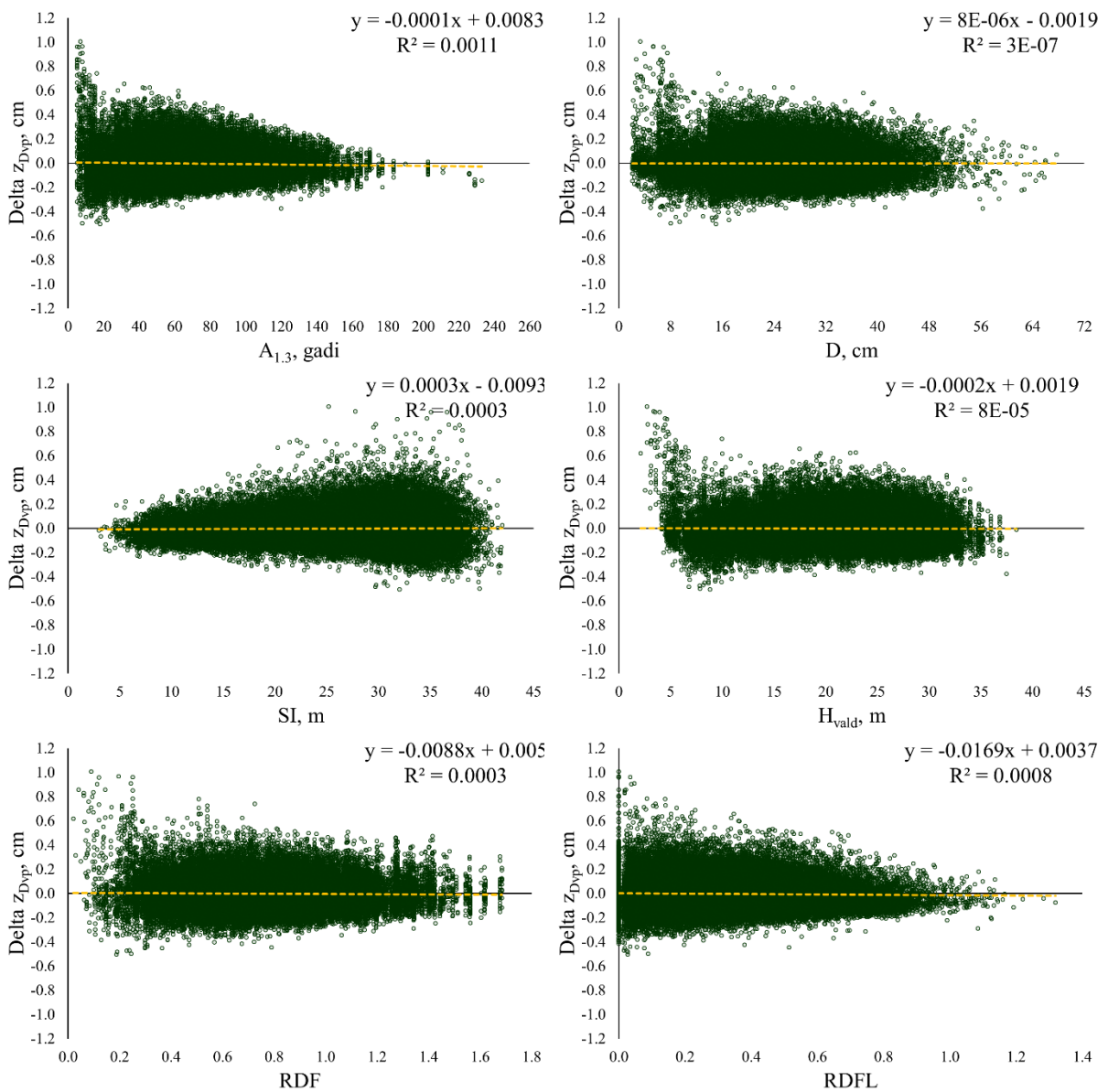
Suga	Koeficients	Vērtība	Standart- kļūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
Priede	b0	-2.80608	0.02165	-2.84851	-2.76366
	b1	0.61570	0.00518	0.60555	0.62585
	b2	2.33976	0.05959	2.22296	2.45656
	b3	-7.44011	0.00000	-7.44011	-7.44011
	b4	1.37047	0.02704	1.31748	1.42346
	b5	-0.00317	0.10184	-0.20277	0.19643
	b6	-0.76893	0.01976	-0.80767	-0.73019
	b7	-0.25567	0.00111	-0.25784	-0.25350
	b8	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	b9	0.11304	0.30670	-0.48810	0.71418
Egle	b0	-1.33688	0.10737	-1.54732	-1.12645
	b1	0.39662	0.00650	0.38388	0.40937
	b2	1.38532	0.04574	1.29566	1.47498
	b3	-3.18939	0.20398	-3.58920	-2.78959
	b4	1.17814	0.01756	1.14373	1.21256
	b5	-0.01431	0.00091	-0.01609	-0.01253
	b6	-0.83368	0.01845	-0.86985	-0.79751
	b7	-0.36328	0.01959	-0.40168	-0.32487
	b8	0.27117	0.03495	0.20266	0.33967
	b9	0.10984	0.00611	0.09786	0.12183
Bērzs	b0	-3.83731	0.15113	-4.13352	-3.54109
	b1	0.78518	0.00782	0.76986	0.80050
	b2	4.26673	0.08789	4.09446	4.43899
	b3	-18.25437	0.50474	-19.24368	-17.26506
	b4	1.52868	0.02214	1.48529	1.57207
	b5	-0.02695	0.00132	-0.02954	-0.02436
	b6	-0.79298	0.02074	-0.83364	-0.75232
	b7	-0.61925	0.02841	-0.67494	-0.56357
	b8	0.12883	0.04740	0.03592	0.22174
	b9	0.10021	0.00826	0.08402	0.11640
Melnalksnis	b0	-3.06999	0.30281	-3.66355	-2.47643
	b1	0.55392	0.01725	0.52010	0.58773
	b2	2.39587	0.15975	2.08273	2.70900
	b3	-8.54380	0.83835	-10.18711	-6.90049
	b4	1.63991	0.05421	1.53366	1.74617
	b5	-0.06028	0.00344	-0.06703	-0.05353
	b6	-1.03552	0.04203	-1.11791	-0.95314
	b7	-0.75270	0.05210	-0.85483	-0.65057
	b8	0.36508	0.08302	0.20234	0.52781
	b9	0.14257	0.01791	0.10746	0.17769

Suga	Koeficients	Vērtība	Standart- kļūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
Apse	b0	-3.95874	0.04050	-4.03813	-3.87936
	b1	0.46427	0.01587	0.43317	0.49538
	b2	4.55794	0.16127	4.24180	4.87408
	b3	-18.05014	0.00000	-18.05014	-18.05014
	b4	1.97323	0.04251	1.88990	2.05656
	b5	-0.02939	0.05235	-0.13201	0.07324
	b6	-0.49108	0.18873	-0.86105	-0.12111
	b7	-0.67240	0.00165	-0.67562	-0.66917
	b8	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	b9	0.05840	1.03995	-1.98022	2.09702
Baltalksnis	b0	-3.30937	0.27899	-3.85624	-2.76249
	b1	0.69057	0.02256	0.64634	0.73480
	b2	2.22659	0.13058	1.97063	2.48256
	b3	-5.60270	0.58399	-6.74740	-4.45799
	b4	1.64983	0.04861	1.55455	1.74511
	b5	-0.12493	0.00687	-0.13839	-0.11146
	b6	-0.65320	0.04192	-0.73536	-0.57103
	b7	-1.11896	0.05232	-1.22152	-1.01639
	b8	0.51540	0.08599	0.34685	0.68394
	b9	0.11734	0.01648	0.08504	0.14963

3.1.2. tabula. Atsevišķa koka caurmēra augšanas gaitas modeļa (3.1. formula) prognozētā ikgadējā caurmēra pieauguma statistiskie rādītāji

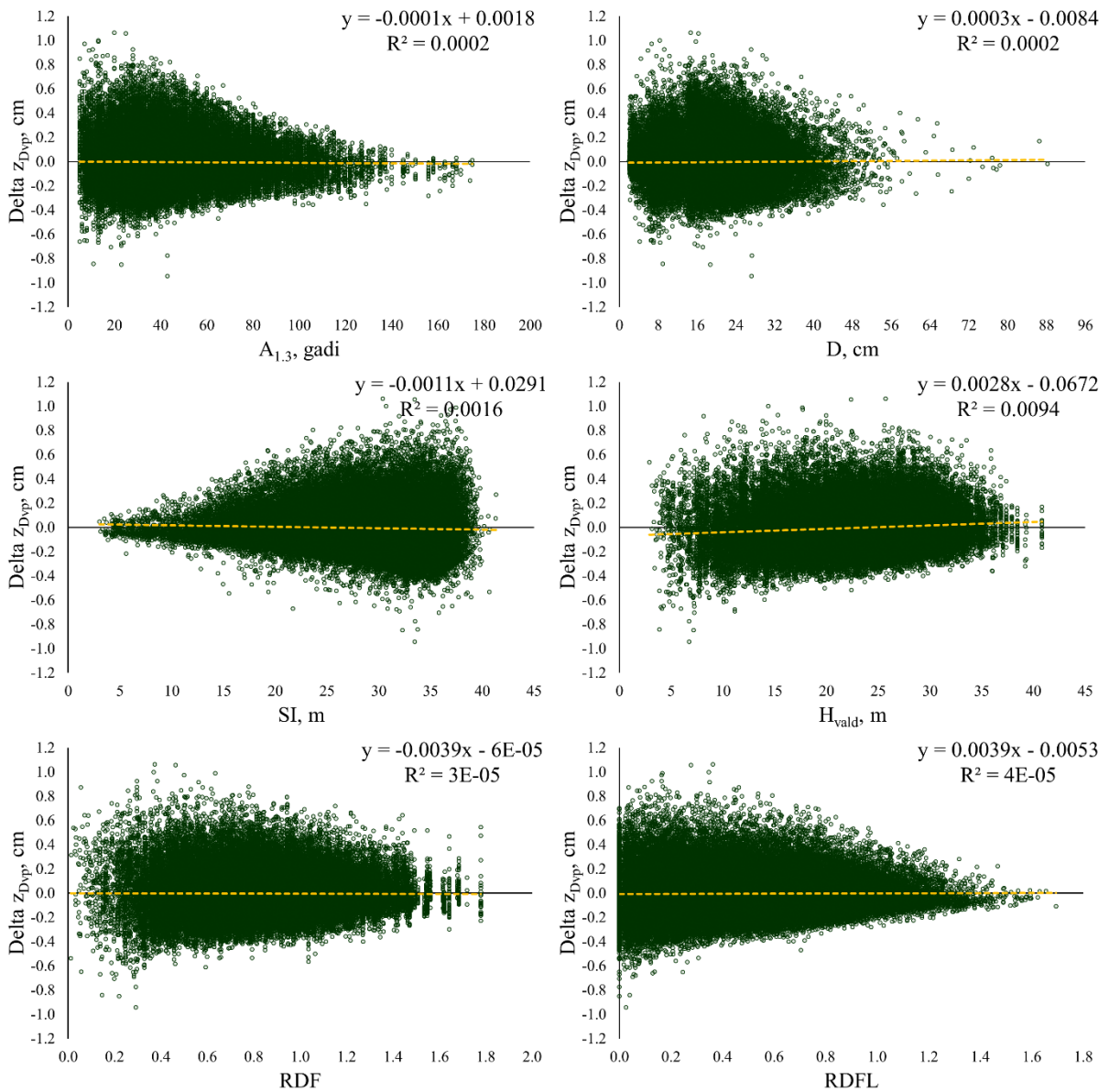
Suga	Vid	MRES	MRES%	AMRES	RMSE	RMSE%	MSE	VR	R2
Priede	0.21	0.00	-0.8	0.10	0.13	60.1	0.02	0.38	0.39
Egle	0.30	0.00	-1.1	0.14	0.18	58.9	0.03	0.42	0.39
Bērzs	0.26	0.00	-1.3	0.13	0.17	65.9	0.03	0.50	0.49
Melnalksnis	0.28	0.00	-0.7	0.13	0.16	58.2	0.03	0.39	0.38
Apse	0.49	0.00	0.5	0.18	0.23	46.8	0.05	0.53	0.48
Baltalksnis	0.26	-0.01	-2.3	0.12	0.15	58.8	0.02	0.43	0.43

Vid - aritmētiski vidējā uzmērītā vērtība, m; MRES - vidējā novirze, m; MRES% - procentuālā vidējā novirze; AMRES - vidējā absolūtā novirze, m; RMSE – standartnovirze, m; RMSE% - variācijas koeficients; MSE - vidējā kvadrātiskā kļūda, m; VR - dispersijas attiecība; R2 - determinācijas koeficients.



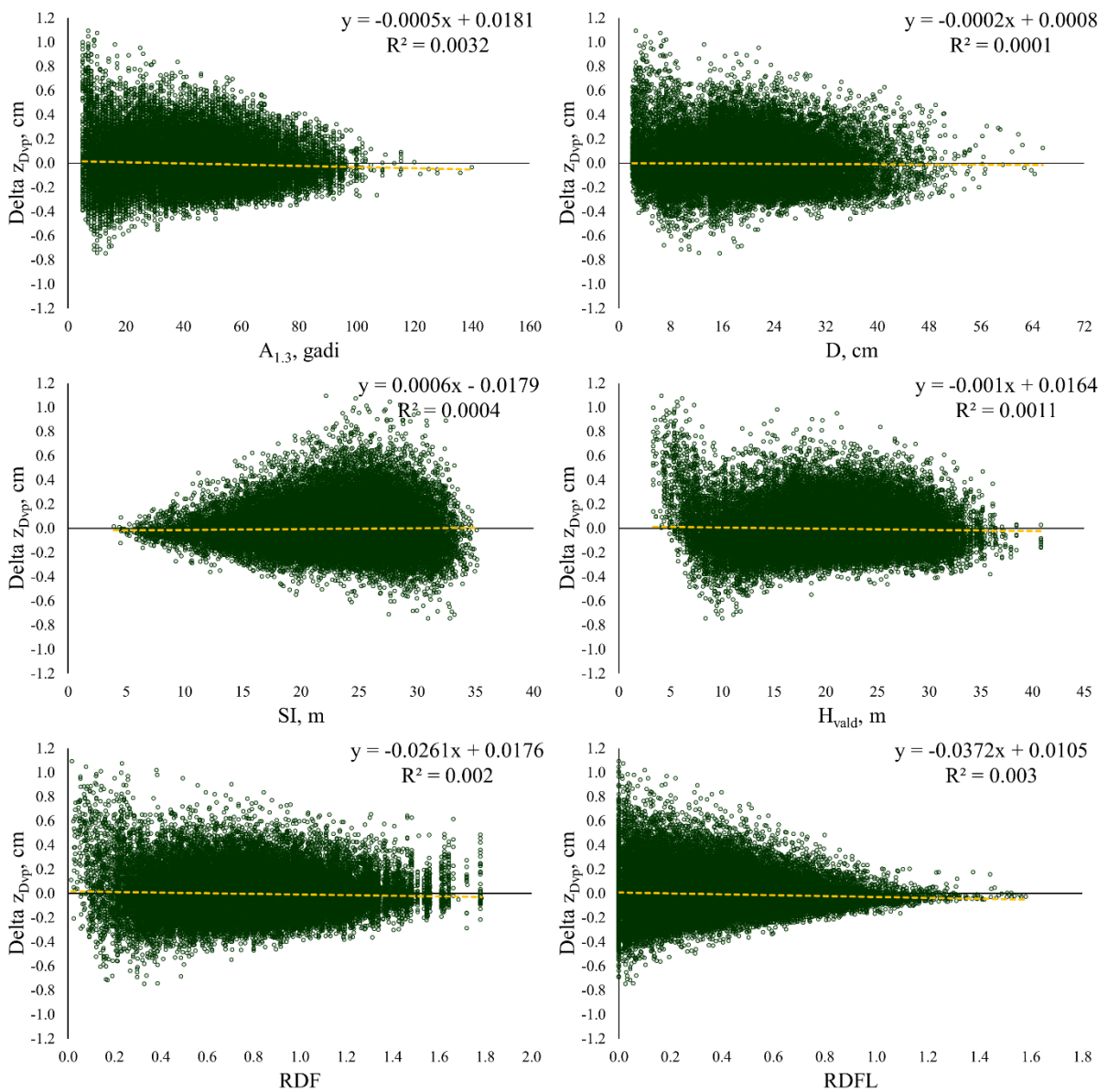
3.1.1. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto (3.1. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu priedēm:

Delta Z_{dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – koka (meža elementa) krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – koka caurmērs 1.3 m augstumā, SI – koka bonitāte jeb augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi, B, M, A 50 gadi, Ba 20 gadi), H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), RDF – mežaudzes relatīvās biežības faktors, $RDFL$ – relatīvās biežības faktors kokiem, kas resnāki par konkrēto koku.



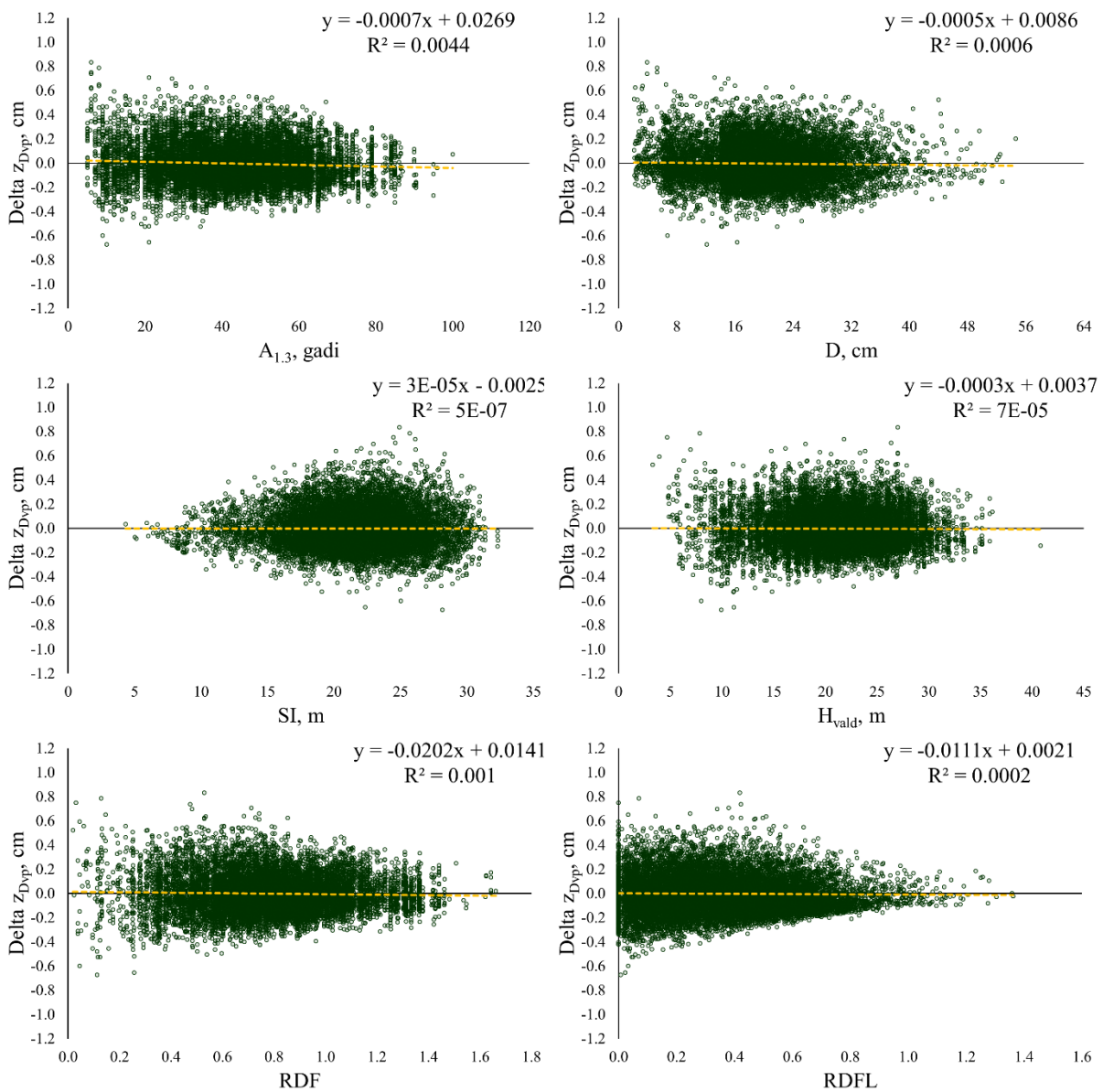
3.1.2. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto (3.1. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu eglēm:

Delta z_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – koka (meža elementa) krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – koka caurmērs 1.3 m augstumā, SI – koka bonitāte jeb augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi, B, M, A 50 gadi, Ba 20 gadi), H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), RDF – mežaudzes relatīvās biežības faktors, $RDFL$ – relatīvās biežības faktors kokiem, kas resnāki par konkrēto koku.



