

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
LATVIJAS VALSTS MEŽZINĀTNES INSTITŪTS “SILAVA”

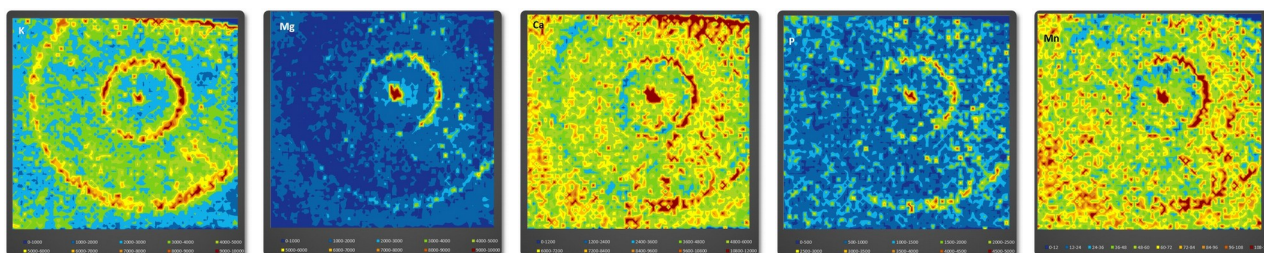
ARTA BĀRDULE

MIKRO- UN MAKROELEMENTU PLŪSMAS ĪSCIRTMETA APŠU HIBRĪDU
(*POPULUS TREMULOIDES* MICHX. × *POPULUS TREMULA* L.)
KOKAUGU STĀDĪJUMĀ LAUKSAIMNIECĪBAS ZEMĒ

Promocijas darba kopsavilkums

Doktora grāda iegūšanai ķīmijā, vides zinātnes nozarē,
vides ķīmijas un ekotoksikoloģijas apakšnozarē

Darba zinātniskie vadītāji:
prof. *Dr. chem.* A. Vīksna
vad. pētn. *Dr. silv.* D. Lazdiņa



RĪGA
2019

Promocijas darbs “Mikro- un makroelementu plūsmas īscirtmeta apšu hibrīdu (*Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L.) kokaugu stādījumā lauksaimniecības zemē” izstrādāts Latvijas Valsts mežzinātnes institūtā “Silava” un Latvijas Universitātes Ķīmijas fakultātes Analītiskās ķīmijas katedrā laika posmā no 2011. gada līdz 2018. gadam, kā arī Austrijas Federālajā Meža, dabas katastrofu un ainavas pētniecības un mācību centrā 2011. gada novembrī un Masārika Universitātē Čehijā 2016. gada oktobrī COST FP0903 un FP1301 Īstermiņa zinātnisko misiju programmu ietvaros.



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**
ANNO 1919



Darba zinātniskie vadītāji:

prof. *Dr. chem.* Arturs Vīksna (Latvijas Universitāte)

vadošā pētniece *Dr. silv.* Dagnija Lazdiņa (Latvijas Valsts mežzinātnes institūts “Silava”)

Darba recenzenti:

prof. *Dr. habil. chem.* Māris Kļaviņš (Latvijas Universitāte)

prof. *Dr. biol.* Artūrs Škute (Daugavpils Universitāte)

vad. pētn. *PhD* Marek Metslaid (Igaunijas Dzīvības zinātņu universitāte)

LU Vides zinātnes nozares promocijas padome:

prof. *Dr. biol.* Viesturs Melecis, promocijas padomes priekšsēdētājs

prof. *Dr. geogr.* Oļģerts Nikodemus, promocijas padomes priekšsēdētāja vietnieks

doc. *Dr. geogr.* Oskars Purmalis, promocijas padomes sekretārs

prof. *Dr. habil. chem.* Māris Kļaviņš

prof. *Dr. habil. paed.* Raimonds Ernšteins

asoc. prof. *Dr. geogr.* Iveta Šteinberga

prof. *Dr. chem.* Arturs Vīksna

asoc. prof. *Dr. geogr.* Raimonds Kasparinskis

doc. *Dr. geogr.* Juris Burlakovs

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Universitātes Vides zinātnes nozares promocijas padomes atklātā sēdē 2019. gada 19. decembrī plkst. 10:00 Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē, Jelgavas ielā 1, 702. telpā.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Raiņa bulvārī 19 (203. telpa).

© Latvijas Universitāte, 2019

© Latvijas Valsts mežzinātnes institūts “Silava”, 2019

© Arta Bārdule, 2019

ANOTĀCIJA

Mikro- un makroelementu plūsmas īscirtmeta apšu hibrīdu (*Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L.) kokaugu stādījumā lauksaimniecības zemē. Bārdule A., zinātniskie vadītāji: prof. Dr. chem. A. Vīksna un vad. pētn. Dr. silv. D. Lazdiņa. Promocijas darbs, 124 lappuses, 63 attēli, 45 tabulas, 15 vienādojumi, 187 literatūras avoti. Latviešu valodā.

APŠU HIBRĪDS, PAMATMĒSLOJUMA IETEKME, AUGSNE, AUGSNES ŪDENS, AUGU UN SĒŅU BIOMATERIĀLS, ELEMENTU PLŪSMAS.

Darbā pētītas mikro- un makroelementu plūsmas juvenīlā apšu hibrīdu kokaugu stādījumā lauksaimniecības zemē, kā arī dažāda veida pamatmēslojuma ietekme uz tām. Pētījuma objekts, kas sastāv no 32 eksperimentāliem apšu hibrīdu parauglaukumiem, ierīkots lauksaimniecības zemē Latvijas centrālajā daļā 2011. gada pavasarī, kopējā pētījuma objekta platība ir 16 ha. Apšu hibrīdu ietvarstādīti gan agromežsaimniecības sistēmā (attālums starp kokiem – 2,5 x 5,0 m), gan kā kokaugu stādījums (attālums starp kokiem – 2,0 x 2,0 m). Augsnes ielabošanai kā barības elementus un augsnes buferkapacitāti kompensējošs augsnes pamatmēslojums izmantotas notekūdeņu attīrīšanas dūņas (deva 10 t_{sausna} ha⁻¹) un zaļās enerģijas ražošanas blakusprodukti – stabilizēti koksnes pelni (deva 6 t_{sausna} ha⁻¹) un digestāts (deva 30 t ha⁻¹). Mikro- un makroelementu plūsmu raksturošanai ekosistēmā sistemātiski analizēti šādi vides paraugi: augsne; augsnes ūdens; nokrišņu ūdens; apšu hibrīdu lapas, zari, stumbru gadskārtas un nobiras; parasto apšubeku (*Leccinum aurantiacum* (Bull.) Gray) augļķermeņi.

Pētījumā noskaidrots, ka ātraudzīgo apšu hibrīdu stādījuma izveidošana lauksaimniecības zemē un pamatmēslojuma ienese būtiski ietekmē gan makroelementu, gan mikroelementu, kā arī to stabilo izotopu plūsmas ekosistēmā visā pētījuma periodā (no 2011. gada līdz 2015. gadam), turklāt vides paraugus kā vides apstākļu maiņas indikatorus atbilstoši to jutīgumam jeb atbildes reakcijai var ierindot šādi: augu un sēņu biomateriāls > augsnes ūdens > augsne. Pirmo piecu gadu laikā pēc apšu hibrīdu stādījuma izveidošanas augsnē netiek uzkrāts papildus C un N, turklāt augsnes dziļākajos slāņos novērots būtisks C un N uzkrājuma samazinājums. Viens no būtiskākajiem ekosistēmas pakalpojumiem, ko nodrošina juvenīli apšu hibrīdu stādījumi lauksaimniecības zemē, ir barības elementu izskalošanās samazinājums no augsnes, kas liecina par efektīvu barības elementu apriti attiecīgajā ekosistēmā un lokālu virsējo gruntsūdeņu kvalitātes uzlabošanos. Piecu gadu laikā pēc apšu hibrīdu stādījumu ierīkošanas NO₃⁻-N izskalošanās samazinājās līdz pat 99,6%, PO₄³⁻-P izskalošanās samazinājās līdz 97,1%, bet K izskalošanās samazinājās līdz 76,5%. Pamatmēslojuma ienese lauksaimniecības zemē būtiski ietekmē ne tikai δ¹³C un δ¹⁵N vērtības apšu hibrīdu lapās un parasto apšubeku augļķermeņos pat 4 un 5 gadus pēc pamatmēslojuma ieneses, bet arī mikro- un makroelementu stabilo izotopu relatīvo daudzumu apšu hibrīdu gadskārtās. Vienas gadskārtas ietvaros vērojamas būtiskas makroelementu relatīvā daudzuma atšķirības starp agrīno un vēlīno koksni – vēlīnajā koksnē konstatēts būtiski lielāks makroelementu relatīvais daudzums. Kaut arī augsnes un augsnes ūdens pH liecina par ierobežotu smago metālu mobilitāti pētījuma objektā, vērojama būtiska pamatmēslojuma, īpaši koksnes pelnu, ietekme uz smago metālu vidējo relatīvo daudzumu apšu hibrīdu gadskārtās.

SATURS

Ievads.....	5
Promocijas darba aprobācija.....	7
Saīsinājumu saraksts.....	8
Promocijas darba konspektīvais izklāsts.....	9
1. Literatūras apskats.....	9
2. Eksperimentālā daļa.....	10
3. Rezultāti un to izvērtējums.....	13
3.1. Augsnes īpašības un sastāvs.....	13
3.2. Augsnes ūdens ķīmiskais sastāvs.....	19
3.3. Augu un sēņu biomasas ķīmiskais sastāvs.....	26
Galvenie secinājumi.....	34
Literatūras saraksts.....	35
Pateicības.....	37

IEVADS

Pēdējās desmitgadēs pasaules mērogā dažādu ekosistēmu pakalpojumu potenciāls ir samazinājies, un tam var būt būtiska negatīva ietekme uz cilvēku labklājību nākotnē. Līdz ar to vides zinātņu pētnieki globāli tiek aicināti pievērsties dažādu, tajā skaitā vidi regulējošo ekosistēmu pakalpojumu, novērtējumam. Kaut arī Latvijas galvenais dabas resurss ir zeme un tās auglība, daļa no lauksaimniecības zemēm netiek apsaimniekotas jau teju divdesmit gadus. Nekoptas lauksaimniecības zemju platības Latvijā aptver ap 257 tūkst. ha (2018. gads), kas veido ap 11% no visas lauksaimniecībā izmantojamo zemju platības. Ātraudzīgo kokaugu stādījumu ierīkošana neizmantotās lauksaimniecības zemēs ir veids, kā saimnieciski izmantot vienu no valsts galvenajiem resursiem – zemi, nākotnē neizslēdzot šo platību atgriešanu lauksaimnieciskajai ražošanai. Turklāt atbilstoši Apvienoto Nāciju Organizācijas Vispārējai konvencijai par klimata pārmaiņām un tās Kioto protokolam lauksaimniecības zemju apmežošana tiek rekomendēta kā siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanas mehānisms. Vienlaicīgi arī fitoremediācija, barības elementu izskalošanās no lauksaimniecības zemēm samazināšana un gruntsūdens kvalitātes uzlabošana ir būtiski ekosistēmas pakalpojumi, ko nodrošina ātraudzīgo kokaugu stādījumi. Baltijas jūras reģionā apšu hibrīds (*Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L.) ir viena no daudzsološākām koku sugām (hibrīdiem) biomasas ražošanai ātrā biomasas pieauguma dēļ. Latvijā līdz šim ~ 500 ha lauksaimniecības zemēs ir ierīkoti apšu hibrīdu stādījumi. Bet, neskatoties uz vides kvalitāti uzlabojošiem aspektiem, visa veida pastāvīga biomasas iznešana no lauksaimniecības zemēm izmaina barības elementu saturu augsnē, samazina augsnes buferkapacitāti, kā arī var ietekmēt gan virszemes ūdens, gan gruntsūdeņu kvalitāti. Sadzīves atkritumi (notekūdeņu attīrīšanas dūņas) un bioenerģijas ražošanas blakusprodukti (koksnes pelni un fermentācijas atliekas jeb digestāts; turpmāk tekstā tiks lietots termins digestāts) var tikt izmantoti kā barības elementus un augsnes buferkapacitāti kompensējošs augsnes pamatmēslojums. Tajā pašā laikā ir jāizvērtē ekoloģiskie riski, kas saistīti ar augsnes, augsnes ūdens un augu materiāla potenciālu piesārņošanu ar smagajiem metāliem, kā arī papildus barības elementu izskalošanu no augsnes mēslošanas rezultātā, un tie jāsalīdzina ar ieguvumiem, kas rodas no augiem izmantojamo barības vielu atgriešanas aprītē, ienesot pamatmēslojumu. Apšu hibrīdu daļas (piemēram, apšu hibrīdu stumbra gadskārtas vai lapas), kā arī, piemēram, sēņu, kas izplatījušās ekosistēmā, auglķermeni var tikt izmantoti kā bioindikatoru vides kvalitātes raksturošanai. Savukārt, moderno analīžu metožu attīstība ļauj veikt detālus bioindikatoru ķīmiskā sastāva (makroelementu, mikroelementu un to izotopu sastāva) pētījumus.

Hipotēze

Pamatmēslojuma ienese būtiski ietekmē mikro- un makroelementu plūsmas lauksaimniecības zemē ierīkotā apšu hibrīdu (*Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L.) kokaugu stādījumā.

Promocijas darba mērķis ir noskaidrot notekūdeņu attīrīšanas dūņu, koksnes pelnu un digestāta pamatmēslojuma ietekmi uz mikro- un makroelementu plūsmām īscirtmeta apšu hibrīdu (*Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L.) kokaugu stādījumā lauksaimniecības zemē.

Darba uzdevumi

- Parauglaukumu izveidošana, regulāra un sistemātiska vides paraugu (augšņu, augšņu ūdens, atmosfēras nokrišņu, augu un sēņu biomateriāla) ņemšana apšu hibrīdu kokaugu stādījumā lauksaimniecības zemē laika posmā no 2011. gada līdz 2015. gadam.
- Augšņu un augšņu ūdens fizikālo un ķīmisko īpašību raksturojums, augšņu un augšņu ūdens kvalitāti raksturojošo parametru izmaiņu novērtējums pēc pamatmēslojuma ienesānas un apšu hibrīda stādījuma izveidošanas lauksaimniecības zemē.
- Pamatmēslojuma ietekmes uz augu un sēņu biomateriālu (apšu hibrīdu lapu, zaru, stumbra gadskārtu un nobiru, parasto apšubeku (*Leccinum aurantiacum* (Bull.) Gray) auglķermeņu) ķīmisko sastāvu izvērtējums.
- No augšņu izskalotā barības elementu apjoma novērtēšana, izmantojot virsējo gruntsūdeņu noteces datus, kuri aprēķināti, izmantojot Latvijas Lauksaimniecības universitātē izstrādāto konceptuālo modeli METQ2012.

Zinātniskā novitāte

Līdz šim hemiboreālajā reģionā nav veikta detāla mikro- un makroelementu plūsmu analīze ātraudzīgo apšu hibrīdu (*Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L.) kokaugu stādījumā lauksaimniecības zemē pēc pamatmēslojuma ieneses. Attīstoties modernām analīzes metodēm, tādām, kā, piemēram, lāzera albācijas induktīvi saistītās plazmas masspektrometrijai (LA-ICP-MS) un izotopu attiecības masspektrometrijai (IRMS), ir iespēja novērtēt makro- un mikroelementu stabilo izotopu relatīvo daudzumu, kā arī stabilo vieglo izotopu attiecību vides paraugos, kas atspoguļo attiecīgās ekosistēmas vides kvalitāti kopumā, kā arī kokaugu stādījuma apsaimniekošanas veida ietekmi uz vidi. Pētījuma ietvaros izvērtēta pamatmēslojuma ietekme uz stabilo oglekļa ($\delta^{13}\text{C}$) un slāpekļa ($\delta^{15}\text{N}$) izotopu attiecību bioindikatoros, kā arī veikti izotopu relatīvā daudzuma mērījumi apšu hibrīdu stumbra gadskārtās, izmantojot LA-ICP-MS, kas potenciāli ir viena no piemērotākajām metodēm dendroķīmijas skrīninga pētījumiem.

Darba praktiskā izmantošana

Eiropas mēroga ziņojumos un publikācijās tiek uzsvērts zinātniski pamatotu un praktiski pielietojamu datu trūkums un zināšanu robeži par ātraudzīgo kokaugu stādījumu ietekmi uz ekosistēmu pakalpojumiem. Latvijas Vides politikas pamatnostādnes 2014.-2020. gadam kā viena no aktuālākajām problēmām augšņu aizsardzības jomā ir minēts sistematizētas informācijas trūkums par augšņu kvalitāti, uzsverot informācijas trūkumu par enerģētisko kultūru ietekmi uz augšni. Mikro- un makroelementu plūsmu dokumentācija un zināšanas par barības elementu satura izmaiņām augšnē un augšņu ūdeņos ātraudzīgo apšu hibrīdu (*Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L.) kokaugu stādījumā lauksaimniecības zemē pēc pamatmēslojuma ieneses sniegs nozīmīgu ieguldījumu aprites bioekonomikas koncepta veicinošu pasākumu ietekmes uz vidi novērtēšanā un palīdzēs izvēlēties labākās kokaugu stādījumu lauksaimniecības zemē apsaimniekošanas alternatīvas. Turklāt pētījuma ietvaros iegūtie elementu plūsmu dati ļauj veikt konkrētā tipa agromežsaimniecisko sistēmu atsevišķu regulējošo ekosistēmu pakalpojumu novērtēšanu hemiboreālajā reģionā, kam raksturīga intensīva barības elementu izskalošanās no augšnes.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Promocijas darba rezultāti apspriesti un atspoguļoti 6 zinātniskās publikācijās, 1 starptautiskā zinātniskā kongresā, 6 starptautiskās zinātniskās konferencēs un 1 Latvijas mēroga konferencē. Promocijas darba autores Hirša indekss atbilstoši Scopus datubāzei (21.10.2019.) ir 6.

Publikācijas par promocijas darba tēmu

1. **Bardule A.**, Busa L., Lazdina D., Viksna A., Tvrdonova M., Kanicky V., Vaculovic T. **2019**. Variation of major elements and toxic heavy metals occurrence in a fertilized juvenile hybrid aspen (*Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L.) tree rings in marginal land. *IForests* (Scopus, CiteScore 2017 – 1,47, Q2). Publikācija apstiprināta.
2. Kļaviņš I., **Bārdule A.**, Lībiete Z., Lazdiņa D., Lazdiņš A. **2019**. Impact of biomass harvesting on nitrogen concentration in the soil solution in hemiboreal woody ecosystems. *Silva Fennica* (Scopus, CiteScore 2017 — 1,77, Q1), 53(4), 10016. Publikācija apstiprināta.
3. **Bārdule A.**, Grīnfelde I., Lazdiņa D., Bārdulis A., Sarkanabols T. **2017**. Macronutrient leaching in a fertilized juvenile hybrid aspen (*Populus Tremula* L. × *P. Tremuloides* Michx.) plantation cultivated in an agroforestry system in Latvia. *Hydrology Research* (Scopus, CiteScore 2017 – 1,57, Q2), 49(2), 407-420.
4. **Bardule A.**, Lupikis A., Butlers A., Lazdins A. **2017**. Organic carbon stock in different types of mineral soils in cropland and grassland in Latvia. *Zemdirbyste-Agriculture* (Scopus, CiteScore 2017 – 0,81, Q3), 104(1), 3-8.
5. **Bardule A.**, Lazdins A., Sarkanabols T., Lazdina D. **2016**. Fertilized short rotation plantations of hybrid aspen (*Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L.) for energy wood or mitigation of GHG emissions. *Engineering for Rural Development* (Scopus, IPP 2015 0,275), 2016, 248-255.
6. **Bardule A.**, Rancane S., Gutmane I., Berzins P., Stesele V., Lazdina D., Bardulis A. **2013**. The effect of fertiliser type on hybrid aspen increment and seed yield of perennial grass cultivated in the agroforestry system, *Agronomy Research* (Scopus, CiteScore 2013 – 0,20, Q4), 11(1), 13-24.