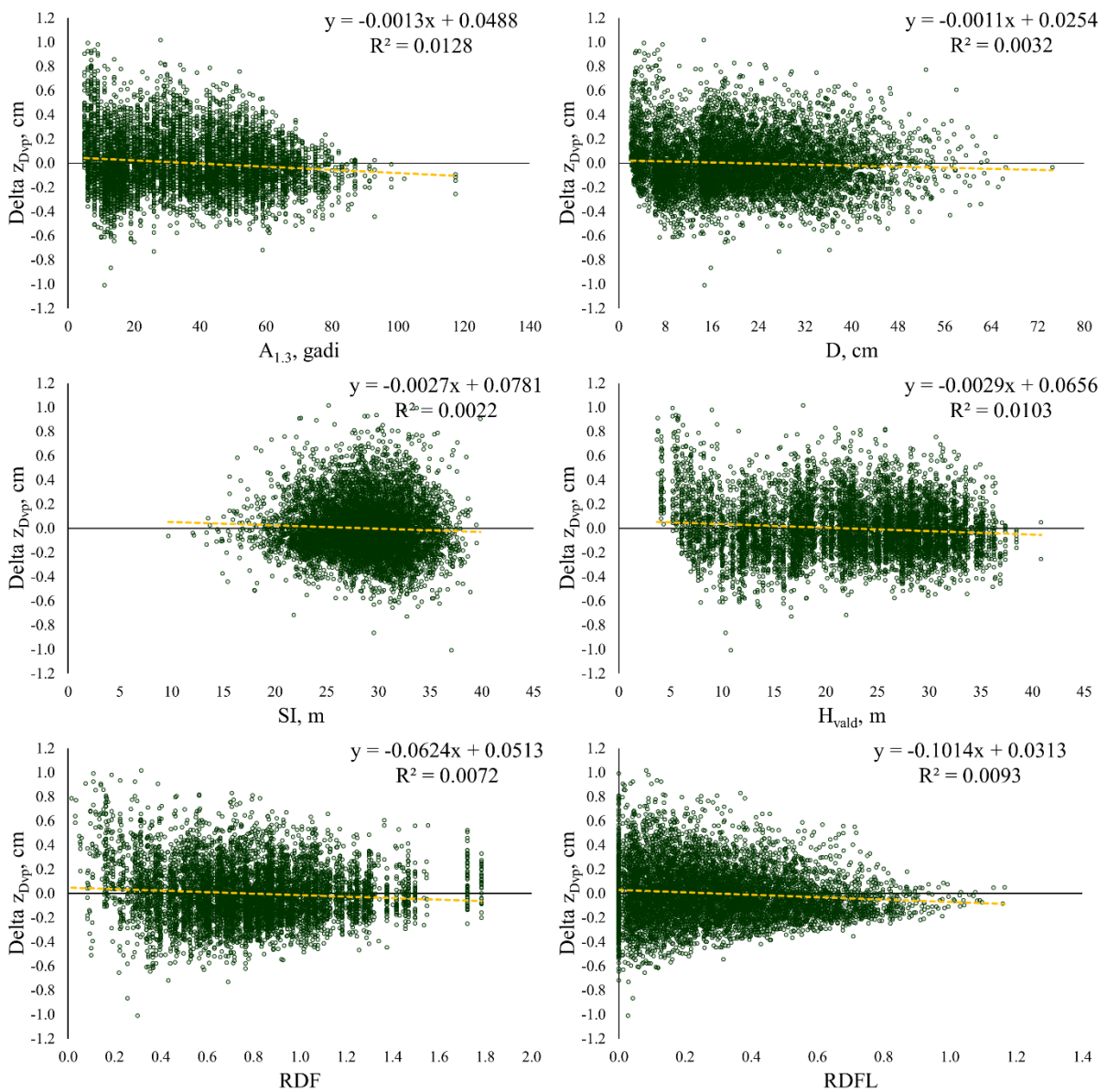
3.1.3. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto (3.1. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu bērziem:

Delta Z_{dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – koka (meža elementa) krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – koka caurmērs 1.3 m augstumā, SI – koka bonitāte jeb augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi, B, M, A 50 gadi, Ba 20 gadi), H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), RDF – mežaudzes relatīvās biežības faktors, $RDFL$ – relatīvās biežības faktors kokiem, kas resnāki par konkrēto koku.



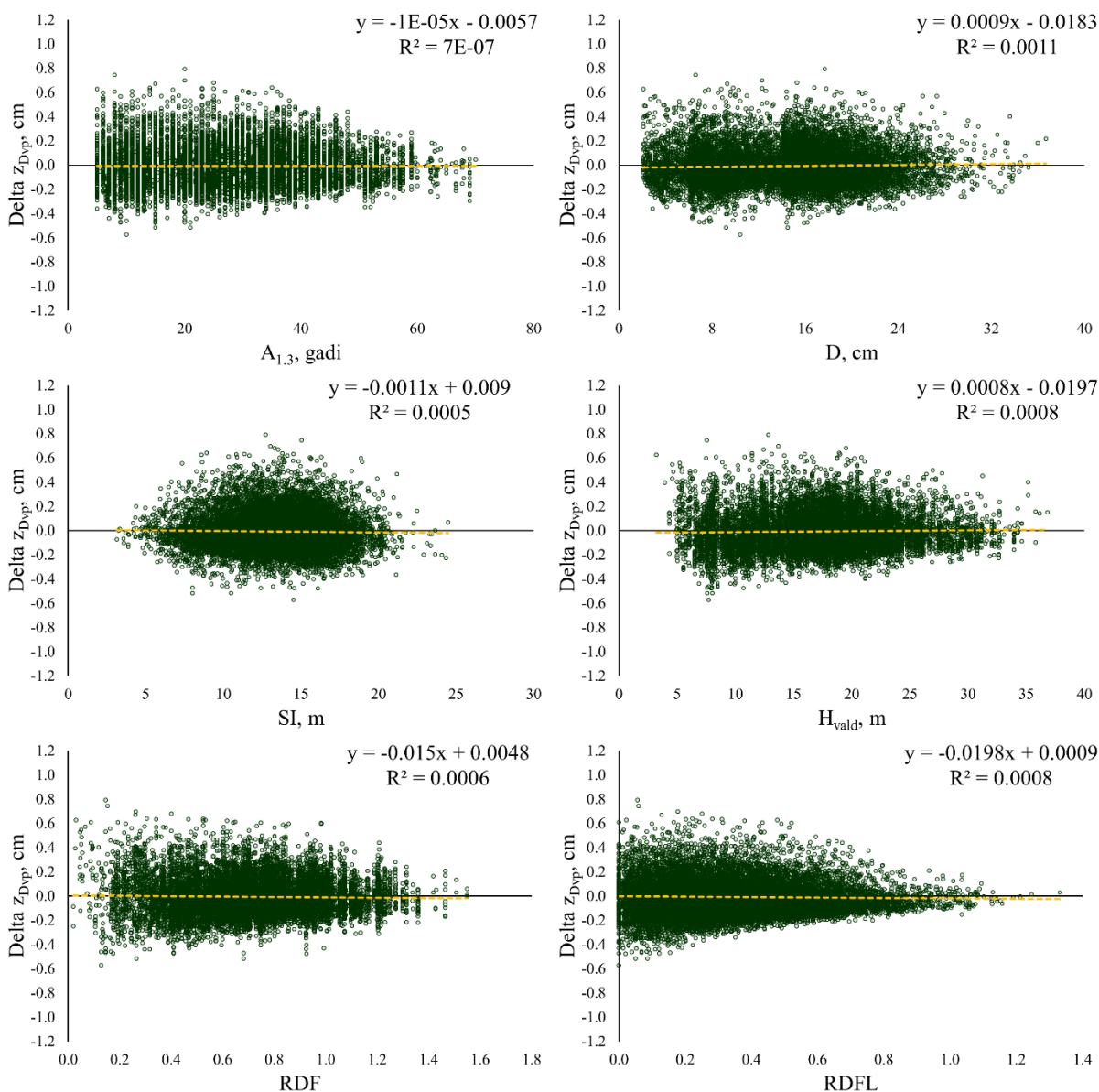
3.1.4. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto (3.1. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu melnalkšņiem:

Delta z_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – koka (meža elementa) krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – koka caurmērs 1.3 m augstumā, SI – koka bonitāte jeb augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi, B, M, A 50 gadi, Ba 20 gadi), H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), RDF – mežaudzes relatīvās biežības faktors, $RDFL$ – relatīvās biežības faktors kokiem, kas resnāki par konkrēto koku.



3.1.5. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto (3.1. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu apšēm:

Delta Z_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – koka (meža elementa) krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – koka caurmērs 1.3 m augstumā, SI – koka bonitāte jeb augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi, B, M, A 50 gadi, Ba 20 gadi), H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), RDF – mežaudzes relatīvās biežības faktors, $RDFL$ – relatīvās biežības faktors kokiem, kas resnāki par konkrēto koku.



3.1.6. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto (3.1. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu baltalkšņiem:

Delta Z_{dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – koka (meža elementa) krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – koka caurmērs 1.3 m augstumā, SI – koka bonitāte jeb augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi, B, M, A 50 gadi, Ba 20 gadi), H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), RDF – mežaudzes relatīvās biežības faktors, $RDFL$ – relatīvās biežības faktors kokiem, kas resnāki par konkrēto koku.

Koku atmirums

Materiāls un metodika

Datu analīzē izmantoja datus par 183503 kokiem (priedes – 50116, egles – 55880, bērzi – 44307, melnalkšņi – 11795, apses – 7356, baltalkšņi – 14049) no 3695 MSI 2014. – 2022. gadā atkārtoti uzņēmītajiem parauglaukumiem. Analīzē neiekļauj ekoloģiskos kokus. Tāpat no analīzes izslēdz parauglaukumus, kuros starpinventarizācijas periodā ir bijusi koku ciršana.

Atsevišķa koka atmiršanas modelēšanā tiek ņemta vērā gan kokaudzes konkurences ietekme, gan koka vecuma ietekme. Atsevišķa koka atmiršanas varbūtība, ka tas atmirs nākamo piecu gadu laikā, tiek modelēta sekojoši:

$$p = 1 - (1 - p_{comp5}) \cdot (1 - p_{old5}) \quad (3.2)$$

- kur p – varbūtība, ka koks atmiris nākošo piecu gadu laikā;
 p_{comp5} – varbūtība, ka koks konkurences dēļ atmiris nākošo piecu gadu laikā;
 p_{old5} – varbūtība, ka koks vecuma dēļ atmiris nākošo piecu gadu laikā.

Varbūtība, ka koks konkurences dēļ atmiris nākošo piecu gadu laikā modelēšanā izmantots sekojošs vienādojums:

$$p_{comp5} = \frac{1}{1 + \exp(-(b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot G + b_3 \cdot BAL))} \quad (3.3)$$

- kur p_{comp5} – varbūtība, ka koks konkurences dēļ atmiris nākošo piecu gadu laikā;
 d – koka krūšaugstuma caurmērs perioda sākumā, cm
 G – mežaudzes šķērslaukums perioda sākumā, m²ha⁻¹;
 BAL – šķērslaukuma summa kokiem, kas lielāki par konkrēto koku, m²ha⁻¹;
 $b_0 - b_3$ – koeficienti.

Varbūtība, ka koks vecuma dēļ atmiris, aprēķināma pēc sekojoša vienādojuma:

$$p_{old} = \frac{\exp\left(-10 + \frac{10 \cdot a}{0.82 \cdot A_{max}}\right)}{1 + \exp\left(-10 + \frac{10 \cdot a}{0.82 \cdot A_{max}}\right)} \quad (3.4)$$

- kur p_{old} – varbūtība, ka koks vecuma dēļ atmiris;
 a – koka vecums, gadi;
 A_{max} – koka sugas maksimālais vecums (P-500, E-300, B,M,A-200, Ba-100), gadi.

Varbūtība, ka koks vecuma dēļ atmiris nākošo piecu gadu laikā, aprēķināma pēc sekojoša vienādojuma:

$$p_{old5} = \frac{p_{old(a+5)} - p_{old(a)}}{1 - p_{old(a)}} \quad (3.5)$$

- kur p_{old5} – varbūtība, ka koks vecuma dēļ atmiris nākošo piecu gadu laikā;
 $p_{old(a+5)}$ – varbūtība, ka koks vecuma dēļ atmiris vecumā a+5;
 $p_{old(a)}$ – varbūtība, ka koks vecuma dēļ atmiris vecumā a.

Atsevišķu koku atmiruma varbūtība modelēta datorprogrammā SPSS 14.0 for Windows, izmantojot rīku *Binary Logistic Regression*.

Rezultāti

Balstoties uz MSI 2014. – 2022. gadā atkārtoti uzmērītajiem parauglaukumu datiem aproksimētas koeficientu vērtības atsevišķu koku atmiruma modelim (3.1.3. tabula).

Ar atsevišķa koka atmiruma modeli (3.2. formula) tiek prognozēta varbūtība, vai koks aizies bojā konkurences, vai vecuma dēļ. Ar šo modeli nav iespējams prognozēt traucējumu vēja, dzīvnieku, kukaiņu vai uguns dēļ masveidā bojā gājušos kokus. Tāpat jāatzīmē, ka rezultāts, ko ar modeli iegūst, ir varbūtība, nevis binomināls rezultāts – koks ir dzīvs vai miris. Tādēļ lietotājam pašam ir jāvērtē, pie kādas prognozētās vērtības koku atzīt vai neatzīt par bojā gājušu.

**3.1.3. tabula. Netelpiska atsevišķu koku atmiruma modeļa (3.3. formula) 2023. gadā
aproximētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji**

Koka suga	Faktors	Koeficients	Vērtība	Standartklūda	Būtiskums
Priede	d	b1	-0.0910	0.0048	0.0000
	G	b2	0.0027	0.0047	0.5630
	BAL	b3	0.0679	0.0047	0.0000
	konstante	b0	-2.5077	0.0737	0.0000
Egle	d	b1	-0.0120	0.0040	0.0024
	G	b2	-0.0257	0.0043	0.0000
	BAL	b3	0.0404	0.0043	0.0000
	konstante	b0	-2.9142	0.0761	0.0000
Bērzs	d	b1	-0.0499	0.0044	0.0000
	G	b2	-0.0473	0.0051	0.0000
	BAL	b3	0.1058	0.0053	0.0000
	konstante	b0	-2.5415	0.0630	0.0000
Melnalksnis	d	b1	-0.0482	0.0091	0.0000
	G	b2	-0.0520	0.0098	0.0000
	BAL	b3	0.1101	0.0094	0.0000
	konstante	b0	-2.6895	0.1701	0.0000
Apse	d	b1	-0.0563	0.0087	0.0000
	G	b2	-0.0645	0.0099	0.0000
	BAL	b3	0.1282	0.0099	0.0000
	konstante	b0	-1.6935	0.0945	0.0000
Baltalksnis	d	b1	-0.0203	0.0064	0.0016
	G	b2	-0.0810	0.0066	0.0000
	BAL	b3	0.1475	0.0066	0.0000
	konstante	b0	-2.0226	0.0851	0.0000

3.1.3. Telpiskie (spatial) individuāla koka augšanas gaitas modeļu (h, d, g, atmiršanas varbūtība, ieaugšanās varbūtība) (P, E, B, M, A) aproksimācija

Metodika

Datu analīzē izmanto 91639 koku datus, kas no parauglaukuma centra neatrodas tālāk par 7,62 m (priedes – 21610, egles – 29850, bērzi – 23163, melnalkšņi – 5459, apses – 3728, baltalkšņi – 7829).

Caurmēra augšanas gaitas raksturošanai izmanto atsevišķu koku šķērslaukuma pieauguma modeli, kas paredzēts nākamo 5 gadu caurmēra pieauguma aprēķināšanai, kas 2021. gadā papildināts ar konkurences indeksa rādītāju:

$$i_{g5} = \exp \left(b_0 + b_1 \cdot \frac{SI_i}{10} + b_2 \cdot \frac{10}{H_{\text{vald}}} + b_3 \cdot \frac{10}{H_{\text{vald}}^2} + b_4 \cdot \ln(d) + \alpha_5 \cdot \left(\frac{d}{100} \right)^2 + b_6 \cdot \frac{T_{\text{sum}}}{1000} + b_7 \cdot c_{0-5} + b_8 \cdot CI_x \right) \quad (3.6)$$

- kur
- i_{g5} – koka nākošo 5 gadu šķērslaukuma pieaugums, cm²;
 - SI_i – koka augstums bāzes vecumā (p, e – 100 gadi; b, m, a – 50 gadi; ba – 20 gadi), m;
 - H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), m;
 - d – koka krūšaugstuma caurmērs, cm;
 - cr – koka vainaga īpatsvars;

- T_{sum} – aktīvās veģetācijas ($t^{\circ} > 5^{\circ}C$) temperatūru summa, $^{\circ}C$;
 C_{0-5} – fiktīvais mainīgais, kas raksturo vai pēdējo 5 gadu laikā mežaudzē ir veikta koku ciršana, (0 vai 1);
 CI – konkurences indekss;
 b_{0-8} – koeficienti.

Atsevišķu koku caurmēra augšanas gaita modelēta datorprogrammā SPSS 14.0 for Windows, izmantojot Mixed Linear Model rīku. Analizējot pieaugumu audzes līmenī vieta jeb parauglaukums ir izmantots kā Subject variable, līdz ar to tiek ņemts vērā, ka koki vienā parauglaukumā ir saistīti un ka koki ir atkārtoti pārmērīti.

Rezultāti

Balstoties uz MSI 2014. – 2022. gadā atkārtoti uzmērītajiem parauglaukum datiem aproksimētas koeficientu vērtības telpiskam atsevišķu koku caurmēra augšanas gaitas modelim (3.2.1. tabula). Vienādojumā atstāti visi bioloģiski loģiskie faktori, lai arī atsevišķos gadījumos tie nav būtiski, bet faktori, kas ir nebūtiski un ir bioloģiski neloģiski (koeficientam pretēja zīme) vienādojumos nav atstāti.

Telpiskajam atsevišķa koka šķērslaukuma prognožu modelim statistiskie rādītāji, pārbaudot to uz izstrādē izmantoto paraugkopu, ir augsti. Piemēram, vidējā periodiskā caurmēra pieauguma vidējā novirze nevienam no meža elementiem nepārsniedz 0,02 cm gadā, kas attiecinot to pret vidējo pieaugumu svārstās no -0,6% līdz 3,4% (3.1.4. tabula).

Telpiskajam atsevišķa koka šķērslaukuma pieauguma modelim, salīdzinot uzmērīto un prognozēto vidējo periodisko caurmēra pieaugumu, nav konstatētas korelatīvas novirzes ar koka vecumu, caurmēru, koka un audzes bonitāti jeb ražību un konkurences indeksu (3.1.7. – 3.1.12. attēli).

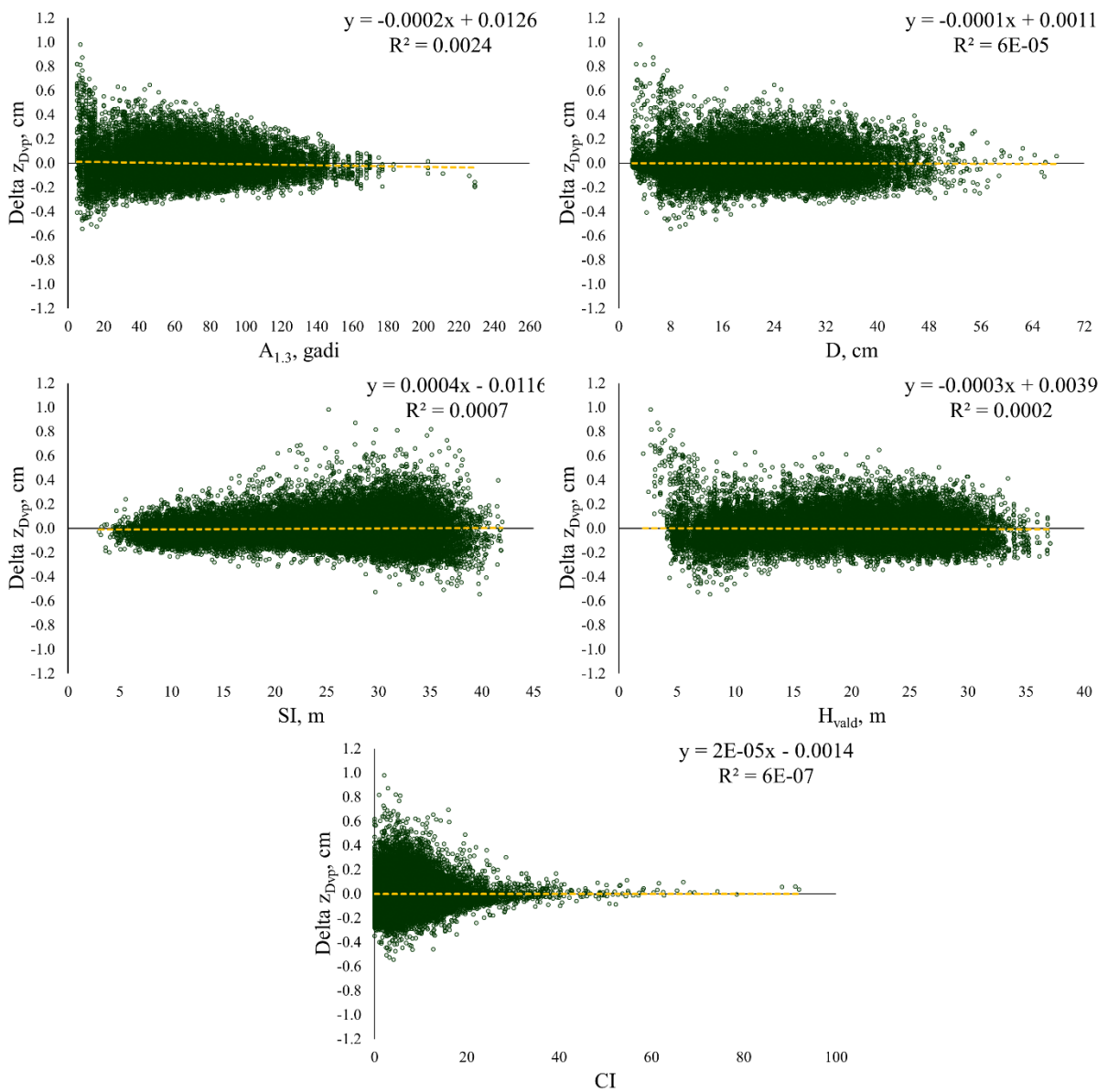
3.1.4. tabula. Atsevišķa koka caurmēra augšanas gaitas modeļa (3.1. formula) prognozētā ikgadējā caurmēra pieauguma statistiskie rādītāji

Suga	Vid	MRES	MRES%	AMRES	RMSE	RMSE%	MSE	VR	R2
Priede	0.21	0.00	-0.6	0.10	0.13	60.8	0.02	0.46	0.45
Egle	0.29	0.01	3.4	0.13	0.18	61.2	0.03	0.58	0.46
Bērzs	0.26	0.00	0.2	0.13	0.17	67.5	0.03	0.54	0.51
Melnalksnis	0.28	0.01	2.0	0.13	0.17	61.0	0.03	0.46	0.40
Apse	0.48	0.02	3.4	0.18	0.24	49.5	0.06	0.59	0.46
Baltalksnis	0.26	0.00	-0.5	0.12	0.16	60.1	0.03	0.49	0.47

Vid - aritmētiski vidējā uzmērītā vērtība, m; MRES - vidējā novirze, m; MRES% - procentuālā vidējā novirze; AMRES - vidējā absolūtā novirze, m; RMSE – standartnovirze, m; RMSE% - variācijas koeficients; MSE - vidējā kvadrātiskā kļūda, m; VR - dispersijas attiecība; R2 - determinācijas koeficients.

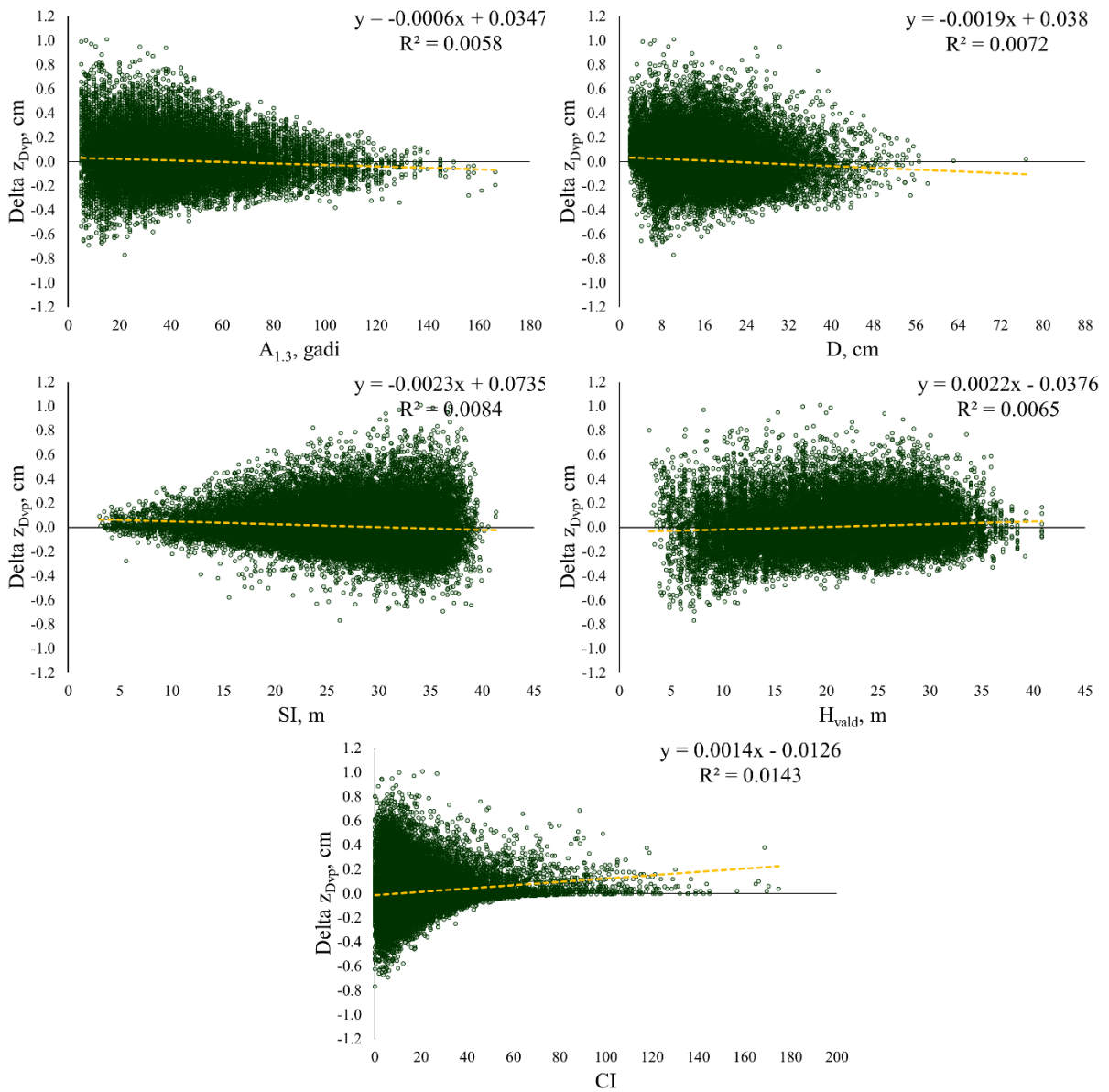
3.1.5. tabula. Telpiska atsevišķu koku caurmēra augšanas gaitas modeļa (3.6. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji

Suga	Koeficients	Vērtība	Standartklūda	95% ticamības intervāls	
				min	max
Priede	b0	-2.61041	0.06200	-2.73193	-2.48890
	b1	0.60943	0.00000	0.60943	0.60943
	b2	2.42029	0.00149	2.41736	2.42322
	b3	-6.80151	0.00947	-6.82008	-6.78295
	b4	1.21022	0.29805	0.62602	1.79442
	b5	-0.00034	0.00744	-0.01491	0.01424
	b6	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	b7	0.13505	0.03430	0.06782	0.20228
Egle	b8	-0.04088	0.12238	-0.28075	0.19899
	b0	-1.65765	0.13305	-1.91844	-1.39686
	b1	0.40100	0.00863	0.38409	0.41791
	b2	1.97164	0.04556	1.88234	2.06094
	b3	-5.45786	0.21751	-5.88419	-5.03154
	b4	0.99027	0.02075	0.94961	1.03094
	b5	-0.00995	0.00129	-0.01247	-0.00743
	b6	0.42101	0.04673	0.32941	0.51260
Bērzs	b7	0.13745	0.00795	0.12187	0.15302
	b8	-0.04281	0.00090	-0.04458	-0.04104
	b0	-4.92595	0.18493	-5.28843	-4.56347
	b1	0.77420	0.00998	0.75465	0.79376
	b2	5.30447	0.08930	5.12944	5.47950
	b3	-21.19908	0.52146	-22.22117	-20.17698
	b4	1.57587	0.02503	1.52681	1.62494
	b5	-0.02183	0.00158	-0.02493	-0.01872
Melnalksnis	b6	0.17716	0.06416	0.05140	0.30291
	b7	0.14394	0.01077	0.12283	0.16505
	b8	-0.02968	0.00115	-0.03192	-0.02743
	b0	-4.82322	0.36110	-5.53112	-4.11533
	b1	0.58079	0.02211	0.53745	0.62412
	b2	4.79223	0.16830	4.46228	5.12217
	b3	-18.82467	1.02638	-20.83678	-16.81256
	b4	1.69232	0.06185	1.57107	1.81358
Apse	b5	-0.05040	0.00453	-0.05928	-0.04153
	b6	0.40947	0.11885	0.17649	0.64246
	b7	0.20551	0.02438	0.15771	0.25331
	b8	-0.03855	0.00210	-0.04267	-0.03442
	b0	-5.36728	0.38619	-6.12443	-4.61012
	b1	0.44471	0.02148	0.40260	0.48682
	b2	5.56957	0.17245	5.23145	5.90768
	b3	-21.71346	1.07600	-23.82307	-19.60385
Baltalksnis	b4	2.03384	0.05180	1.93228	2.13539
	b5	-0.02837	0.00207	-0.03244	-0.02431
	b6	0.28127	0.12645	0.03336	0.52918
	b7	0.09114	0.01983	0.05226	0.13003
	b8	-0.02805	0.00225	-0.03246	-0.02364
	b0	-5.76654	0.31936	-6.39258	-5.14051
	b1	0.72772	0.02431	0.68008	0.77537
	b2	4.26775	0.12045	4.03163	4.50387
b3	-12.19740	0.57322	-13.32107	-11.07373	
Baltalksnis	b4	1.99719	0.05120	1.89681	2.09756
	b5	-0.13456	0.00903	-0.15227	-0.11686
	b6	0.57549	0.11088	0.35813	0.79284
	b7	0.20141	0.01935	0.16349	0.23934
	b8	-0.02614	0.00116	-0.02841	-0.02387



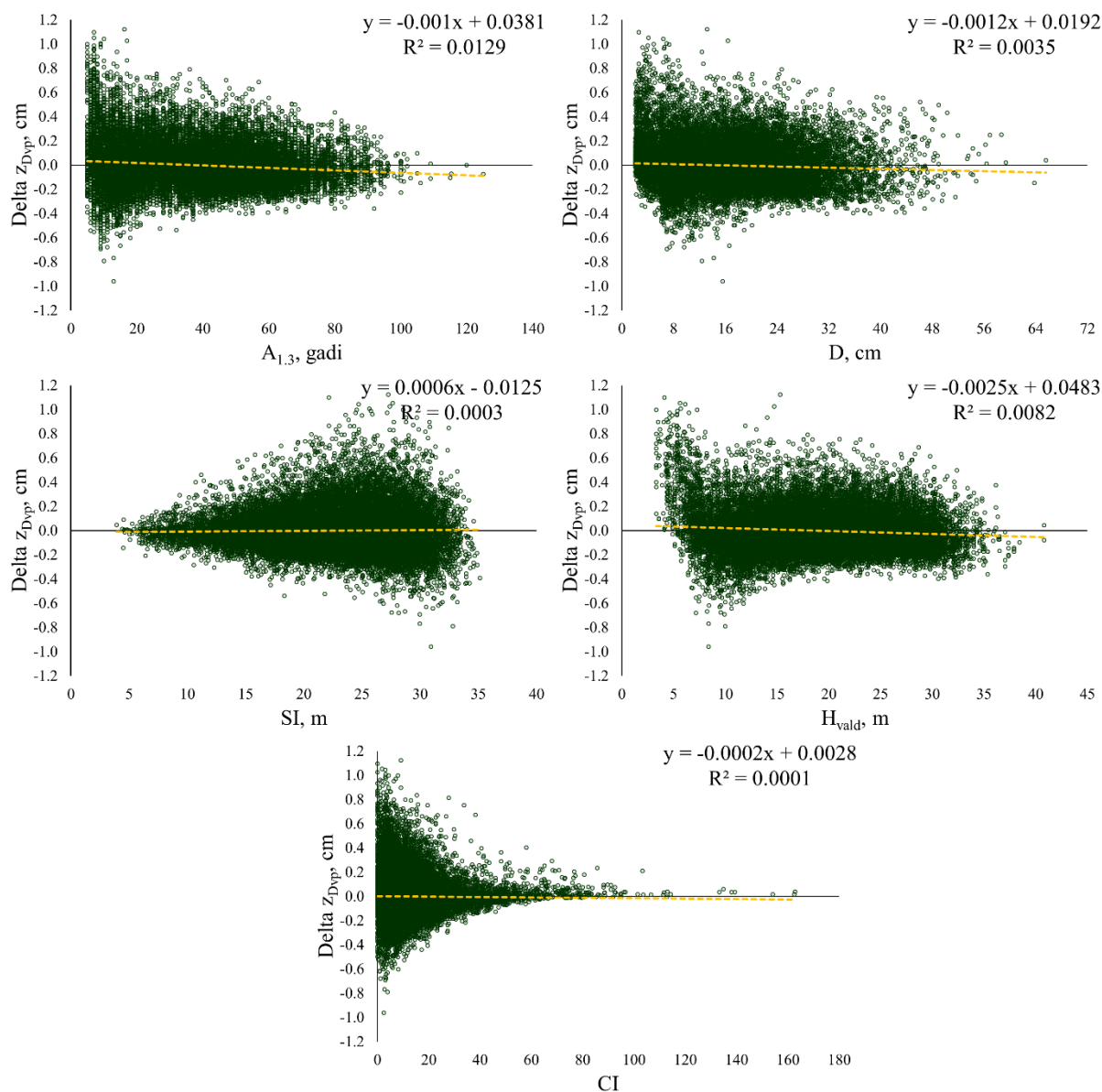
3.1.7. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.2. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu priedēm:

Delta Z_{dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzmērīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), A_{1,3} – koka (meža elementa) krūšaugstuma vecums, D_{1,3} – koka caurmērs 1.3 m augstumā, SI – koka bonitāte jeb augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi, B, M, A 50 gadi, Ba 20 gadi), H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), CI – konkurences indekss.



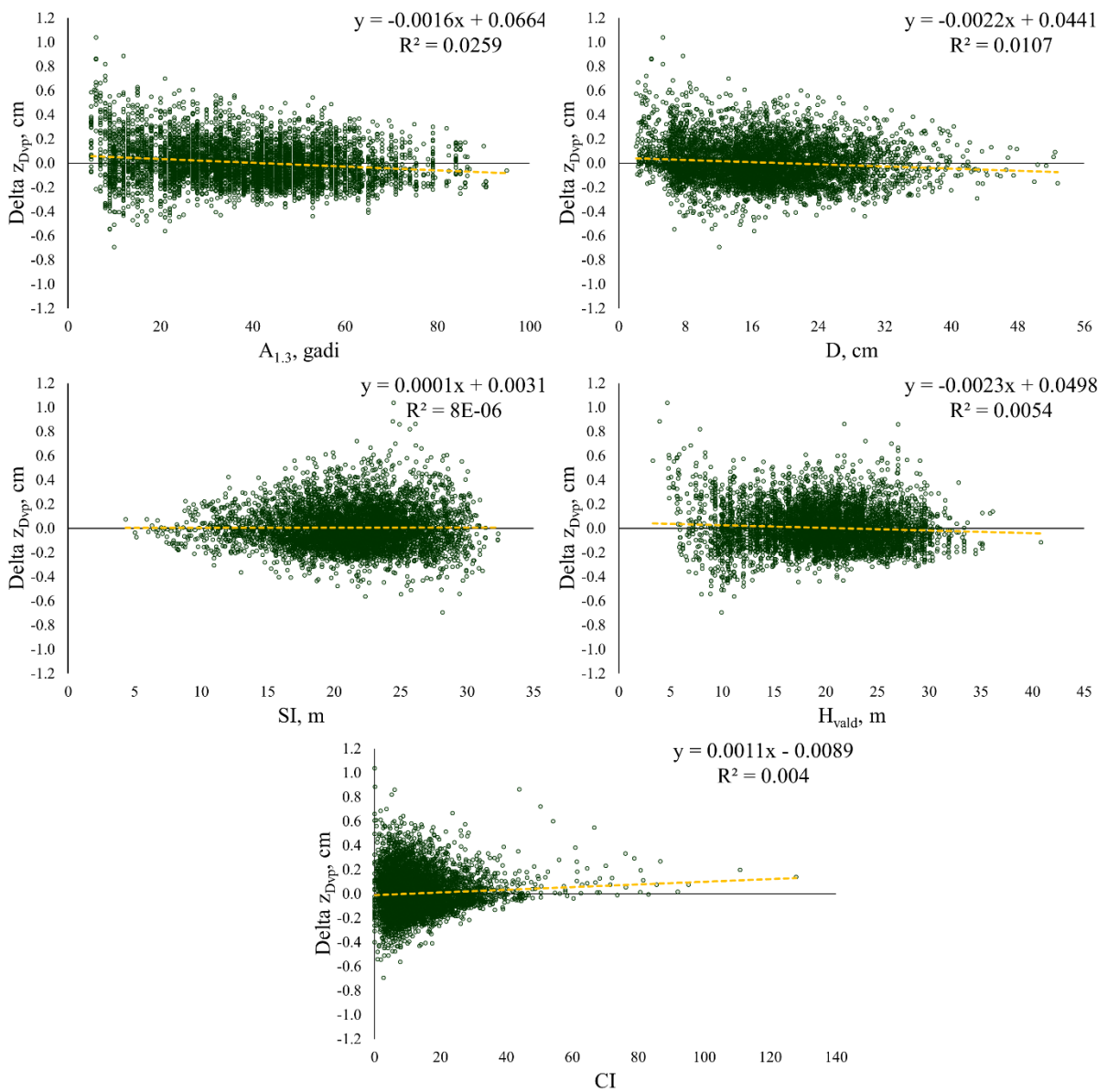
3.1.8. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.2. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu eglēm:

Delta Z_{dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzmērīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – koka (meža elementa) krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – koka caurmērs 1.3 m augstumā, SI – koka bonitāte jeb augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi, B, M, A 50 gadi, Ba 20 gadi), H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), CI – konkurences indekss.