Ar promocijas darba tēmu saistītas publikācijas

7. **Bārdule A.**, Laiviņš M., Lazdiņš A., Bārdulis A., Zadiņa M. **2017**. Changes in soil organic O layer composition after surface fire in the dry-mesic pine forest in Rucava (Latvia). *Baltic Forestry* (Scopus, CiteScore 2017 – 0,87, Q2), 23(2), 490-497.
8. Lupikis A., **Bardule A.**, Lazdins A., Stola J., Butlers A. **2017**. Carbon stock changes in drained arable organic soils in Latvia: results of a pilot study. *Agronomy Research* (Scopus, CiteScore 2017 – 0,94, Q2), 15(3), 788-798.
9. Lībiete Z., **Bardule A.**, Murniece S., Lupikis A. **2017**. Impact of clearfelling on nitrogen content in soil-, ground-, and surface waters: Initial results from a study in Latvia. *Agronomy Research* (Scopus, CiteScore 2017 – 0,94, Q2), 15(3), 767-787.
10. Lībiete Z., **Bardule A.**, Lupikis A. **2016**. Long-term effect of spruce bark ash fertilization on soil properties and tree biomass increment in a mixed Scots pine – Norway spruce stand on drained organic soil. *Agronomy Research* (Scopus, CiteScore 2016 – 0,93, Q2), 14(2), 495-512.

11. Kļaviņa D., Muižnieks I., Gaitnieks T., Nikolajeva V., Lazdiņa D., Lazdiņš A., **Bārdule A.**, Menkis A. **2016**. Fungal communities in roots of Scots pine and Norway spruce saplings grown for 10 years on peat soils fertilized with wood ash. *Baltic Forestry* (Scopus, CiteScore 2016 – 0,82, Q2), 22(1), 25-33.
12. Daugaviete M., Lazdina D., Bambe B., **Bardule A.**, Bardulis A., Daugavietis U. **2015**. Productivity of different tree specie in plantations on agricultural soils and related environmental impacts. *Baltic Forestry* (Scopus, CiteScore 2015 – 0,47, Q3), 21(2), 349-358.
13. Daugaviete, M., Korica, M.A., Silins, I., Barsevskis, A., Bardulis, A., **Bardule, A.**, Spalvis, K., Daugavietis, M. **2015**. The use of mineral nutrients for biomass production by young birch stands and stands vitality in different forest growing conditions. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 4, 177-189.
14. Bārdulis A., Lazdiņa D., Daugaviete M., **Bārdule A.**, Daugavietis U., Rozītis G. **2015**. Above ground and below ground biomass in grey alder *Alnus incana* (L.) Moench. young stand on agricultural land in central part of Latvia. *Agronomy Research* (Scopus, CiteScore 2015 – 1,12, Q2), 13(2), 277-286.
15. Lazdiņa D., Bārdulis A., **Bārdule A.**, Lazdiņš A., Zeps M., Jansons Ā. **2014**. The first three-year development of ALASIA poplar clones AF2, AF6, AF7, AF8 in biomass short rotation coppice experimental cultures in Latvia. *Agronomy Research* (Scopus, CiteScore 2014 – 1,10, Q2), 12(2), 543-552.
16. Gruduls K., **Bārdule A.**, Zālītis T., Lazdiņš A. **2013**. Characteristics of wood chips from logging residues and quality influencing factors. *Research for Rural Development*, 2, 49-54.
17. **Bārdule A.**, Lazdiņš A., Bārdulis A., Lazdiņa D., Stola J. **2012**. Meža nobiru frakcijas un to ķīmiskais sastāvs priežu (*Pinus sylvestris* L.) audzē 2. līmeņa meža monitoringa parauglaukumā. *Proc. Latv. Univ. Agr.*, 27(322), 16-21.

Dalība vasaras skolās, kas saistīta ar promocijas darba izstrādi

1. COST akcijas FP0903 un ES0903 vasaras skola “Ekofizioloģisko mērījumu tehnika klimata pārmaiņu un piesārņojuma kontekstā”, Monte Bondone, Trento, Itālija, 2011. gada 5.-9. septembris.
2. COST akcijas FP1305 BioLink vasaras skola “R lietošana augsnes procesu modelēšanai”, Pokljuka, Slovēnija, 2015. gada 6.-10. jūlijs.

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

AH – apšu hibrīds (*Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L.)

EP – ekosistēmu pakalpojumi (*ecosystem services*)

IAEA – Starptautiskā Atomu enerģijas aģentūra (*International Atomic Energy Agency*)

IM – iekšējā miza (*inner bark*)

IRMS – izotopu attiecības masspektrometrija (*isotope ratio mass spectrometry*)

LA-ICP-MS – lāzera ablācijas induktīvi sasīdītās plazmas masspektrometrija (*laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry*)

PL – parauglaukums (*sample plot*)

PROMOCIJAS DARBA KONSPEKTĪVAIS IZKLĀSTS

1. LITERATŪRAS APSKATS

Ekosistēmas sniedz virkni pakalpojumu, kas ir būtiski cilvēku labklājībai, veselībai, iztikai un izdzīvošanai (Costanza *et al.*, 2014; Nikodemus *et al.*, 2018). Ekosistēmu pakalpojumu (EP) koncepts ir salīdzinoši jauns pētījumu virziens, zinātnieki tā izstrādei ir pievērsušies kopš 20. gs. beigām, kad parādījās pirmās nozīmīgās publikācijas šajā jomā (Nikodemus *et al.*, 2018). Pēdējā desmitgadē ekosistēmu pakalpojumu jēdziens ir ieguvis paplašinātu ietvaru, ar to saprotot ekosistēmas struktūru un funkciju ieguldījumus cilvēku labklājībā, kas veidojas kombinācijā ar cilvēku darbības ieguldījumu ekosistēmā (Burkhard *et al.*, 2012). Līdz ar to jāuzsver, ka ekosistēmu pakalpojumi ir vērtējami arī kontekstā ar cilvēka pārveidotām un ietekmētām ekosistēmām. Promocijas darba ietvaros īscirtmeta apšu hibrīdu (*Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L.) kokaugu stādījumā lauksaimniecības zemē pētīts mikro- un makroelementu plūsmu nodrošinājums, kas ieskaitāms regulējošo ekosistēmu pakalpojumu kategorijā (pakalpojumi, ko sniedz ekosistēmas caur to regulācijas funkcijām; TEEB, 2010). Literatūras izpētes rezultātā secināts, ka kokaugu stādījumi lauksaimniecības zemē, tai skaitā agromežsaimniecības sistēmas, atkarībā no sākotnējā zemes seguma un zemes izmantošanas veida var būtiski ietekmēt virkni regulējošo EP, kas saistīti ar mikro- un makroelementu plūsmām (Jose, 2009; Daugaviete *et al.*, 2017). Turklāt zinātniskajā literatūrā nereti aprakstīti konceptuāli pretēji pētījumu rezultāti attiecībā uz kokaugu stādījumu lauksaimniecības zemē ietekmi uz elementu apriti ekosistēmā. Būtiski zināšanu robi par elementu apriti kokaugu stādījumos lauksaimniecības zemē ir attiecināmi tieši uz hemiboreālo reģionu, kuram, ņemot vērā atšķirīgas augšņu īpašības, kā arī klimatiskos un hidroloģiskos apstākļus, nevar pielīdzināt pētījumu rezultātus, kas iegūti citos bioģeogrāfiskos reģionos.

Pēdējo gadu literatūra norāda uz īpaši strauju moderno analīžu metožu, kas piemērotas vides paraugu sastāva, tai skaitā izotopiskā sastāva, noteikšanai, attīstību. Dažas no šīm metodēm, kas ir izmantotas arī promocijas darba izstrādes gaitā, ir stabilo izotopu attiecības masspektrometrija (IRMS) un lāzera ablācijas induktīvi saistītās plazmas masspektrometrija (LA-ICP-MS). IRMS ir masspektrometrijas paveids, kurā masspektrometrijas metode tiek lietota, lai mērītu paraugu izotopisko sastāvu (Muccio & Jackson, 2009; Carter & Barwick, 2011). Stabilo izotopu attiecība vienmēr tiek mērīta attiecībā pret standartu, ko katrai izotopu attiecībai definējusi Starptautiskā Atomu enerģijas aģentūra (IAEA). Pieņemts stabilo izotopu dabiskās izplatības variāciju izteikt ar δ , atbilstoši 1.1. un 1.2. vienādojumiem:

$$\text{Attiecība}(R) = \frac{\text{smagā izotopa izplatība}}{\text{vieglā izotopa izplatība}} \quad (1.1.) \quad \delta = \left(\frac{R_{\text{paraugs}}}{R_{\text{standarts}}} - 1 \right), \text{ kur} \quad (1.2.)$$

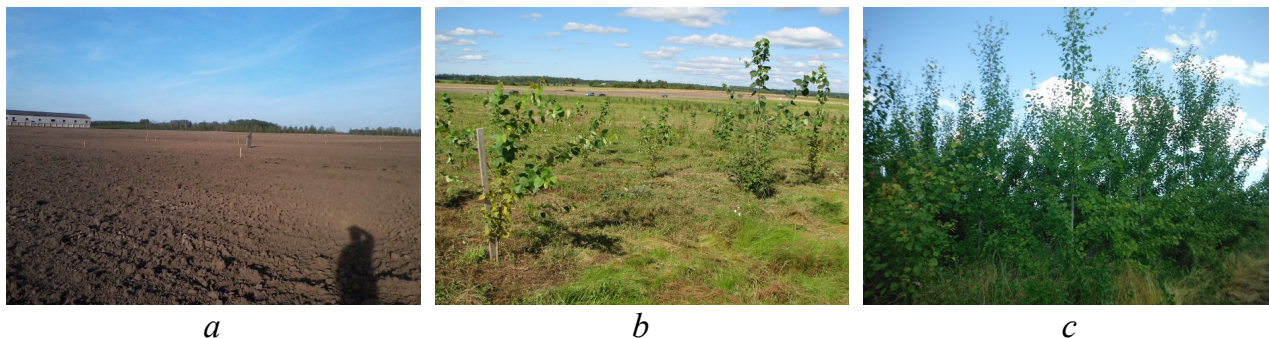
R_{paraugs} – izotopu attiecība paraugā; $R_{\text{standarts}}$ – izotopu attiecība standartā (Carter & Barwick, 2011).

LA-ICP-MS tiek atzīta par vienu no labākajām metodēm, lai veiktu multielementu dendroanalīzi ar ļoti augstu telpisko izšķirtspēju un zemu detektēšanas robežu, kas ļauj spriest par elementu un to izotopu sastāvu un apriti kokaugu gadskārtās. Ablācijas jeb erozijas metožu pamatā ir ārējas enerģijas pievadīšana paraugam, kura rezultātā reprezentatīva parauga daļa tiek pārvērsta tvaika stāvoklī vai cietu aerosolu veidā un tālāk tiek ievadīta induktīvi saistītās plazmas sistēmā atomizācijai un jonizācijai (Vīksna, 2011).

Lāzera-materiāla mijiedarbība ir komplekss process, kas rezultējas (1) parauga iztvaikošanā vai ablācijā; (2) atomu, jonu, molekulāru savienojumu izveidošanā. Lāzera ablācija ir process, kura laikā enerģija (lāzera stars) tiek fokusēta uz parauga virsmu, parauga materiāls tiek daļēji ietvaicēts no virsmas jeb tiek ģenerētas maza izmēra daļiņas (Vīksna, 2011; Ghent University, 2017).

2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

Pētījuma objekts (32 eksperimentālie apšu hibrīdu parauglaukumi) ierīkots lauksaimniecības zemē Latvijas centrālā daļā, Skrīveru novadā (56°41 N un 25°08 E) 2011. gada pavasarī.



2.1. att. Pētījuma objekts (a – 2011. gada pavasaris; b – 2012. gada vasara; c – 2015. gada vasara)

Pētījuma objektā konstatētie augšņu tipi atbilstoši Latvijas klasifikācijai ir Velēnpodzolētā virsēji glejotā augsne (atbilstoši 2006. gada Pasaules augšņu klasifikātoram – *Luvic Stagnic Phaeozem, Hypoalbic*) un Virsēji velēnglejotā augsne (atbilstoši 2006. gada Pasaules augšņu klasifikātoram – *Mollic Stagnosol, Ruptic, Calcaric, Endosiltic*) (Kārklīņš & Rancāne, 2012a, 2012b), dominējošā augsnes granulometriskā sastāva grupa 0-20 cm dziļumā ir smilšmāls un smaga mālsmilts, 20-80 cm dziļumā – smaga mālsmilts. 2012. gada rudenī pētījuma objekts tika iežogots. Pēdējo reizi augsne arta 2011. gadā.

Viengadīgi apšu hibrīdu (*Populus tremuloides* Michx. × *Populus tremula* L.) ietvarstādi (klons Nr. 4 un Nr. 28) tika stādīti gan agromežsaimniecības sistēmā (attālums starp kokiem – 2,5 x 5,0 m), gan kā kokaugu stādījums (attālums starp kokiem – 2,0 x 2,0 m). Stādmateriāla ražotājs – AS “Latvijas valsts meži” kokaudzētava “Kalsnava”, Latvija. Apšu hibrīdu ietvarstādi audzēti bagātinātā kūdras substrātā (kasetes HIKO V-310), pavairoti meristēmu kultūrās. Parauglaukumos, kas ierīkoti agromežsaimniecības sistēmā, starp apšu hibrīdu kokaugu joslām, kuru platums ir 5 m, 2,5 m platās joslās sētas divas tauriņziežu šķirnes (*Galega orientalis* Lam. “Gale” un *Lupinus polyphyllus* L. “Valfrid”) un divas ilggadīgo zālāju šķirnes (*Phalaris arundinacea* L. “Bamse” un *Festulolium pabulare* “Felina”) sēklu ieguvei.

Augsnes ielabošanai kā barības elementus un augsnes buferkapacitāti kompensējošs augsnes pamatmēslojums izmantotas notekūdeņu attīrīšanas dūņas un zaļās enerģijas ražošanas blakusprodukti – stabilizēti koksnes pelni un digestāts no metāna reaktora (2.1. tabula). Koksnes pelnu un notekūdeņu dūņu pamatmēslojums ienests 2011. gada pavasarī īsi pirms apšu hibrīdu stādu stādīšanas, bet digestāta pamatmēslojums – uzreiz pēc apšu hibrīdu stādu stādīšanas. Paralēli izveidoti kontroles parauglaukumi, kur pamatmēslojums netika ienests.

Pamatmēslojuma raksturojums

Pamatmēslojums	Izcelsme	Deva	Izkliedes veids	Ar mēslojumu ienestais barības elementu daudzums, kg ha ⁻¹		
				N _{kop.}	P _{kop.}	K _{kop.}
Stabilizēti koksnes pelni	Siguldas katlu māja	6 t sausna ha ⁻¹	mehāniska izkliede	2,6	65	190
Digestāts	Metāna reaktors Vecaucē	30 t ha ⁻¹	punktveida	69	1,2	99
Notekūdeņu attīrīšanas dūņas	SIA "Aizkraukles ūdens"	10 t sausna ha ⁻¹	mehāniska izkliede	259	163	22

Vides paraugu ņemšanas raksturojums un nosakāmie parametri

Vides paraugi	Paraugu ņemšanas īss raksturojums	Nosakāmie parametri
Augsnes paraugi	Paraugi ņemti 32 apšu hibrīdu kokaugu PL (16 PL agromežsaimniecības sistēmā, 16 PL tradicionālā kokaugu stādījumā) no noteiktiem augsnes dziļumiem (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm un 60-80 cm dziļumā) 2011. gada jūlijā (pēc pamatmēslojuma ienešanas), 2013. gada augustā un 2015. gada oktobrī. Augsnes paraugi katrā PL ņemti divās paralēlās sērijās: 1) ar zondi trijos atkārtojumos no noteiktiem dziļumiem ķīmiskajām analizēm; 2) ar zondi, kuras cilindra tilpums ir 100 cm³, trijos atkārtojumos no noteiktiem dziļumiem (no augsnes slāņa vidusdaļas) blīvuma un augsnes granulometriskā sastāva noteikšanai. 2012. gada jūlija beigās un augusta sākumā ņemti augsnes paraugi no divu profilbedru ģenētiskajiem horizontiem līdz 2,0 m dziļumam <i>Dr. habil. agr. Alda Kārklīņa</i> vadībā.	• augsnes blīvums • granulometriskais sastāvs (māla, putekļu un smilts daļiņu īpatsvars) • pH(CaCl₂), pH(KCl), pH(H₂O) • karbonātu sastāvā esošā oglekļa saturs (C_{karb.}) • kopējais oglekļa saturs un organisko vielu sastāvā esošā oglekļa saturs (C_{kop.} un C_{org.}) • kopējā slāpekļa saturs (N_{kop.}) • nitrātu sastāvā esošā slāpekļa saturs (NO₃⁻-N) • amonija jonu sastāvā esošā slāpekļa saturs (NH₄⁺-N) • kopējā sēra saturs (S_{kop.}) • fosfātu sastāvā esošā fosfora saturs (PO₄³⁻-P) • augiem viegli uzņemamā K saturs • konc. HNO₃ un konc. HClO₄ maisījumā ekstrahējamo elementu (P, K, Ca, Mg, Fe, Al, S, Mn, Cu, Zn, Co, Cr, Ni, Pb, Cd, As, V, Mo) saturs • kopējais Hg saturs
Augsnes ūdens un atmosfēras nokrišņu paraugi	No 2011. gada augusta līdz 2015. gada oktobrim 14 apšu hibrīdu kokaugu PL veikts augsnes ūdens kvalitātes monitorings. Augsnes ūdens paraugu ņemšanai 30 cm un 60 cm dziļumā augsnē vertikāli ievietoti vakuuma lizimetru (<i>Eijkelkamp</i>) pāri. Augsnes ūdens paraugi ņemti 2 reizes mēnesī visā bezsala periodā. No 2012. gada janvāra līdz 2015. gada decembrim sešos PL veikts atmosfēras nokrišņu daudzuma monitorings un paraugu ņemšana. Atmosfēras nokrišņu paraugu ņemšanai izmantotas pastāvīgi atvērtas plastmasas piltuves, kas savienotas ar plastmasas pudelēm un aprīkotas ar putnu atbaidīšanas gredzeniem.	• ūdens pH • elektrovadītspēja (EVS) • kopējā sārmainība • fosfātjonu sastāvā esošā fosfora saturs (PO₄³⁻-P) • nitrātjonu sastāvā esošā slāpekļa saturs (NO₃⁻-N) • amonija jonu sastāvā esošā slāpekļa saturs (NH₄⁺-N) • K, Na, Ca un Mg saturs • kopējā slāpekļa saturs (N_{kop.})

Vides paraugi	Paraugu ņemšanas īss raksturojums	Nosakāmie parametri
Augsnes ūdens un atmosfēras nokrišņu paraugi	Atmosfēras nokrišņu paraugu ņemšanas piltuvju augstums – 1,2 m, piltuves laukums – 602,6 cm ² . Ar pastāvīgi atvērtā tipa plastmasas piltuvēm tiek savākti arī sausie atmosfēras nosēdumi un gāzes bezlietus periodā.	- kopējā izšķīdušā oglekļa, izšķīdušā organiskā oglekļa un izšķīdušā neorganiskā oglekļa saturs ($C_{kop.}$, $C_{org.}$, $C_{neorg.}$) - Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd un Pb kopējais saturs
Augu un sēņu biomateriāla paraugi: nobiru paraugi; apšu hibrīdu lapu un zaru paraugi; parasto apšubeku auglķermeņu paraugi; apšu hibrīdu stumbra paraugi	Nobiru paraugi apšu hibrīdu kokaugu stādījumā ņemti 2014. un 2015. gadā visa gada garumā. Nobiru paraugu uztveršanas aprīkojums novietots zem apšu hibrīdu vainagiem četros PL, kur sākotnēji ienesti dažādi pamatmēslojuma veidi. Nobiru uztveršanas virsmas laukums – 0,5 m². Katrā PL izvēlēti un iezīmēti trīs paraugkoki, no kuriem katras veģetācijas sezonas beigās ņemti zaru un lapu paraugi. Parasto apšubeku (<i>Leccinum aurantiacum</i> (Bull.) Gray) auglķermeņu paraugi ņemti pētījumu objektā 2014. un 2015. gada rudenī. Apšu hibrīdu stumbra paraugi ņemti no 12 paraugkokiem 2016. gada oktobrī, izmantojot nerūsējošā tērauda rokas zāģi. Stumbra ripu paraugi ņemti 0,20 m augstumā virs sakņu kakla, lai paraugā būtu pārstāvētas visas sešas gadskārtas. Stumbra ripas biezums ~ 2 cm.	- kopējais oglekļa saturs ($C_{kop.}$) - kopējais slāpekļa saturs ($N_{kop.}$) - kopējais sēra saturs ($S_{kop.}$) - kopējais fosfora saturs ($P_{kop.}$) - kopējais K, Ca un Mg saturs - stabilo oglekļa ($\delta^{13}C$) un slāpekļa ($\delta^{15}N$) izotopu attiecība ¹³C, ²⁶Mg, ²⁷Al, ³¹P, ³⁹K, ⁴⁴Ca, ⁵³Cr, ⁵⁵Mn, ⁵⁶Fe, ⁶⁰Ni, ⁶³Cu, ⁶⁶Zn, ¹¹¹Cd, ²⁰²Hg un ²⁰⁸Pb relatīvais saturs

Izskaloto barības elementu apjoma aprēķināšanai izmantoti augsnes ūdens, kas ņemts 60 cm dziļumā, ķīmiskā sastāva empīriskie dati un augsnes noteces (virsējo gruntsūdeņu noteces) dati, kuri laika posmam no 2011. gada 1. janvāra līdz 2015. gada 31. decembrim aprēķināti, izmantojot konceptuālo modeli METQ, kura jaunākā versija METQ2012 izstrādāta Latvijas Lauksaimniecības universitātes Meža un ūdens resursu zinātniskajā laboratorijā (Grinfelde & Lauva, 2012).

Datu statistiskā analīze veikta, izmantojot Libre Office Calc un R programmatūras funkcijas. Dažādu parametru sakarību novērtēšanai izmantoti Pīrsona korelācijas koeficienti un funkciju (regresiju) determinācijas koeficienti. Datu kopas atbilstība normālajam sadalījumam pārbaudīta, izmantojot grafisko analīzi programmā R – funkciju *qqPlot()* paketē *car*, kas attēlo attiecību starp reālo datu kvantilēm un teorētisko datu kvantilēm (teorētiskie dati veidoti, balstoties uz reālo datu statistiskajiem rādītājiem tā, lai tie atbilstu normālajam sadalījumam) (Elferts, 2013). Datu paraugkopu salīdzināšanai un atšķirību būtiskuma novērtēšanai izmantota programma R. Divu paraugkopu salīdzināšanai ar neparametriskām analīzes metodēm izmantots Vilkoksona tests (*Wilcoxon rank sum test with continuity correction* vai *Wilcoxon signed rank test* atkarībā no tā, vai divas paraugkopas ir atkarīgas vai neatkarīgas), funkcija *wilcox.test()*, būtiskuma līmenis $\alpha = 0,05$ (Elferts, 2013).

3. REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS

3.1. Augsnes īpašības un sastāvs

Augsnes blīvums. Augsnes blīvums ir nozīmīgs fizikāls parametrs, kas ietekmē augsnes barības vielu uzkrājumu, ūdens aiztures kapacitāti un gāzveida vielu apriti augsnē jeb augsnes aerāciju (Wang *et al.*, 2011). Pētījuma ietvaros tika konstatētas būtiskas ($p < 0,05$) augsnes blīvuma atšķirības starp dažādiem augsnes slāņiem – dziļākos augsnes slāņos augsnes blīvums ir lielāks. Kaut arī pēc kokaugu stādījuma izveidošanas lauksaimniecības zemē tika novērota tendence samazināties augsnes blīvumam, īpaši augšējos augsnes slāņos (vidēji no $1521 \pm 35 \text{ kg m}^{-3}$ 2011. gadā uz $1381 \pm 27 \text{ kg m}^{-3}$ 2015. gadā 0-20 cm dziļumā un no $1569 \pm 28 \text{ kg m}^{-3}$ 2011. gadā uz $1373 \pm 25 \text{ kg m}^{-3}$ 2015. gadā 20-40 cm dziļumā), statistiski būtiskas atšķirības starp augsnes blīvumu atsevišķu parauglaukumu līmenī 2011. un 2015. gadā netika konstatētas. Savukārt, salīdzinot augsnes blīvuma vidējos rādītājus 0-20 cm un 20-40 cm dziļumā dažādu kokaugu stādījuma dizaina ietvaros, konstatēts, ka vidējais augsnes blīvums ceturtajā gadā pēc stādījuma izveidošanas ir statistiski būtiski samazinājies ($p < 0,05$). Tas liecina, ka kokaugu augšanas un sakņu sistēmu attīstības rezultātā augsnes virskārtas blīvums samazinās un augsne kļūst gan ūdens, gan gāzveida vielu caurlaidīgāka, savukārt augsnes dziļāko slāņu blīvumu kokaugu augšana maz ietekmē.

Augsnes pH. Augsnes pH ir viena no būtiskākajām īpašībām, kas ietekmē augsnes bioloģisko aktivitāti, augu augšanu, kā arī zināmā mērā jonu apmaiņas kapacitāti, organisko vielu un minerālu šķīdību, barības elementu pieejamību augiem, kā arī barības elementu zudumus izskalošanās rezultātā (Nikodemus *et al.*, 2008; Lutter *et al.*, 2016b). Tiek uzskatīts, ka augsnes pH ir viena no visstraujāk reaģējošām augsnes īpašībām, kas liecina par lauksaimniecības zemju transformāciju uz meža zemēm raksturīgiem vides apstākļiem. Pētījuma objektā neatkarīgi no ienestā pamatmēslojuma konstatēta liela dabiskā augsnes apmaiņas skābuma variācija (3.1. tabula). Turklāt veicot augsnes ģenētisko horizontu analīzes, konstatētas būtiskas augsnes aktīvā skābuma (pH H₂O) un apmaiņas skābuma (pH KCl) atšķirības viena un tā paša augsnes ģenētiska horizonta ietvaros – atšķirība starp augsnes aktīvo un apmaiņas skābumu minerālā trūdvielu akumulācijas horizontā Ap sasniedz 2,1 un 2,5 pH vienības, Ah horizontā – 2,3 un 2,8 pH vienības (Kārkliņš & Rancāne, 2012a, 2012b). Ņemot vērā lielo dabisko augsnes skābuma variāciju pētījuma objektā, statistiski būtiskas augsnes apmaiņas skābuma atšķirības starp kontroles parauglaukumiem un parauglaukumiem, kur ienests pamatmēslojums, konstatētas tikai atsevišķos parauglaukumos, kur ienests dūņu vai koksnes pelnu pamatmēslojums. Statistiski būtiskas augsnes skābuma izmaiņas stādījuma ierīkošanas rezultātā viena kokaugu stādījuma dizaina, pamatmēslojuma veida un izdalītā augsnes slāņa ietvaros netika konstatētas.

3.1. tabula

Augsnes apmaiņas skābums (pH CaCl₂) pētījuma objektā

Augsnes slānis	Gads	Stādījuma dizains: 2,0 x 2,0 m				Stādījuma dizains: 2,5 x 5,0 m			
		kontrole	digestāts	dūņas	koksnes pelni	kontrole	digestāts	dūņas	koksnes pelni
0-20 cm	2011	6,0 ± 0,2	5,7 ± 0,3	5,6 ± 0,2*	5,7 ± 0,2*	6,59 ± 0,08	6,5 ± 0,4	6,7 ± 0,2*	6,8 ± 0,1*
	2015	5,7 ± 0,3	5,4 ± 0,5	5,7 ± 0,2*	5,6 ± 0,4	6,2 ± 0,1	6,2 ± 0,2	6,5 ± 0,1*	6,6 ± 0,2

3.1. tabulas turinājums

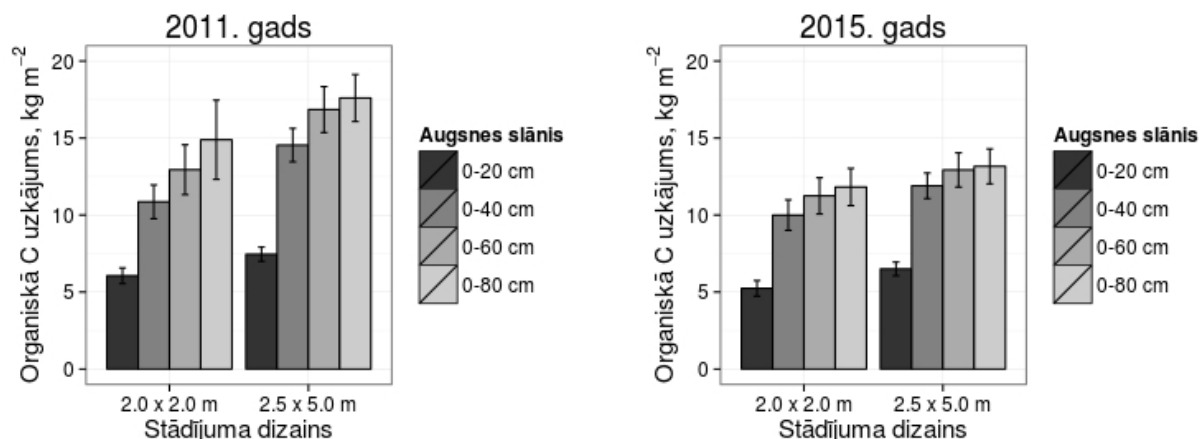
Augsnes slānis	Gads	Stādījuma dizains: 2,0 x 2,0 m				Stādījuma dizains: 2,5 x 5,0 m			
		kontrolē	digestāts	dūņas	koksnes pelni	kontrolē	digestāts	dūņas	koksnes pelni
20-40 cm	2011	5,9 ± 0,3	5,5 ± 0,3	5,7 ± 0,3*	5,8 ± 0,3*	6,49 ± 0,04	6,4 ± 0,4	6,8 ± 0,2*	6,8 ± 0,1*
	2015	5,7 ± 0,4	5,4 ± 0,5	5,7 ± 0,3*	5,8 ± 0,3	6,5 ± 0,2	6,3 ± 0,3	6,7 ± 0,2*	6,5 ± 0,2
40-60 cm	2011	5,7 ± 0,3	5,4 ± 0,4	5,8 ± 0,3*	6,1 ± 0,2*	6,4 ± 0,3	6,5 ± 0,4	7,0 ± 0,2*	6,87 ± 0,07**/**
	2015	5,5 ± 0,5	5,6 ± 0,6	5,3 ± 0,4	6,5 ± 0,3	6,4 ± 0,4	6,3 ± 0,4	6,6 ± 0,2	6,4 ± 0,1
60-80 cm	2011	6,1 ± 0,2	5,4 ± 0,5	6,0 ± 0,3	6,4 ± 0,3	6,4 ± 0,4	6,8 ± 0,4	7,1 ± 0,2	7,0 ± 0,2
	2015	5,4 ± 0,6	5,6 ± 0,6	5,8 ± 0,5	6,1 ± 0,5	6,4 ± 0,6	6,6 ± 0,5	6,7 ± 0,2	6,7 ± 0,4

* Statistiski būtiskas ($p < 0,05$) augsnes pH atšķirības starp parauglaukumiem ar dažādu kokaugu stādījuma dizainu viena pamatmēslējuma veida, pētījuma gada un izdalītā augsnes slāņa ietvaros.

** Statistiski būtiskas ($p < 0,05$) augsnes pH atšķirības starp kontroles un mēslotiem parauglaukumiem viena kokaugu stādījuma dizaina, pētījuma gada un izdalītā augsnes slāņa ietvaros.

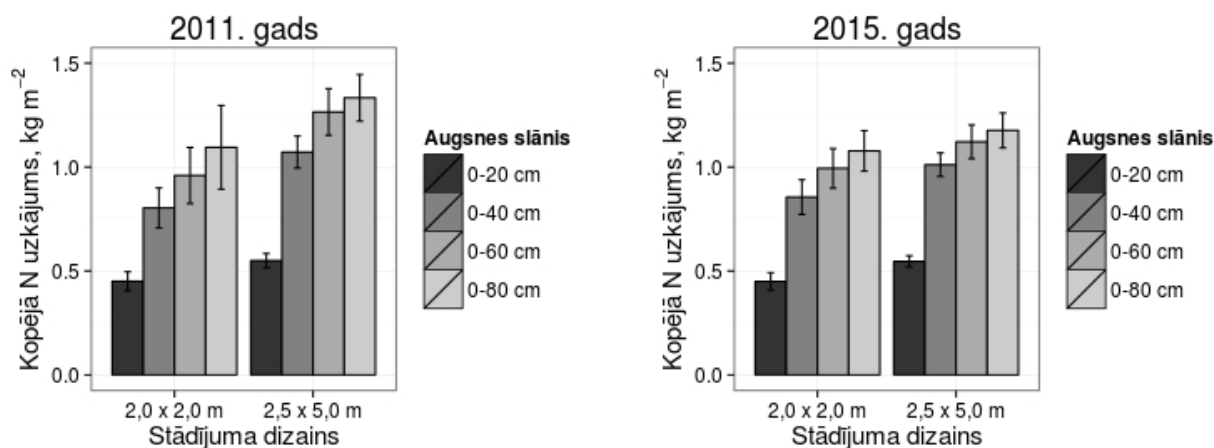
Organiskā oglekļa saturs un uzkrājums augsnē. Agromežsaimniecība ir viens no pasākumiem, kas pašlaik tiek rekomendēts klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu sasniegšanai (Tumwebaze & Byakagaba, 2016). Tiek uzskatīts, ka agromežsaimniecības sistēmām piemīt liels C akumulācijas potenciāls piecās galvenajās C krātuvēs: virszemes augu biomasa (kokaugi, zemsedze), augu saknes (kokaugi, zemsedze), nedzīvā zemsega (nobiras), mikroorganismi un augsne (Udawatta & Jose, 2011; Monroe *et al.*, 2016). Organiskā C saturs augsnē 0-20 cm dziļumā variē no 8,3 g kg⁻¹ līdz 38,3 g kg⁻¹ 2011. gadā un no 6,1 g kg⁻¹ līdz 47,0 g kg⁻¹ 2015. gadā, bet dziļākos augsnes slāņos (60-80 cm dziļumā) – no 0,06 g kg⁻¹ līdz 6,7 g kg⁻¹ 2011. gadā un no < 0,01 g kg⁻¹ līdz 12,4 g kg⁻¹ 2015. gadā. Pētījuma ietvaros netika konstatēta statistiski būtiska apšu hibrīdu kokaugu stādījuma izveidošanas ietekme uz organiskā C saturu augsnē 0-40 cm dziļumā pirmo piecu veģetācijas sezonu laikā pēc stādījuma ierīkošanas, bet 40-60 cm dziļumā kokaugu stādījuma dizaina ietvaros vidējais organiskā C saturs augsnē 2015. gadā ir būtiski mazāks kā 2011. gadā. Vidējais organiskā C uzkrājums augsnē 0-20 cm dziļumā 2011. gadā ir 6,8 ± 0,4 kg m⁻² un 5,9 ± 0,4 kg m⁻² 2015. gadā, bet 0-80 cm dziļumā 16 ± 1 kg m⁻² 2011. gadā un 12,5 ± 0,8 kg m⁻² 2015. gadā (3.1. att.). Pētījuma ietvaros 0-40 cm augsnes slānī netika konstatētas būtiskas atšķirības starp organiskā C uzkrājumu 2011. gadā (pirms apšu hibrīdu stādīšanas) un 2015. gadā (pēc 5 veģetācijas sezonām), bet 40-80 cm dziļumā, pretēji gaidītajam, būtiski mazāks organiskā C uzkrājums augsnē tika konstatēts 2015. gadā, salīdzinot ar 2011. gadu. Pētījumā konstatēts, ka parauglaukumā ir heterogēns augsnes sastāvs nesenās augsnes rekultivācijas dēļ – pirms 20 gadiem veikta zemes virsmas izlīdzināšana un iestrādāta kūdra, ko apstiprina organisko vielu ieslēgumi augsnes profilā (Bardule *et al.*, 2013). Samazināts augsnes blīvums veicina labāku augsnes aerāciju un augsnes organiskās matērijas sadalīšanos. Līdz ar to pētījuma ietvaros konstatētais organiskā C uzkrājuma augsnē samazinājums izskaidrojams ar pirms 20 gadiem iestrādātās kūdras mineralizēšanos. Pētījuma rezultāti apstiprina, ka parauglaukums ir izveidots ar organiskām

vielām bagātā lauksaimniecības zemē, jo vidējais organiskā C uzkrājums augsnē 0-20 cm dziļumā pētījuma parauglaukumā ir lielāks nekā vidēji aramzemēs ($5,5 \pm 0,6 \text{ kg m}^{-2}$) un ilggadīgos zālajos ($5,8 \pm 0,9 \text{ kg m}^{-2}$) Latvijā (Bardule *et al.*, 2017). Lielākā organiskā C uzkrājuma augsnē daļa (85%) atrodas 0-40 cm dziļumā, bet 47% no organiskā C uzkrājuma augsnē atrodas augsnes virskārtā 0-20 cm dziļumā.



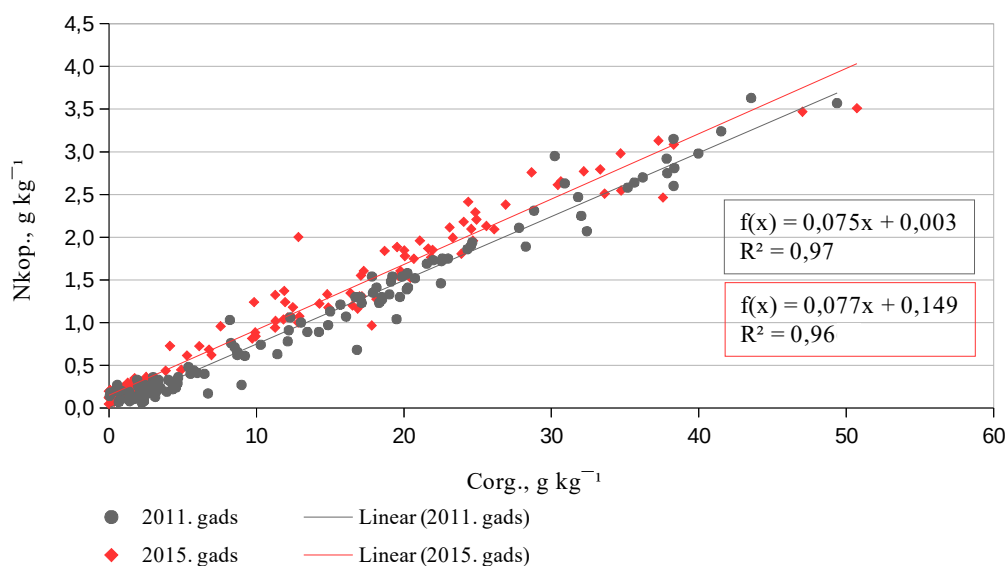
3.1. att. Kumulatīvais organiskā C uzkrājums augsnē

Kopējā slāpekļa saturs un uzkrājums augsnē. C un N aprīte augsnē ir stipri saistītas, bet N uzkrājuma augsnē izmaiņas ir ievērojami mazāk pētītas nekā organiskā C uzkrājuma augsnē izmaiņas pēc lauksaimniecības zemju apmežošanas (Lutter *et al.*, 2016a), kaut gan boreālos apstākļos lielākais ekosistēmas N uzkrājums ir tieši augsnē un N aprīte, ko nodrošina lapu nobiras, ir ļoti intensīva tieši ātraudzīgo lapu koku stādījumos (Meiresonne *et al.*, 2006). Pētījuma ietvaros statistiski būtiskas kopējā N satura augsnē atšķirības starp kontroles parauglaukumiem un parauglaukumiem, kur ienests pamatmēslojums, stādījuma dizaina ietvaros netika konstatētas ne 2011. gadā, ne 2015. gadā. Vidējais kopējā N saturs augsnes virskārtā (0-20 cm dziļumā) pirms stādījuma izveidošanas ir $1,7 \pm 0,1 \text{ g kg}^{-1}$, bet pēc piecām veģetācijas sezonām kopš stādījuma izveidošanas (2015. gads) vidējais kopējā N saturs augsnes virskārtā ir palielinājies līdz $1,9 \pm 0,1 \text{ g kg}^{-1}$. Tāpat analīžu rezultāti liecina, ka statistiski būtiska mēslojuma ietekme uz kopējā N uzkrājumu augsnē pirmo piecu veģetācijas sezonu laikā nav konstatēta. Vidējais kopējā N uzkrājums augsnes virskārtā 0-20 cm dziļumā pirmo piecu gadu laikā kopš kokaugu stādījuma izveidošanas lauksaimniecības zemē nav mainījies ($0,50 \pm 0,03 \text{ kg m}^{-2}$), bet vidējais kopējā N uzkrājums augsnes slānī 0-80 cm dziļumā ir samazinājies no $1,2 \pm 0,1 \text{ kg m}^{-2}$ 2011. gadā uz $1,13 \pm 0,06 \text{ kg m}^{-2}$ 2015. gadā. Parauglaukumos, kur kokaugi stādīti $2,5 \times 5,0 \text{ m}$ attālumā, 2015. gadā 0-80 cm augsnes slānī konstatēts pat statistiski būtiski mazāks kumulatīvais kopējā N uzkrājums ($p = 0,039$), salīdzinot ar 2011. gadu (3.2. att.).