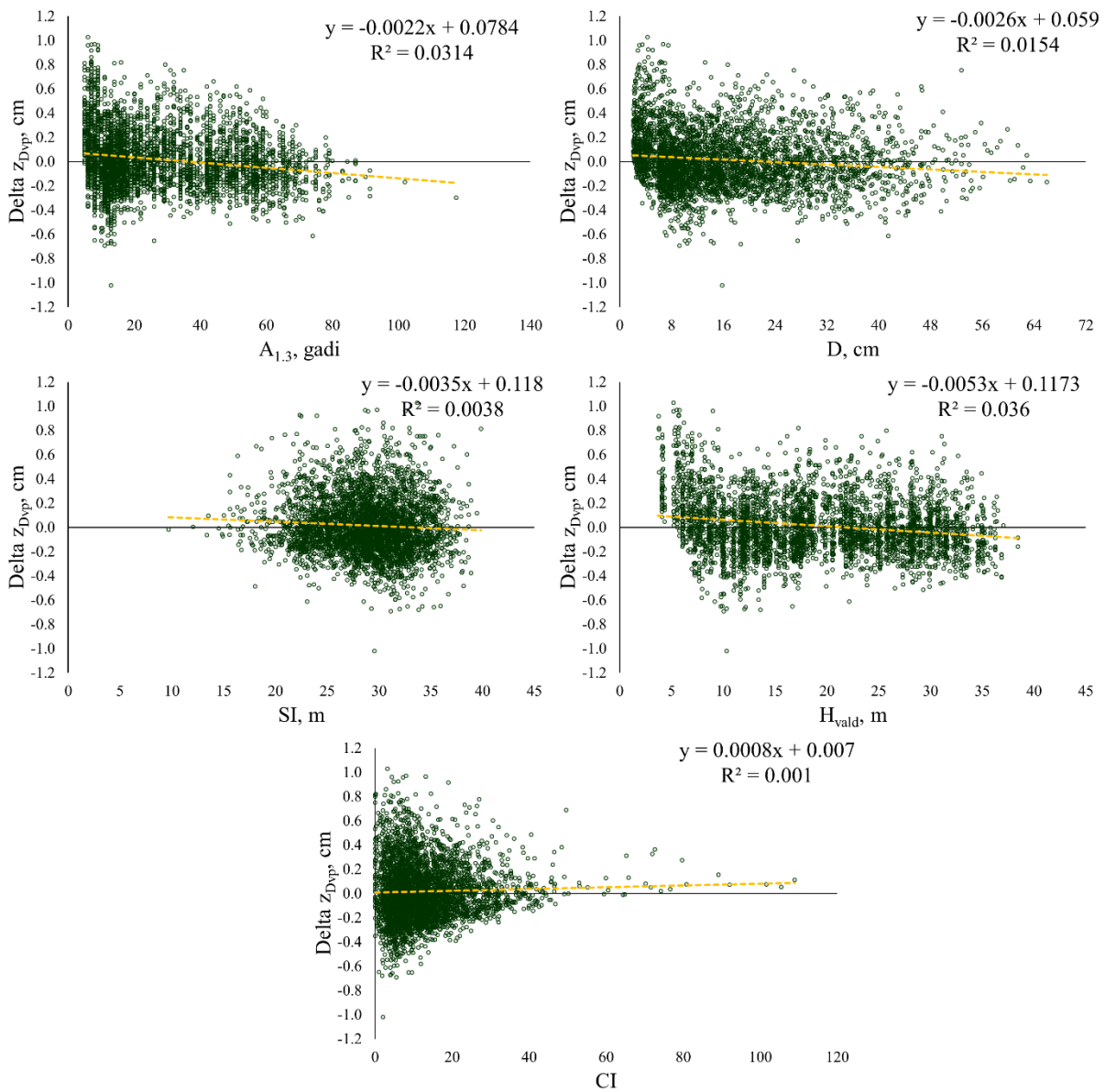
3.1.9. attēls. Starpība starp uzmērīto un prognozēto (3.2. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu bērziem:

Delta z_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzmērīto vērtību un prognozēto (Uzm-Progn), $A_{1,3}$ – koka (meža elementa) krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – koka caurmērs 1.3 m augstumā, SI – koka bonitāte jeb augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi, B, M, A 50 gadi, Ba 20 gadi), H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), CI – konkurences indekss.



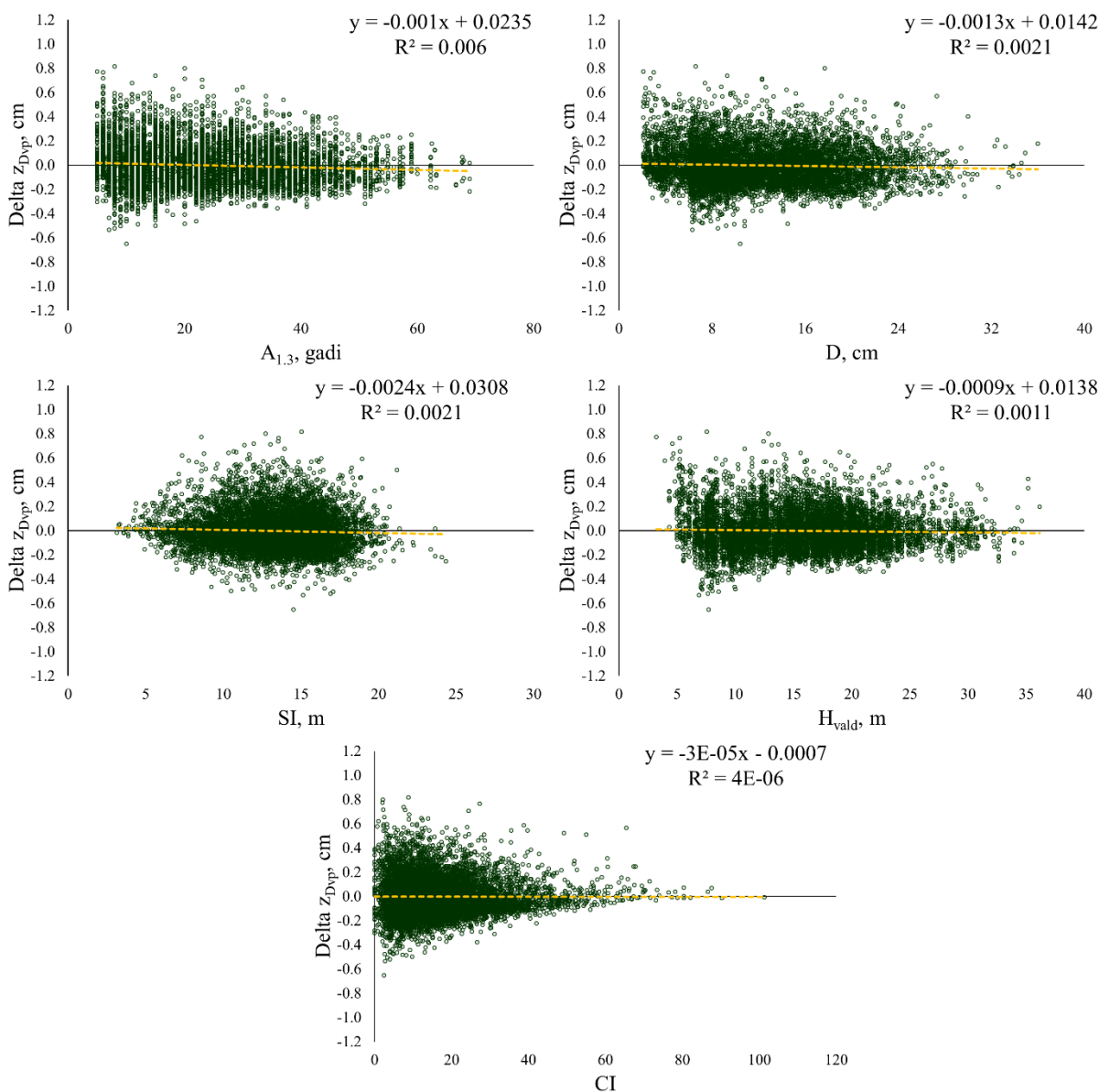
3.1.10. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto (3.2. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu melnalkšņiem:

Δz_{Dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto ($Uzm-Progn$), $A_{1,3}$ – koka (meža elementa) krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – koka caurmērs 1.3 m augstumā, SI – koka bonitāte jeb augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi, B, M, A 50 gadi, Ba 20 gadi), H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), CI – konkurences indekss.



3.1.11. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto (3.2. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu apsēm:

Delta Z_{dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto ($Uzm-Progn$), $A_{1,3}$ – koka (meža elementa) krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – koka caurmērs 1.3 m augstumā, SI – koka bonitāte jeb augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi, B, M, A 50 gadi, Ba 20 gadi), H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), CI – konkurences indekss.



3.1.12. attēls. Starpība starp uzņēmīto un prognozēto (3.2. formula) caurmēra vidējo periodisko pieaugumu baltalkšņiem:

Delta Z_{dvp} – vidējā periodiskā caurmēra pieauguma starpība starp uzņēmīto vērtību un prognozēto ($Uzm-Progn$), $A_{1,3}$ – koka (meža elementa) krūšaugstuma vecums, $D_{1,3}$ – koka caurmērs 1.3 m augstumā, SI – koka bonitāte jeb augstums bāzes vecumā (P, E 100 gadi, B, M, A 50 gadi, Ba 20 gadi), H_{vald} – mežaudzes valdaudzes augstums (koku, kas resnāki par mežaudzes I stāva valdošās koku sugas vidējo kvadrātisko caurmēru, aritmētiski vidējais augstums), CI – konkurences indekss.

Atmirums

Materiāls un metodika

Datu analīzē izmantoja datus par 95997 kokiem (priedes – 21749, egles – 30174, bērzi – 24979, melnalkšņi – 5802, apses – 4195, baltalkšņi – 9098) no 3670 MSI 2014. – 2022. gadā atkārtoti uzņēmītajiem parauglaukumiem. Analīzē izmanto tos kokus, kas no parauglaukuma centra neatrodas tālāk par 7,62 m, jo konkurences indekss rēķināts 5m rādiusā ap koku. Analīzē neiekļauj ekoloģiskos kokus. Tāpat no analīzes izslēdz parauglaukumus, kuros starpinventarizācijas periodā ir bijusi koku ciršana.

“Telpiska modeļa” gadījumā algoritms saglabājas tas pats, kas “netelpiskā modeļa” gadījumā (3.2. formula), vienīgi izmaiņas skar konkurences atmiruma modeli (3.3. formula).

Varbūtība, ka koks konkurences dēļ atmirs nākošo piecu gadu laikā “telpiska modeļa” gadījumā izmantots sekojošs vienādojums:

$$p_{comp5} = \frac{1}{1 + \exp(-(b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot BAL + b_3 \cdot CI))} \quad (3.3)$$

- kur p_{comp5} – varbūtība, ka koks konkurences dēļ atmirs nākošo piecu gadu laikā;
 d – koka krūšaugstuma caurmērs perioda sākumā, cm
 G – mežaudzes šķērslaukums perioda sākumā, m^2ha^{-1} ;
 BAL – šķērslaukuma summa kokiem, kas lielāki par konkrēto koku, m^2ha^{-1} ;
 $b_0 - b_3$ – koeficienti.

Atsevišķu koku atmiruma varbūtība modelēta datorprogrammā SPSS 14.0 for Windows, izmantojot rīku *Binary Logistic Regression*.

Rezultāti

Loģistiskās binārās regresijas analīzes rezultātā iegūtie vienādojumu koeficienti apkopoti 3.1.6. tabulā. Ar atsevišķa koka atmiruma modeli tiek prognozēta varbūtība, vai koks aizies bojā konkurences dēļ nākamo piecu gadu laikā.

3.1.6. tabula. Netelpiska atsevišķu koku atmiruma modeļa (3.3. formula) 2023. gadā aproksimētās koeficientu vērtības un to statistiskie rādītāji

Koka suga	Faktors	Koeficients	Vērtība	Standartklūda	Būtiskums
Priede	d	b1	-0.0666	0.0055	0.0000
	BAL	b2	0.0665	0.0036	0.0000
	CI	b3	0.0325	0.0038	0.0000
	konstante	b0	-3.1877	0.1239	0.0000
Egle	d	b1	-0.0100	0.0045	0.0276
	BAL	b2	0.0191	0.0024	0.0000
	CI	b3	0.0148	0.0014	0.0000
	konstante	b0	-3.5091	0.1046	0.0000
Bērzs	d	b1	-0.0523	0.0053	0.0000
	BAL	b2	0.0549	0.0028	0.0000
	CI	b3	0.0253	0.0017	0.0000
	konstante	b0	-3.3440	0.0941	0.0000
Melnalksnis	d	b1	-0.0517	0.0126	0.0000
	BAL	b2	0.0714	0.0070	0.0000
	CI	b3	0.0248	0.0050	0.0000
	konstante	b0	-3.8671	0.2766	0.0000
Apse	d	b1	-0.1055	0.0113	0.0000
	BAL	b2	0.0741	0.0064	0.0000
	CI	b3	0.0221	0.0044	0.0000
	konstante	b0	-2.2821	0.1609	0.0000
Baltalksnis	d	b1	-0.0487	0.0085	0.0000
	BAL	b2	0.0737	0.0040	0.0000
	CI	b3	0.0257	0.0027	0.0000
	konstante	b0	-3.0845	0.1353	0.0000

Secinājumi

Aprēķināti jauni koeficienti iepriekš izvēlētajiem individuāla koka augšanas gaitas modeļiem. Modeļi ir izmantojami stratēģisku lēmumu pieņemšanai, statistiski ticamākā atsevišķa koka augšanas gaitas prognozēšanai, bet atsevišķa koka augšanas gaitas prognozes var ievērojami atšķirties no faktiskās augšanas gaitas.

Telpisko modeļu prognozes ir tikai nedaudz labākās (precīzākas nekā netelpisko modeļu prognozes, tādēļ sākotnēji stratēģisko lēmumu pieņemšanai var izmantot arī netelpiskos modeļus.

3.2. Individuāla koka augšanas gaitas modeļi, kas balstītu uz attālās izpētes metožu pārmērījumu datiem

3.2.1. LĢIA LiDAR datu / ortofoto datu apstrāde (KKC parauglaukumi)

Materiāls un metodika

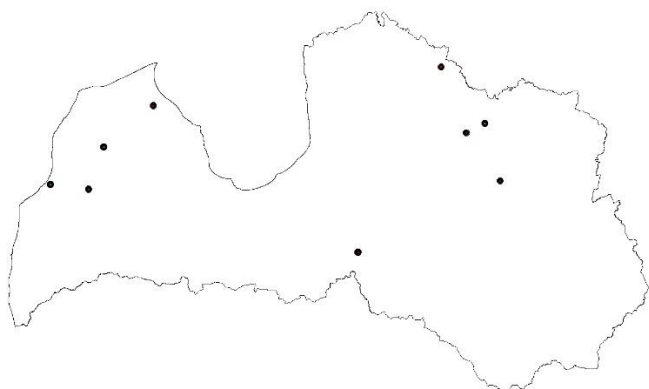
Pētījuma vajadzībām izvēlēti 10 objekti no 2022. g. vai 2023. g. sākumā pārmērītajiem objektiem, kuros lauku darbos veikta individuāla koka uzmērīšana vietējā koordinātu sistēmā, un kuri atbilda prasībām, kādas nosaka lidojuma drošības nosacījumi. Izvēlēto pētījumu objektu saraksts ir 3.2.1. tabulā un izvietojuma shēma 3.2.1. attēlā.

No LĢIA mājas lapas (<https://www.lgia.gov.lv/lv/Digit%C4%81lais%20virsmas%20modelis>) lejuplādēti nogabaliem atbilstošo karšu lapu .las faili un aerofoto 5. un 6. cikla CIR un RGB attēli. LĢIA LiDAR skenēšana Kurzemē (DK, ZK) veikta 2016.g. pavasarī, Vidusdaugavas (VD) objektiem - 2015.g. pavasarī, bet Austrumvidzemes objektiem – 2019.g. un 2018.g. pavasarī, kas nozīmē, ka lāzerskenēšana veikta 2 - 3 gadus pirms parauglaukumu ierīkošanas un eksperimentu iekārtošanas, izņemot Austrumvidzemi, kurā LĢIA lidar dati iegūti pēc parauglaukumu ierīkošanas.

Datorprogrammā FUSION 4.21. aprēķināti digitālais virsmas modelis (DTM) un koku vainagu augstumu modelis (CHM) 1m² lielam pikselim.

3.2.1. tabula. KKC parauglaukumi, kuriem veikta 3D attēlu ieguve ar dronu

Nrpk	Reģions	Objekts	PL skaits	Dmin, cm	MT	Bon	A, gadi	Sastāvs
1	AV	101-425-13	10	6,1	Mr	I	67	10P
2	AV	104-391-15	12	6,1	As	Ia	45	10E+B
3	AV	110-74-1	10	6,1	Ks	I	48	10P ats.E
4	AV	111-86-5	10	4,1	Dm	Ia	22	10E ats.B
5	DK	201-399-14	12	4,1	Dm	Ia	27	9E1B ats.P,Oz
6	VD	505-210-16	12	4,1	Dm	Ia	29	10E+ats.P
7	ZK	703-407-7	10	4,1	Sl	II	33	10P
8	ZK	708-262-12	12	6,1	Am	Ia	42	10P ats.E
9	ZK	710-291-22	12	4,1	Mr	III	55	9P1B
10	ZK	710-291-26	12	4,6	Ln	II	56	9P1E+B



3.2.1. attēls. Krājas kopšanas ciršu objektu, kuros iegūti dronu attēli, shematisks izvietojums Latvijā

Rezultāti

Atbilstoši metodikai visiem 10 objektiem izveidoti CHM attēli ar 1m pikseli, kas saglabāti .tif formātā. Skat. piemēru 3.2.2. attēlā.



3.2.2. attēls. Piemērs pētījumu objektu CHM noteikšanai 101-425-13 objektā. (CHM veidots no LĢIA (c) las datu failiem.