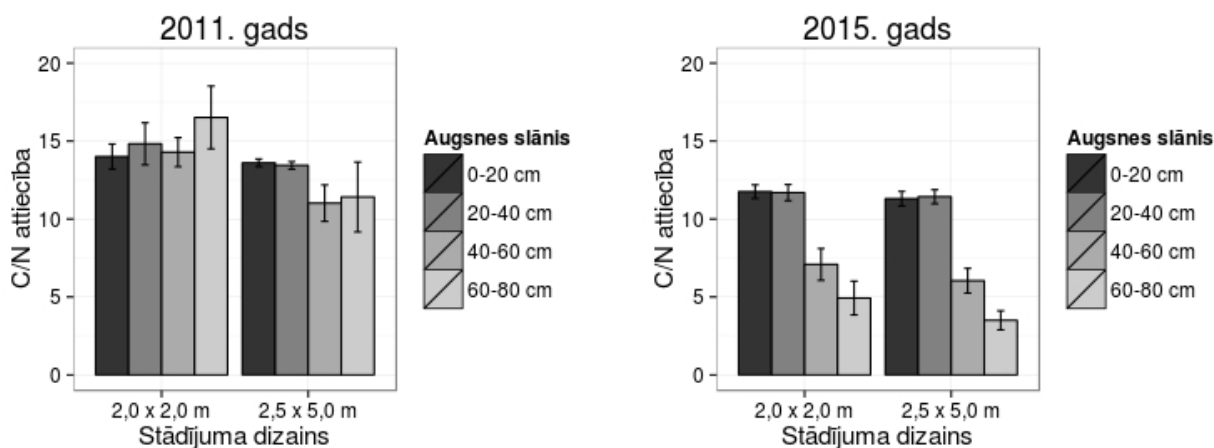
3.2. att. Kumulatīvais kopējā slāpekļa uzkrājums augsnē

C/N attiecība augsnē. Pētījumā apstiprināts, ka kopējais N saturs augsnes slāņos pozitīvi korelē ar organiskā oglekļa saturu (3.3. att.), korelācijas koeficients r ir 0,986 2011. gadā un r ir 0,983 2015. gadā.



3.3. att. Sakarība starp organiskā oglekļa saturu un kopējā slāpekļa saturu augsnē

Pētījuma ietvaros vidējā C/N attiecība izdalītajos augsnes slāņos 2011. gadā variē no $12,6 \pm 0,8$ (augšnes slānī 40-60 cm dziļumā) līdz $14,1 \pm 0,7$ (augšnes slānī 20-40 cm dziļumā), bet 2015. gadā vidējā C/N attiecība variē no $4,2 \pm 0,6$ (augšnes slānī 60-80 cm dziļumā) līdz $11,6 \pm 0,3$ (augšnes slānī 20-40 cm dziļumā). Pētījuma ietvaros 2015. gadā konstatēta statistiski būtiski ($p < 0,05$) mazāka C/N attiecība visos izdalītajos augsnes slāņos salīdzinot ar C/N attiecību augsnē 2011. gadā (3.4. att.).



3.4. att. C/N attiecība dažādos augsnes slāņos

Biopieejamais barības elementu saturs augsnē. Līdz šim boreālajā un hemiboreālajā reģionā ir veikti tikai nedaudz pētījumi, lai noskaidrotu ātraudzīgo *Populus spp.* stādījumu ierīkošanas lauksaimniecības zemē ietekmi uz barības elementu apriti augsnē (Lutter *et al.*, 2016b). Barības elementu līdzsvarošana ir svarīga īsirtmeta ātraudzīgo koku sugu stādījumu ilgtspējīgai apsaimniekošanai, jo šādi stādījumi īsā laika posmā uzņem lielu barības elementu daudzumu un nereti ir nepieciešama atkārtota mēslošana, lai nodrošinātu kokaugu produktivitāti (Ericsson, 1994; Berthrong *et al.*, 2009; Liao *et al.*, 2012). 3.2. tabulā parādīts vidējais augiem uzņemamo barības elementu saturs augsnes virskārtā (0-40 cm dziļumā) pētījuma objektā. Kaut arī tiek uzskatīts, ka lauksaimniecības zemēm raksturīga homogēna augsnes virskārta (Lutter *et al.*, 2016b), pētījuma ietvaros konstatēta salīdzinoši liela barības elementu satura augsnē dabiskā variācija, piemēram, 2011. gadā ņemtajos augsnes paraugos kontroles parauglaukumos nitrātu saturs augsnes virskārtā (0-40 cm dziļumā) variē intervālā līdz 5,1 mg NO₃⁻-N kg⁻¹, amonija jonu saturs variē no 3,2 līdz 20,7 mg NH₄⁺-N kg⁻¹, fosfātu saturs variē no 46,3 līdz 190,8 mg PO₄³⁻-P kg⁻¹, bet K saturs – no 31,2 līdz 176,2 mg K kg⁻¹. Salīdzinoši lielās barības elementu satura augsnē dabiskās variācijas dēļ tikai atsevišķos parauglaukumos, kuros ienests pamatmēslojums, vērojams statistiski būtisks barības elementu satura augsnē palielinājums. Tāpat pirmo divu gadu laikā pēc apšu hibrīdu stādījuma izveidošanas lauksaimniecības zemē un pamatmēslojuma iestrādāšanas nav novērota būtiska barības elementu satura augsnē samazināšanās, izņemot atsevišķus parauglaukumus, bet tas nenorāda uz viennozīmīgu barības elementu satura samazinājuma tendenci augsnē.

3.2. tabula

Biopieejamais barības elementu saturs augsnes virskārtā (0-40 cm) pētījuma objektā

Gads	Stādījuma dizains: 2,0 x 2,0 m				Stādījuma dizains: 2,5 x 5,0 m			
	kontrole	digestāts	dūņas	koksnes pelni	kontrole	digestāts	dūņas	koksnes pelni
NO₃⁻-N, mg kg⁻¹								
2011	3,4 ± 0,4	6 ± 1**	3,5 ± 0,4	3,4 ± 0,5	3,3 ± 0,4	2,3 ± 0,2**	4,4 ± 0,6	3,5 ± 0,6
2013	2 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	0,6 ± 0,6	5,5 ± 0,9*	9 ± 3	6 ± 2	9 ± 2*
NH₄⁺-N, mg kg⁻¹								
2011	6,1 ± 0,9	9 ± 2	5,8 ± 0,4	4,3 ± 0,4	11 ± 2	7,5 ± 0,4	9 ± 1	7,7 ± 0,6
2013	2,3 ± 0,8	6,2 ± 0,3**	5,2 ± 0,9**	2,8 ± 0,6	17 ± 14*	3,3 ± 0,5	3,2 ± 0,3*	17 ± 10

3.2. tabulas turpinājums

Gads	Stādījuma dizains: 2,0 x 2,0 m				Stādījuma dizains: 2,5 x 5,0 m			
	kontrolē	digestāts	dūņas	koksnes pelni	kontrolē	digestāts	dūņas	koksnes pelni
PO₄³⁻-P, mg kg⁻¹								
2011	94 ± 9	100 ± 12	88 ± 13	88 ± 8	115 ± 16	113 ± 14	150 ± 13	141 ± 14
2013	92 ± 11	67 ± 7*	80 ± 13	78 ± 10	122 ± 25	108 ± 12	114 ± 8*	144 ± 23
K, mg kg⁻¹								
2011	97 ± 17	152 ± 20**	87 ± 9	86 ± 9	62 ± 5	66 ± 5	81 ± 4**	92 ± 8**
2013	75 ± 8	113 ± 20	74 ± 6	78 ± 13	66 ± 8	73 ± 8	82 ± 17	107 ± 27
* Statistiski būtiskas ($p < 0,05$) barības elementu satura augsnē atšķirības, salīdzinot 2013. un 2011. gadu viena stādījuma dizaina un pamatmēslojuma veida ietvaros.								
** Statistiski būtiskas ($p < 0,05$) barības elementu satura augsnē atšķirības starp kontroles parauglaurumiem un parauglaurumiem, kur ienests pamatmēslojums, viena stādījuma dizaina un pētījuma gada ietvaros.								

Smago metālu saturs augsnē. Augsnes dabiski satur virkni smago metālu, un daudzi no tiem ir nozīmīgi augu barības elementi (Frausto da Silva & Williams, 2001). Tomēr lielākā daļa smago metālu augsnē nonāk piesārņojuma veidā un ir toksiski (Smidt *et al.*, 2012). Viens no galvenajiem lauksaimniecības zemju piesārņojuma avotiem ir augsnes mēslošana (tajā skaitā ar notekūdeņu dūņām un koksnes pelniem). Pētījuma ietvaros analizēts vidējais Cu, Pb, Zn, Ni, As, Cd, Cr un Hg saturs augsnes virskārtā (0-20 cm dziļumā, 3.3. tabula) un augsnes dziļākajos slāņos (20-80 cm dziļumā). Ņemot vērā lielo smago metālu satura augsnē dabisko variāciju pētījuma objektā, nav konstatētas statistiski būtiskas smago metālu satura augsnē atšķirības kontroles un mēslotajos parauglaurumos. Līdz ar to pamatmēslojuma (notekūdeņu dūņu – deva 10 t sausnas ha⁻¹, koksnes pelnu – deva 6 t sausnas ha⁻¹ un digestāta – deva 30 t ha⁻¹) ieneses rezultātā nav novērota būtiska augsnes kvalitātes pasliktināšanās smago metālu kontekstā, kaut gan Zn, Ni, As un Cd satura augsnē mērķlielumi, kurus pārsniedzot, nevar nodrošināt ilgtspējīgu augsnes kvalitāti, ir pārsniegti gan augsnes virskārtā, gan dziļākajos augsnes slāņos.

3.3. tabula

Vidējais smago metālu saturs (mg kg⁻¹) augsnes virskārtā (0-20 cm augsnes slānis) pētījuma objektā pēc pamatmēslojuma ienešanas 2011. gadā

Elements	Granulometriskā sastāva grupa	Pamatmēslojuma veids			
		kontrolē	digestāts	dūņas	koksnes pelni
Cu	mālsmilts	5,6*	3,7 ± 0,2	5,0 ± 0,6	4,6 ± 0,7
	smilšmāls	5,2 ± 0,9	6,9*	3,3*	5,9 ± 0,9
Pb	mālsmilts	6,7*	8,1 ± 0,5	9,0 ± 0,9	9 ± 1
	smilšmāls	9,8 ± 0,7	11,1*	8,7*	10 ± 2
Zn	mālsmilts	22*	22 ± 2	28 ± 5	24,1 ± 0,7
	smilšmāls	46 ± 19	47*	16*	42 ± 21
Ni	mālsmilts	9,3*	5,6 ± 0,4	7 ± 1	8 ± 2
	smilšmāls	8 ± 1	9,5*	5,3*	8,5 ± 0,3

3.3. tabulas turpinājums

Elements	Granulometriskā sastāva grupa	Pamatmēslojuma veids			
		kontrole	digestāts	dūņas	koksnes pelni
As	mālsmilts	3,3*	2,5 ± 0,2	3,2 ± 0,3	3,43 ± 0,02
	smilšmāls	3,4 ± 0,6	4,2*	3,1*	3,4 ± 0,2
Cd	mālsmilts	< NR	0,03 ± 0,02	0,07 ± 0,01	0,02 ± 0,02
	smilšmāls	0,12 ± 0,04	0,18*	< NR	0,09 ± 0,09
Cr	mālsmilts	5,9*	6,8 ± 0,5	7,1 ± 0,4	6,67 ± 0,03
	smilšmāls	9 ± 2	13,0*	6,4*	9 ± 2
Hg	mālsmilts	0,019*	0,033 ± 0,001	0,037 ± 0,002	0,027 ± 0,006
	smilšmāls	0,05 ± 0,01	0,073*	0,025*	0,05 ± 0,02

Vērtība pārsniedz Ministra kabineta 2005. gada 25. oktobra noteikumos Nr. 804 "Noteikumi par augsnes un grunts kvalitātes normatīviem" noteikto attiecīgā elementa mērķlielumu (A) augsnē attiecīgajā augsnes granulometriskā sastāva grupā, bet nepārsniedz robežlielumus (B un C).

** Attiecīgajai granulometriskā sastāva grupai pamatmēslojuma veida ietvaros atbilst tikai viens augsnes paraugs.*

Daļa smago metālu augsnē tiek adsorbēti uz māla minerāliem un organiskās matērijas (Smidt *et al.*, 2012). To viennozīmīgi apstiprina arī šī pētījuma rezultāti, Pīrsona korelācijas koeficienti, kas raksturo sakarības ciešumu starp smago metālu saturu un māla un organiskā C saturu augsnē, apkopoti 3.4. tabulā.

3.4. tabula

Lineāru sakarību starp smago metālu saturu un māla daļiņu īpatsvaru vai organiskā C saturu augsnē raksturojums (korelācijas koeficienti, r)

Korelācijas koeficienti (r)	Fe saturs	Cu saturs	Pb saturs	Zn saturs	Ni saturs	As saturs	Cd saturs	Cr saturs	Hg saturs
Māla daļiņu īpatsvars	0,63	0,54	0,09	0,15	0,62	0,55	0,01	0,30	-0,01
Organiskā C saturs	-0,11	-0,15	0,87	0,77	-0,25	0,10	0,92	0,71	0,95

0,5 ≤ |r| ≤ 0,8 – vidēji cieša lineāra sakarība.

|r| > 0,8 – cieša lineāra sakarība.

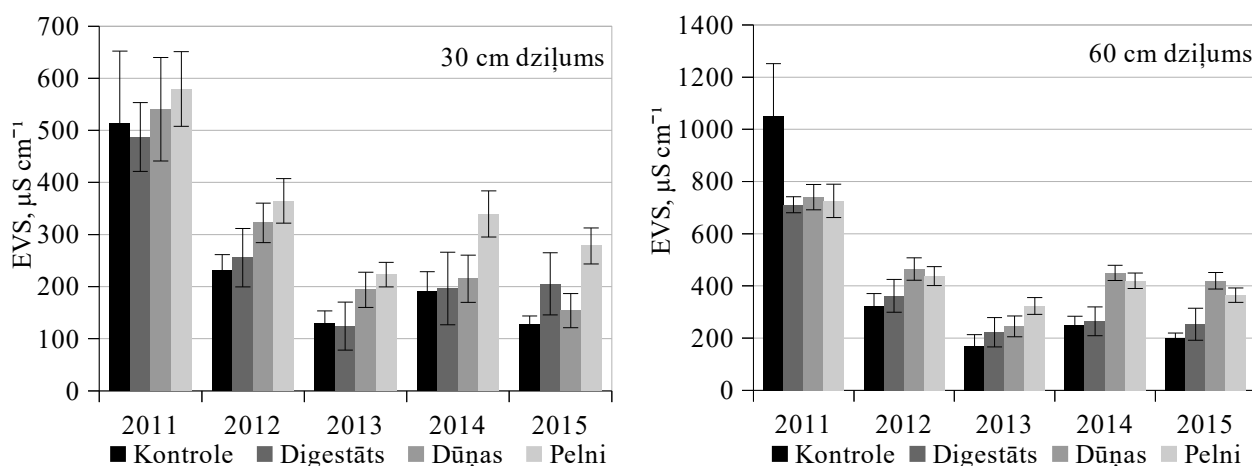
3.2. Augsnes ūdens ķīmiskais sastāvs

Barības elementu izskalošanās samazinājums ir būtisks ekosistēmu pakalpojums, kas salīdzinoši viegli var tikt ietekmēts ar apsaimniekošanas lēmumiem nelielās platībās (Tully *et al.*, 2012). Agromežsaimniecības sistēmas tiek uzskatītas par izkliedētā piesārņojuma samazināšanas līdzekli lauksaimniecības zemēs (Udawatta *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2003; Anderson *et al.*, 2008; Jose, 2009). Līdz ar virsmas noteces ūdens plūsmas ātruma samazināšanu, kas veicina infiltrāciju, sedimentu nogulsnešanos un barības vielu aizturi, agromežsaimniecības sistēmas uzlabo noteces ūdens kvalitāti. Tāpat agromežsaimniecības sistēmās barības elementi tiek intensīvi uzņemti ar koku saknēm, un līdz ar to samazinās barības elementu ieskalošanās gruntsūdeņos (Lee *et al.*, 2003; Allen *et al.*, 2004; Nair & Graetz, 2004; Jose, 2009). Līdz ar barības elementu atgriešanu elementu aprites sistēmā caur koku saknēm un nobīrām palielinās sistēmas barības elementu izmantošanas efektivitāte (Allen *et al.*, 2004; Jose, 2009). Kokiem ir garāka veģetācijas sezona nekā lielākajai daļai lauksaimniecības kultūru, kas palielina barības elementu izmantošanu un izmantošanas efektivitāti agromežsaimniecības sistēmās pirms un pēc lauksaimniecības kultūru

veģetācijas sezonas sākuma un beigām (Jose, 2009).

Augsnes ūdens pH. Ūdenim sūcoties cauri augsnei, tā ķīmiskais sastāvs mainās iežu dēdēšanas, jonu apmaiņas, mineralizācijas un imobilizācijas procesā. Viens no galvenajiem augsnes ūdens parametriem ir augsnes ūdens skābums, kura izmaiņas var nozīmīgi ietekmēt barības elementu apriti kokaugu ekosistēmās (Tērauda, 2008). Atmosfēras nokrišņu pH pētījuma periodā variē salīdzinoši plašā diapazonā no $4,09 \pm 0,05$ līdz $8,47 \pm 0,05$, turklāt pētījuma periodā vērojama tendence gada vidējam atmosfēras nokrišņu pH palielināties, 2014. un 2015. gadā konstatēts statistiski būtiski lielāks gada vidējais atmosfēras nokrišņu pH salīdzinot ar 2012. gadu, tāpat vērojama sezonālā ietekme uz atmosfēras nokrišņu pH – pH samazinās ziemas mēnešos, bet palielinās vasaras mēnešos. Salīdzinot augsnes ūdens pH 30 cm un 60 cm dziļumā viena pētījuma gada un pamatmēslojuma veida ietvaros, nav konstatēta būtiska augsnes ūdens pH atšķirība. Tāpat nav konstatēta būtiska augsnes ūdens pH atšķirība starp kontroles parauglaurumiem (vidējais augsnes ūdens pH bija $7,68 \pm 0,05$) un parauglaurumiem, kur ienests pamatmēslojums (vidējais augsnes ūdens pH bija $7,85 \pm 0,02$). Toties laika periodā no 2012. gada līdz 2015. gadam konstatēts mazāks vidējais augsnes ūdens pH ($7,76 \pm 0,02$), salīdzinot ar augsnes ūdens vidējo pH 2011. gadā ($8,35 \pm 0,02$).

Augsnes ūdens elektrovadītspēja. Augsnes ūdens elektrovadītspēja raksturo ūdenī izšķīdušo sāļu daudzumu. Atmosfēras nokrišņu elektrovadītspēja pētījuma periodā variē salīdzinoši plašā diapazonā no $5,8 \pm 0,3 \mu\text{S cm}^{-1}$ līdz $111 \pm 17 \mu\text{S cm}^{-1}$, un nav novērota statistiski būtiska atmosfēras nokrišņu elektrovadītspējas atšķirība starp pētījuma gadiem. Atmosfēras nokrišņu ūdeņiem skalojoties cauri veģetācijas stāviem un augsnes slāņiem, ūdens elektrovadītspēja ievērojami palielinās. Salīdzinot gada vidējo augsnes ūdens elektrovadītspēju, visos parauglaurumos 60 cm dziļumā konstatēta lielāka ūdens elektrovadītspēja nekā 30 cm dziļumā, atsevišķos parauglaurumos konstatēta statistiski būtiska atšķirība. Savukārt, salīdzinot gada vidējo augsnes ūdens elektrovadītspēju kontroles parauglaurumos un parauglaurumos, kur ienests pamatmēslojums, 30 cm un 60 cm dziļumā atsevišķi (3.5. att.), konstatēts, ka augsnes ūdens elektrovadītspēja pētījuma periodā ir būtiski lielāka parauglaurumos, kuros ienests pelnu un notekūdeņu dūņu pamatmēslojums.



3.5. att. Gada vidējā augsnes ūdens elektrovadītspēja 30 cm un 60 cm dziļumā

Barības elementu saturs augsnes ūdenī. Lauksaimniecība tiek uzskatīta par vienu no galvenajiem cēloņiem palielinātam barības elementu saturam virszemes ūdeņos Ziemeļu un Baltijas valstīs. Ne tikai hidrometeoroloģiskie apstākļi, bet arī barības elementu koncentrācija ūdenstecēs lauksaimniecības zemēs variē atkarībā no izmantotā mēslojuma

veida un daudzuma, lauksaimniecības prakses (piemēram, aršanas veida), kultūraugu un zemes apsaimniekošanas veida (Pengerud *et al.*, 2015). Barības elementu izskalošanās mazināšana ir viens no ekosistēmu pakalpojumiem, ko nodrošina agromežsaimniecības sistēmas (Tully *et al.*, 2012).

Vidējā NO_3^- -N ienese ekosistēmā ar atmosfēras nokrišņiem laika posmā no 2012. līdz 2015. gadam ir $3,6 \text{ kg ha}^{-1}$ gadā, vidējā atmosfēras PO_4^{3-} -P ienese – $0,3 \text{ kg ha}^{-1}$ gadā un vidējā K ienese – $2,4 \text{ kg ha}^{-1}$ gadā. Būtiskas vidējā barības elementu satura atmosfēras nokrišņos atšķirības starp pētījuma gadiem nav konstatētas ($p > 0,05$). Kopš 2013. gada NO_3^- -N ienese ekosistēmā ar atmosfēras nokrišņiem pārsniedz NO_3^- -N izskalošanos no ekosistēmas (3.7. att.), neskatoties uz slāpekli saturošo pamatmēslojumu iestrādi. Tāpat gada laikā ar atmosfēras nokrišņiem ienestais PO_4^{3-} -P apjoms pārsniedz izskaloto PO_4^{3-} -P apjomu (3.7. att.), izņemot parauglaukumus, kur ienests notekūdeņu attīrīšanas dūņu pamatmēslojums. Tas norāda uz intensīvu NO_3^- -N un PO_4^{3-} -P uzņemšanu ar augu saknēm un apriti ekosistēmā kopumā.

3.5. tabulā ir parādīts vidējais barības elementu saturs augsnes ūdenī 30 cm dziļumā pētījuma periodā (2011.-2015. gads) apšu hibrīdu stādījumā lauksaimniecības zemē. Augsnes ūdens analīžu rezultāti liecina par būtiskām barības elementu koncentrācijas atšķirībām augsnes ūdenī pētījuma perioda sākumā un beigās, kā arī starp parauglaukumiem, kuros ienests atšķirīgs pamatmēslojums. ES dalībvalstīs kopēji ūdens kvalitātes standarti, nosakot kvalitātes dalījumu klasēs pēc biogēno elementu koncentrācijām (Lagzdīņš *et al.*, 2008), nav izstrādāti, taču ES Nitrātu direktīva un atbilstošie Latvijas Republikas normatīvie akti nosaka robežlielumus nitrātu saturam – tā vērtības ūdeņos nedrīkst pārsniegt $50 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ ($11,3 \text{ mg NO}_3^- \text{ N L}^{-1}$). Pētījuma objektā parauglaukumos, kur ienests pamatmēslojums, minētā nitrātu satura robežvērtība tika pārsniegta tikai 2011. gadā augsnes ūdenī gan 30 cm, gan 60 cm dziļumā, sasniedzot maksimumu $29,8 \text{ mg NO}_3^- \text{ N L}^{-1}$ (parauglaukumā, kur iestrādāts digestāta pamatmēslojums). Izvērtējot NO_3^- -N saturu augsnes ūdenī 30 cm dziļumā, visos parauglaukumos konstatēta tendence laika gaitā pēc apšu hibrīdu stādījuma izveidošanas lauksaimniecības zemē NO_3^- -N saturam augsnes ūdenī samazināties, sasniedzot būtisku līmeni. Vidējais NO_3^- -N saturs augsnes ūdenī 30 cm dziļumā 2011. gadā ir $9 \pm 2 \text{ mg NO}_3^- \text{ N L}^{-1}$, bet 2015. gadā vidējais NO_3^- -N saturs augsnes ūdenī 30 cm dziļumā ir būtiski samazinājies līdz $0,10 \pm 0,02 \text{ mg NO}_3^- \text{ N L}^{-1}$. Kaut arī parauglaukumos, kur ienests ar N bagāts pamatmēslojums (notekūdeņu attīrīšanas dūņas un digestāts), 2011. gadā augsnes ūdenī 30 cm dziļumā ir lielāks vidējais nitrātu saturs, salīdzinot ar kontroles parauglaukumiem, būtiskas atšķirības netika konstatētas (3.5. tab.). Izvērtējot PO_4^{3-} -P saturu augsnes ūdenī parauglaukumos, kur ienests atšķirīgs pamatmēslojums, atsevišķi 30 cm dziļumā, nav konstatētas būtiskas PO_4^{3-} -P satura izmaiņas laika gaitā pēc apšu hibrīdu stādījuma izveidošanas lauksaimniecības zemē. Savukārt vērojama būtiska pamatmēslojuma, īpaši notekūdeņu attīrīšanas dūņu, ietekme uz PO_4^{3-} -P saturu augsnes ūdenī 30 cm dziļumā. Salīdzinot ar kontroles parauglaukumiem, parauglaukumos, kur ienests notekūdeņu attīrīšanas dūņu pamatmēslojums, visā pētījumu periodā augsnes ūdenī 30 cm dziļumā vērojams lielāks PO_4^{3-} -P saturs, kaut gan būtiskas atšķirības lielās variācijas dēļ konstatētas tikai 2013. un 2015. gadā (3.5. tab.). Līdzīgi kā NO_3^- -N gadījumā, arī izvērtējot K saturu augsnes ūdenī 30 cm dziļumā, visos parauglaukumos konstatēta tendence laika gaitā pēc apšu hibrīdu stādījuma izveidošanas lauksaimniecības zemē K saturam augsnes ūdenī samazināties, sasniedzot būtisku līmeni. Salīdzinot ar kontroles parauglaukumiem, parauglaukumos, kur ienests koksnes pelnu un digestāta pamatmēslojums, visā pētījumu periodā augsnes ūdenī 30 cm dziļumā vērojams

lielāks K saturs, kaut gan būtiskas atšķirības lielās variācijas dēļ konstatētas tikai 2015. gadā parauglaukumā, kur ienests koksnes pelnu pamatmēslojums (3.5. tabula).

3.5. tabula

Vidējais barības elementu saturs augsnes ūdenī 30 cm dziļumā

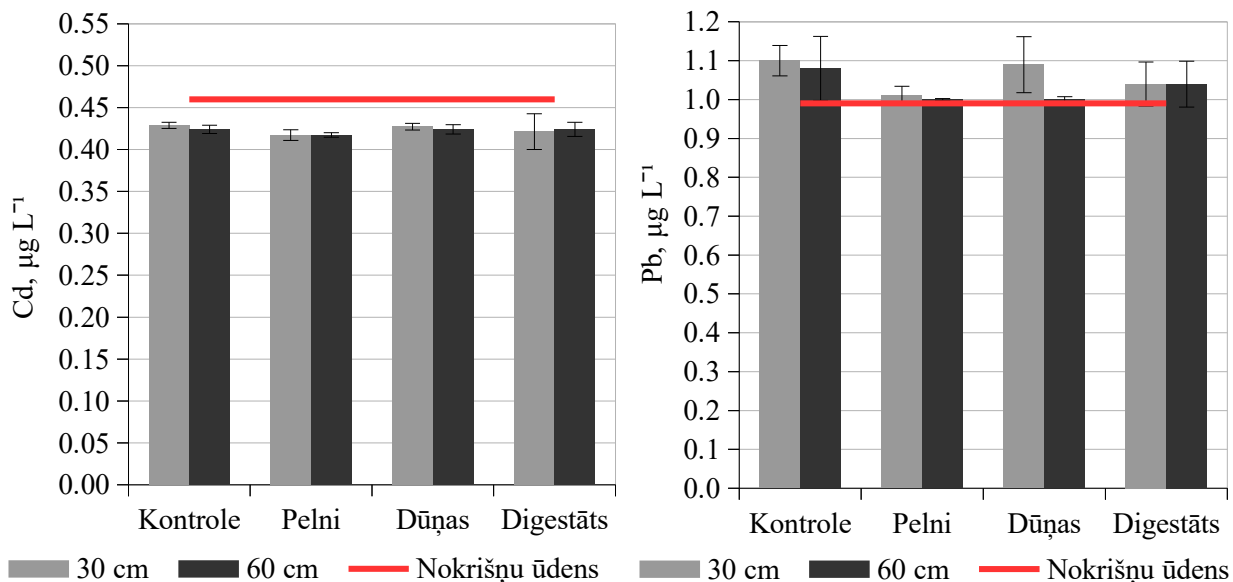
Barības elements, mērvienība	Gads	Pamatmēslojuma veids			
		kontrole	pelni	digestāts	dūņas
NO ₃ ⁻ -N, mg L ⁻¹	2011	7 ± 2	7 ± 4	11 ± 6	9 ± 5
	2012	2,0 ± 0,7	1,2 ± 0,6	0,6 ± 0,2*	1,6 ± 0,6
	2013	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,2	0,2 ± 0,1*	0,7 ± 0,4
	2014	0,3 ± 0,2	0,2 ± 0,1*	0,4 ± 0,2*	0,4 ± 0,1
	2015	0,2 ± 0,1*	0,1 ± 0,1*	0,1 ± 0,1*	0,1 ± 0,1*
PO ₄ ³⁻ -P, mg L ⁻¹	2011	0,005 ± 0,005	0,14 ± 0,09	0,03 ± 0,01	0,14 ± 0,09
	2012	0,020 ± 0,007	0,04 ± 0,02	0,016 ± 0,006	0,10 ± 0,05
	2013	0,008 ± 0,005	0,04 ± 0,02	0,005 ± 0,005	0,10 ± 0,06**
	2014	0,05 ± 0,03	0,10 ± 0,03	0,02 ± 0,01	0,17 ± 0,06
	2015	0,022 ± 0,003	0,10 ± 0,02**	0,011 ± 0,003**	0,18 ± 0,07**
K, mg L ⁻¹	2011	3 ± 1	9 ± 3	9 ± 2	6 ± 2
	2012	3,3 ± 0,7	4,6 ± 0,3	4,5 ± 0,8	2,8 ± 0,3
	2013	3 ± 1	3,9 ± 0,5	3,8 ± 0,9	2,9 ± 0,5
	2014	2,0 ± 0,6	2,6 ± 0,7*	3,4 ± 0,4*	2,7 ± 0,3
	2015	2,0 ± 0,3	3,2 ± 0,3*/**	2,9 ± 0,3*	2,1 ± 0,2*
* Statistiski būtiskas ($p < 0,05$) barības elementu satura atšķirības, salīdzinot ar 2011. gadu viena pamatmēslojuma veida ietvaros.					
** Statistiski būtiskas ($p < 0,05$) barības elementu satura atšķirības starp kontroles parauglaukumiem un parauglaukumiem, kur ienests pamatmēslojums, viena pētījuma gada ietvaros.					

Visos parauglaukumos lielākais NO₃⁻-N saturs augsnes ūdenī 60 cm dziļumā konstatēts 2011. gadā. Tāpat visos parauglaukumos konstatēta būtiska nitrātu satura samazināšanās (no vidēji 11 ± 2 mg L⁻¹ 2011. gadā līdz vidēji 0,08 ± 0,02 mg L⁻¹ 2015. gadā). Nitrātu satura augsnes ūdenī 60 cm dziļumā samazināšanās laika gaitā pēc apšu hibrīdu stādījuma izveidošanas un pamatmēslojuma iestrādes atbilst logaritmiskai regresijai. Regresijas vienādojuma koeficienti variē atkarībā no pamatmēslojuma veida, bet visos parauglaukumos logaritmiskas regresijas determinācijas koeficients R^2 ir > 0,81. Salīdzinot ar kontroles parauglaukumiem, parauglaukumos, kur iestrādāts notekūdeņu attīrīšanas dūņu pamatmēslojums, 2014. un 2015. gadā augsnes ūdenī 60 cm dziļumā vērojams būtiski lielāks PO₄³⁻-P saturs. Tāpat augsnes ūdenī 60 cm dziļumā 2014. un 2015. gadā parauglaukumos, kur ienests notekūdeņu attīrīšanas dūņu pamatmēslojums, konstatēts būtiski lielāks PO₄³⁻-P saturs, salīdzinot ar 2011. gadu, kas norāda uz pakāpenisku mēslojuma organiskās matērijas sadalīšanos. Šāda tendence tika novērota arī augsnes ūdenī 30 cm dziļumā. Pētījuma periodā no 2011. līdz 2015. gadam lielākais vidējais K saturs augsnes ūdenī 60 cm dziļumā konstatēts parauglaukumos, kur ienests koksnes pelnu pamatmēslojums, norādot uz būtisku mēslojuma ietekmi uz K koncentrāciju augsnes ūdenī. Vislielākais K saturs augsnes ūdenī 60 cm dziļumā (21,4 mg L⁻¹) pētījuma periodā tika konstatēts 2012. gada vasaras sākumā parauglaukumā, kur ienests koksnes pelnu

pamatmēslojums.

Kopējā slāpekļa un oglekļa saturs augsnēs ūdenī. Izvērtējot kopējā N saturu augsnēs ūdenī 30 cm un 60 cm dziļumā, visos parauglaukumos konstatēta tendence laika gaitā pēc apšu hibrīdu stādījuma izveidošanas lauksaimniecības zemē kopējam N saturam augsnēs ūdenī samazināties, sasniedzot būtisku līmeni. Maksimālais kopējā N saturs augsnēs ūdenī ($11,9 \text{ mg L}^{-1}$) konstatēts 2012. gada pavasarī 60 cm dziļumā parauglaukumā, kur ienests notekūdeņu attīrīšanas dūņu pamatmēslojums. Salīdzinot ar kontroles parauglaukumiem, parauglaukumos, kur ienests N saturošs pamatmēslojums, nav novērots statistiski būtiski lielāks kopējā N saturs augsnēs ūdenī. Izvērtējot augsnēs ūdens kvalitāti pētījuma objektā atbilstoši Latvijas Lauksaimniecības Universitātes izstrādātajiem ieteikumiem ūdeņu kvalitātes dalījumam drenu sistēmās atkarībā no kopējā N satura (Lagzdīņš *et al.*, 2008), augsnēs ūdens kvalitāte pētījuma objektā tiek vērtēta kā augsta, jo vidējais kopējā N saturs ir $< 4,5 \text{ mg N L}^{-1}$. Nokrišņu ūdeņiem skalojoties cauri augsnēs slāņiem, tie bagātinās ar C saturošām vielām – visos parauglaukumos augsnēs ūdenī 60 cm dziļumā konstatēts lielāks kopējā C saturs nekā augsnēs ūdenī 30 cm dziļumā. Tāpat vērojama tendence, ka parauglaukumos, kur ienests pamatmēslojums, augsnēs ūdenī gan 30 cm, gan 60 cm dziļumā ir lielāks kopējā C saturs, salīdzinot ar kontroles parauglaukumiem.

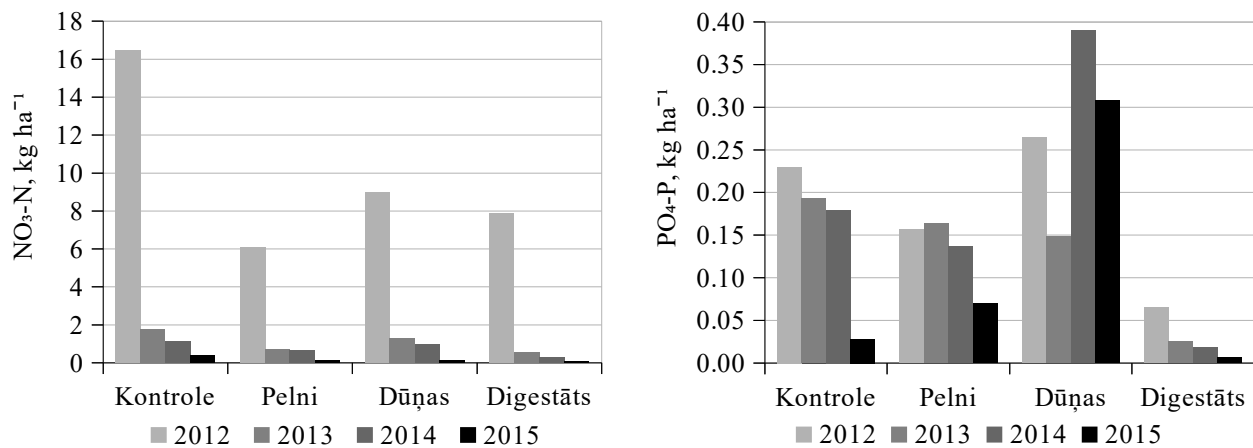
Smago metālu saturs augsnēs ūdenī. Lauksaimnieciskās darbības, tajā skaitā pamatmēslojuma iestrādes, radītā izkliedētā piesārņojuma ietekmētie mazie sateces baseini un drenu sistēmas ir hidrogrāfiskā tīkla sākuma posms, kurā iespējams novērtēt piesārņojuma ar biogēnajiem elementiem vai smagajiem metāliem slodzi. Piesārņojošo elementu noplūdi no difūzajiem avotiem ietekmē laika un telpas faktori, piemēram, mainīgi klimatiskie un hidroloģiskie apstākļi, ģeomorfoloģiskās īpatnības, augu seka un zemes lietojuma veids, tādēļ to salīdzinājumā ar punktveida piesārņojuma avotiem ir grūtāk kontrolēt un novērtēt (Lagzdīņš *et al.*, 2008). Smago metālu (Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd un Pb) saturs augsnēs un nokrišņu ūdenī pētīts paraugos, kas ņemti 2015. gada pavasarī (aprīlis-jūnijs) – četrus gadus pēc pamatmēslojuma iestrādes. Nokrišņu ūdenim skalojoties cauri augsnēs slāņiem, tie bagātinās ar Ni, Cu, Pb un As, savukārt atmosfēras nokrišņu ūdenī ir lielāks Mn (izņemot augsnēs ūdeni 60 cm dziļumā parauglaukumos, kur ienests koksnes pelnu pamatmēslojums), Zn un Cd saturs nekā augsnēs ūdenī (3.6. att.). Ņemot vērā salīdzinoši lielo smago metālu variāciju ūdens paraugos, nav novērots statistiski būtiski lielāks smago metālu saturs parauglaukumos, kur ienests pamatmēslojums. Tāpat smago metālu saturs augsnēs ūdenī nenasniedz mērķlielumus un robežlielumus, kas norādītu uz pasākumu nepieciešamību, lai precizētu piesārņojuma areāla robežas, novērtētu, vai piesārņojums nerada risku cilvēku veselībai un videi, kā arī novērstu turpmāku pazemes ūdeņu piesārņošanu. Smago metālu sadalījumu starp augsnēs cieto un šķīdros fāzi ietekmē vairāki procesi (piemēram, adsorbcija, kompleksveidošanās, nogulšņu veidošanās – šķīšanas reakcijas), kas ir tieši atkarīgi no vides pH. Pētījuma ietvaros konstatēta vidēji cieša negatīva korelācija starp Pb un Cd saturu augsnēs ūdenī un augsnēs ūdens pH (korelācijas koeficienti r ir attiecīgi -0,61 un -0,52). Minētā sakarība ir skaidrojama ar adsorbcijas un nešķīstošu savienojumu izgulsnēšanās procesiem, par ko liecina salīdzinoši augstās augsnēs ūdens pH vērtības pētījuma objektā. Kopumā, ja augsnēs ūdens pH ir ap 6,0-7,0, kas atbilst konstatētajam pētījuma objektā, tikai neliela metālu daļa atrodas augsnēs šķīdumā (Rieuwerts *et al.*, 1998).