3.2.2. Aerofotoainu ieguve izmantojot multispektrālo kameru, kas uzmontēta uz drona

Materiāls un metodika

3.1. tabulā uzskaitītajos objektos aerofoto ainas iegūtas ar dronu DJI ar CMOS 20MP RGB kameru (attēlu izmērs 5472x3078). Rastra izmērs ~5cm ortofotoattēla pikseli. Lidojums tika plānots izmantojot UGCS ground station software. Datu tālākajā apstrādē izmantota datorprogramma AgisoftMetashape Professional Edition 1.8.4.. Attēlu pārveide LAS formātā veikta, izmantojot CloudCompare. Agisoft balstās uz algoritmiem, kuru pamatā ir attēlu stereo savienošana un

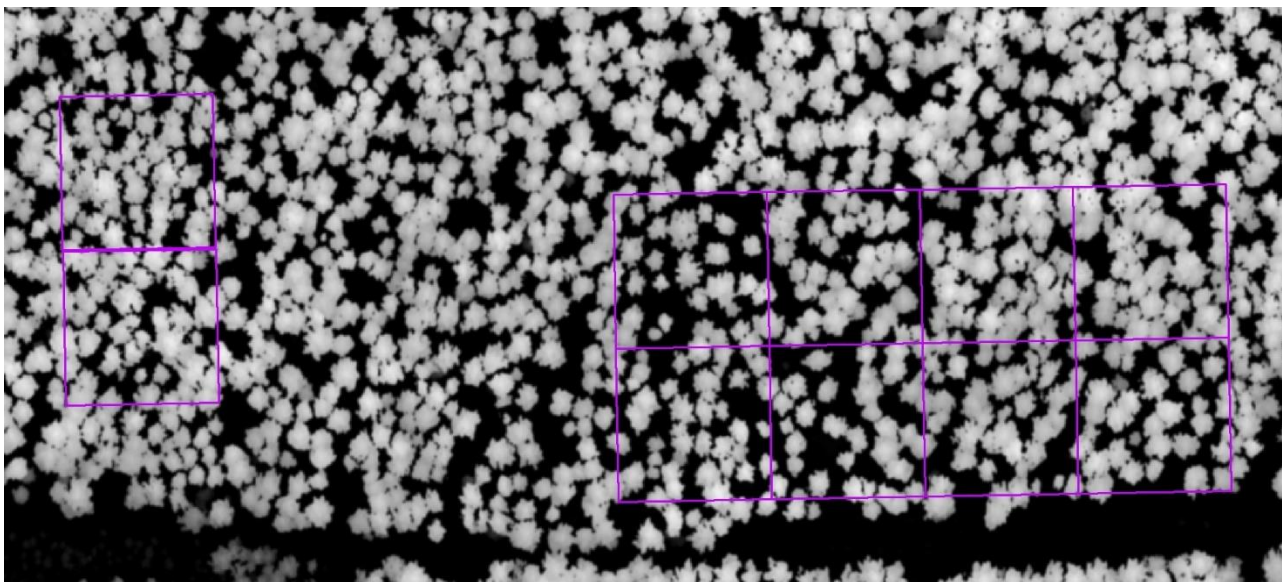
Structure-from-Motion metode (Verhoeven et al., 2012). Virsmas modeļa izveidošanai tika izmantots blīvais punktu mākonis ar augstāko kvalitāti. Izveidotais virsmas modelis tika eksportēts GeoTiff formātā. Visos gadījumos izveidotajiem modeļiem bija 10 cm pikseļu izšķirtspēja. Papildus tam ar dronu tika iegūti arī lāzerskenēšanas dati.

Rezultāti

Piemērs pētījuma objektu ortofotomozaīkai atspoguļots 3.2.3. attēlā. Savukārt no drona datiem izveidota CHM piemērs atspoguļots 3.2.4. attēlā.



3.2.3. attēls. Piemērs pētījumu objektu ortofotomozaīkai 101-425-13 objektā. Mozaīka veidota no drona RGB datu failiem.



3.2.4. attēls. Piemērs pētījumu objektu CHM 101-425-13 objektā. (CHM veidots drona LiDAR datiem).

3.2.3. Individuāla koka detektēšana KKC parauglaukumos, balstot uz attālās izpētes datiem

Materiāls un metodika

Individuāli koku augstumi no virsmas modeļa izdalīti, aprēķinot vietējo minimum (Local minimum) izmantojot QGIS 3.22 programmā pieejamo watershed segmentation algoritmu, kas pielāgots individuālu koku augstuma noteikšanai no fotogrammetrijas vai LiDAR punktu mākoņiem radīta CHM modeļa. Virsmas modelis tika apstrādāts, izmantojot Gausa izlīdzināšanas rīku, lai izslēgtu lokālas nevienādības un noteiktu lokālos maksimumus, kas tika uzskatīti par individuāliem kokiem. Minimālais punkta augstums tika norādīts 5 m. Iegūtais rastra attēls tika konvertēts uz punktu vektor slāni, kur katrs punkts atbilda individuālam kokam. Noslēgumā aprēķinātais koku augstums no virsmas modeļa salīdzināts ar parauglaukumos uzmērīto koku augstumu.

Rezultāti

Informācija par koku skaitu parauglaukumos pēc uzmērīšanas dabā 2017./2018. g. un no LĢIA .las failu datiem aprēķinātie CHM atsoguļota 3.2.2. tabulā.

3.2.2. tabula. Krājas kopšanas ciršu parauglaukumu dati pēc mērījumiem dabā (2017.g.) un no LĢIA las datiem aprēķinātie

Mērījums dabā							Parametri no LĢIA las CHM datiem				
Objekts	P L	D, cm	H, m	G, m ² ha ⁻¹	M, m ³ ha ⁻¹	N, ha ⁻¹	Vidējais H, m	Reģistrēti koki	N, ha ⁻¹	delta H	gad s
101-425-13	-		22.8	-	-	-	21.2	255	-	1.6	2019
101-425-13	1	22.4	22.7	26.3	285.7	666.7	21.6	27	300	1.1	2019
101-425-13	2	25.0	24.0	24.6	275.1	500.0	22.6	24	267	1.4	2019
101-425-13	3	24.7	22.7	13.9	147.0	288.9	20.5	20	222	2.2	2019
101-425-13	4	23.1	23.4	18.7	203.1	444.4	20.5	22	244	2.9	2019
101-425-13	5	24.3	22.7	26.2	284.3	566.7	20.9	35	389	1.9	2019
101-425-13	6	23.9	22.5	23.8	253.6	533.3	21.6	25	278	0.9	2019
101-425-13	7	22.9	21.9	19.2	199.4	466.7	21.6	25	278	0.3	2019
101-425-13	8	24.4	23.5	14.1	153.5	300.0	20.8	25	278	2.7	2019
101-425-13	9	22.3	22.1	18.3	188.7	466.7	20.5	25	278	1.6	2019
101-425-13	0	24.9	22.8	19.0	202.4	388.9	21.6	27	300	1.2	2019
104-391-15	-		21.0	-	-	-	19.0	321	-	2.0	2019
104-391-15	1	22.6	21.1	23.6	256.1	600.0	20.3	22	244	0.8	2019

104-391-15	2	23.0	22.3	28.4	318.6	700.0	19.3	31	344	2.9	2019
104-391-15	3	19.6	18.8	18.0	174.4	600.0	17.4	28	311	1.4	2019
104-391-15	4	25.5	22.5	29.3	322.0	588.9	20.1	25	278	2.4	2019
104-391-15	5	22.6	20.7	30.9	324.2	788.9	19.0	30	333	1.7	2019
104-391-15	6	22.7	21.0	20.2	212.2	500.0	18.8	29	322	2.2	2019
104-391-15	7	22.2	20.6	16.3	168.5	422.2	18.8	26	289	1.7	2019
104-391-15	8	17.8	18.8	16.9	173.2	677.8	17.1	28	311	1.6	2019
104-391-15	9	27.6	22.6	24.2	260.8	411.1	20.1	27	300	2.5	2019
104-391-15	10	25.6	21.6	13.7	142.6	266.7	19.6	21	233	2.0	2019
104-391-15	11	20.9	21.2	16.9	185.3	500.0	19.1	23	256	2.1	2019
104-391-15	12	19.9	20.6	32.4	357.6	1000.0	19.1	31	344	1.5	2019
110-74-1	-	-	19.5	-	-	-	18.2	274	-	1.3	2019
110-74-1	1	16.9	19.3	22.5	214.8	1011.1	17.9	29	322	1.4	2019
110-74-1	2	17.2	19.2	16.3	152.7	700.0	18.4	30	333	0.9	2019
110-74-1	3	19.6	20.5	18.5	184.4	611.1	18.6	26	289	1.9	2019
110-74-1	4	17.7	18.6	27.9	256.2	1133.3	18.9	30	333	-0.3	2019
110-74-1	5	21.3	20.3	13.8	134.1	388.9	18.8	26	289	1.5	2019
110-74-1	6	16.2	18.8	17.1	158.0	833.3	17.6	28	311	1.2	2019
110-74-1	7	19.3	19.9	18.6	178.1	633.3	18.4	27	300	1.6	2019
110-74-1	8	18.9	19.8	12.5	119.4	444.4	17.1	27	300	2.7	2019
110-74-1	9	18.0	19.9	23.4	229.5	922.2	18.8	25	278	1.2	2019
110-74-1	10	16.2	18.7	26.0	242.3	1266.7	17.8	26	289	0.8	2019
111-86-5		16.1	13.8	-	-	-	8.6	333	-	5.2	2018
111-86-5	1	16.9	14.1	18.6	136.1	833.3	8.9	33	367	5.2	2018
111-86-5	2	17.9	12.9	8.1	51.9	333.3	8.3	34	378	4.6	2018
111-86-5	3	15.2	13.3	23.9	170.4	1377.8	8.7	32	356	4.6	2018

111-86-5	4	15.8	13.6	14.9	106.5	744.4	8.8	33	367	4.8	2018
111-86-5	5	16.2	14.3	15.2	112.3	755.6	8.6	42	467	5.7	2018
111-86-5	6	15.7	14.0	13.4	99.9	722.2	9.0	29	322	4.9	2018
111-86-5	7	17.3	14.9	10.5	79.4	444.4	8.4	33	367	6.5	2018
111-86-5	8	15.9	13.8	18.8	135.6	944.4	8.7	32	356	5.1	2018
111-86-5	9	14.7	13.8	13.7	102.6	811.1	8.5	31	344	5.3	2018
111-86-5	10	15.1	13.6	22.9	167.7	1322.2	8.4	34	378	5.2	2018
201-399-14			15.6	-	-	-	14.0	398	-	1.6	2016
201-399-14	1	15.6	14.5	27.4	213.3	1477.8	13.5	27	300	1.1	2016
201-399-14	2	15.7	14.9	31.1	244.7	1577.8	14.7	34	378	0.2	2016
201-399-14	3	15.7	14.5	29.2	224.3	1577.8	11.2	31	344	3.3	2016
201-399-14	4	16.9	15.2	32.1	253.7	1600.0	12.7	33	367	2.5	2016
201-399-14	5	15.8	16.0	34.9	300.5	1855.6	14.0	36	400	2.0	2016
201-399-14	6	15.3	16.0	32.9	284.5	1866.7	13.0	36	400	3.0	2016
201-399-14	7	16.7	15.3	32.8	257.2	1833.3	14.9	36	400	0.4	2016
201-399-14	8	16.0	15.6	35.4	294.2	1977.8	14.8	33	367	0.9	2016
201-399-14	9	15.8	15.8	29.8	251.1	1788.9	15.6	33	367	0.2	2016
201-399-14	10	15.8	16.3	33.6	296.9	1833.3	14.7	36	400	1.6	2016
201-399-14	11	15.9	16.6	33.6	299.4	1822.2	13.7	30	333	3.0	2016
201-399-14	12	16.1	16.1	31.6	273.7	1733.3	14.7	33	367	1.4	2016
505-210-16			14.1	-	-	-	9.8	394	-	4.3	2015
505-210-16	1	17.2	15.4	30.7	246.6	1344.4	11.0	33	367	4.4	2015
505-210-16	2	16.9	15.4	32.4	264.2	1455.6	10.7	32	356	4.7	2015
505-210-16	3	14.7	14.0	29.1	225.3	1711.1	10.4	33	367	3.5	2015
505-210-16	4	14.6	13.7	28.7	215.7	1700.0	9.9	33	367	3.8	2015
505-210-16	5	14.3	14.1	30.2	235.9	1888.9	10.5	31	344	3.5	2015

505-210-16	6	14.0	13.6	27.0	203.0	1744.4	9.8	35	389	3.8	2015
505-210-16	7	14.8	13.6	27.0	201.5	1600.0	10.2	34	378	3.4	2015
505-210-16	8	14.3	13.5	27.3	202.5	1722.2	9.3	32	356	4.2	2015
505-210-16	9	13.4	14.4	30.4	249.8	2166.7	9.5	35	389	4.9	2015
505-210-16	10	14.1	13.8	26.8	209.2	1744.4	9.0	31	344	4.8	2015
505-210-16	11	13.8	14.7	29.7	249.5	2000.0	9.9	34	378	4.8	2015
505-210-16	12	13.5	13.5	28.3	222.3	1977.8	7.1	31	344	6.4	2015
703-407-7	-	-	10.5	-	-	-	9.3	251	-	1.2	2016
703-407-7	1	12.8	10.5	18.2	107.3	1411.1	9.7	29	322	0.9	2016
703-407-7	2	12.1	10.1	16.2	92.2	1422.2	9.3	20	222	0.8	2016
703-407-7	3	11.8	10.3	17.2	99.1	1566.7	9.3	24	267	1.0	2016
703-407-7	4	12.0	11.3	16.3	101.3	1433.3	9.5	27	300	1.8	2016
703-407-7	5	11.3	10.1	17.2	99.3	1733.3	8.9	26	289	1.3	2016
703-407-7	6	11.7	10.5	17.2	101.1	1600.0	9.3	21	233	1.1	2016
703-407-7	7	11.2	10.6	16.6	98.7	1677.8	9.1	24	267	1.5	2016
703-407-7	8	12.1	10.9	17.3	104.8	1511.1	9.6	29	322	1.3	2016
703-407-7	9	10.9	10.1	16.8	98.3	1800.0	9.2	24	267	1.0	2016
703-407-7	10	11.5	10.7	17.0	102.1	1644.4	9.4	27	300	1.3	2016
708-262-12	-	-	19.1	-	-	-	16.3	352	-	2.8	2016
708-262-12	1	23.7	21.2	40.6	410.0	922.2	18.8	35	389	2.4	2016
708-262-12	2	21.9	18.5	33.1	296.1	877.8	17.2	24	267	1.2	2016
708-262-12	3	24.1	20.1	36.6	348.5	800.0	17.4	30	333	2.7	2016
708-262-12	4	24.1	19.7	33.9	313.6	744.4	16.3	25	278	3.4	2016
708-262-12	5	22.3	20.0	37.7	358.7	944.4	17.2	27	300	2.7	2016
708-262-12	6	22.8	19.4	34.5	319.0	833.3	16.0	36	400	3.4	2016
708-262-12	7	21.4	19.2	33.8	313.5	933.3	14.8	31	344	4.4	2016

708-262-12	8	21.7	18.8	31.9	289.9	855.6	13.0	30	333	5.8	2016
708-262-12	9	20.8	18.8	34.5	314.8	988.9	16.9	28	311	1.9	2016
708-262-12	10	22.4	18.0	37.1	320.4	922.2	15.6	30	333	2.4	2016
708-262-12	11	22.3	18.4	33.3	294.9	855.6	16.1	32	356	2.3	2016
708-262-12	12	20.7	16.9	30.8	256.3	911.1	15.5	24	267	1.4	2016
710-291-22			14.7				14.7	678		0.0	2016
710-291-22	1	13.6	13.7	27.4	200.8	1911.1	13.2	50	556	0.5	2016
710-291-22	2	12.7	12.5	20.2	139.2	1566.7	12.5	42	467	-0.1	2016
710-291-22	3	13.3	13.4	27.3	197.4	2022.2	13.8	58	644	-0.5	2016
710-291-22	4	13.9	14.6	22.9	180.7	1477.8	13.9	54	600	0.7	2016
710-291-22	5	14.7	14.6	28.0	216.0	1700.0	15.3	58	644	-0.7	2016
710-291-22	6	13.8	14.4	21.5	164.9	1388.9	14.6	38	422	-0.2	2016
710-291-22	7	14.7	15.3	32.2	254.9	1933.3	15.3	72	800	0.0	2016
710-291-22	8	14.6	15.0	23.6	189.2	1366.7	14.5	54	600	0.6	2016
710-291-22	9	14.5	15.5	27.9	223.8	1722.2	15.2	60	667	0.3	2016
710-291-22	10	16.4	16.9	24.4	213.2	1111.1	15.6	52	578	1.3	2016
710-291-22	11	14.4	15.2	28.9	233.5	1744.4	15.2	70	778	0.0	2016
710-291-22	12	15.3	14.9	25.3	192.8	1400.0	15.6	70	778	-0.7	2016
710-291-26			19.0				17.6	384		1.4	2016
710-291-26	1	17.7	17.7	30.5	273.9	1255.6	16.3	31	344	1.4	2016
710-291-26	2	17.3	18.3	33.5	308.3	1466.7	17.4	35	389	1.0	2016
710-291-26	3	17.7	18.1	34.6	311.0	1555.6	16.9	31	344	1.2	2016
710-291-26	4	17.5	19.2	31.0	292.9	1344.4	18.0	32	356	1.2	2016
710-291-26	5	18.3	19.4	34.8	336.9	1344.4	17.7	34	378	1.7	2016
710-291-26	6	17.8	18.3	31.4	283.7	1277.8	17.7	27	300	0.5	2016
710-291-26	7	19.0	19.6	31.3	301.3	1122.2	17.7	32	356	1.9	2016

710-291-26	8	18.4	19.5	28.4	268.9	1055.6	17.6	30	333	1.9	2016
710-291-26	9	19.5	18.8	36.3	341.5	1244.4	17.4	30	333	1.4	2016
710-291-26	10	20.5	20.5	29.5	291.1	877.8	18.0	32	356	2.6	2016
710-291-26	11	18.8	17.6	32.4	291.0	1277.8	17.1	30	333	0.5	2016
710-291-26	12	19.8	20.7	31.0	305.8	1066.7	19.0	40	444	1.7	2016

Savukārt mērījumu dati 2022.g. un 2023.g., salīdzinājumā ar 2023.g. - no dronu datiem iegūtie augstuma un skaita rādītāji atspoguļoti 3.2.3. tabulā.