3.6. att. Cd un Pb saturs augsnes un nokrišņu ūdenī 2015. gada pavasarī

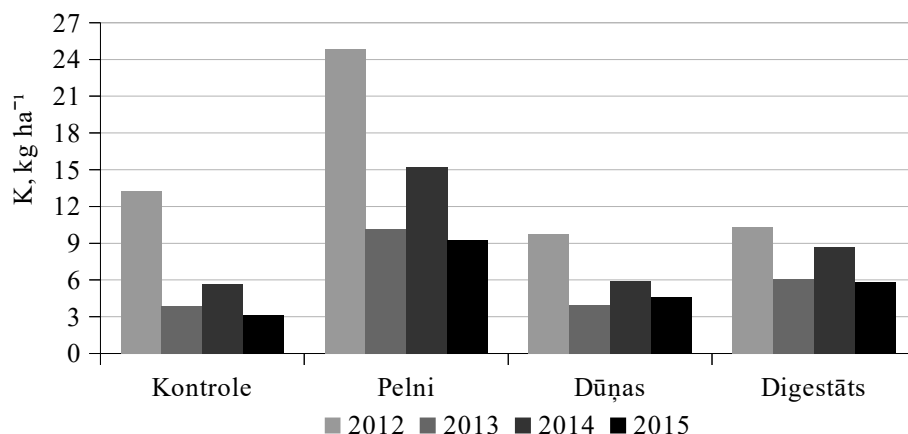
Barības elementu izskalošanās no augsnes. Baltijas jūras reģionā vērojama gan saldūdens, gan sālsūdens kvalitātes pasliktināšanās, kā arī virszemes ūdens eutrofikācija, kā rezultātā ir izstrādātas dažādas rekomendācijas, starptautiskas konvencijas u.c. līgumi vides aizsardzības jomā. Latvija atrodas mitrā, mērenā klimatiskā joslā, kur nokrišņu daudzums pārsniedz iztvaikošanu, kas pavasaros un rudenos rezultējas ūdens aizplūdē no augsnes (Jansons *et al.*, 2011). Pētījumu rezultāti Baltijas jūras reģionā norāda uz to, ka barības elementu izskalošanās no lauksaimniecības zemēm var būt būtiska, turklāt Baltijas valstīs vērojama lauksaimniecības intensitātes palielināšanās (Stålnacke *et al.*, 2014). Pētījuma objektā aprēķināta diennakts vidējā barības elementu izskalošanās no augsnes, izmantojot integrētu pieeju, kas ietver augsnes noteces (viršējo gruntsūdeņu noteces) datus, kas modelēti, izmantojot konceptuālo modeli METQ2012, un empīriskus augsnes ūdens ķīmiskā sastāva datus. Lielākā diennakts NO_3^- -N izskalošanās konstatēta 2011. gadā parauglaukumā, kur ienests digestāta pamatmēslojums ($412,0 \text{ g ha}^{-1}$ dienā). Rezultāti liecina, ka gada laikā izskalotais nitrātu apjoms pēc apšu hibrīdu stādījuma izveidošanas lauksaimniecības zemē, neskatoties uz pamatmēslojuma ienešanu, ir būtiski samazinājies – attiecīgi no vidēji $9,85 \text{ kg ha}^{-1}$ 2012. gadā līdz vidēji $0,17 \text{ kg ha}^{-1}$ 2015. gadā (3.7. att.).

Lielākā fosfātu izskalošanās diennakts laikā ($11,0 \text{ g ha}^{-1}$) konstatēta 2014. gadā (četrus gadus pēc mēslojuma iestrādes) parauglaukumā, kur ienests notekūdeņu attīrīšanas dūņu pamatmēslojums. Rezultāti norāda uz būtisku notekūdeņu attīrīšanas dūņu pamatmēslojuma ietekmi ne tikai uz fosfātu vidējo diennakts izskalošanos, bet arī uz gada laikā izskaloto fosfātu apjomu (3.7. att.). Kontroles parauglaukumā un parauglaukumos, kur ienests koksnes pelnu un digestāta pamatmēslojums, konstatēta tendence samazināties gada laikā izskalotajam fosfātu apjomam, bet parauglaukumos, kur ienests notekūdeņu attīrīšanas dūņu pamatmēslojums, gada laikā izskalotais fosfātu apjoms ir ievērojami palielinājies ceturtajā un piektajā gadā pēc pamatmēslojuma ienešanas, sasniedzot pētījuma perioda augstākās vērtības (attiecīgi, $389,8 \text{ g ha}^{-1}$ gadā un $307,5 \text{ g ha}^{-1}$ gadā).



3.7. att. Nitrātu un fosfātu gada vidējā izskalošanās no augsnes pētījuma objektā

Kālija joni augsnē ir mobili, un līdz ar to liels K daudzums var tikt izskalots, jo īpaši no lauksaimniecības zemēm (Alfaro *et al.*, 2004). Izskalošajam K apjomam no lauksaimniecības zemēm tiek pievērta mazāka uzmanība, salīdzinot ar nitrātu un fosfātu izskalošo apjomu, jo K netiek uzskatīts par vides piesārņotāju, kā arī K izskalošanās tieši neietekmē virszemes ūdeņu eutrofikāciju, bet pastiprināta K izskalošanās no augsnes var ietekmēt augu augšanu un kvalitāti (Broschat, 1995; Kolahchi & Jalali, 2007). Diennakts laikā izskalošais K apjoms variē atkarībā no augsnē iestrādātā pamatmēslojuma veida un meteoroloģiskajiem apstākļiem. Pētījuma rezultāti liecina, ka lielākais diennakts laikā izskalošais K apjoms ir novērots 2012. gadā (otrajā gadā pēc pamatmēslojuma iestrādāšanas augsnē) parauglaukumos, kur ienests koksnes pelnu pamatmēslojums, kad diennakts laikā izskalošais K apjoms sasniedza maksimālo vērtību 485,4 g K ha⁻¹ dienā, bet laika periodā no 2013. līdz 2015. gadam diennakts laikā izskalošais K apjoms ir salīdzinoši stabils – no 25,4 līdz 41,8 g ha⁻¹ dienā. Kontroles parauglaukumos diennakts laikā izskalošais K apjoms pētījuma periodā samazinājās no 32,3 g ha⁻¹ dienā 2011. gadā līdz 8,6 g ha⁻¹ dienā 2015. gadā. Arī gada laikā izskalošais K apjoms pētījuma periodā galvenokārt samazinājās visos parauglaukumos, sasniedzot minimālo vērtību 3,12 kg K ha⁻¹ 2015. gadā kontroles parauglaukumos (3.8. att.). Krass izskalošais K apjoma samazinājums vērojams tieši 2013. un 2015. gadā, kas skaidrojams ar salīdzinoši mazāku kopējo nokrišņu daudzumu attiecīgajos gados. Neskatoties uz kopējo tendenci izskalošajam K apjomam pētījuma objektā samazināties, tajā skaitā parauglaukumos, kur ienests K saturošs pamatmēslojums, K izskalošanās pārsniedz K ienesi ar atmosfēras nokrišņiem, norādot uz K saturošu minerālu mineralizācijas procesiem.

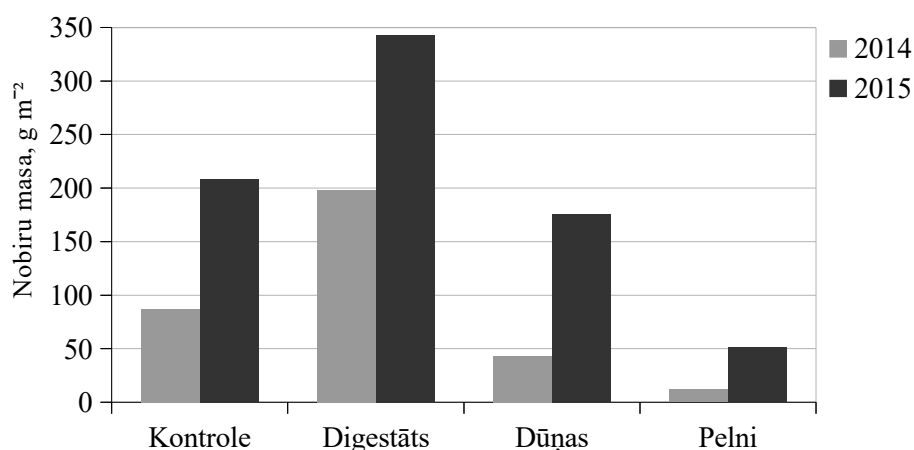


3.8. att. Kālija gada vidējā izskalošanās no augsnes pētījuma objektā

3.3. Augu un sēņu biomateriāla ķīmiskais sastāvs

Apšu hibrīdu lapu, zaru un nobiru ķīmiskais sastāvs. Lapas un zari apšu hibrīdu vainagā ir galvenie barības vielu uzkrājēji, kas nodrošina šo vielu saglabāšanos un apriti ekosistēmā. Tā kā kokaugu ekosistēmās piesārņojošās vielas un barības vielas no nokrišņiem, kā arī daļiņas vielu sausajā izsēšanās procesā vispirms uztver koku vainagi, arī nobiras, kas nokļūst uz augsnes, satur ķīmiskas vielas, kuras akumulējušās koku skujās un lapās. Tiek uzskatīts, ka nobiras ir otrs lielākais barības elementu avots zemes virskārtā, taču barības elementi no organiskajām vielām mineralizācijas procesā atbrīvojas lēni, turpretī barības vielas, kas nonākušas augsnē ar vainaga caurtecēm un stumbra noteces ūdeņiem, parasti ir gandrīz izšķīdušas, un līdz ar to augi tās var ātri uzņemt (Tērauda, 2008).

Gada kopējā nobiru masa pētījumu objektā 2014. un 2015. gadā parādīta 3.9. attēlā. 2015. gadā konstatēta ievērojami lielāka gada kopējā nobiru masa, kas izskaidrojama ar straujo apšu hibrīdu biomasas, tajā skaitā arī koku vainaga daļas, kas rada lielāko masas ieguldījumu nobiru kopējā masā, pieaugumu.



3.9. att. Gada kopējā nobiru masa pētījuma objektā

Vidējais dažādu frakciju īpatsvars kopējā nobiru biomasā un vidējais makroelementu saturs dažādu nobiru frakciju paraugos apkopots 3.6. tabulā. Ar apšu hibrīdu lapu nobirām ienestais makroelementu daudzums 2014. un 2015. gadā atkarībā no pamatmēslojuma veida parādīts 3.7. tabulā. Ar apšu hibrīdu lapu nobirām elementu aprītē atgrieztais makroelementu daudzums ir tieši atkarīgs no kokaugu stādījuma vecuma un izmantotā pamatmēslojuma veida. Gan 2014. gadā, gan 2015. gadā lielākais makroelementu daudzums, kas aprītē atgriezts ar apšu hibrīdu lapu nobirām, konstatēts parauglaukumā, kur kā pamatmēslojums izmantots digestāts, kaut arī ar digestāta pamatmēslojumu nav ienests lielākais barības elementu (N, P, K) daudzums, salīdzinot ar notekūdeņu attīrīšanas dūņu un koksnes pelnu pamatmēslojumu.

3.6. tabula

Vidējais makroelementu saturs nobiru paraugos pētījuma objektā

Frakcija (w)	C, g kg ⁻¹	N, g kg ⁻¹	P, g kg ⁻¹	K, g kg ⁻¹	Ca, g kg ⁻¹	Mg, g kg ⁻¹	S, mg kg ⁻¹
Zari un mizas (1,6%)	509 ± 5 n = 4	6,4 ± 0,7 n = 4	1,4 ± 0,4 n = 3	7,8 ± 0,5 n = 3	171 ± 1 n = 3	2,8 ± 0,1 n = 3	55 ± 27 n = 3
Apšu hibrīdu lapas (92,9%)	505 ± 2 n = 8	12 ± 1 n = 8	2,3 ± 0,1 n = 4	6,2 ± 0,5 n = 4	24 ± 3 n = 4	3,8 ± 0,1 n = 4	506 ± 22 n = 4
Sēklas (1,5%)	592 ± 14 n = 2	11 ± 3 n = 2	0,5 n = 1	1,8 n = 1	10,8 n = 1	1,5 n = 1	347 n = 1

3.6. tabulas turpinājums

Frakcija (w)	C, g kg ⁻¹	N, g kg ⁻¹	P, g kg ⁻¹	K, g kg ⁻¹	Ca, g kg ⁻¹	Mg, g kg ⁻¹	S, mg kg ⁻¹
Insekti, fekālijas u.c. (3,9%)	151 ± 4 n = 2	29 ± 6 n = 2	1,8 n = 1	3,6 n = 1	13,7 n = 1	3,2 n = 1	1325 n = 1
Cītu koku sugu lapas (0,2%)	520 n = 1	13,0 n = 1	2,6 n = 1	8,4 n = 1	19,6 n = 1	3,2 n = 1	556 n = 1

n – paraugu skaits; w – attiecīgās frakcijas vidējais īpatsvars kopējā nobiru biomasā.

3.7. tabula

Ar apšu hibrīdu lapu nobirām elementu aprītē atgriestais makroelementu daudzums

Gads	Pamatmēslojuma veids	AH lapu nobiru biomasas, kg ha ⁻¹	C, kg ha ⁻¹	N, kg ha ⁻¹	P, kg ha ⁻¹	K, kg ha ⁻¹	Ca, kg ha ⁻¹	Mg, kg ha ⁻¹	S, kg ha ⁻¹
2014	kontrole	836,3	415,6	11,25	2,37	5,18	19,74	3,18	0,89
	digestāts	1926,4	965,1	37,45	5,31	11,94	45,46	7,32	2,59
	dūņas	365,3	188,3	4,47	1,11	2,27	8,62	1,39	0,44
	pelni	105,5	52,7	0,81	0,26	0,65	2,49	0,40	0,08
2015	kontrole	1972,4	992,4	27,0	4,8	12,5	30,5	7,2	1,04
	digestāts	3060,9	1549,2	37,0	6,7	22,5	85,8	11,9	1,65
	dūņas	1682,1	853,8	19,3	4,1	8,7	42,6	6,9	0,86
	pelni	507,6	258,3	3,9	1,1	3,0	13,0	1,9	0,23

Koku lapu un zaru izotopisko sastāvu nosaka gan koku suga, gan mēslojums (Kalcits *et al.*, 2015). Vidējās $\delta^{13}\text{C}$ un $\delta^{15}\text{N}$ izotopu attiecību vērtības četrus gadus vecu apšu hibrīdu lapās ir apkopotas 3.8. tabulā. $\delta^{13}\text{C}$ izotopu attiecība apšu hibrīdu lapās variē salīdzinoši šaurā intervālā no -29,47 ‰ līdz -28,04 ‰. $\delta^{15}\text{N}$ izotopu attiecība apšu hibrīdu lapās variē no 1,19 ‰ (kontroles parauglaurumā) līdz 6,49 ‰ (parauglaurumā, kas mēslots ar notekūdeņu attīrīšanas dūņām). Pētījuma ietvaros konstatētas statistiski būtiskas $\delta^{13}\text{C}$ izotopu attiecības vērtību atšķirības starp apšu hibrīdu klona Nr. 4 un klona Nr. 28 lapām kontroles parauglaurumā. Visos parauglaurumos apšu hibrīdu klona Nr. 28 lapās konstatēta lielāka $\delta^{15}\text{N}$ izotopu attiecības vērtība, salīdzinot ar klona Nr. 4 lapās konstatētām vērtībām, bet statistiski būtiska atšķirība konstatēta tikai parauglaurumā, kur kā pamatmēslojums ir izmantotas notekūdeņu attīrīšanas dūņas ($p = 0,002$). Tāpat visos parauglaurumos, kur ienests kāds no pamatmēslojuma veidiem, konstatētas lielākas vidējās $\delta^{15}\text{N}$ izotopu attiecības vērtības, bet statistiski būtiskas atšķirības konstatētas starp kontroles parauglaurumiem un parauglaurumiem, kur ienestas notekūdeņu attīrīšanas dūņas ($p = 0,002$ gan apšu hibrīdu kolona Nr. 4 parauglaurumā, gan klona Nr. 28 parauglaurumā) un digestāts ($p = 0,002$ apšu hibrīdu kolona Nr. 4 parauglaurumā, $p = 0,015$ klona Nr. 28 parauglaurumā).

Dažādu koku sugu pētījumos noskaidrots, ka $\delta^{13}\text{C}$ vērtība gan koksne ekosistēmas līmenī, gan koksnes gadskārtās individuālu koku līmenī stipri atšķiras pat vienas ekosistēmas un individuāla koka ietvaros, kas skaidrots ar $\delta^{13}\text{C}$ vērtības stipro atkarību no vides un klimatiskajiem apstākļiem, piemēram, auga ģenētiskajām īpašībām attiecībā uz ūdens izmantošanas efektivitāti, fotosintēzes aktivitāti, kas savukārt ir atkarīga no tādiem

faktoriem kā saules radiācija un barības elementu pietiekamība, mikrolieljefa, augsnes tipa, granulometriskā sastāva, vietas hidroloģiskām īpatnībām, nokrišņu daudzuma, gaisa temperatūras (Bégin *et al.*, 2015).

3.8. tabula

Vidējā $\delta^{13}\text{C}$ un $\delta^{15}\text{N}$ izotopu attiecība četrus gadus vecu apšu hibrīdu lapu paraugos

Pamatmēslojuma veids	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$, ‰		$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$, ‰	
	klons Nr. 4	klons Nr. 28	klons Nr. 4	klons Nr. 28
Kontrole	$-28,4 \pm 0,2$ ($n = 3$)	$-29,0 \pm 0,2^*$ ($n = 3$)	$1,6 \pm 0,1$ ($n = 3$)	$2,0 \pm 0,1$ ($n = 3$)
Digestāts	$-28,6 \pm 0,1$ ($n = 3$)	$-28,8 \pm 0,2$ ($n = 3$)	$2,8 \pm 0,1^{**}$ ($n = 3$)	$3,0 \pm 0,2^{**}$ ($n = 3$)
Dūņas	$-29,0 \pm 0,1^{**}$ ($n = 3$)	$-28,5 \pm 0,1$ ($n = 3$)	$2,7 \pm 0,1^{**}$ ($n = 3$)	$4,6 \pm 0,6^{**/*}$ ($n = 3$)
Pelni	$-29,1 \pm 0,1$ ($n = 3$)	$-28,8 \pm 0,2$ ($n = 3$)	$1,7 \pm 0,1$ ($n = 3$)	$3,5 \pm 0,7$ ($n = 3$)
* Statistiski būtiskas ($p < 0,05$) atšķirības starp C vai N izotopu attiecības vērtību apšu hibrīdu klona Nr. 4 un klona Nr. 28 lapās parauglaukuma ietvaros.				
** Statistiski būtiskas ($p < 0,05$) atšķirības starp C vai N izotopu attiecības vērtību kontroles parauglaukumā un parauglaukumā, kur ienests pamatmēslojums, apšu hibrīdu klona ietvaros.				
n – paraugu skaits.				

Parasto apšubeku auglķermeņu izotopiskais sastāvs. Sēņu auglķermeņu izotopiskā sastāva pētījumi norāda uz lielu stabilo izotopu vērtību variāciju: $\delta^{15}\text{N}$ vērtība variē no $-7,1$ ‰ līdz $21,8$ ‰, bet $\delta^{13}\text{C}$ vērtība variē no $-31,7$ ‰ līdz $-19,0$ ‰ (O'Regan *et al.*, 2016). Līdz šim tikai nedaudzi sēņu izotopiskā sastāva pētījumi ir veikti Eiropā, īpaši maz pētīts ir cilvēkiem ēdamo taksonu izotopiskais sastāvs, bet esošie dati liecina, ka $\delta^{15}\text{N}$ vērtība variē no $-1,1$ ‰ līdz $12,5$ ‰, bet $\delta^{13}\text{C}$ vērtība variē no $-28,6$ ‰ līdz $-21,1$ ‰ (O'Regan *et al.*, 2016). Sešām ēdamām sēņu sugām (*Boletus edulis*, *Hydnum repandum*, *Agaricus arvensis* un trifelēm) noteikts, ka $\delta^{15}\text{N}$ vērtība ir lielāka par 8‰. Līdz šim zinātniskajā literatūrā nav publicēta informācija par $\delta^{13}\text{C}$ un $\delta^{15}\text{N}$ izotopu attiecību vērtībām parasto apšubeku (*Leccinum aurantiacum* (Bull.) Gray) auglķermeņos. Vidējās $\delta^{13}\text{C}$ un $\delta^{15}\text{N}$ izotopu attiecību vērtības parasto apšubeku (*Leccinum aurantiacum* (Bull.) Gray) auglķermeņos, kas ņemti pētījuma objektā 2014. un 2015. gadā, ir apkopotas 3.9. tabulā.

3.9. tabula

Vidējā $\delta^{13}\text{C}$ un $\delta^{15}\text{N}$ izotopu attiecība parasto apšubeku auglķermeņos

Pamatmēslojuma veids	2014. gads		2015. gads	
	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$, ‰	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$, ‰	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$, ‰
Kontrole	$-25,89 \pm 0,05$	$8,9 \pm 0,2$	$-26,64 \pm 0,04$	$8,6 \pm 0,1$
Digestāts	$-26,30 \pm 0,06$	$9,9 \pm 0,3$	$-26,7 \pm 0,1$	$10,4 \pm 0,1$
Dūņas	$-25,5 \pm 0,2$	$9,7 \pm 0,2$	$-27,01 \pm 0,08$	$9,0 \pm 0,4$
Koksnes pelni	$-25,88 \pm 0,05$	$8,7 \pm 0,5$	$-27,37 \pm 0,05$	$8,7 \pm 0,1$

$\delta^{13}\text{C}$ vērtība parasto apšubeku auglķermeņos, kas ņemti pētījuma objektā, variē salīdzinoši šaurā intervālā no $-27,37 \pm 0,05$ ‰ līdz $-25,5 \pm 0,2$ ‰. Visos parauglaukumos 2015. gadā ņemtajos parasto apšubeku auglķermeņu paraugos konstatēta mazāka $\delta^{13}\text{C}$ vērtība (vidēji par 1,0 ‰), salīdzinot ar 2014. gadā ņemtajos paraugos noteiktajām $\delta^{13}\text{C}$ vērtībām. $\delta^{15}\text{N}$ vērtība parasto apšubeku auglķermeņu paraugos variē no $8,6 \pm 0,1$ ‰ līdz $10,4 \pm 0,1$ ‰. Gan 2014. gadā, gan 2015. gadā ņemtajos parasto apšubeku auglķermeņu

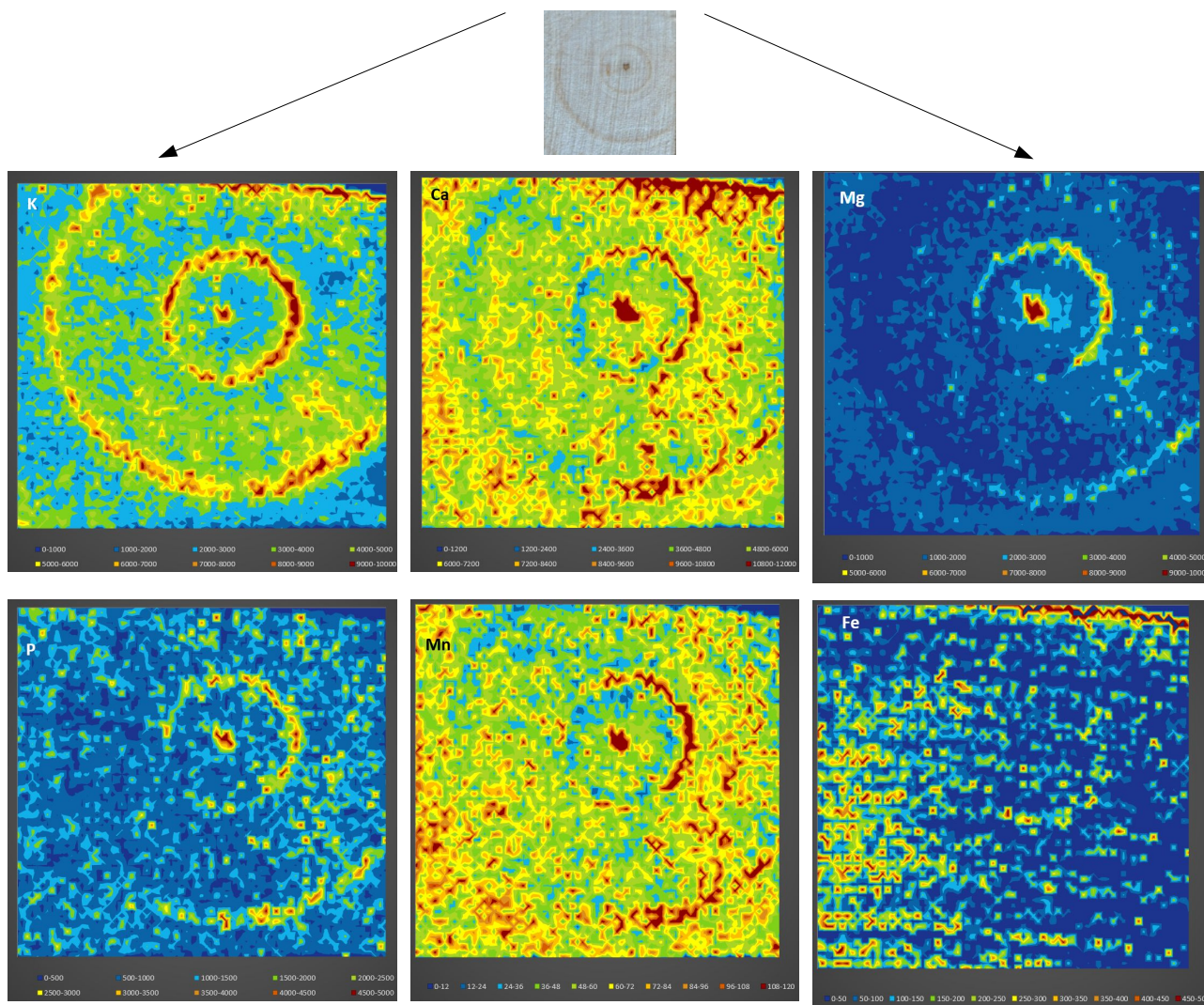
paraugos lielākas $\delta^{15}\text{N}$ vērtības konstatētas paraugos, kas ņemti parauglaukumos, kur ienests notekūdeņu dūņu un digestāta pamatmēslojums, salīdzinot ar paraugiem, kas ņemti kontroles parauglaukumos. Šāds konstatējums norāda uz organiskā pamatmēslojuma (notekūdeņu dūņu un digestāta) ietekmi uz parasto apšubeku auglķermeņu izotopisko sastāvu pat 4-5 gadus pēc pamatmēslojuma iestrādes. Pētījuma ietvaros noteiktās $\delta^{13}\text{C}$ un $\delta^{15}\text{N}$ vērtības parasto apšubeku auglķermeņu paraugos atbilst O'Regan *et al.* (2016) minētajam $\delta^{13}\text{C}$ un $\delta^{15}\text{N}$ vērtību diapazonam, kas norādīts cilvēkiem uzturā lietojamām sēnēm.

Apšu hibrīdu stumbra gadskārtu ķīmiskais sastāvs. Līdz ar analītisko metožu attīstību ir iespēja veikt multielementu dendroanalīzi ar ļoti augstu telpisko izšķirtspēju un zemu detektēšanas robežu, kas ļauj spriest par elementu un to izotopu sastāvu un apriti kokaugos, kā arī elementu un to izotopu satura atšķirībām kokaugu dažādās gadskārtās. Apšu hibrīdu stumbra gadskārtu ķīmiskā sastāva raksturošanai izmantoti elementu izotopu relatīvā daudzuma mērījumu rezultāti, kas iegūti, izmantojot LA-ICP-MS metodi. Elementu satura koku gadskārtās variācijas vizuālai atspoguļošanai 3.10. attēlā parādīti ^{39}K , ^{44}Ca , ^{26}Mg , ^{31}P , ^{55}Mn un ^{56}Fe relatīvā daudzuma kartēšanas rezultāti. Kopumā vērojama salīdzinoši liela minēto elementu gadskārtu vidējā relatīvā daudzuma variācija. Tāpat arī vienas gadskārtas ietvaros vērojama liela minēto elementu relatīvā daudzuma variācija.

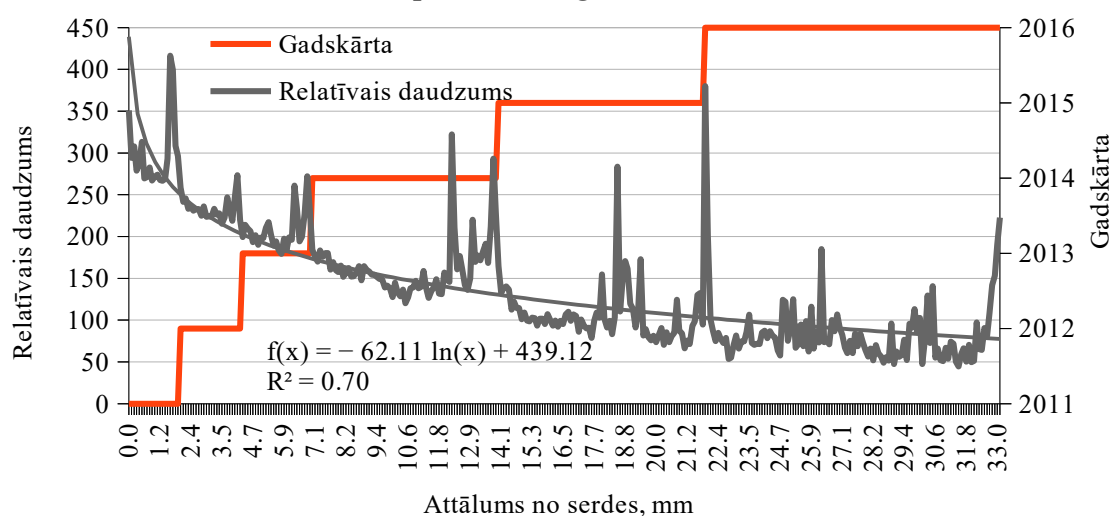
Salīdzinot gadskārtu vidējo ^{39}K relatīvo daudzumu apšu hibrīdos, kas auguši parauglaukumos, kur ienesti dažādi pamatmēslojuma veidi, vislielākais ^{39}K relatīvais daudzums visās gadskārtās konstatēts paraugkokos, kas auguši parauglaukumos, kur ienests koksnes pelnu vai digestāta pamatmēslojums. Jāņem vērā, ka ar koksnes pelniem un digestātu augsnē arī ienests lielākais K daudzums, salīdzinot ar notekūdeņu attīrīšanas dūņu pamatmēslojumu (2.1. tabula). Salīdzinot gadskārtu vidējo ^{44}Ca un ^{26}Mg relatīvo daudzumu apšu hibrīdos, nav vērojama viennozīmīga pamatmēslojuma ietekme, bet vērojamas būtiskas atšķirības starp paraugkokiem. Visās gadskārtās lielākais ^{44}Ca un ^{26}Mg relatīvais daudzums konstatēts paraugkokā A12, kas audzis parauglaukumā, kur ienests koksnes pelnu pamatmēslojums. Salīdzinot gadskārtu ^{31}P vidējo relatīvo daudzumu, vērojama notekūdeņu attīrīšanas dūņu un koksnes pelnu pamatmēslojuma ietekme uz ^{31}P relatīvo daudzumu apšu hibrīdu gadskārtās – apšu hibrīdu paraugkokos, kas auguši parauglaukumos, kur ar pamatmēslojumu ienests papildus fosfors, konstatēts lielāks ^{31}P relatīvais daudzums koksnē nekā paraugkokos kontroles parauglaukumos. Atsevišķos paraugkokos, piemēram, A1¹ (kontroles parauglaukums), vērojama tendence ^{31}P relatīvam daudzumam koksnē samazināties virzienā no stumbra serdes uz mizu atbilstoši logaritmiskai regresijai (3.11. att.). Turklāt kontroles parauglaukumos vērojama vidēji cieša un cieša korelācija starp gada vidējo $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ saturu augsnes ūdenī un ^{31}P vidējo relatīvo daudzumu apšu hibrīdu stumbru attiecīgās gadskārtās, Pīrsona korelācijas koeficienti r variē no 0,60 līdz 0,90. Savukārt citos paraugkokos, piemēram, A11², vērojama pretēja tendence, kas skaidrojama ar pamatmēslojuma (notekūdeņu attīrīšanas dūņu) ietekmi. To apstiprina cieša korelācija, kas minētajā parauglaukumā konstatēta starp gada vidējo $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ saturu augsnes ūdenī un ^{31}P vidējo relatīvo daudzumu apšu hibrīdu stumbra attiecīgajās gadskārtās (Pīrsona korelācijas koeficients r ir 0,86).

1 Paraugkoks A1 audzis kontroles parauglaukumā.

2 Paraugkoks A11 audzis parauglaukumā, kur ienests notekūdeņu attīrīšanas dūņu pamatmēslojums.



3.10. att. ^{39}K , ^{44}Ca , ^{26}Mg , ^{31}P , ^{55}Mn un ^{56}Fe relatīvais daudzums apšu hibrīdu paraugkoka A4³ pirmās trīs gadskārtās



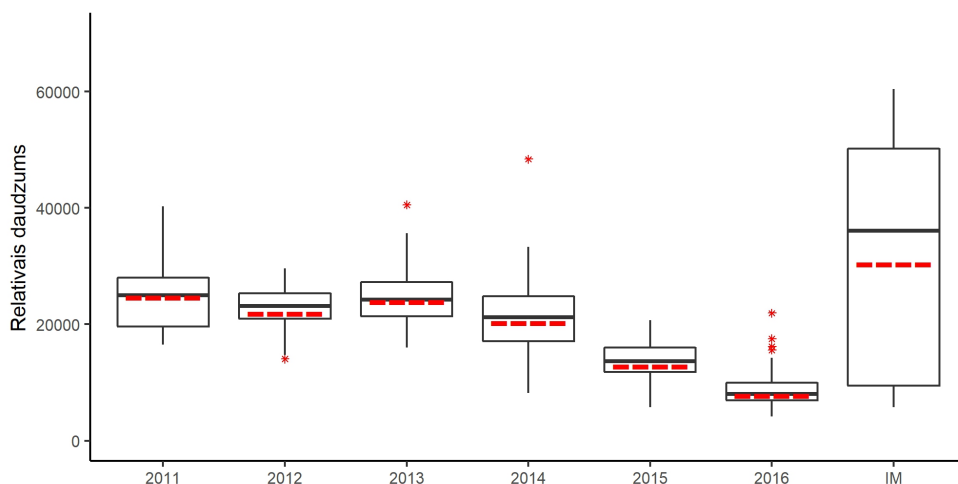
3.11. att. ^{31}P relatīvais daudzums apšu hibrīdu paraugkoka A1⁴ gadskārtās

Tāpat iezīmējas ^{39}K , ^{44}Ca , ^{26}Mg un ^{31}P relatīvā daudzuma atšķirības vienas gadskārtas

3 Paraugkoks A4 audzis parauglaukumā, kur ienests koksnes pelnu pamatmēslojums.

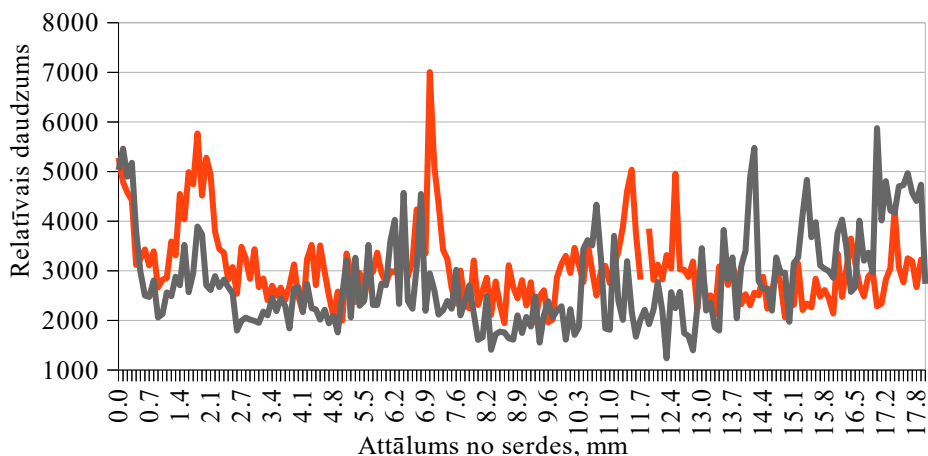
4 Paraugkoks A1 audzis kontroles parauglaukumā.

ietvaros starp agrīno un vēlīno koksni – gadskārtu ietvaros vēlīnajā koksņē konstatēts maksimālais ^{39}K , ^{44}Ca , ^{26}Mg un ^{31}P relatīvais daudzums. Salīdzinot ^{39}K , ^{44}Ca , ^{26}Mg un ^{31}P relatīvo daudzumu apšu hibrīdu stumbru serdē, gadskārtās un iekšējā mizā, būtiski lielāks minēto elementu relatīvais daudzums konstatēts serdē, vaskulārajā kambijā un iekšējā mizā (piemēram, 3.12. att).



3.12.att. ^{44}Ca relatīvais daudzums apšu hibrīdu paraugkoka A2⁵ gadskārtās un iekšējā mizā (IM)⁶

3.13. attēlā parādīti ^{39}K relatīvā daudzuma LA-ICP-MS mērījumu rezultāti pa divām taisnām savstarpēji perpendikulārām trajektorijām virzienā no stumbra serdes uz mizu paraugkoka A9⁷ gadskārtās. Apšu hibrīda (paraugkoks A9) gadskārtā, kas veidojusies 2011. gadā, konstatēta vidēji cieša korelācija starp 2 perpendikulāriem K relatīvā daudzuma mērījumiem, korelācijas koeficients $r = 0,62$. Nākamajās gadskārtās vērojama vāja korelācija ($r < 0,50$). Kā vienu no iemesliem var minēt gadskārtu platuma un attāluma no serdes jeb rādiusa nevienādīgumu kokaugu stumbros.



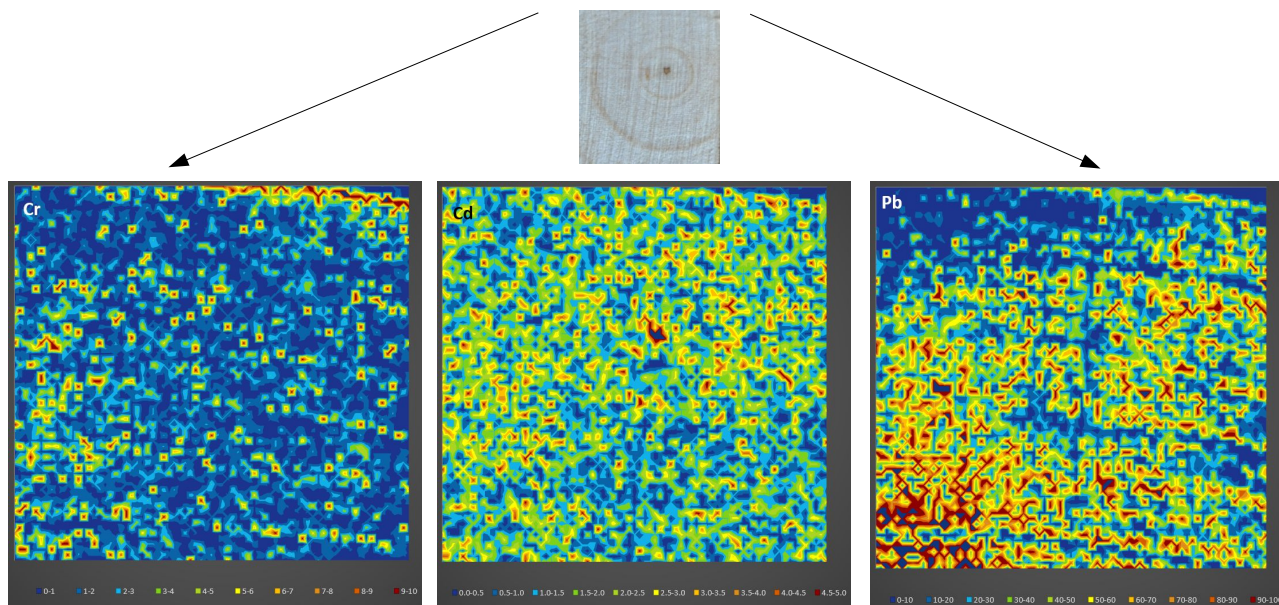
3.13. att. ^{39}K relatīvā daudzuma mērījumi pa divām taisnām savstarpēji perpendikulārām trajektorijām apšu hibrīdu paraugkoka A9⁷ gadskārtās

5 Paraugkoks A2 audzis parauglaukumā, kur ienests notekūdeņu attīrīšanas dūņu pamatmēslojums.

6 Melnā līnija, kas atrodas taisnstūrī, atbilst mediānai; sarkanā raustītā līnija atbilst datu kopas vidējais vērtībai; taisnstūra apakšējā un augšējā mala atbilst 1. un 3. kvartilei; līnijas apašējais un augšējais punkts ir minimālā un maksimālā vērtība, kas nepārsniedz 1,5 reizes attālumu starp 1. un 3. kvartili, sarkanie punkti ir maksimālās vērtības, kas 1,5 reizes pārsniedz attālumu starp 1. un 3. kvartili.

7 Paraugkoks A9 audzis kontroles parauglaukumā.

3.14. attēlā ir parādīts smago metālu izotopu (^{53}Cr , ^{111}Cd un ^{208}Pb) relatīvais daudzums apšu hibrīdu paraugkoka A4⁸ gadskārtās.