3.2.2. tabula. Krājas kopšanas ciršu parauglaukumu dati pēc mērījumiem dabā (2022/2023) un no dronu CHM datiem aprēķinātie

Uzmērīts dabā 2022/2023					Drons 2023				
Objekts	PL	D, cm	H, m	N, ha-1	H, m	n	N, ha-1	delta n	delta h
101-425-13		-	23.5		22.71	593	-	-	0.8
101-425-13	1	23.0	22.9	666.7	22.41	84	933.3	-266.7	0.5
101-425-13	2	26.2	24.2	500.0	23.42	74	822.2	-322.2	0.7
101-425-13	3	25.7	24.1	288.9	22.35	47	522.2	-233.3	1.7
101-425-13	4	24.0	23.5	433.3	22.48	59	655.6	-222.2	1.0
101-425-13	5	24.9	23.5	566.7	22.81	62	688.9	-122.2	0.7
101-425-13	6	24.3	23.2	533.3	23.31	77	855.6	-322.2	-0.2
101-425-13	7	23.7	23.7	466.7	22.99	49	544.4	-77.8	0.7
101-425-13	8	25.6	24.2	300.0	23.28	35	388.9	-88.9	0.9
101-425-13	9	23.0	22.5	466.7	21.27	51	566.7	-100.0	1.3
101-425-13	10	25.7	23.4	355.6	22.48	55	611.1	-255.6	0.9
104-391-15		-	23.1	-	22.24	571	-	-	0.9
104-391-15	1	25.1	23.8	477.8	22.72	51	566.7	-88.9	1.1
104-391-15	2	24.8	23.5	622.2	22.54	54	600.0	22.2	0.9
104-391-15	3	22.8	21.4	444.4	20.94	44	488.9	-44.4	0.4
104-391-15	4	28.0	23.4	533.3	23.37	61	677.8	-144.4	0.0
104-391-15	5	24.3	23.2	600.0	21.26	64	711.1	-111.1	1.9
104-391-15	6	24.6	23.2	311.1	21.63	36	400.0	-88.9	1.6
104-391-15	7	24.4	23.4	366.7	22.20	46	511.1	-144.4	1.2
104-391-15	8	19.8	21.2	611.1	20.91	56	622.2	-11.1	0.3
104-391-15	9	29.8	23.9	311.1	23.12	45	500.0	-188.9	0.8
104-391-15	10	28.4	24.2	77.8	21.62	14	155.6	-77.8	2.6
104-391-15	11	23.5	23.2	388.9	21.56	35	388.9	0.0	1.6
104-391-15	12	21.5	22.8	933.3	23.80	65	722.2	211.1	-1.0
110-74-1		-	20.7	-	19.67	831	-	-	1.0
110-74-1	1	18.5	20.9	944.4	19.60	97	1077.8	-133.3	1.3
110-74-1	2	19.1	21.2	655.6	20.59	70	777.8	-122.2	0.6
110-74-1	3	21.0	21.4	600.0	20.11	88	977.8	-377.8	1.3
110-74-1	4	19.2	21.4	1055.6	20.52	99	1100.0	-44.4	0.9

110-74-1	5	22.9	21.2	388.9	19.49	65	722.2	-333.3	1.7
110-74-1	6	17.6	19.7	800.0	18.94	88	977.8	-177.8	0.7
110-74-1	7	20.9	20.9	622.2	20.17	67	744.4	-122.2	0.8
110-74-1	8	21.2	20.9	444.4	19.39	54	600.0	-155.6	1.5
110-74-1	9	19.3	20.0	877.8	19.68	84	933.3	-55.6	0.3
110-74-1	10	17.5	19.0	1144.4	18.63	119	1322.2	-177.8	0.4
111-86-5	-		16.7	-	16.07	691	-	0.0	0.7
111-86-5	1	20.2	17.3	788.9	16.27	65	722.2	66.7	1.0
111-86-5	2	21.5	15.5	311.1	14.11	42	466.7	-155.6	1.4
111-86-5	3	17.4	16.9	1311.1	16.39	97	1077.8	233.3	0.5
111-86-5	4	19.4	17.0	733.3	15.99	70	777.8	-44.4	1.1
111-86-5	5	19.8	16.9	733.3	16.59	73	811.1	-77.8	0.3
111-86-5	6	20.4	17.4	688.9	16.31	63	700.0	-11.1	1.1
111-86-5	7	21.7	16.8	411.1	16.11	39	433.3	-22.2	0.7
111-86-5	8	19.4	16.9	911.1	16.42	78	866.7	44.4	0.4
111-86-5	9	18.7	16.4	766.7	15.89	62	688.9	77.8	0.5
111-86-5	10	17.7	16.1	1222.2	15.84	102	1133.3	88.9	0.3
201-399-14	-		18.7	-	17.26	1215	-	-	1.4
201-399-14	1	21.4	18.9	444.4	16.46	80	888.9	-444.4	2.4
201-399-14	2	20.2	16.6	711.1	15.95	102	1133.3	-422.2	0.7
201-399-14	3	17.8	16.9	755.6	15.25	90	1000.0	-244.4	1.6
201-399-14	4	18.3	17.6	1544.4	16.90	144	1600.0	-55.6	0.7
201-399-14	5	19.5	20.1	1022.2	18.70	97	1077.8	-55.6	1.4
201-399-14	6	18.8	19.9	911.1	17.49	100	1111.1	-200.0	2.4
201-399-14	7	22.3	19.3	555.6	17.24	79	877.8	-322.2	2.1
201-399-14	8	19.0	18.6	1044.4	18.22	121	1344.4	-300.0	0.4
201-399-14	9	17.1	18.2	1655.6	18.62	163	1811.1	-155.6	-0.4
201-399-14	10	17.9	17.8	755.6	16.04	89	988.9	-233.3	1.7
201-399-14	11	20.1	20.2	633.3	17.77	90	1000.0	-366.7	2.4
201-399-14	12	21.7	19.9	444.4	17.20	60	666.7	-222.2	2.7
505-210-16	-		17.3	-	16.77	911	-	-	0.5
505-210-16	1	19.2	18.9	988.9	19.04	51	566.7	422.2	-0.1
505-210-16	2	19.8	18.9	755.6	18.58	49	544.4	211.1	0.3
505-210-16	3	15.8	16.6	1688.9	18.05	74	822.2	866.7	-1.4
505-210-16	4	16.2	17.0	955.6	17.38	73	811.1	144.4	-0.4
505-210-16	5	16.8	16.6	1233.3	16.83	119	1322.2	-88.9	-0.3
505-210-16	6	18.3	17.7	722.2	15.59	78	866.7	-144.4	2.1
505-210-16	7	16.9	16.7	877.8	16.40	90	1000.0	-122.2	0.3
505-210-16	8	20.2	17.8	488.9	16.46	68	755.6	-266.7	1.3
505-210-16	9	14.4	15.8	2133.3	15.49	77	855.6	1277.8	0.3
505-210-16	10	19.0	18.0	700.0	16.18	49	544.4	155.6	1.8
505-210-16	11	16.3	16.6	1100.0	16.51	111	1233.3	-133.3	0.1
505-210-16	12	18.2	16.5	588.9	16.12	72	800.0	-211.1	0.4
703-407-7			13.2		12.14	988	-	-	1.1
703-407-7	1	16.0	13.4	688.9	12.62	73	811.1	-122.2	0.8
703-407-7	2	14.3	13.7	944.4	12.27	88	977.8	-33.3	1.4

703-407-7	3	13.3	13.1	1455.6	12.08	117	1300.0	155.6	1.1
703-407-7	4	14.6	13.7	822.2	12.45	79	877.8	-55.6	1.2
703-407-7	5	13.1	12.5	1255.6	11.66	100	1111.1	144.4	0.8
703-407-7	6	13.3	13.5	1177.8	12.33	95	1055.6	122.2	1.2
703-407-7	7	13.0	12.8	1322.2	11.99	107	1188.9	133.3	0.8
703-407-7	8	13.5	14.0	1422.2	12.84	108	1200.0	222.2	1.1
703-407-7	9	12.1	12.0	1477.8	11.42	111	1233.3	244.4	0.5
703-407-7	10	13.4	13.6	1211.1	12.00	110	1222.2	-11.1	1.6
708-262-12	-		21.8	-	20.43	1014	-	-	1.4
708-262-12	1	27.9	23.2	522.2	22.66	86	955.6	-433.3	0.5
708-262-12	2	24.0	21.8	833.3	21.13	122	1355.6	-522.2	0.7
708-262-12	3	25.8	21.7	411.1	21.06	69	766.7	-355.6	0.6
708-262-12	4	27.6	21.8	466.7	20.26	107	1188.9	-722.2	1.5
708-262-12	5	25.2	23.7	644.4	21.95	81	900.0	-255.6	1.7
708-262-12	6	24.7	22.6	777.8	21.24	101	1122.2	-344.4	1.3
708-262-12	7	24.1	22.2	588.9	20.19	89	988.9	-400.0	2.0
708-262-12	8	25.2	21.6	444.4	19.29	76	844.4	-400.0	2.3
708-262-12	9	26.8	22.0	344.4	20.00	57	633.3	-288.9	2.0
708-262-12	10	24.5	20.0	511.1	18.73	83	922.2	-411.1	1.3
708-262-12	11	26.4	20.9	400.0	19.42	76	844.4	-444.4	1.5
708-262-12	12	26.8	20.5	300.0	18.07	67	744.4	-444.4	2.5
710-291-22	-		17.4	-	16.79	1007	-	-	0.6
710-291-22	1	14.8	16.3	1722.2	15.29	100	1111.1	611.1	1.0
710-291-22	2	16.2	15.1	755.6	14.34	84	933.3	-177.8	0.7
710-291-22	3	16.2	16.8	1211.1	15.87	104	1155.6	55.6	0.9
710-291-22	4	16.4	17.1	844.4	16.68	72	800.0	44.4	0.4
710-291-22	5	19.0	18.2	766.7	17.39	81	900.0	-133.3	0.8
710-291-22	6	17.3	18.1	811.1	17.08	68	755.6	55.6	1.0
710-291-22	7	17.4	17.2	1255.6	17.38	97	1077.8	177.8	-0.2
710-291-22	8	16.3	16.1	1255.6	17.32	106	1177.8	77.8	-1.2
710-291-22	9	16.6	17.5	933.3	16.89	90	1000.0	-66.7	0.6
710-291-22	10	19.1	18.7	700.0	17.88	71	788.9	-88.9	0.8
710-291-22	11	18.0	18.2	955.6	18.15	74	822.2	133.3	0.0
710-291-22	12	20.3	19.7	522.2	18.31	60	666.7	-144.4	1.4
710-291-26			21.6		19.96	915	-	-	1.7
710-291-26	1	19.5	19.5	1177.8	18.92	92	1022.2	155.6	0.6
710-291-26	2	21.6	21.8	788.9	19.83	82	911.1	-122.2	1.9
710-291-26	3	20.2	20.5	677.8	19.34	65	722.2	-44.4	1.2
710-291-26	4	23.0	21.2	411.1	19.42	48	533.3	-122.2	1.7
710-291-26	5	21.1	22.4	900.0	20.29	94	1044.4	-144.4	2.2
710-291-26	6	22.6	21.6	544.4	19.54	77	855.6	-311.1	2.1
710-291-26	7	21.2	21.3	1011.1	20.59	98	1088.9	-77.8	0.7
710-291-26	8	20.0	21.5	677.8	20.18	72	800.0	-122.2	1.3
710-291-26	9	21.3	22.4	855.6	19.91	74	822.2	33.3	2.5
710-291-26	10	24.0	22.6	488.9	20.78	68	755.6	-266.7	1.8
710-291-26	11	22.1	21.3	711.1	19.12	75	833.3	-122.2	2.2

710-291-26	12	25.0	23.2	377.8	21.47	70	777.8	-400.0	1.7
------------	----	------	------	-------	-------	----	-------	--------	-----

Pēc fotogrammetrijas datiem noteiktais kopējais koku, kas augstāki par 5m, skaits nogabalā 3.2.2.tabulā ir lielāks nekā dabā uzmērītais. Šeit gan jānorāda, ka detektēto koku (lokālo maksimumu) skaitu, būtiski ietekmē uzstādījumi. Šajā gadījumā visiem nogabaliem izmantots viens un tas pats uzstādījums, taču modeli būtu iespējams uzlabot, nosakot, ka minimālais attālums ir atkarīgs no vidējā augstuma.

Ar izmantoto algoritmu aprēķināts koku vidējais augstums (šajā gadījumā visu koku, kas augstāki par 5 m), tādējādi aprēķinā, iespējams, iekļauti arī klajākās vietās augoši II stāva un pameža / paaugas koki. Algoritms pēc būtības nespēj noteikt II stāva un paaugas kokus, kas aug zem I stāva koku vainagiem.

3.2.4. Individuāla koka augšanas gaitas aproksimācija KKC parauglaukumos, balstoties uz attālās izpētes datiem

Materiāls un metodika

Pirmās uzmērīšanas reizes attālo izpētes datu pamatā izmantoti no LĢIA .las datiem ģenerētie CHM, un atbilstoši veiktā segmentācija, par pamatu izmantojot 1 m pikseļu datus.

Otrās (2023.g.) uzmērīšanas reizes individuāla koka noteikšanai segmentācija veikta, izmantojot no drona datiem iegūto CHM, kas ir ar 20x20cm pikseļi. Tā kā aprēķinātais koku skaits nesakrīt ar dabā uzmērīto, aprēķiniem izmantotas individuāli detektēto koku augstuma atšķirības 1. un 2. reizē.

Rezultāti

Informācija par krājas kopšanas ciršu parauglaukumu augstuma pieaugumiem pēc mērījumiem dabā (2022/2023), no dronu CHM datiem aprēķinātie un no LĢIA .las aprēķinātie doti 3.2.3. tabulā.

3.2.3. tabula. Krājas kopšanas ciršu parauglaukumu augstuma pieaugumi pēc mērījumiem dabā (2022/2023), no dronu CHM datiem aprēķinātie un no LĢIA .las aprēķinātie

Objekts/parauglaukums	drons2023		CHM (2015-2019)		delta H (drons-CHM)	gads	H pieaugums gadā, m gadā	H pieaugums aprēķināts lauku mērījumiem, m gadā	Delta
	H,m	n	H, m	n					
101-425-13	22.71	593	21.23	255	1.48	2019	0.37	0.139	
1	22.41	84	21.64	27	0.77	2019	0.19	0.037	-0.156
2	23.42	74	22.61	24	0.81	2019	0.20	0.033	-0.170
3	22.35	47	20.50	20	1.84	2019	0.46	0.279	-0.182
4	22.48	59	20.48	22	2.00	2019	0.50	0.013	-0.487
5	22.81	62	20.88	35	1.93	2019	0.48	0.162	-0.321
6	23.31	77	21.59	25	1.73	2019	0.43	0.137	-0.294
7	22.99	49	21.58	25	1.41	2019	0.35	0.367	0.014
8	23.28	35	20.80	25	2.49	2019	0.62	0.142	-0.480
9	21.27	51	20.46	25	0.81	2019	0.20	0.096	-0.106

10	22.48	55	21.61	27	0.86	2019	0.22	0.122	-0.094
104-391-15	22.24	571	19.02	321	3.22	2019	0.81	0.424	-0.382
1	22.72	51	20.30	22	2.41	2019	0.60	0.535	-0.069
2	22.54	54	19.33	31	3.21	2019	0.80	0.240	-0.562
3	20.94	44	17.39	28	3.54	2019	0.89	0.513	-0.373
4	23.37	61	20.09	25	3.27	2019	0.82	0.187	-0.631
5	21.26	64	19.00	30	2.26	2019	0.56	0.506	-0.059
6	21.63	36	18.76	29	2.87	2019	0.72	0.453	-0.264
7	22.20	46	18.85	26	3.36	2019	0.84	0.564	-0.275
8	20.91	56	17.14	28	3.77	2019	0.94	0.479	-0.464
9	23.12	45	20.07	27	3.05	2019	0.76	0.261	-0.502
10	21.62	14	19.56	21	2.06	2019	0.52	0.528	0.013
11	21.56	35	19.12	23	2.44	2019	0.61	0.390	-0.221
12	23.80	65	19.12	31	4.69	2019	1.17	0.431	-0.740
110-74-1	19.67	831	18.22	274	1.45	2019	0.36	0.233	-0.130
1	19.60	97	17.92	29	1.68	2019	0.42	0.313	-0.106
2	20.59	70	18.37	30	2.22	2019	0.56	0.398	-0.157
3	20.11	88	18.61	26	1.49	2019	0.37	0.178	-0.196
4	20.52	99	18.92	30	1.61	2019	0.40	0.561	0.159
5	19.49	65	18.79	26	0.70	2019	0.18	0.189	0.013
6	18.94	88	17.57	28	1.37	2019	0.34	0.184	-0.159
7	20.17	67	18.35	27	1.82	2019	0.46	0.205	-0.250
8	19.39	54	17.09	27	2.29	2019	0.57	0.214	-0.359
9	19.68	84	18.76	25	0.92	2019	0.23	0.011	-0.219
10	18.63	119	17.83	26	0.80	2019	0.20	0.074	-0.125
111-86-5	16.07	691	8.62	333	7.45	2018	1.49	0.580	-0.910
1	16.27	65	8.90	33	7.38	2018	1.48	0.628	-0.847
2	14.11	42	8.33	34	5.78	2018	1.16	0.514	-0.642
3	16.39	97	8.68	32	7.71	2018	1.54	0.731	-0.810
4	15.99	70	8.78	33	7.21	2018	1.44	0.686	-0.756
5	16.59	73	8.63	42	7.96	2018	1.59	0.520	-1.071
6	16.31	63	9.05	29	7.26	2018	1.45	0.689	-0.763
7	16.11	39	8.38	33	7.72	2018	1.54	0.394	-1.150
8	16.42	78	8.70	32	7.72	2018	1.54	0.605	-0.938
9	15.89	62	8.45	31	7.44	2018	1.49	0.521	-0.966
10	15.84	102	8.38	34	7.45	2018	1.49	0.515	-0.976
201-399-14	17.26	1215	13.98	398	3.28	2016	0.47	0.528	0.060
1	16.46	80	13.47	27	3.00	2016	0.43	0.675	0.247
2	15.95	102	14.74	34	1.22	2016	0.17	0.232	0.058
3	15.25	90	11.20	31	4.06	2016	0.58	0.484	-0.095
4	16.90	144	12.66	33	4.23	2016	0.60	0.484	-0.120
5	18.70	97	14.02	36	4.67	2016	0.67	0.704	0.036
6	17.49	100	13.00	36	4.49	2016	0.64	0.679	0.037
7	17.24	79	14.93	36	2.32	2016	0.33	0.688	0.357
8	18.22	121	14.77	33	3.44	2016	0.49	0.500	0.008
9	18.62	163	15.63	33	2.99	2016	0.43	0.484	0.057

10	16.04	89	14.69	36	1.35	2016	0.19	0.335	0.142
11	17.77	90	13.68	30	4.09	2016	0.58	0.533	-0.051
12	17.20	60	14.67	33	2.53	2016	0.36	0.533	0.172
505-210-16	16.77	911	9.80	394	6.97	2015	0.87	0.537	-0.335
1	19.04	51	10.99	33	8.05	2015	1.01	0.697	-0.310
2	18.58	49	10.67	32	7.91	2015	0.99	0.635	-0.354
3	18.05	74	10.42	33	7.63	2015	0.95	0.537	-0.417
4	17.38	73	9.92	33	7.46	2015	0.93	0.716	-0.216
5	16.83	119	10.52	31	6.31	2015	0.79	0.412	-0.376
6	15.59	78	9.81	35	5.78	2015	0.72	0.694	-0.028
7	16.40	90	10.24	34	6.16	2015	0.77	0.595	-0.175
8	16.46	68	9.34	32	7.12	2015	0.89	0.681	-0.209
9	15.49	77	9.51	35	5.99	2015	0.75	0.292	-0.456
10	16.18	49	9.01	31	7.16	2015	0.90	0.614	-0.281
11	16.51	111	9.91	34	6.61	2015	0.83	0.252	-0.573
12	16.12	72	7.10	31	9.02	2015	1.13	0.318	-0.809
703-407-7	12.14	988	9.33	251	2.81	2016	0.40	0.511	0.110
1	12.62	73	9.65	29	2.96	2016	0.42	0.430	0.006
2	12.27	88	9.26	20	3.01	2016	0.43	0.673	0.244
3	12.08	117	9.29	24	2.79	2016	0.40	0.565	0.166
4	12.45	79	9.48	27	2.97	2016	0.42	0.414	-0.010
5	11.66	100	8.87	26	2.79	2016	0.40	0.455	0.056
6	12.33	95	9.33	21	2.99	2016	0.43	0.608	0.180
7	11.99	107	9.10	24	2.89	2016	0.41	0.415	0.002
8	12.84	108	9.59	29	3.25	2016	0.46	0.621	0.157
9	11.42	111	9.19	24	2.23	2016	0.32	0.391	0.073
10	12.00	110	9.40	27	2.60	2016	0.37	0.542	0.171
708-262-12	20.43	1014	16.27	352	4.16	2016	0.59	0.481	-0.113
1	22.66	86	18.83	35	3.83	2016	0.55	0.248	-0.300
2	21.13	122	17.20	24	3.92	2016	0.56	0.671	0.111
3	21.06	69	17.44	30	3.62	2016	0.52	0.311	-0.206
4	20.26	107	16.30	25	3.97	2016	0.57	0.379	-0.188
5	21.95	81	17.23	27	4.71	2016	0.67	0.679	0.006
6	21.24	101	16.01	36	5.23	2016	0.75	0.629	-0.118
7	20.19	89	14.84	31	5.34	2016	0.76	0.572	-0.191
8	19.29	76	13.04	30	6.24	2016	0.89	0.488	-0.404
9	20.00	57	16.86	28	3.13	2016	0.45	0.462	0.014
10	18.73	83	15.63	30	3.09	2016	0.44	0.420	-0.022
11	19.42	76	16.13	32	3.29	2016	0.47	0.397	-0.074
12	18.07	67	15.52	24	2.55	2016	0.36	0.518	0.154
710-291-22	16.79	1007	14.66	678	2.12	2016	0.30	0.427	0.123
1	15.29	100	13.22	50	2.07	2016	0.30	0.499	0.203
2	14.34	84	12.53	42	1.81	2016	0.26	0.321	0.063
3	15.87	104	13.80	58	2.06	2016	0.29	0.523	0.228
4	16.68	72	13.92	54	2.75	2016	0.39	0.368	-0.025
5	17.39	81	15.27	58	2.12	2016	0.30	0.512	0.210

6	17.08	68	14.64	38	2.44	2016	0.35	0.564	0.215
7	17.38	97	15.29	72	2.09	2016	0.30	0.239	-0.060
8	17.32	106	14.49	54	2.83	2016	0.40	0.216	-0.188
9	16.89	90	15.17	60	1.72	2016	0.25	0.358	0.112
10	17.88	71	15.60	52	2.28	2016	0.33	0.267	-0.058
11	18.15	74	15.19	70	2.96	2016	0.42	0.410	-0.012
12	18.31	60	15.61	70	2.70	2016	0.39	0.844	0.459
710-291-26	19.96	915	17.59	384	2.37	2016	0.34	0.417	0.079
1	18.92	92	16.25	31	2.67	2016	0.38	0.357	-0.024
2	19.83	82	17.36	35	2.47	2016	0.35	0.431	0.078
3	19.34	65	16.90	31	2.44	2016	0.35	0.433	0.085
4	19.42	48	18.04	32	1.37	2016	0.20	0.175	-0.022
5	20.29	94	17.66	34	2.63	2016	0.38	0.467	0.091
6	19.54	77	17.75	27	1.79	2016	0.26	0.476	0.220
7	20.59	98	17.73	32	2.86	2016	0.41	0.331	-0.078
8	20.18	72	17.56	30	2.62	2016	0.37	0.401	0.027
9	19.91	74	17.41	30	2.50	2016	0.36	0.749	0.392
10	20.78	68	17.95	32	2.82	2016	0.40	0.308	-0.095
11	19.12	75	17.15	30	1.98	2016	0.28	0.512	0.230
12	21.47	70	18.95	40	2.52	2016	0.36	0.366	0.006

Kopējā tendence ir, ka pēc mērījumiem dabā (un aprēķinātām augstumlīknēm), augstuma pieaugumi ir lielāki nekā no attālās izpētes datiem iegūtie, tomēr ar dažādām metodēm aprēķinātie augstuma pieaugumi atšķiras pa objektiem. No attālās izpētes datiem iegūtie augstuma pieaugumi ir vidēji par 0,16m gadā mazāki.