3.14. att. Smago metālu izotopu (^{53}Cr , ^{111}Cd un ^{208}Pb) relatīvais daudzums apšu hibrīdu paraugkoka A4⁸ pirmās trīs gadskārtās

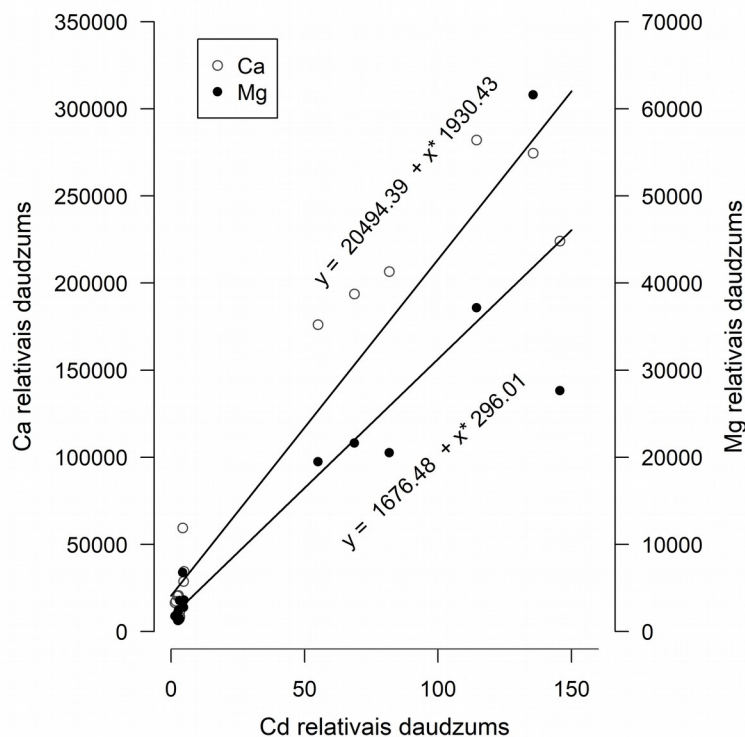
Nav vērojamas būtiskas atšķirības starp ^{53}Cr , ^{60}Ni , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{111}Cd un ^{208}Pb relatīvo daudzumu agrīnā un vēlīnā koksne. Salīdzinot ^{53}Cr , ^{63}Cu , ^{66}Zn un ^{208}Pb relatīvo daudzumu koksne apšu hibrīdu paraugkokos, kas auguši kontroles parauglaukumos un parauglaukumos, kur ienests pamatmēslojums, konstatēts, ka visos mēslotajos parauglaukumos apšu hibrīdu koksne ir statistiski būtiski ($p < 0,05$) lielāks ^{53}Cr , ^{63}Cu , ^{66}Zn un ^{208}Pb vidējais relatīvais daudzums nekā kontroles parauglaukumos. Vidēji lielākais ^{53}Cr , ^{60}Ni , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{208}Pb un ^{111}Cd relatīvais daudzums konstatēts paraugkokos, kas auguši parauglaukumos, kur ienests koksnes pelnu pamatmēslojums, bet mazākais – kontroles parauglaukumos.

Smago metālu transportēšanas mehānismu raksturojums *Populus* kokaugos ir maz aprakstīts. Pētījuma ietvaros izvērtēti Pīrsona korelācijas koeficienti, kas raksturo lineāru sakarību ciešumu starp smago metālu izotopu un citu makro- un mikroelementu izotopu relatīvo daudzumu apšu hibrīdu paraugkoku gadskārtās. Cieša, pozitīva korelācija ($r > 0,5$) konstatēta starp gadskārtu vidējo ^{44}Ca un ^{111}Cd relatīvo daudzumu un starp ^{44}Ca un ^{208}Pb relatīvo daudzumu. Atsevišķos apšu hibrīdu paraugkokos konstatēta cieša, pozitīva korelācija starp gadskārtu vidējo ^{111}Cd un ^{39}K relatīvo daudzumu un starp gadskārtu vidējo ^{111}Cd un ^{26}Mg relatīvo daudzumu. Visos paraugkokos, kas auguši parauglaukumos, kur ienests koksnes pelnu pamatmēslojums, konstatēta cieša, pozitīva korelācija starp apšu hibrīdu stumbra gadskārtu vidējo ^{111}Cd un ^{44}Ca relatīvo daudzumu (vidēji r ir 0,87) un starp ^{111}Cd un ^{26}Mg relatīvo daudzumu (vidēji r ir 0,83, 3.15. att.). Savukārt visos paraugkokos, kas auguši kontroles parauglaukumos, konstatēta vidēji cieša, pozitīva korelācija starp apšu hibrīdu stumbra gadskārtu vidējo ^{208}Pb un ^{44}Ca relatīvo daudzumu (vidēji r ir 0,77).

Korelācijas starp smago metālu un makroelementu relatīvo daudzumu apšu hibrīdu gadskārtās ir skaidrojamas ar specifiskiem elementu klāsteru transporta mehānismiem. Piemēram, P tipa adenoizīna trifosfāti (ATF) tiek izmantoti, lai pārvietot dažādu jonu kopas, tajā skatā H^+ , Na^+/K^+ , H^+/K^+ un Ca^{2+} , kā arī smagos metālus un iespējams arī lipīdus

⁸ Paraugkoks A4 audzis parauglaukumā, kur ienests koksnes pelnu pamatmēslojums.

(Kuhlbrandt 2004). P_{IB} tipa ATF, kas tiek dēvēti arī par smago metālu ATF, ir iesaistīti gan būtisko smago metālu, gan potenciāli toksisko smago metālu transportā starp šūnu membrānām. Smago metālu ATF pētījumi liecina, ka attiecīgie transportētāji iedalās divās grupās atbilstoši to metāla-substrāta specifikai: Cu/Ag grupa un Zn/Co/Cd/Pb grupa (Tangahu *et al.*, 2011). Līdz ar to līdzīgas korelācijas starp Cd un makroelementu relatīvo daudzumu apšu hibrīdu gadskārtās un starp Pb un makroelementu relatīvo daudzumu apšu hibrīdu gadskārtās var tikt skaidrotas ar to, ka Cd un Pb pieder vienai un tai pašai smago metālu ATF metāla-substrāta specifiskajai grupai, un līdz ar to Cd un Pb transportēšanas un akumulēšanās procesi apšu hibrīdu stumbru koksne ir līdzīgi.



3.15. att. Sakarības starp apšu hibrīdu stumbru gadskārtu vidējo ^{111}Cd un ^{44}Ca , ^{26}Mg relatīvo daudzumu parauglaukumos, kur ienests koksnes pelnu pamatmēslajums

GALVENIE SECINĀJUMI

1. Pirmo piecu gadu laikā pēc apšu hibrīdu stādījuma izveidošanas lauksaimniecības zemē augsnē netiek uzkrāts papildus C un N, turklāt augsnes dziļākajos slāņos (40-60 cm dziļumā) novērots būtisks C un N uzkrājuma samazinājums organisko vielu noārdīšanās rezultātā.
2. Kopumā pētījuma objektā nav novērots augsnes piesārņojums ar smagajiem metāliem ne kontroles parauglaukumos, ne parauglaukumos, kur ienests pamatmēslojums, bet atsevišķu smago metālu (piemēram, Zn, Ni un As) saturs augsnē norāda uz ilgtspējīgas augsnes kvalitātes nodrošināšanas riskiem.
3. Viens no būtiskākajiem ekosistēmas pakalpojumiem, ko nodrošina juvenīli apšu hibrīdu stādījumi lauksaimniecības zemē, ir barības elementu (NO_3^- -N, PO_4^{3-} -P, K) izskalošanās samazinājums no augsnes. Pirmo piecu gadu laikā pēc apšu hibrīdu stādījumu ierīkošanas NO_3^- -N izskalošanās samazinājās pat līdz 99,6%, PO_4^{3-} -P izskalošanās samazinājās līdz 97,1%, bet K izskalošanās samazinājās līdz 76,5%.
4. Pamatmēslojuma ienese lauksaimniecības zemē būtiski ietekmē ne tikai apšu hibrīdu lapotnes nobiru biomasu un kopējo elementu apritē atgrieztu elementu daudzumu, bet arī vieglo stabilo izotopu frakcionēšanos apšu hibrīdu kokaugos, par ko liecina būtiskas $\delta^{13}\text{C}$ un $\delta^{15}\text{N}$ vērtības atšķirības apšu hibrīdu lapās kontroles parauglaukumos un parauglaukumos, kur ienests pamatmēslojums.
5. Parastās apšubekas (*Leccinum aurantiacum* (Bull.) Gray) ir vides kvalitāti raksturojoši bioindikatorī. Parasto apšubeku auglķermeņos $\delta^{15}\text{N}$ vērtību atšķirības kontroles parauglaukumos un parauglaukumos, kur ienests pamatmēslojums (notekūdeņu attīrīšanas dūņas un digestāts), atspoguļo N saturoša pamatmēslojuma ietekmi uz biouzņemamā N avotu un plūsmām ekosistēmā pat 5 gadus pēc pamatmēslojuma ieneses pētījuma objektā.
6. LA-ICP-MS mērījumi apšu hibrīdu stumbra gadskārtās ļauj spiest par makroelementu un mikroelementu relatīvā daudzuma koksne atšķirībām ne tikai starp kokaugiem, bet arī vienas gadskārtas ietvaros. Vienas gadskārtas ietvaros vērojamas būtiskas makroelementu relatīvā daudzuma atšķirības starp agrīno un vēlīno koksni – vēlīnajā koksne konstatēts būtiski lielāks K, Ca, Mg, P un Mn relatīvais daudzums.
7. Neraugoties uz to, ka augsnes un augsnes ūdens bāziskās pH vērtības norāda uz ierobežotu smago metālu mobilitāti pētījuma objektā, vērojama būtiska pamatmēslojuma, īpaši koksnes pelnu, ietekme uz smago metālu (Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb) vidējo relatīvo daudzumu apšu hibrīdu gadskārtās – būtiski lielāks smago metālu relatīvais daudzums vērojams paraugkokū, kas auguši parauglaukumos, kur ienests pamatmēslojums, koksne.
8. Vides paraugus, kuriem pētījuma ietvaros noteikts mikro- un makroelementu sastāvs, kā vides apstākļu maiņas indikatorus atbilstoši to jutīgumam jeb atbildes reakcijai var ierindot šādi: augu un sēņu biomateriāls > augsnes ūdens > augsne.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- Alfaro M.A., Jarvis S.C. & Gregory P.J. 2004. Factors affecting potassium leaching in different soils. *Soil Use and Management*, 20, 182–189.
- Allen S., Jose S., Nair P.K.R., et al. 2004. Safety net role of tree roots: experimental evidence from an alley cropping system. *Forest Ecology and Management*, 192, 395–407.
- Anderson S.H., Udawatta R.P., Seobi T., et al. 2008. Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. *Agroforestry Systems*, 75(1), 5–16.
- Bardule A., Lupikis A., Butlers A., et al. 2017. Organic carbon stock in different types of mineral soils in cropland and grassland in Latvia. *Zemdirbyste-Agriculture*, 104(1), 3–8.
- Bardule A., Rancane S., Gutmane I. et al. 2013. The effect of fertiliser type on hybrid aspen increment and seed yield of perennial grass cultivated in the agroforestry system. *Agronomy Research*, 11(1), 13–24.
- Bégin C., Gingras M., Savard M.M., et al. 2015. Assessing tree-ring carbon and oxygen stable isotopes for climate reconstruction in the Canadian northeastern boreal forest. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 423, 91–101.
- Berthrong S.T., Jobbágy E.G. & Jackson R.B. 2009. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation. *Ecological Applications*, 19(8), 2228–2241.
- Broschat T.K. 1995. Nitrate, phosphate, and potassium leaching from container-grown plants fertilized by several methods. *HortScience*, 30(1), 74–77.
- Burkhard B., de Groot R., Costanza R., et al. 2012. Solutions for sustaining natural capital and ecosystem services. *Ecological Indicators*, 21, 1–6.
- Carter J. & Barwick V. 2011. *Good practice guide for isotope ratio mass spectrometry*. FIRMS, 48 p.
- Costanza R., de Groot R., Sutton P., et al. 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152–158.
- Daugaviete M., Bambe B., Lazdiņš A., et al. 2017. *Plantāciju mežu augšanas gaita, produktivitāte un ietekme uz vidi*. Salaspils, LVMI Silava, DU AA Saule, 470 lpp.
- Elferts D. 2013. *Praktiskā biometrija. Piemēri darbā ar programmu R*. Rīga, 101 lpp.
- Ericsson T. 1994. Nutrient cycling in energy forest plantations. *Biomass and Bioenergy*, 6(1), 115–121.
- Frausto da Silva J.J.R. & Williams R.J.P. 2001. *The biological chemistry of the elements. The inorganic chemistry of life*. Clarendon Press, Oxford, 561 p.
- Ghent University. 2017. *Laser Ablation ICP-mass spectrometry (LA-ICP-MS)*. http://www.analchem.ugent.be/ams_onderzoek_solid/ [skatīts 10.04.2017.]
- Grinfelde I. & Lauva D. 2012. Autocalibration feasibility and urbanization dimension integration in regional model METQ. *Conference Proceedings. HydroPredict2012, Predictions for Hydrology, Ecology and Water Resources Management: Water Resources and Changing Global Environment*, 24–27.
- Jansons V., Lagzdins A., Berzina L., et al. 2011. Temporal and spatial variation of nutrient leaching from agricultural land in Latvia: Long term trends in retention and nutrient loss in a drainage and small catchment scale. *Scientific Journal of Riga Technical University*, 7, 54–65.
- Jose S. 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76(1), 1–10.
- Kalcsits L.A., Min X. & Guy R.D. 2015. Interspecific variation in leaf–root differences in $\delta^{15}\text{N}$ among three tree species grown with either nitrate or ammonium. *Trees*, 29(4), 1069–1078.
- Kārkliņš A. & Rancāne S. 2012a. *Augsnes apraksts, Reģ. Nr. AI0103*. Skrīveri, Latvija: LLU Augsnes un augu zinātņu institūts.
- Kārkliņš A. & Rancāne S. 2012b. *Augsnes apraksts, Reģ. Nr. AI0104*. Skrīveri, Latvija: LLU Augsnes un augu zinātņu institūts.
- Kolahchi Z. & Jalali M. 2007. Effect of water quality on the leaching of potassium from sandy soil. *Journal of Arid Environments*, 68(4), 624–639.
- Kuhlbrandt W. 2004. Biology, structure and mechanism of P-type ATPases. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 5(4), 282–95.
- Lagzdins A., Jansons V. & Abramenko K. 2008. Ūdeņu kvalitātes standarta noteikšana pēc biogēno elementu koncentrācijas notecē no lauksaimniecībā izmantotajām platībām. *LLU Raksti*, 21(315), 96–105.
- Lee K.H., Isenhardt T.M. & Schultz R.C. 2003. Sediment and nutrient removal in an established multi-species

- riparian buffer. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58(1), 1–8.
- Liao C., Luo Y., Fang C., et al. 2012. The effects of plantation practice on soil properties based on the comparison between natural and planted forests: a meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 21(3), 318–327.
- Lutter R., Tullus A., Kanal A., et al. 2016a. The impact of former land-use type to above- and below-ground C and N pools in short-rotation hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *P. tremuloides* Michx.) plantations in hemiboreal conditions. *Forest Ecology and Management*, 378, 79–90.
- Lutter R., Tullus A., Kanal A., et al. 2016b. The impact of short-rotation hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *P. tremuloides* Michx.) plantations on nutritional status of former arable soils. *Forest Ecology and Management*, 362, 184–193.
- Meiresonne L., Schrijver A.D. & De Vos B. 2006. Nutrient cycling in a poplar plantation (*Populus trichocarpa* × *Populus deltoides*, Beaupre) on former arable land in northern Belgium. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 141–155.
- Monroe P.H.M., Gama-Rodrigues E.F., Gama-Rodrigues A.C., et al. 2016. Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 221, 99–108.
- Muccio Z. & Jackson G.P. 2009. Isotope ratio mass spectrometry. *Analyst*, 134, 213–222.
- Nair V.D. & Graetz D.A. 2004. Agroforestry as an approach to minimizing nutrient loss from heavily fertilized soils: the Florida experience. *Agroforestry Systems*, 61, 269–279.
- Nikodemus O., Kļaviņš M., Krišjāne Z., et al. (zin. red.). 2018. *Latvija. Zeme, daba, tauta, valsts*. LU Akadēmiskais apgāds, Rīga, 752 lpp.
- Nikodemus O., Melecis V., Kārklīš A., et al. 2008. *Augsnes ilgtspējīga izmantošana un aizsardzība*. LU Akadēmiskais apgāds, Rīga, 256 lpp.
- O'Regan H.J., Lamb A.L. & Wilkinson D.M. 2016. The missing mushrooms: Searching for fungi in ancient human dietary analysis. *Journal of Archaeological Science*, 75, 139–143.
- Pengerud A., Stålnacke P., Bechmann M., et al. 2015. Temporal trends in phosphorus concentrations and losses from agricultural catchments in the Nordic and Baltic countries. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 65(2), 173–185.
- Rieuwerts J.S., Thornton I., Farago M.E., et al. 1998. Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 10:2, 61–75.
- Smidt S., Jandl R., Bauer H., et al. 2012. Trace metals and radionuclides in Austrian forest ecosystems. In: *The Biosphere*. Ishwaran N. (Ed). InTech, 302 p.
- Stålnacke P., Aakerøy P.A., Blicher-Mathiesen G., et al. 2014. Temporal trends in nitrogen concentrations and losses from agricultural catchments in the Nordic and Baltic countries. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 198, 94–103.
- Tangahu B.V., Abdullah S.R.S., Basri H., et al. 2011. A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, 939161, 31.
- TEEB. 2010. *The economics of ecosystems and biodiversity: mainstreaming the economics of nature: a synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB*.
- Tērauda E. 2008. *Ķīmisko vielu plūsmas Latvijas priežu mežu ekosistēmās*. Promocijas darbs. Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija, 124 lpp.
- Tully K.L., Lawrence D. & Scanlon T.M. 2012. More trees less loss: Nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 161, 137–144.
- Tumwebaze S.B. & Byakagaba P. 2016. Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216, 188–193.
- Udawatta R.P. & Jose S. 2011. Carbon sequestration potential of agroforestry practices in temperate North America. In: *Carbon sequestration potential of agroforestry systems*, Kumar B.M. & Nair P.K.R. (Eds), Springer Netherlands, 17–42.
- Udawatta R.P., Krstansky J.J., Henderson G.S. & Garrett H.E. 2002. Agroforestry practices, runoff, and nutrient loss: a paired watershed comparison. *Journal of Environmental Quality*, 31(4), 1214–1225.
- Vīksna A. 2011. Modernās analīzes metodes. Analītiskās ķīmijas metožu apraksts un induktīvi saistītās plazmas spektrometrija. Latvijas Universitāte, Rīga, 64 lpp.
- Wang W.J., Qiu L., Zu Y.G., Su D.X., An J., Wang H.Y., Zheng G.Y., Sun W. & Chen X.Q. 2011. Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch (*Larix gmelinii*) plantations in China. *Global Change Biology*, 17(8), 2657–2676.

PATEICĪBAS

Izsaku īpaši lielu un sirsnīgu pateicību darba zinātniskajiem vadītājiem – profesoram *Dr. chem.* Arturam Vīksnam un vadošai pētniecei *Dr. silv.* Dagnijai Lazdiņai par neatsveramu atbalstu, konsultācijām, padomiem un uzmundrinājumiem darba izstrādes gaitā.

Esmu pateicīga Latvijas Valsts mežzinātnes institūta “Silava” vadošajiem pētniekiem *Dr. silv.* Andim Lazdiņam un *Dr. silv.* Zanei Lībieteī par iepazīstināšanu ar patiesi interesantajiem un aizraujošajiem dabas procesiem meža ekosistēmās, par palīdzību un atbalstu zinātnisko pētījumu tapšanas gaitā, par motivēšanu, iedvesmošanu un radītām iespējām papildināt esošās zināšanas. Liels paldies Meža atjaunošanas un ieaudzēšanas zinātniskā virziena un Meža vides laboratorijas kolēģiem par pirmās darba pieredzes iegūšanu zinātnes jomā, par kopīgu projektu īstenošanu, kā arī par praktiska un teorētiska atbalsta sniegšanu promocijas darba tapšanas laikā.

Ieguldījumu promocijas darba izstrādē sniegušas *Mg. chem.* Lauma Buša ar palīdzību stabilo oglekļa ($\delta^{13}\text{C}$) un slāpekļa ($\delta^{15}\text{N}$) izotopu attiecības analīžu veikšanā, *Dr. chem.* Vita Rudoviča ar palīdzību ūdens paraugu analīzē, izmantojot ICP-MS analīzes metodi, kā arī *Mg. sc. ing.* Inga Grīnfeldē ar palīdzību virsējo gruntsūdeņu noteces aprēķināšanā pētījuma objektā.

Vissirsnīgākais paldies manai ģimenei un īpaši vīram Andim, dēliņam Ralfam, vecākiem, vecvecākiem un māšai Andai par neizsīkstošu atbalstu, sapratni un pacietību visu šo gadu garumā.