Secinājumi

Uz attālās izpētes datiem (CHM no LGIA las) un ar dronu iegūtie CHM iegūto koku skaits ir atšķirīgs no parauglaukumos uzmērītā, kas saistīts ne tikai ar koordinātu neprecizitāti koku identificēšanā uz zemes, bet arī ar atšķirīgu datu kopu izmantošanu atsevišķu koku detektēšanā un vainagu segmentēšanā.

Pašreiz izmantotie algoritmi ir izmantojami I stāva koku identificēšanā, bet ir nepieciešams salīdzināt ar citiem algoritmiem.

4. Plantāciju mežaudžu augšanas gaitas modeļi

4.1. Parauglaukumu ierīkošana plantāciju mežaudzēs un koku sākotnējā uzmērīšana

4.1.1. Parauglaukumi P, E, B audzēs, kuras ir bijušajās lauksaimniecības zemēs ieaudzētas kokaudzes LVM ražošanas objektos

Materiāls un metodika

No LVM saņemtās datu bāzes, kurā ir informācija par 1433 stādītām P, E un B plantācijām tās pārvaldībā esošajās zemēs, atlasīti 99 objekti, kuros kokaudzes vecums ir no 11 līdz 30 gadiem. No tiem pēc jaunāko LĢIA ortofotoattēlu vizuālas izvērtēšanas atlasīti 16 objekti, kuros lielākajā daļā no nogabala platības ir sekmīgi ieaugusi kokaudze (objektu sarakstu un vispārējos taksācijas rādītājus skat. 4.1.1. tabula).

Katrā objektā, atkarībā no konfigurācijas, ierīkoti 3 - 4 parauglaukumi ($r=12.62$) līdzīgi kā MSI metodikā. Visiem kokiem, kas krūšaugstumā resnāki par 6 cm, uzmērīts caurmērs, reģistrēta suga, katrā objektā vismaz 30 kokiem uzmērīts koka augstums, vainaga sākuma augstums, kā arī vainaga platums.

4.1.1. tabula. Pētniecisko objektu taksācijas apraksti LVM datu bāzē (2022)

Kv. Apg.	KV	NOG	ANO G	PLAT	Meža tips	Valdošā suga	Vecums	H10, m	D10, cm	G1, m ² ha ⁻¹	V1, m ³ ha ⁻¹
109	592	1	0	2.01	Dm	P	16	11	14	27	166
209	164	10	0	1.02	19	P	16	8	14	21	110
209	540	1	0	5.06	19	B	16	13	17	17	107
304	46	12	0	5.17	Vr	B	16	13	11	14	133
307	72	3	0	8.61	Vr	B	15	12	13	9	92
307	205	25	0	1.10	Vr	B	12	9	9	0	32
307	319	17	0	3.15	Vr	B	12	12	12	14	158
308	194	39	0	4.54	Vr	B	13	12	10	9	53
601	207	51	0	6.08	Dm	E	15	8	12	15	77
603	342	52	0	1.27	Vr	B	12	13	11	8	50
603	439	51	0	4.45	Vr	B	12	10	8	0	36
604	292	51	0	1.89	19	B	13	12	12	9	86
605	249	53	0	1.56	Dm	P	14	8	14	20	74
708	101	35	0	1.47	19	E	15	7	9	0	35
713	246	6	0	1.97	Dm	E	17	11	13	13	92
801	323	1	0	12.26	Vr	B	16	13	12	12	105

Rezultāti

Audzū taksācijas rādītāji atspoguļoti 4.1.2. tabulā. Vairumā gadījumu plantācijas ir tīraudzes. Salīdzinot uzmērītos augstumus ar LVM datu bāzē reģistrētajiem augstumiem, konstatēts, ka kopumā plantācijās koki ir auguši straujāk nekā to paredz Meža valsts reģistra aktualizācijas algoritmi. Tomēr jānorāda, ka liela daļa no plantāciju stādījumiem, vizuāli izvērtējot pēc LĢIA ortofoto attēliem, ir

ieaugušies nevienmērīgi. Šādu objektu īpatsvara noteikšana varētu būt atsevišķs pētījuma darba uzdevums.

4.1.2. tabula. Pētniecisko objektu taksācijas apraksti pēc lauku mērījumiem

Objekts	I stāvs								
	sastāvs	D, cm	H, m	G, m ² ha ⁻¹	M, m ³ ha ⁻¹	N, ha ⁻¹	Z _D ^v , cm	Z _H ^v , m	Z _M ^v , m ³ ha ⁻¹
109-592-1	10P	11.9 ± 0.5	10.7 ± 0.3	23 ± 1.1	132.3 ± 6.1	2060 ± 257	0.66	0.59	7.35
209-164-10	10P	15.9 ± 0.3	11.8 ± 0.2	20.6 ± 1.7	124.8 ± 12.1	1040 ± 45	0.88	0.66	6.93
605-249-53	10P	12.5 ± 0.3	9.7 ± 0	19.6 ± 0.4	103 ± 1.8	1600 ± 75	0.89	0.97	7.69
601-207-51	9E1B	12.8 ± 0.6	9.3 ± 0.1	15.8 ± 1.1	77.1 ± 6.3	1280 ± 161	0.75	0.85	6.81
708-101-35	9E1P	9.1 ± 0.3	7.7 ± 0.2	13.8 ± 0.8	66.3 ± 3.6	2065 ± 46	0.57	0.75	3.48
713-246-6	10E atsP	13.1 ± 0.3	10.7 ± 0.3	22.3 ± 1.2	127.8 ± 9	1655 ± 24	0.71	0.83	3.76
209-540-1	8B2Ba	16.1 ± 0.5	17.4 ± 0.7	17.1 ± 2.3	138.4 ± 20	950 ± 157	0.76	0.96	5.79
304-46-12	10B atsP	13.5 ± 0.4	15.3 ± 0.3	16.7 ± 1	122.6 ± 8.3	1160 ± 102	0.71	0.95	5.50
307-72-3	10B atsA	10.6 ± 0.4	13.4 ± 0.4	12.2 ± 0.7	81 ± 6.6	1395 ± 57	0.75	0.55	4.54
307-205-25	10B	9.7 ± 0.2	12.8 ± 0.3	9.3 ± 0.2	59.1 ± 2.1	1255 ± 62	0.91	0.96	5.43
307-319-17	10B	10 ± 0.3	11.6 ± 0.7	9 ± 1	52.7 ± 7.7	1160 ± 63	0.79	0.87	4.66
308-194-39	10B	10.7 ± 0.1	14.2 ± 0.5	11.9 ± 0.4	82.5 ± 4.7	1320 ± 54	0.75	1.01	6.43
603-342-52	10B	12.7 ± 0.3	13.4 ± 0.2	11.7 ± 0.3	76 ± 1.5	930 ± 33	0.78	0.61	6.44
603-439-51	10B	11.1 ± 0.5	12.2 ± 0.6	10.8 ± 1.5	65.2 ± 11.2	1125 ± 122	0.54	0.45	3.90
604-292-51	10B	11.2 ± 0.1	15.2 ± 0.1	13.1 ± 0.4	96.5 ± 2.9	1320 ± 55	0.69	0.56	6.73
801-323-1	10B	13.8 ± 0.6	17.1 ± 0.5	11.8 ± 0.6	95.2 ± 7.6	785 ± 81	0.77	0.95	5.29

4.1.2. Parauglaukumi P, E, B audzēs, kuras ir bijušajās lauksaimniecības zemēs ieaudzētas kokaudzes LVMI Silava agrāk iekārtotos pētījumu objektos

Pamatojums

Nemot vērā parastās egles nozīmi Ziemeļvalstu reģiona mežsaimniecībā, ir svarīgi, lai mežsaimniekiem būtu pieejami atbalsta instrumenti, ko var izmantot, lai pieņemtu pārdomātus lēmumus par šīs koku sugas apsaimniekošanu (Allen et al. 2020). Meža selekcija ir būtiski veicinājusi augstas kvalitātes koksnes ražošanu, ko nākotnes mainīgā klimata apstākļos varētu palīdzēt uzturēt pret dažādiem riskiem izturīgu un produktīvu klonu veģetatīvā pavairošana. Intensīvi apsaimniekotas un produktīvas egles plantācijas bijušajās lauksaimniecības zemēs varētu tikt audzētas, fokusējoties tikai uz koksnes ražošanu, meža platībās lielāku uzsvāru liekot uz dažādus ekosistēmu pakalpojumu līdzsvarotu vērtības kāpināšanu (Thiffault et al. 2023). Egles plantāciju ierīkošana atbilst arī mērķim efektīvāk izmantot meža potenciālu ilgtermiņa CO₂ piesaistei un transformēt daļēji aizaugušas,

neizmantotas lauksaimniecības zemes produktīvās plantācijās, izmantojot selekcionētu reproduktīvo materiālu (Ahtikoski et al. 2020; Jonsson et al. 2021; Brunet-Navarro et al. 2021). Tas saskan ar lielāko daļu plānoto pasākumu šobrīd sagatavošanas stadijā esošajā Klimata un enerģētikas plānā 2030.

Lai pēc iespējas precīzāk plānotu saimnieciskās darbības un aprēķinātu sagaidāmo oglekļa uzkrājumu, ir jāizprot augšanas dinamika ilgtermiņā, ko ietekmē arī ģenētika (kloni) (Zeltiņš et al. 2023). Empīriskie modeļi parasti ir piemēroti tikai tad, ja tos izmanto datu diapazonā, kas tika izmantots modeļa izstrādei. Esošie audzes līmeņa modeļi radīti salīdzinoši sen, un to izstrādei izmantotie empīriskie dati ir vēl vecāki, neatspoguļojot pašreizējos augšanas apstākļus un apsaimniekošanas praksi plantācijām lauksaimniecības zemēs (Allen et al. 2020).

Aktivitātes mērķi šajā etapā ir datu ieguve 8 pētījuma objektos saskaņā ar iepriekš aprobētu metodiku, kas aprakstīta iepriekšējā pārskata etapā. Datu kompleksa analīze paredzēta pētījuma noslēguma etapā.

Aktivitātes rezultāts

Veikta datu ievākšana stādījumos uz bijušās lauksaimniecības zemes, vienu objektu saskaņā ar metodiku definējot kā 4 parauglaukumus ar platību 500 m². Individuālu koku augstuma augšanas gaita modelēta egles kloniem/klonu grupām, izmantojot empīriskos datus no atkārtotiem mērījumiem 10 – 13 (iepriekšējie mērījumi) un 40 gadu vecumā (šajā etapā ievākti dati, 4.3.tabula). Caurmēra pieaugumu, ka iegūti no urbumu mērījumiem, un koksnes blīvuma (rezistogrāfa mērījumu) dati tiks analizēti noslēguma etapā.

Kopumā objektos ietvertas un analīzē izmantotas 7240 augstuma laika sērijas no 181 klona/klonu grupas. Tika izmantota nelineāra jaukta efekta modelēšanas pieeja, pielietojot klonu kā randoma ietekmi uz Čapmana – Ričardsa (Chapman-Richards) vienādojuma vispārinātās algebriskās diferences (GADA) formas (Cieszewski 2004) parametriem:

$$h = h_0 \left(\frac{1 - \exp(-b_1 t)}{1 - \exp(-b_1 t_0)} \right)^{b_2 + \frac{b_3}{x_0}}$$

, kur

h_0 – koka augstums perioda sākumā, m;

h – koka augstums prognozes perioda beigās, m;

t_0 – koka vecums prognozes perioda sākumā, gadi;

t – koka vecums prognozes perioda beigās, gadi;

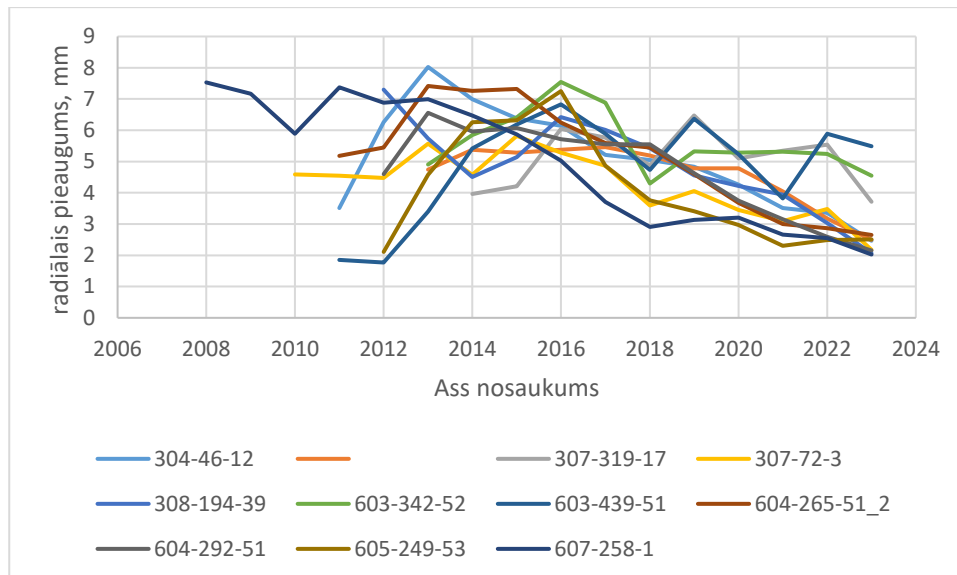
$b_1; b_2; b_3$ – empīriskie koeficienti.

4.1.3. tabula. Uzmērīto objektu taksācijas rādītāji

Objekts	Augstums, m	Caurmērs, cm	Šķērslaukums, m ² ha ⁻¹
1	18,5	12,3	24,0
2	18,2	13,1	26,9
3	18,4	13,3	28,6
4	16,7	12,8	26,2
5	16,2	12,6	23,8
6	17,4	12,5	25,9
7	16,5	12,1	22,0
8	19,7	13,4	26,5

4.1.3. Pieaugumu uzmērīšana

Uzmērītas radiālā pieauguma skaidas 11 ražošanas objektos un visos 8 ilglaicīgo pētījumu objektos. Radiālais pieaugums ražošanas objektos vidēji ir 4,9 mm gadā. Taču atsevišķos objektos un gados tas arī pārsniedz arī 7 mm gadā (skat. 4.1. attēlu).



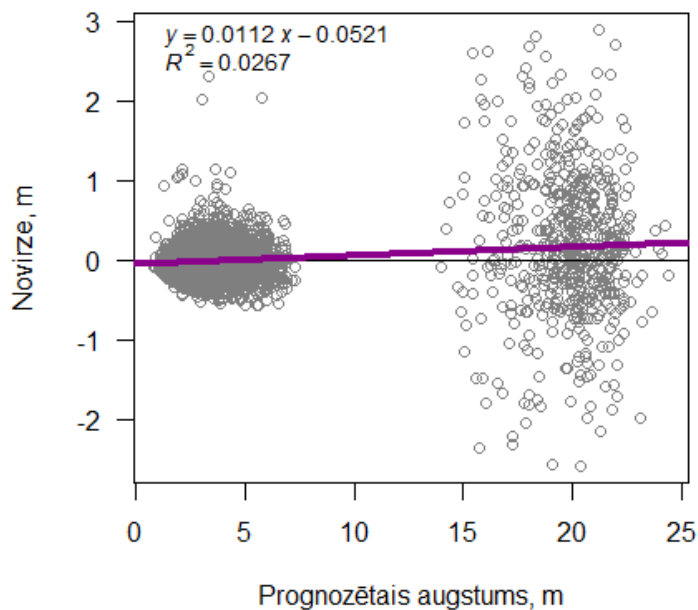
4.1. attēls. Radiāla pieauguma mērījumu rezultāti ražošanas plantāciju objektos.

4.1.4. Datu analīze/ pieaugumu aprakstošu vienādojumu koeficientu aproksimācija

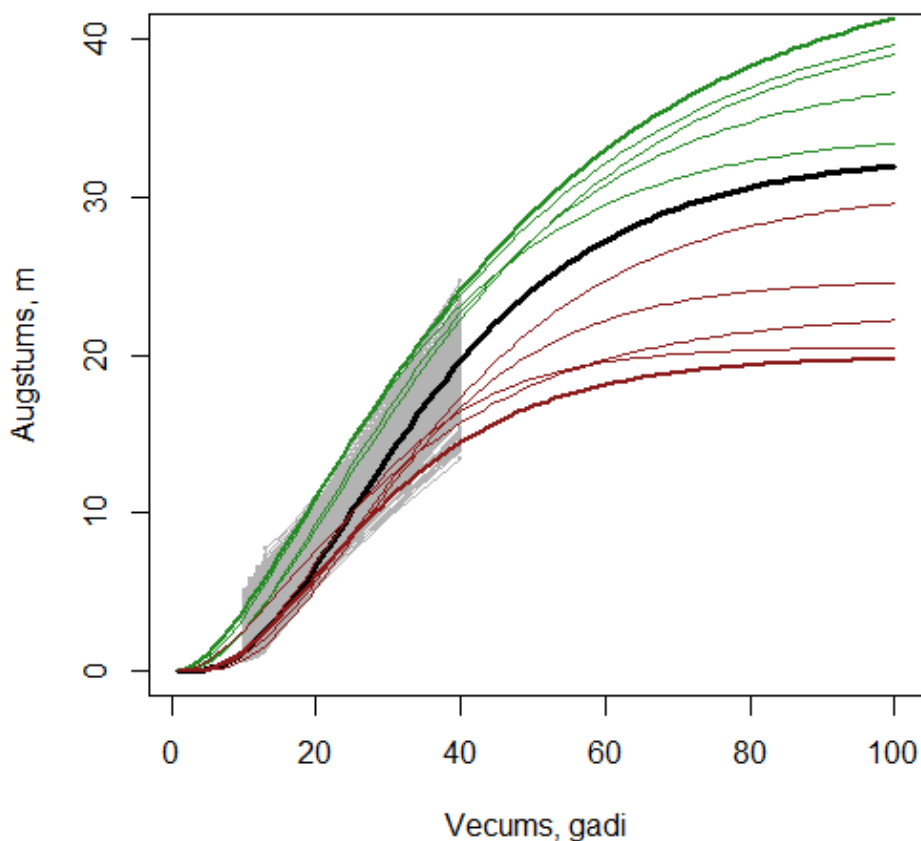
Izvēlētais modelis raksturojams ar augstu statistisko precizitāti (4.1.4. tabula, 4.2.attēls). Būtiska klona ietekme ($p < 0.01$) konstatēta uz empīriskajiem koeficientiem b_1 un b_2 , tādēļ tie aproksimēti katram klonam/ klonu grupai (4.1.5.tabula). Klonu augšanas gaitas līknes norāda, ka genotipi raksturojami gan ar atšķirīgu augšanas dinamiku agrīnā vecumā, gan arī potenciāli sasniedzamo augstumu (asimptotu) (4.3. attēls).

4.1.4. tabula. Čapmana-Ričardsa augstuma augšanas gaitas modeļa prognozētā augstuma pieauguma statistiskie rādītāji

MRES	MRES%	AMRES	RMSE	RMSE%	MSE	MEF	VR	R ²	N
0.0006	0.0119465	0.1761	0.3116	6.6002	0.0971	0.9954	0.9737	0.9961	7240



4.2. attēls. Starpība starp uzmerīto un prognozēto augstumu (novirze) atkarībā no prognozētā augstuma.



4.3. attēls. Ar Čapmana-Ričarda funkciju modelētās augšanas gaitas līknes: melnā – objektu vidējā augšanas gaita; zaļās – 5 salīdzinoši ātraudzīgu klonu augšanas gaita; sarkanā – 5 salīdzinoši lēnaudzīgu klonu augšanas gaita (klonu sadalījums, balstoties uz augstuma mērījumiem 40 gadu vecumā). Gaiši pelēkā krāsā fonā parādītas empīriskās individuālu koku augstuma laika sērijas.

4.1.5. tabula. Klonu specifiski aproksimētie Čapmana-Ričardsa funkcijas empīriskie koeficienti.

Klona Nr.	b₁	b₂	b₃
179	0.0439	-8524.74	28921
181	0.0373	-7999.11	28921
182	0.0507	-8297.36	28921
183	0.0618	-8835.79	28921
184	0.0863	-9130.95	28921
194	0.0233	-7515.81	28921
195	0.0543	-8544.93	28921
270	0.0550	-8566.67	28921
273	0.0353	-7928.01	28921
297	0.0450	-8182.20	28921
298	0.0592	-9105.60	28921
299	0.0866	-9021.07	28921
300	0.0294	-7954.35	28921
301	0.0404	-8374.46	28921
302	0.0300	-7772.49	28921
304	0.0533	-8701.77	28921
306	0.0463	-8599.84	28921
309	0.0760	-9020.30	28921
310	0.0334	-7869.93	28921
312	0.0398	-8510.04	28921
314	0.0352	-7641.34	28921
315	0.0431	-8907.74	28921
316	0.0823	-9174.87	28921
317	0.0620	-8970.05	28921
318	0.0535	-8601.33	28921
319	0.0433	-8506.08	28921
320	0.0533	-8677.98	28921
321	0.0548	-8593.66	28921
322	0.0252	-7537.10	28921
323	0.1004	-9656.06	28921
324	0.0424	-7848.57	28921
325	0.0384	-8139.36	28921
326	0.0671	-8806.12	28921
327	0.0321	-7891.22	28921
328	0.1022	-8977.77	28921
329	0.0696	-9044.66	28921
330	0.0646	-8616.99	28921
331	0.0474	-8338.31	28921
332	0.0163	-6688.10	28921
333	0.0550	-8690.30	28921
334	0.0821	-9723.32	28921
335	0.0553	-8578.69	28921
336	0.0105	-6490.15	28921

Klona Nr.	b₁	b₂	b₃
337	0.0297	-7968.48	28921
338	0.0735	-8980.37	28921
339	0.0770	-9661.70	28921
340	0.0141	-6772.87	28921
341	0.0476	-8290.40	28921
342	0.0121	-6191.95	28921
343	0.0839	-8945.86	28921
344	0.0329	-7931.49	28921
345	0.0264	-7556.82	28921
346	0.0557	-8865.12	28921
347	0.0391	-8406.05	28921
348	0.0363	-7744.23	28921
349	0.0234	-7285.22	28921
350	0.0072	-6080.47	28921
351	0.0409	-8410.49	28921
352	0.0484	-8558.09	28921
353	0.0696	-8602.83	28921
354	0.0471	-8239.35	28921
355	0.0667	-9016.85	28921
356	0.0639	-8934.08	28921
357	0.0783	-8858.63	28921
358	0.0244	-7679.83	28921
359	0.0237	-7723.89	28921
360	0.0399	-8303.46	28921
361	0.0155	-7153.52	28921
362	0.0909	-9178.38	28921
363	0.0216	-7623.86	28921
364	0.0410	-7963.08	28921
365	0.0651	-9036.23	28921
366	0.0609	-9001.62	28921
367	0.0327	-7861.35	28921
368	0.0515	-8474.65	28921
369	0.0414	-8059.27	28921
370	0.0179	-6880.57	28921
371	0.0362	-7967.70	28921
372	0.0314	-7703.00	28921
373	0.0299	-7795.03	28921
374	0.0515	-8450.04	28921
375	0.0262	-7461.51	28921
376	0.0947	-9385.44	28921
377	0.0718	-8869.36	28921
378	0.0609	-8829.46	28921
379	0.0466	-8220.54	28921
380	0.0454	-8452.93	28921
381	0.0723	-8871.13	28921

Klona Nr.	b₁	b₂	b₃
382	0.0476	-8293.60	28921
383	0.0137	-6701.30	28921
384	0.0598	-8788.32	28921
385	0.0201	-7448.25	28921
386	0.0432	-8106.64	28921
387	0.0700	-8979.98	28921
388	0.0267	-7559.47	28921
389	0.0238	-7620.70	28921
390	0.0685	-9012.14	28921
391	0.0347	-8174.19	28921
392	0.0410	-8139.08	28921
393	0.0398	-8040.38	28921
394	0.0564	-8835.63	28921
395	0.0542	-8630.33	28921
396	0.0499	-8368.22	28921
397	0.0673	-8736.08	28921
398	0.0404	-7942.10	28921
399	0.0169	-7050.16	28921
400	0.0275	-7788.84	28921
401	0.0449	-9261.80	28921
402	0.0512	-8629.79	28921
403	0.0186	-7243.57	28921
404	0.0734	-9567.22	28921
405	0.0569	-8599.39	28921
406	0.0530	-8317.46	28921
407	0.0594	-8628.24	28921
408	0.0576	-8407.50	28921
409	0.1029	-9116.15	28921
410	0.0296	-7710.61	28921
411	0.0730	-8770.19	28921
412	0.0321	-8072.15	28921
413	0.0526	-8445.60	28921
414	0.0391	-8047.44	28921
415	0.0715	-9214.34	28921
416	0.0790	-9140.39	28921
417	0.0308	-7928.87	28921
418	0.0385	-8135.32	28921
419	0.0301	-7595.15	28921
420	0.0896	#####	28921
421	0.0613	-8791.97	28921
422	0.0587	-9666.67	28921
423	0.0386	-7879.23	28921
424	0.0716	-9001.69	28921
425	0.0479	-8715.52	28921
426	0.0890	-9254.25	28921

Klona Nr.	b₁	b₂	b₃
427	0.0370	-8041.48	28921
428	0.0565	-8756.81	28921
429	0.0772	-9110.90	28921
430	0.0456	-8221.37	28921
431	0.0728	-9046.14	28921
432	0.0623	-8589.53	28921
433	0.0414	-8067.84	28921
434	0.0466	-8446.00	28921
435	0.0394	-8117.67	28921
436	0.0405	-8110.17	28921
437	0.0212	-7683.11	28921
438	0.0549	-8578.32	28921
439	0.0632	-8930.46	28921
440	0.0282	-7644.77	28921
441	0.0189	-7313.84	28921
442	0.0299	-7447.59	28921
443	0.0466	-8361.12	28921
444	0.0066	-5562.67	28921
445	0.0387	-8086.21	28921
446	0.0444	-8180.67	28921
447	0.0300	-7609.82	28921
448	0.0260	-7337.83	28921
449	0.0101	-6625.35	28921
450	0.0621	-8644.05	28921
451	0.0169	-7021.95	28921
452	0.0536	-8588.84	28921
453	0.0349	-7749.37	28921
454	0.0349	-7667.33	28921
455	0.0293	-7617.44	28921
456	0.0315	-7560.45	28921
457	0.0387	-7740.64	28921
458	0.0522	-8458.33	28921
459	0.0486	-8592.13	28921
460	0.0778	-9270.45	28921
461	0.0313	-7694.56	28921
462	0.0353	-7794.25	28921
463	0.0526	-8737.15	28921
464	0.0736	-8904.01	28921
465	0.0451	-8186.26	28921
466	0.0374	-8225.48	28921
467	0.0297	-7644.57	28921
468	0.0539	-8411.76	28921
469	0.0916	-9465.35	28921
470	0.0304	-7838.49	28921
471	0.0717	-8901.28	28921

Klona Nr.	b₁	b₂	b₃
472	0.0109	-6089.56	28921
473	0.0878	-10581.97	28921
906	0.0768	-8992.37	28921

Secinājumi

Plantāciju tipa stādījumi pētījumu objektos aug ievērojami labāk nekā prognozē normatīvi meža tipam (bonitātei) noteiktie augšanas gaitas modeļi.

Nepieciešami papildus pētījumi par modelēšanā izmantojamajiem vienādojumiem, jo plantācijas tipa stādījumos augstuma augšanas gaitu labāk aproksimēja Ričardsa- Čapmana funkcija nevis Hoffeld IV funkcija, kas izmantota uz MSI datiem balstīto pieaugumu aprēķināšanā.

Literatūra

1. Ahtikoski A, Ahtikoski R, Haapanen M, et al (2020) Economic performance of genetically improved reforestation material in joint production of timber and carbon sequestration: A case study from Finland. *Forests* 11:847. <https://doi.org/10.3390/F11080847>
2. Allen MG, Antón-Fernández C, Astrup R (2020) A stand-level growth and yield model for thinned and unthinned managed Norway spruce forests in Norway. *Scand J For Res* 35:238–251. <https://doi.org/10.1080/02827581.2020.1773525>
3. Brunet-Navarro P, Jochheim H, Cardellini G, et al (2021) Climate mitigation by energy and material substitution of wood products has an expiry date. *J Clean Prod* 303:127026. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.12702>
4. Burkhart H. E., Tomé M. (2012) *Modeling forest trees and stands*. Heidelberg, Germany: Springer. 457 p.
5. Cieszewski C. J. (2002) Comparing fixed- and variable-base-age site equations having single versus multiple asymptotes. *Forest Science*, Vol. 48, p. 7–23.
6. Cieszewski CJ (2004) GADA derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from Richards, Weibull, and other exponential functions. *Univ Georg PMRC-TR* 5:2004
7. Cieszewski C. J., Bailey R. L. (2000) Generalized algebraic difference approach: Theory based derivations with polymorphism and variable asymptotes. *Forest Science*, Vol. 46 (1), p. 115–126.
8. Clutter J. L., Fortson J. S., Pienaar L. V., Brister G. H., Bailey R. L. (1983) *Timber management. A quantitative approach*. New York; Chichester; Brisbane; Toronto; Singapore: John Wiley & Sons, 333 p.
9. Dieguez-Aranda U., Alvarez Gonzalez J. G., Barrio Anta M., Rojo Alboreca A. (2005) Site quality equations for *Pinus sylvestris* L. plantations in Galicia (northwestern Spain). *Annals of Forest Science*, Vol. 62 (2), p.143–152.
10. Elfving B. (2010) *Growth modelling in the Heureka system*. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Forestry. 99 p. [tiešsaiste] [skatīts 07.01.2017.]. Pieejams: http://heurekaslu.org/mw/images/9/93/Heureka_prognos_system_%28Elfving_rapportutkast%29.pdf.
11. Eriksson, L. (2011). The Heureka forestry decision support system: an overview. *Mathematical and Computational Forestry and Natural Resources Sciences*.
12. Fabrika M., Ďurský J. (2005) Algorithms and software solution of thinning models for SIBYLA growth simulator. *Journal of forest science*, Vol. 51, p. 431–445.
13. Fabrika M., Pretzsch H. (2011) *Analýza a modelovanie lesných ekosystémov*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 599 p.
14. Gadow von K., Hui G. (1999) *Modelling forest development*. Dordrecht: Kluwer academic publishers. 213 p.
15. Groot, A.; Gauthier, S.; Bergeron, Y Stand dynamics modelling approaches for multicohort management of eastern Canadian boreal forests. 2004.. *Silva Fennica* 38: 437-448.

16. Hynynen J., Ojansuu R., Hökkä H., Siipilehto J., Salminen H., Haapala P. (2002) *Models for predicting stand development in MELA System. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja*. Research papers 835. Vantaa Research Center: The Finnish Forest Research Institute. 116 p.
17. Ivanovs, J., Lazdins, A., 2018. Evaluation of tree height and number of trees using lidar data. International Scientific Conference: Engineering for Rural Development, 17, Jelgava (Latvia), 23–25 May 2018.- p. 1390–1394
18. Jansons Ā. (2010) Sagaidāmās klimata izmaiņas Latvijā. No Jansons Ā. (pētījuma vadītājs), Meža apsaimniekošana klimata izmaiņu kontekstā. Pārskats. 31 lpp.
19. Jonsson R, Rinaldi F, Pilli R, et al (2021) Boosting the EU forest-based bioeconomy: Market, climate, and employment impacts. *Technol Forecast Soc Change* 163:120478. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120478>
20. Kerr G, Haufe J (2011) *Thinning practice a Silvicultural guide*. Version 1.0, Forestry Commission, 54 p
21. Krumland. B., Eng. H., (2005) *Site index systems for major young-growth forest woodland species in northern California*. California Forestry Report 4. Sacramento, CA: Department of Forestry and Fire Protection, State of California Resources Agency. 219 p.
22. Kuliešis A. (1993) *Lietuvos medynų prieaugio panaudojimo normatyvai. [Forest yield models and tables in Lithuania]*. Kaunas: Girios Aidas. 384 p.
23. Laar van A., Akça A. (2007) *Forest mensuration*. Dordrecht: Springer. 383 p.
24. Liepa I. (1996) *Pieauguma mēcība*. Jelgava: LLU. 123 lpp.
25. Liepa I. (2018) *Meža taksācija*. Jelgava. LLU. 238 lpp.
26. Matthews R. W., Jenkins T. A. R., Mackie E. D., Dick, E. C. (2016) *Forest Yield: A handbook on forest growth and yield tables for British forestry*. Edinburgh: Forestry Commission. 92 p.
27. Matuzānis J. (1983) *Audžu augšanas gaitas un produktivitātes modeļi*. Apskats. Rīga, LatZTIZPI. 32 lpp.
28. Matuzānis J., Tauriņš J. (1971) *Audžu pieaugums*. Apskats. Rīga: LRZTIPI. 32 lpp.
29. Monserud R. (2003) Evaluating forest models in a sustainable forest management context. *Forest Biometry, Modelling and Information Sciences*, Vol. 1, p. 35–47.
30. Motulsky H. J., Christopoulos A. (2003) *Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression. A practical guide to curve fitting*. San Diego CA USA: GraphPad Software Inc. 351 p.
31. Ozoliņš R. (2002) Forest stand assortment structure analysis using mathematical modelling. *Forestry Studies, Metsanduslikud Uurimused*, Vol. 37, p. 33–42.
32. Ozols J. (1926) *Meža taksācija un ierīcība*. Rīga: Meža departamenta izdevums. 173 lpp.
33. Pommerening, Arne; Grabarnik, Pavel (2019). *Individual-based Methods in Forest Ecology and Management*. Cham: Springer.
34. Porte A., Bartelink H. H. (2002) Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. *Ecological Modelling*, Vol. 150, p. 141–188
35. Pretzsch H., Biber P., Ďurský J. (2002) The single tree based stand simulator SILVA. Construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management*, Vol. 162, p. 3–21.
36. Pretzsch H. (2009) *Forest dynamics, growth and yield*. Berlin, Heidelberg: Springer. 664 p.
37. Sarma P. (1948) *Meža taksācija*. Rīga: Latvijas Valsts izdevniecība. 590 lpp.

38. Sharma R. P., Brunner A., Eid T., Øyen B. H. (2011) Modelling dominant height growth from national forest inventory individual tree data with short time series and large age errors. *Forest Ecology and Management*, Vol. 262, p. 2162–2175.
39. Skovsgaard J. P., Vanclay J. K. (2008) Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry*, Vol. 81, p. 12–31.
40. Skudra P., Dreimanis A. (1993) *Mežsaimniecības pamati*. Rīga: Zvaigzne. 263 lpp.
41. Soest van J., Ayral P., Schober R., Hummel F. C. (1965) *The standardization of symbols in forest*. Maine Agricultural Experiment Station Technical Bulletin 15, 32 p.
42. Spiecker H. 1999 Growth Trends in European Forests – Do We Have Sufficient Knowledge? In: Karjalainen T, Spiecker H., Laroussinie O.(ed.) *Causes and Consequences of Accelerating Tree Growth in Europe*. EFI Proceedings No. 27. Nancy: European Forest Institute, p. 157–171.
43. Spiecker H. 1999a. Overview of recent growth trends in European forests. *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 116 (1–2), p. 33–46.
44. Fridman, Jonas & Ståhl, Göran. (2001). A Three-step Approach for Modelling Tree Mortality in Swedish Forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 16. 455-466.
45. Vanclay J. K. (1994) *Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests*. Copenhagen, Denmark: Wallingford UK: CAB International, Department of Economics and Natural Resource, Royal Veterinary and Agricultural University. 312 p.
46. Thiffault N, Lenz PRN, Hjelm K (2023) Plantation Forestry, Tree Breeding, and Novel Tools to Support the Sustainable Management of Boreal Forests. In: *Advances in Global Change Research*. Springer Science and Business Media B.V., pp 383–401
47. Verhoeven, G.; Doneus, M.; Briese, C.; Vermeulen, F. Mapping by matching: A computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. *J. Archaeol. Sci.* 2012, 39, 2060–2070
48. Weiskittel A. R., Hann D. W., Kershaw J. A. Jr., Vanclay J. K. (2011) *Forest growth and yield modeling*. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. 415 p.
49. West P.W. (2009) *Tree and Forest Measurement*. 2nd Edition. Berlin, Heidelberg: Springer. 191 p.
50. Zeltiņš P, Jansons Ā, Baliuckas V, Kangur A (2023) Height growth patterns of genetically improved Scots pine and silver birch. *For An Int J For Res* cpad057. <https://doi.org/10.1093/FORESTRY/CPAD057>
51. Кивисте А. К. (1988) *Функции роста леса*. Учебно- справочное пособие. Тарту: Эстонская сельскохозяйственная академия, 108 с.
52. *Нормативы для таксации леса Латвийской ССР*. (1988) Матузанис Я.К. (ред.) Рига: Леспроект, 175 с.
53. Donis, J. (2022). Algoritmu izstrāde mežsaimniecības plānošanai. Pētījuma pārskats. 99 lpp.

Pielikums 1. Vienādojumu atbilstības izvērtēšanas statistiskie rādītāji

Vidējā novirze (Mean Residual)

$$MRES = \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (21)$$

Procentuālā vidējā novirze (Mean Residual as %)

$$MRES\% = \frac{\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)}{n}}{\bar{y}_i} 100 \quad (22)$$

Vidējā absolūtā novirze (Absolute Mean residual)

$$AMRES = \frac{\sum|y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (23)$$

Standartnovirze (Root mean square error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1 - p}} \quad (24)$$

Variācijas koeficients (Root mean square error as %)

$$RMSE\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1 - p}}}{\bar{y}_i} 100 \quad (25)$$

Vidējā kvadrātiskā kļūda (Mean square error)

$$MSE = \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p} \quad (26)$$

Modeļa efektivitāte (Model efficiency)

$$MEF = \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (27)$$

Dispersijas attiecība (Variance ratio)

$$VR = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (28)$$

kur y_i – uzņēmējais rādītājs;
 \hat{y}_i – aprēķinātais rādītājs;
 $\bar{\hat{y}}$ – aritmētiski vidējais uzņēmējais rādītājs;
 \bar{y}_i – aritmētiski vidējais aprēķinātais rādītājs;
 p – vienādojuma parametru skaits;
 n – novērojumu skaits.